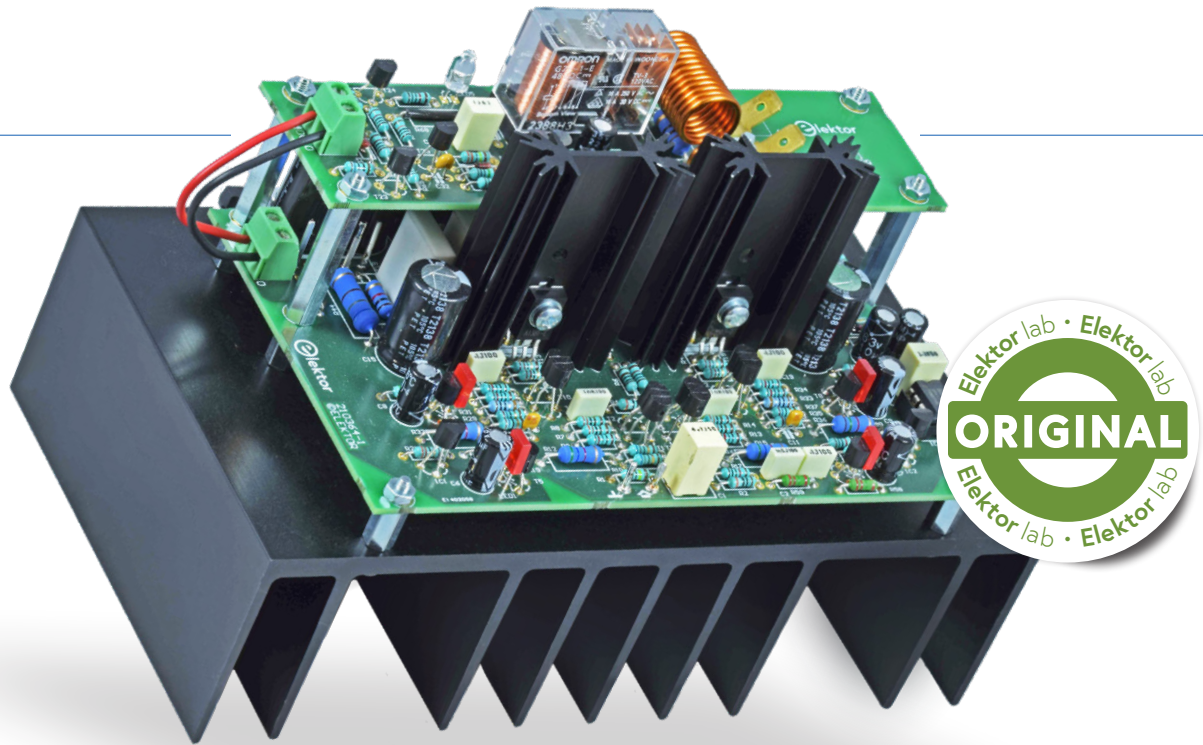




Fortissimo-100 high-end versterker

volledig symmetrische audio-eindtrap levert 100/190 W

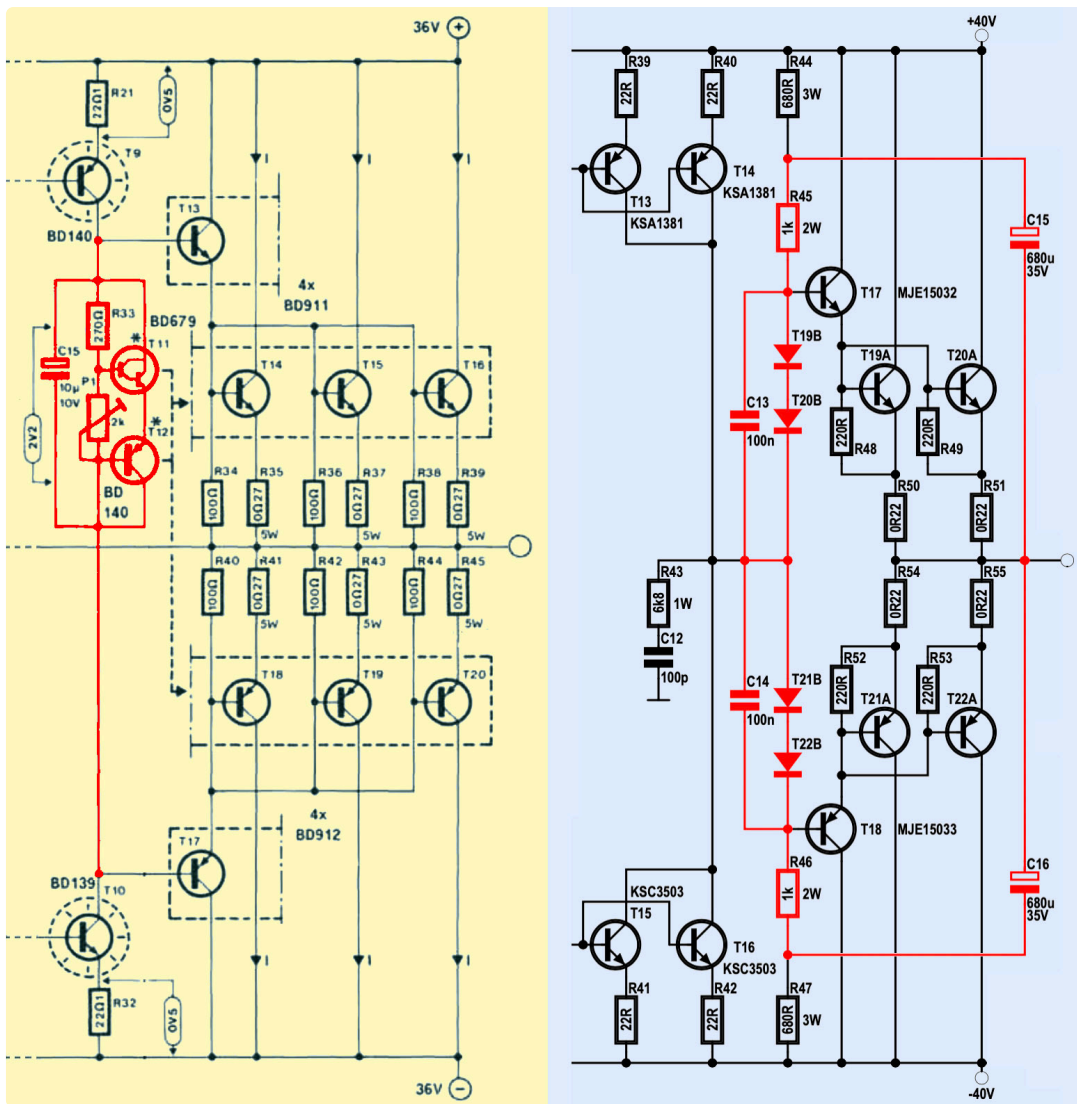
Ton Giesberts (Elektor)

Digitale versterkermodule zijn tegenwoordig voor weinig geld te koop, maar high-end liefhebbers halen doorgaans hun neus op voor het geluid. Aan de andere kant bouwen mensen nog steeds graag Elektor-ontwerpen van tientallen jaren geleden. Onze nieuwste versterker, de Fortissimo-100, zal zowel doe-het-zelvers als high-end liefhebbers weten te boeien: THD+N 0,0008% bij 50 W in 8 Ω , maximaal vermogen 98 W in 8 Ω of 188 W in 4 Ω met THD $\leq$ 1%. Doe-het-zelvers zullen het op prijs stellen dat alleen through-hole componenten worden gebruikt. Nieuwsgierig? Lees dan verder en warm je soldeerbout vast op.

Bij de ontwikkeling van deze high-end versterker heb ik me laten inspireren door een Elektor-ontwerp dat al meer dan 30 jaar oud maar nog steeds erg goed is: de *Power Amp* [1] uit oktober 1990. Dankzij het uitgekiende volledig symmetrische ontwerp heeft deze versterker nog niets van zijn glans verloren en kan hij zeker als high-end worden beschouwd. De vraag is of de schakeling werkelijk nog verbeterd kan worden. Mijn antwoord is de Fortissimo, en dat betekent volmondig "ja!"

Principe

Figuur 1 toont het vermogensgedeelte van de oude eindtrap (lichtgeel) en de nieuwe eindtrap (lichtblauw). Net als de oude schakeling werkt de nieuwe in de beproefde klasse-AB instelling, maar nu met de stuurtrap uitgevoerd in een symmetrische bootstrap-configuratie. De belangrijkste verschillen zijn in rood aangegeven. Aan de rechterkant van de figuur zorgen de condensatoren C15 (tussen het knooppunt van R44/R45 en de uitgang) en C16 (tussen het knooppunt van R46/R47 en de uitgang) voor aanzienlijk hogere spanningen op de bases van T17 en T18. Het grote voordeel is dat de eindtrap die rond de uitgangstransistoren is gebouwd, forser kan worden aangestuurd, zodat de maximale uitgangsspanning ruim 2 V hoger is zonder dat hogere voedingsspanningen voor de spanningsversterkertrappen nodig zijn.



Figuur 1. Verschillen tussen oud (links) en nieuw (rechts): rustroominstelling en symmetrische bootstrapping.

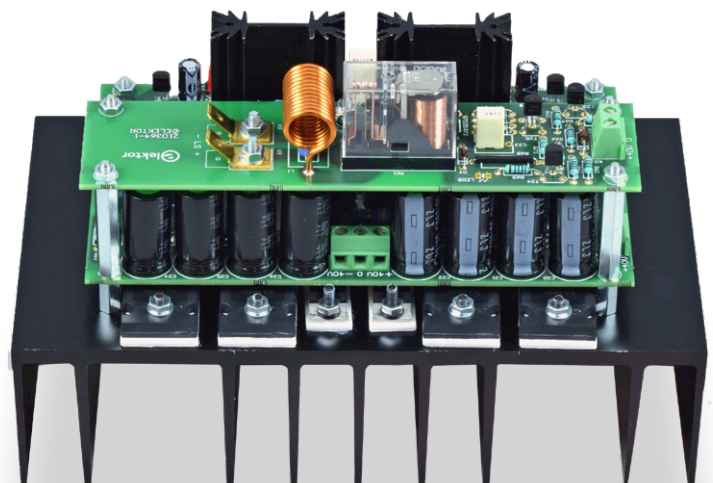
Een opmerkelijke eigenschap van de nieuwe schakeling is dat deze geen instelbare voorspanning heeft voor de instelling van de ruststroom. In plaats daarvan zijn vier diodes (T19B...T22B) eenvoudig in serie geschakeld, waarbij de spanningsval over deze diodes overeenkomt met de spanning over de vier BE-overgangen van de schakeling, bestaande uit T17 tot en met T22A. Zoals je wellicht al uit de onderdeelnummers heb begrepen, zijn dit 'onzichtbare' diodes die in de eindtransistoren T19...T22 zijn geïntegreerd. De thermische koppeling van deze diodes is zeer goed, wat resulteert in een vrij stabiele ruststroom met een uiterst eenvoudige schakeling. Deze thermische koppeling is de reden waarom de complementaire transistoren, NJL3281D (NPN) en NJL1302D (PNP) [2], "ThermalTrak" worden genoemd, en het is een leuke eigenschap.

Voor een optimaal uitgangsvermogen heeft de versterker een geregelde symmetrische voedingsspanning van ± 40 V nodig. In een belasting van 8Ω bedraagt het maximale vermogen met $\text{THD} \leq 1\%$ bijna 100 W, en in een belasting van 4Ω is dat bijna het dubbele (zie het kader **Specificaties**).

Bovendien is de print dubbelzijdig en doorgemetalliseerd, wat de bouw van de versterker vereenvoudigt. De zes vermogenstransistoren van de eindtrap bevinden zich half onder de print, die samen met de beveiligingsschakeling

op het koellichaam is gemonteerd. Dit resulteert in een compacte module (figuur 2). Er zijn bij deze constructie slechts zes 3mm-gaten in het koellichaam nodig voor de eindtransistoren, plus nog eens zes voor de afstands-bussen. Als je het SK53-100-SA koellichaam van Fischer Elektronik gebruikt, hoeft je geen M3-schroefdraad te tappen, omdat de vereiste twaalf gaten perfect tussen de koelribben komen. Er is zelfs een beetje speling om onnauwkeurigheden op te vangen. Het mechanische

Figuur 2. De compleet geassembleerde compacte versterkermodule.



werk is waarschijnlijk het ingewikkeldste deel van de bouw. Hierover later meer.

Het ontwerp van de schakeling

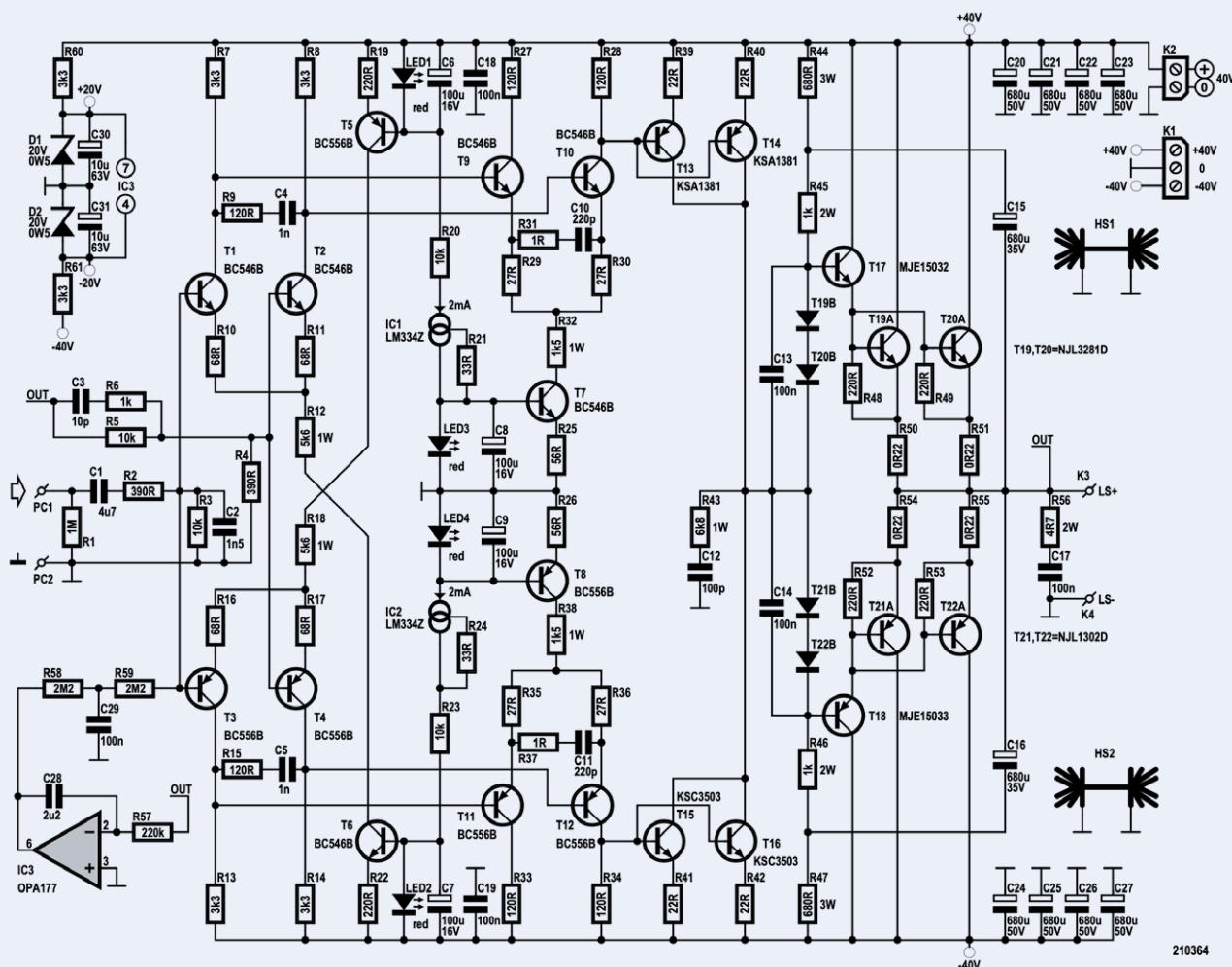
De basisschakeling van de versterker (figuur 3) kan in drie delen worden gesplitst. Als eerste de ingangstrap met symmetrische verschilversterkers, gevolgd door de push-pull trap, die op zijn beurt de uitgangstrap aanstuurt. Daarnaast hebben we nog de beveiligingsschakeling. Al dit komt hieronder in detail aan de orde.

Verschilversterkers

De verschilversterkers rond T1/T2, T3/T4, T9/T10 en T11/T12 zijn opgebouwd met transistoren van het (bekende) type BC546B/BC556B. Deze hebben een hogere overgangsfrequentie dan latere types, zoals het KSC1845/KSA992-paar. Vervanging van de BC546B en BC556B door andere types kan problemen veroorzaken, aangezien hun eigenschappen de stabiliteit beïnvloeden, en in veel gevallen hebben andere types een andere pinning.

Dat maakt andere netwerkes voor de frequentiecompensatie nodig, en eventueel een compleet andere layout. De rechthoekige rode LED's die dicht bij de afzonderlijke transistors zijn gemonteerd, leveren temperatuurgecompenseerde spanningen voor de stroombronnen van de verschilversterkers. Om de vermogensdissipatie van de stroombron-transistoren T5...T8 te beperken, zijn 1W-weerstanden (R12, R18, R32 en R38) in de collectoraansluitingen opgenomen. De twee geïntegreerde stroombronnen IC1 en IC2 stabiliseren, samen met weerstanden R21 en R24, de stroom door de LED's op 2 mA. Hoewel de maximaal toelaatbare spanning van de geïntegreerde stroombronnen net hoog genoeg is voor de hier gebruikte 40 V, zijn voor de zekerheid twee weerstanden van 10 kΩ (R20 en R23) in serie geschakeld om de aangelegde spanning tot minder dan de helft te reduceren. De totale versterking is op 26,6 ingesteld door het tegenkoppelnetwerk R4/R5. Door de kleine spanningsval over R2 wordt deze gereduceerd tot ongeveer 25,6. Condensator C2 dempt samen met weerstanden R2 en

Figuur 3. De schakeling van de Fortissimo-versterkermodule is volledig symmetrisch.



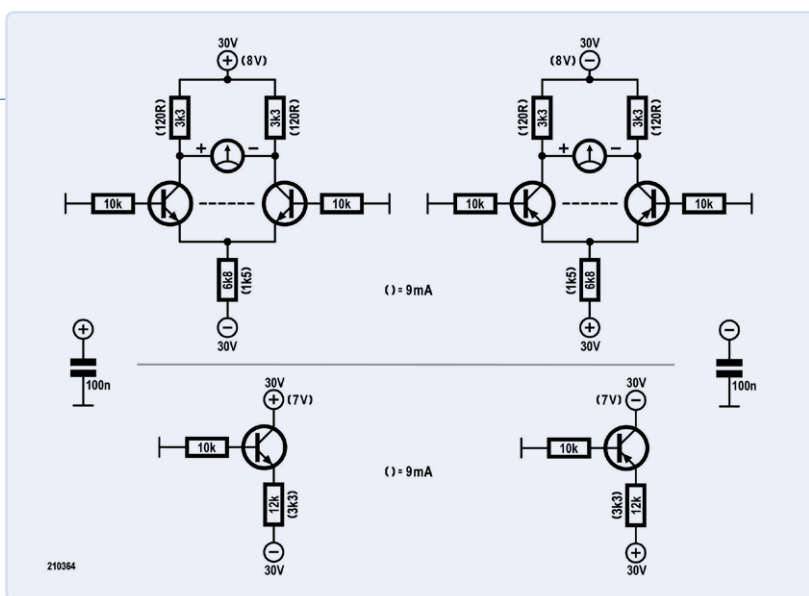
R3 hoogfrequente signalen die de versterker niet kan verwerken. De maximale ingangsspanning voor een niet geclipt uitgangssignaal ligt iets boven 1 V. C3 en R6 in de tegenkoppellus zorgen voor stabiliteit bij hoge frequenties. Eveneens om stabiliteitsredenen zijn RC-netwerken R9/C4 en R15/C5 opgenomen tussen de collectors van de eerste verschilversterkers die rond T1/T2 en T3/T4 zijn opgebouwd; deze zorgen voor frequentiecompensatie. De 'stroomafwaartse' verschilversterkers rond T9/T10 en T11/T12 zorgen voor een beetje extra versterking. Hun belangrijkste taak is de laagohmige aansturing van de eropvolgende push-pull versterkertrap die rond T13...T16 is opgebouwd. De netwerkjes R31/C10 en R37/C11 zorgen ook hier voor frequentiecompensatie.

Collectorweerstand R27 en R33 houden de collector/emitter-spanningen van de beide transistoren in de tweede verschilversterker gelijk. Het spanningsverschil tussen R27 en R28 en tussen R33 en R34 moet $\leq 0,35$ V zijn (nog beter $\leq 0,1$ V), omdat anders de U_{BE} en h_{FE} van de transistoren van de eerste verschilversterker niet dicht genoeg bij elkaar zouden liggen. Ondanks hun plaatsing dicht bij elkaar is de thermische koppeling van de transistorpaartjes niet zo goed als bij een dubbele transistor, omdat ze zich niet in dezelfde behuizing op hetzelfde halfgeleiderkristal bevinden. Bijgevolg kunnen er meetbare afwijkingen zijn.

Deze transistoren kunnen niet als gematchte paartjes worden gekocht. Dit betekent dat je eerst hun karakteristieken moet meten en dan zo gelijk mogelijke paartjes moet selecteren. Een simpele meting van de h_{FE} , bijvoorbeeld met een multimeter, is hier niet goed genoeg. De U_{BE} -waarden mogen niet meer dan 1 mV verschillen bij dezelfde collector/emitter-spanning en dezelfde collectorstroom. Als de U_{BE} van het NPN-paar niet dezelfde is als die van het PNP-paar, dan is dat geen probleem. Het kader **Transistorselectie** beschrijft de procedure voor het selecteren van *matched pairs* met behulp van de testschakeling van **figuur 4**. Merk op dat de metingen sterk afhankelijk zijn van de omgevingstemperatuur.

Push-pull trap

T10 en T12 sturen een push-pull trap aan. Twee paar parallel geschakelde drivers – T13||T14 (PNP) en T15||T16 (NPN) in TO-126 of SOT-32 behuizing – houden de collectorstroom per transistor in het lineaire gebied, zelfs bij maximale uitsturing, en deze dubbele driverstroom verbetert de aansturing met betrekking tot de parasitaire capaciteit van de eindtrap. Hier gebruiken we complementaire types (KSC3503 en KSA1381) van ON Semiconductor (voorheen Fairchild Semiconductor). Deze zijn hiervoor zeer geschikt: met een V_{CEO} van 300 V kunnen zij niet alleen hoge spanningen aan, maar hebben ze ook een indrukwekkend geringe sperkapaciteit C_{re} van 1,8 pF (NPN) of 2,3 pF (PNP) en een lineaire versterking bij collectorstromen tot 50 mA (maximale collectorstroom 100 mA).



Deze transistoren zijn verkrijgbaar in de h_{FE} -klassen C, D, E en F. Helaas kan ON Semiconductor alleen het NPN-type KSC3503 leveren in klasse-D (h_{FE} 60...120) en het PNP-type KSA1381 in klasse-E (h_{FE} 100...200). De NPN- en PNP-types zouden idealiter dezelfde klasse moeten hebben, maar de emitterweerstand R39/R40 en R41/R42 compenseren de verschillende stroomversterking grotendeels. De stroom door elk van de vier transistoren is ingesteld op ongeveer 13 mA. Dit komt overeen met hun taak, en de overgangsfrequentie is bij deze stroom het hoogst.

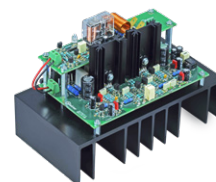
Zonder signaal bedraagt de vermogensdissipatie van elke transistor ongeveer 510 mW. Om de warmte af te voeren, wordt elk parallelpaar transistoren op een koellichaam gemonteerd. De koellichamen HS1 en HS2 zijn van het type SK104 van Fischer Elektronik, dat voorzien is van gaten voor de behuizingen TO-220, SOT-32 of TO-3P. De TO-126 behuizing past ook. De warmteweerstand van de 50,8 mm lange SK104 is 9 K/W, zodat de temperatuur ongeveer 10 K boven de omgevingstemperatuur zal liggen wanneer de twee transistoren erop zijn gemonteerd. Door de warmteweerstand van de behuizing (17,8 K/W) zal het silicium van de transistoren nog eens 9 K warmer worden. Hoewel de koellichamen aan massapotentiaal liggen, is geen extra isolatie nodig voor de transistoren. Een beetje warmtegeleidende pasta is voldoende, omdat ze elk een volledig kunststof behuizing hebben.

Uitgangstrap

De eindtrap is opgebouwd rond de transistoren T17...T22A. Het is een complementaire Darlington-configuratie met klasse-AB instelling. In de meeste analoge eindversterkers, waaronder de eerder genoemde "power amp", wordt de ruststroom van de eindtransistoren geregeld door een transistor die op hetzelfde koellichaam is gemonteerd, in een configuratie die lijkt op een zenerdiode (U_{BE} -spanningsvermenigvuldiging) en die zorgt voor temperatuurstabilisatie.

De Fortissimo is anders: hier heeft elk van de vier eindtransistoren (T19...T22) een galvanisch geïsoleerde diode in zijn behuizing, in het schema aangegeven als T19B...T22B. Deze diodes voelen de junctietemperatuur van de

▲
Figuur 4. De testschakeling voor het meten van de kleinsignaal-transistoren om zo goed mogelijk gematchte paartjes te vinden, kan op een breadboard worden opgebouwd.



eindtransistoren vrij direct, waardoor ze beter geschikt zijn om de ruststroom van deze eindtransistoren in te stellen. Met vier eindtransistoren zijn er vier diodes beschikbaar, en deze kunnen eenvoudig in serie worden geschakeld om te compenseren voor alle vier effectieve basis/emitter-spanningen van de eindtransistoren (T19A||T20A en T21A||T22A) en hun drivers (T17 en T18).

Hoewel deze methode beter is, is hij door de indirecte detectie van T17 en T18 niet perfect, zodat hij niet helemaal kan voorkomen dat de ruststroom een temperatuurafhankelijk verloop vertoont. Deze schakeling voorkomt echter wel een thermisch sneeuwbaaleffect. De stroom door de vier diodes wordt op ongeveer 23 mA ingesteld door de vier vermogensweerstand R44...R47. Deze weerstanden maken ook deel uit van een symmetrische bootstrap-schakeling met C15 en C16, waardoor de stroom door de diodes vrijwel onafhankelijk is van de spanningsamplitude. Bootstrapping maakt ook een hogere uitgangsamplitude mogelijk. Bij volle uitsturing worden de spanningsval over de weerstanden R39...R42 en de verzadigingsspanningen van T13...T16 grotendeels gecompenseerd door de spanningen over T19A...T22A. Belangrijk: de ruststroom van de eindtransistoren is afhankelijk van de stroom door de weerstanden R44...R47. Dit betekent dat de $\pm 40\text{V}$ -voeding binnen een vrij klein bereik moet worden geregeld. Een voeding die alleen bestaat uit een transformator met een brugge-lijkrichter en bufferelco's is voor deze versterker beslist niet aan te bevelen. Bij een dergelijke opstelling zou de ruststroom een geringe rimpel vertonen en varieert de voedingsspanning met de belasting, het uitgangsvermogen en de netspanning, waardoor de eigenschappen van de versterker zouden verslechteren. Er zijn inmiddels uitstekende en speciaal voor audio-eindversterkers ontworpen schakelende voedingen beschikbaar, zoals het type SMPS800RE. Veel andere voedingen zijn ontworpen voor klasse-D versterkers en hebben een uitgangsspanning die varieert met de netspanning. Deze zijn beslist niet geschikt. Een geschikte schakelende voeding moet een stabiele symmetrische uitgangsspanning van $\pm 40\text{ V}$ leveren die niet inzakt bij de piekstromen die in de schakeling optreden, zelfs niet bij een laagohmige belasting met (bijvoorbeeld) $4\ \Omega$.

De spanning over R45 en R46 is altijd een constante $23,4\text{ V}$ en is vrijwel onafhankelijk van het uitgangssignaal. De vermogensdissipatie in elke weerstand is ongeveer 550 mW . De gelijkspanning over R44 en R47 is ongeveer $15,9\text{ V}$, maar de wisselspanning van het uitgangssignaal wordt hierop gesuperponeerd door de bootstrap-condensatoren C15 en C16. De effectieve waarde van een sinusoidale spanning met een DC-offset kan worden berekend met deze formule:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{(U_{\text{DC}}^2 + U_{\text{ACpeak}}^2 / 2)}$$

Als de gelijkspanning U_{DC} $15,9\text{ V}$ bedraagt en de

piekwaarde van het sinusvormige signaal U_{ACpeak} 39 V , dan bedraagt de vermogensdissipatie over $680\ \Omega$ $1,5\text{ W}$. Bij maximale oversturing van de versterker met maximale clipping is de golfvorm een blokgolf met topwaarden dicht bij de voedingsspanningen. In dat geval is de vermogensdissipatie over R44 en R47 elk $2,6\text{ W}$. Dit zou eigenlijk nooit mogen gebeuren, maar toch gebruiken we 3W -types om te voorkomen dat de weerstanden in rook opgaan. Voor R45 en R46 zijn 2W -types voldoende. De vermogensdissipatie in deze vermogensweerstand is ook afhankelijk van de omgevingstemperatuur.

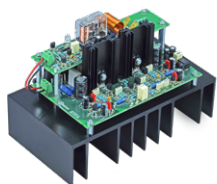
DC-correctie

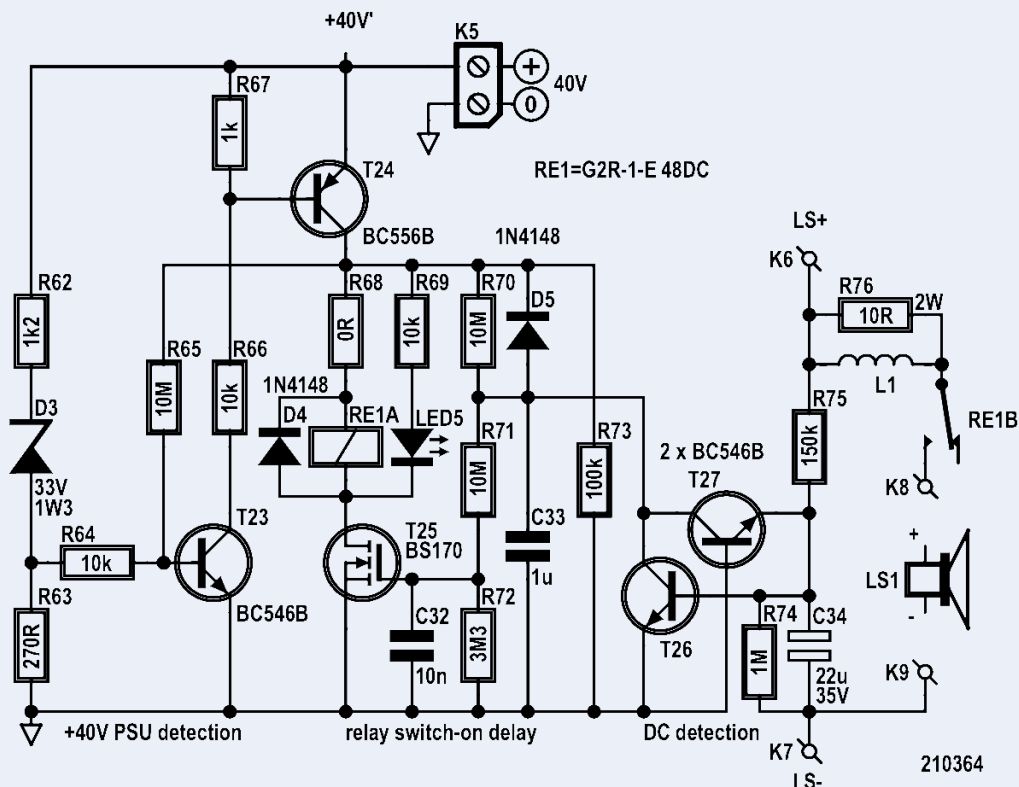
Idealiter hebben beide ingangs-transistorpaartjes dezelfde U_{BE} , zodat de basisstromen van T1 en T3 elkaar zouden compenseren. Maar zelfs als de h_{FE} -waarden van de twee transistorparen gelijk zijn, zouden de spanningsverliezen over LED1 en LED2 iets verschillen omdat LED's, net als transistoren en weerstanden, een zekere tolerantie hebben. Dit leidt tot verschillen in de DC-instelling, en zelfs kleine verschillen worden versterkt. Metingen toonden aan dat de versterking van een BC556B groter is dan die van een BC546B, maar zelfs dat is afhankelijk van de fabrikant. Een verschil in de basisstromen van de NPN- en PNP-transistoren veroorzaakt verschillende offsetspanningen over R3 en R4, aangezien de waarden daarvan zeer verschillend zijn ($10\text{ k}\Omega$ en $390\ \Omega$). De spanningsval over R4 kan worden genegeerd. De offset wordt vervolgens versterkt en moet dus worden gecompenseerd. Dit wordt gedaan door opamp IC3. Het gekozen type OPA177 heeft een zeer lage intrinsieke ingangs-offset. De opamp werkt als een integrator en meet via R57 de DC-component van de uitgangsspanning. De uitgangsspanning van de opamp voegt een zeer kleine negatieve tegenkoppelstroom toe aan R3 via R58/R59/C29, die de offset corrigeert tot bijna 0 V . Condensator C29 filtert de resterende AC-spanningscomponenten van IC3. De offset die wordt veroorzaakt door de verschillende basis-emitterspanningen van de ingangstransistoren wordt ook gecompenseerd. Door alle toleranties zal de spanning op R3 hoogstwaarschijnlijk niet precies 0 V zijn, ook al ligt de uitgangsspanning dicht bij 0 V . In de praktijk zal er een kleine offset over R3 blijven. In het prototype bedroeg de offsetspanning over R3 ongeveer $0,7\text{ mV}$.

De symmetrische voedingsspanning ($\pm 20\text{ V}$) voor de opamp worden afgeleid van de $\pm 40\text{V}$ -voeding via weerstanden R60 en R61 en zenerdiodes D1 en D2.

Beveiliging

In het geval dat er gelijkspanning op de uitgang staat of er zich andere storingen voordoen, is het een goed idee om de luidspreker los te koppelen. **Figuur 5** toont de beveiligingsschakeling. Transistoren T26 en T27 maken deel uit van de DC-detectieschakeling. Na een inschakelvertraging activeren T24 en T25 de luidspreker via een relais. Een relatief grote gelijkspanning over R75





Figuur 5. De beveiligingsschakeling van de Fortissimo voorkomt beschadiging van de luidspreker door gelijkspanningen en luide inschakelgeluiden.

genereert een collectorstroom in T26 die C33 ontlad. Vervolgens schakelt T25 het relais uit. Een overeenkomstige negatieve gelijkspanning over R75 genereert een emitterstroom in T27 die C33 ontlad. Dan schakelt T25 het relais uit. R75 en C34 vormen een laagdoorlaatfilter, zodat lage audiofrequenties niet worden verward met gelijkspanningen, zelfs niet bij maximaal uitgangssignaal. Om de luidspreker uit te schakelen wanneer de versterker wordt in- of uitgeschakeld, schakelt T23 het relais via T24 uit wanneer de voedingsspanning te laag is. R65 zorgt voor een kleine hysteresis. Inschakeling vindt plaats bij spanningen $\geq 36,7$ V en uitschakeling bij spanningen $\leq 36,5$ V. Deze spanningen worden vastgelegd door zenerdiode D3. De stroom door D3 wordt door R62 plus R63 ingesteld op ongeveer 5 mA bij 40 V. De spanning over R63 wordt geëvalueerd door de Schmitt-trigger bestaande uit T23, T24 en R64...R67. De hysteresis voorkomt het klapperen van het relais bij kleine storingen of geringe variaties in de voedingsspanning bij een groot uitgangsvermogen. MOSFET T25 zorgt in combinatie met het tijdconstante-netwerk gevormd door R70, R71, R72 en C33 voor een inschakelvertraging die het 'ploppen' van de luidspreker voorkomt, aangezien de luidspreker pas wordt ingeschakeld als de voedingsspanning hoog genoeg is en de versterker tot rust is gekomen. R73 en D5 ontladen C33 snel wanneer T24 wordt uitgeschakeld. Dit zorgt voor een gedefinieerde inschakelvertraging van het relais bij een volgende maal inschakelen of bij afwezigheid van een gelijkspanning aan de uitgang. De weerstanden aan de gate van T25 hebben een voldoende hoge weerstand dat een relatief lage waarde van C33 voldoende is voor een adequate tijdconstante. Hierdoor kan een kunststof-foliecondensator worden gebruikt,

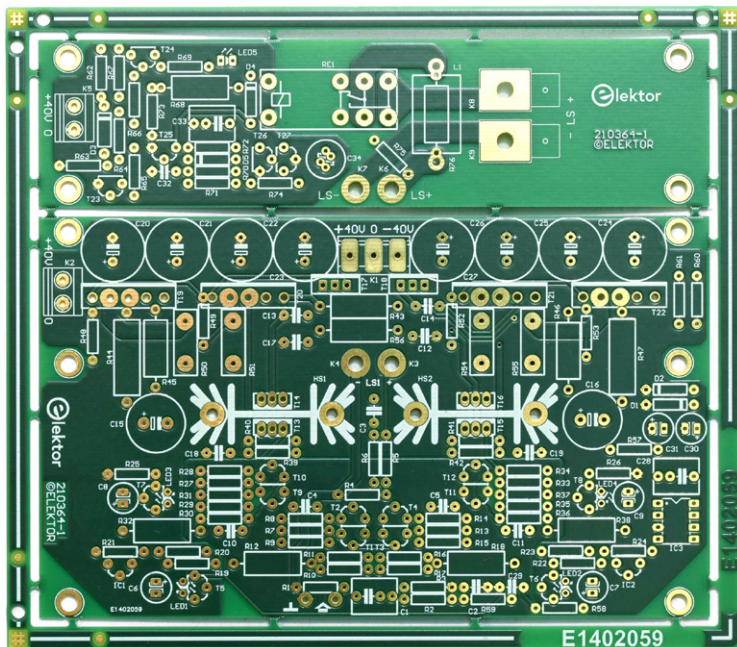
wat de voorkeur verdient, omdat elco's gewoonlijk een hoge lekstroom hebben en sneller verouderen. Met $1 \mu\text{F}$ voor C33 bedraagt de vertraging ongeveer 3,5 seconden. Het relais van het type G2R-1-E DC48 heeft een bedrijfsspanning van 48 V, en de contacten zijn berekend op maximaal 16 A. Volgens de datasheet kan het relais ongeveer 5 A schakelen bij 40 VDC. Het relais wordt ingeschakeld bij 70% van de nominale spoelspanning. Dit betekent dat 34 V voldoende is om het relais te activeren. In ieder geval is de beschikbare 40 V meer dan voldoende. Als een ander relais met een lagere spoelspanning (bijvoorbeeld 24 V) wordt gebruikt, moet de 0Ω -weerstand R68 (of draadbrug) worden vervangen door een weerstand met een geschikte waarde. Het 24V-relais G2R-1-E DC24 heeft bijvoorbeeld een spoelweerstand van $1,1 \text{ k}\Omega$. De waarde van R68 kan dan als volgt worden berekend:

$$R68 = (40 \text{ V} - 24 \text{ V}) / 24 \text{ V} \times 1,1 \text{ k}\Omega = 733 \Omega$$

De dichtstbijgelegen lagere of hogere waarde uit de E12-reeks zou geschikt zijn. Bij 680Ω zou de spoelspanning $24,7 \text{ V}$ bedragen en bij 820Ω ongeveer 23 V . De spanningsval over T23 en T24 kan hier worden verwaarloosd. De vermogensdissipatie van R68 is ongeveer 350 mW met een weerstand van 680Ω , zodat de print-layout is voorbereid voor de montage van een 1 W -weerstand.

Bouw

De montage van de vermogenstransistoren T17...T22 en de assemblage van de print is relatief eenvoudig gehouden. Het noodzakelijke mechanische werk bestaat uit het boren

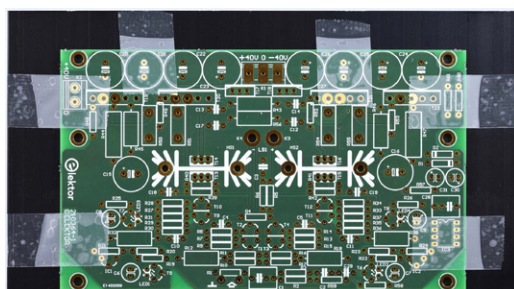


Figuur 6. De dubbelzijdige, doorgemetalliseerde print van het prototype. De PCB-layouts van de twee afzonderlijke printplaten kunnen worden gedownload [3].

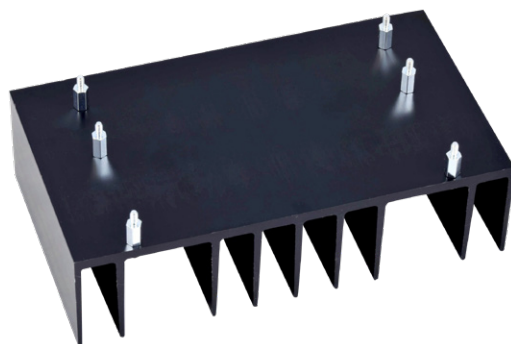
Figuur 7. Achterkant van het grote koellichaam. De twaalf zwarte schroefkoppen zijn nauwelijks te zien.



Figuur 8. De met plakband gefixeerde versterkerprint fungeert als sjabloon voor het markeren van de te boren gaten.



Figuur 9. Het grote koellichaam met zes 10mm-afstandshouders voor de montage van de versterkerprint.



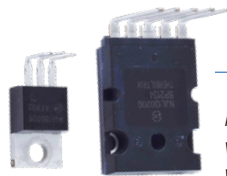
van twaalf 3mm-gaten voor de montage van de transistoren en de printen (**figuur 6**) aan de achterzijde van het koellichaam. Tussen de ribben van het SK53-100-SA koellichaam van Fischer Elektronik is voldoende plaats voor de koppen van de 3mm-schroeven. De print worden op het koellichaam bevestigd met zes metalen afstandshouders van 10 mm met M3-schroefdraad. Om een geringe thermische weerstand te bereiken, zijn de transistoren geïsoleerd met keramische isolatiepads (aluminiumoxide). In het laatste stadium van de bouw moet een zeer dun laagje warmtegeleidende pasta worden aangebracht op de achterkant van de transistoren en de onderkant van de pads die op het koellichaam rusten. Voorkom huidcontact met deze pasta; veel van deze pasta's zijn giftig.

De in figuur 5 getekende beveiligingsschakeling zit zich op een tweede, kleinere print (bovenste deel van figuur 6), die boven de versterkerprint is gemonteerd met zes stuks 30mm-afstandshouders. De contacten K3 en K4 op de versterkerprint verbinden de versterkeruitgang via twee van deze afstandshouders met de contacten K6 en K7 op de beveiligingsprint. Van daaruit is K7 rechtstreeks verbonden met K9 of met uitgangsklem LS-. K6 daarentegen is via L1 verbonden met de relaiscontacten, en van daaruit met K8 of uitgangsklem LS+. Hier zijn de sporen aan beide zijden van de printplaat gelegd voor een geringe weerstand. Faston-connectoren K8 en K9 garanderen een lage overgangsweerstand naar de luidsprekerkabel en ondersteunen een hoge reële dempingsfactor. De afstandshouders hebben aan het ene uiteinde een inwendige schroefdraad en aan het andere uiteinde een draadeind. De inwendige schroefdraad wordt naar het koellichaam gericht, en de draadeinden gaan door de gaten van de beveiligingsprint. Alle schroefkoppen moeten zich aan de achterzijde van het koellichaam bevinden. Zwarte schroeven zijn relatief onopvallend aan de achterzijde van het koellichaam (zie **figuur 7**). In het prototype zijn zes M3x12 kruiskopschroeven gebruikt om de print te monteren. Voor de drivertransistoren in TO-220 behuizingen waren ook 12mm-schroeven bruikbaar, maar zwarte schroeven waren destijds alleen als M3x16 inbusschroeven bij Conrad verkrijgbaar. Die zijn vast ook ergens anders te vinden.

Koellichaam

Leg eerst de print op het koellichaam zoals getoond in **figuur 8** en fixeer hem met plakband. De onderrand van de print (waar C1 zit) moet 1 mm van de rand van het koellichaam blijven, met de printplaat horizontaal in het midden. Op de foto is de print tijdelijk vastgezet met plakband om als sjabloon te dienen voor het markeren van de plaats van de gaten voor de zes metalen afstandshouders.

Met een boor van 3,5 mm kunnen de drie gaten aan elke kant (links en rechts) worden gemarkeerd. Draai de boor met de hand *linksom* in elk van de zes gaten, waarbij je enige druk uitoefent. Zo kan de print niet worden bescha-



Figuur 10. De pootjes van de vermogenstransistoren moeten op deze manier worden gebogen.

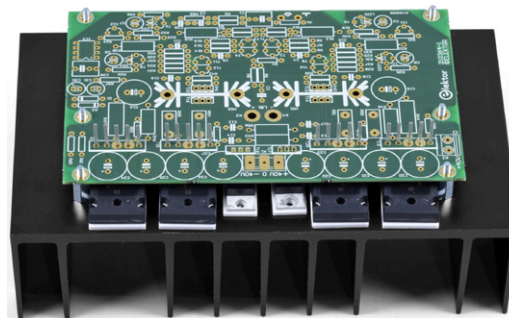
digd. Let er echter op dat K3 en K4 niet gemarkeerd zijn. De printplaat wordt zo gelegd dat de gaten zich tussen de koelribben van het koellichaam bevinden, met voldoende speling. Boor vervolgens de gaten met een 3,2mm-boor en schroef de zes 10mm-afstandshouders stevig vast. Het geheel moet er uitzien als in **figuur 9**. Als de print gemakkelijk over de zes draadeinden past, is alles in orde. Als dat niet het geval is, kunt u een of meer gaten uitvijlen om de plaats van de afstandshouders aan te passen.

Vóór de montage moeten alle pootjes van T17...T22 haaks naar boven worden gebogen (zoals in **figuur 10**). Om te voorkomen dat bij het buigen van de draden te veel kracht op de behuizingen van de grote vermogenstransistoren T19...T22 wordt uitgeoefend, klem je de draden dicht bij de behuizing in een bankschroef met een 2mm-boor tussen de bekken van de bankschroef. Met een geschikt stuk plaatmetaal kun je dan alle draden haaks ombuigen. De pinnen van de kleinere transistoren T17 en T18 kunnen met een tang worden gebogen, waarbij erop moet worden gelet dat ze 1 mm worden gebogen vanaf het punt waar ze (naar de behuizing toe) breder worden. Om de gaten voor de zes transistoren te markeren, leg je ze op de isolatiepads en steek je de pootjes in de soldeergaten van de print. De print moet daarbij op de zes draadeinden liggen. Na een beetje heen en weer schuiven moet het geheel er uitzien als in **figuur 11**. Tekens vervolgens de posities van de zes gaten af zoals voorheen, met een boor van 3 mm die je met de hand *linksom* draait. Bij het prototype zaten de vier gaten voor T19...T22 ongeveer 8,8 mm van de rand van het koellichaam, en die voor T17 en T18 ongeveer 11,5 mm. Dit hangt natuurlijk af van hoe nauwkeurig de pootjes van de transistoren omgebogen zijn, dus het kan bij jou iets anders zijn. **Figuur 12** toont de gemarkeerde plaatsen van de zes montagegaten voor de transistoren, en in **figuur 13** zijn ze geboord.

Schroef vervolgens de transistoren en keramische isolatiepads op hun plaats. Je moet de moeren niet te vast aandraaien. Controleer vervolgens of de aansluitdraden van de transistoren netjes in de gaten van de printplaat passen en of de printplaat daarbij op de zes draadeinden past. Indien nodig moet je de pootjes van de transistoren iets bijbuigen.

Volbouwen van de print

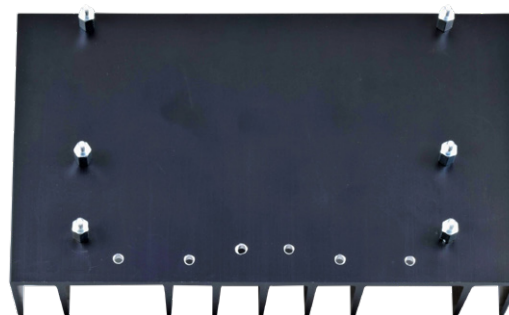
Na deze voorbereidingen kunnen bijna alle onderdelen op de print worden gemonteerd. Zoals gebruikelijk is de montagevolgorde gebaseerd op de hoogte van de componenten. Begin met de kleine weerstanden en de diodes D1...D5 (zie **figuur 14**). Monteer vervolgens de vermogensweerstand en het voetje voor IC3. Daarna komen de kleinere condensatoren, gesorteerd naar grootte: C3, C10, C11, C32, C4, C5, C12, C2, C13, C14, C18, C19, C29, C17, C33 en C28. Na het monteren van de grotere condensatoren (C6...C9, C30, C31 en C34) bevestig je K5 en tenslotte C1.



Figuur 11. Markeren van de gaten voor de eindtransistoren. Om de nauwkeurigheid te vergroten, worden de transistoren op keramische isolatiepads gelegd.

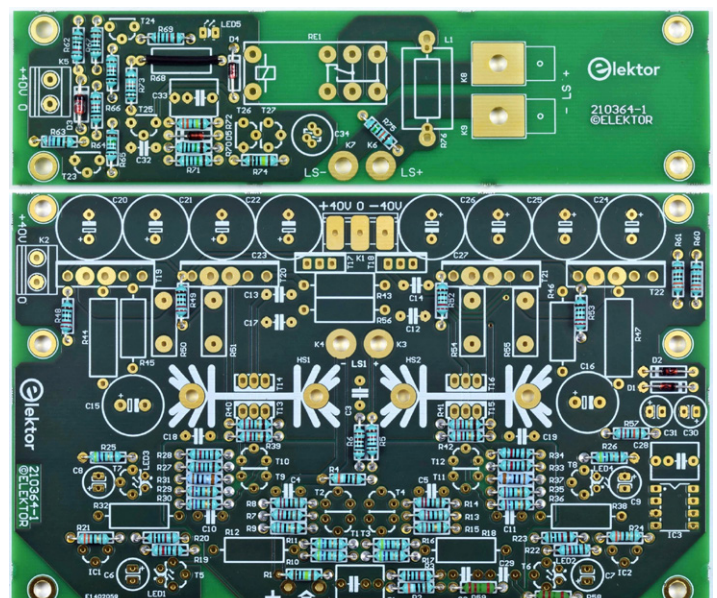


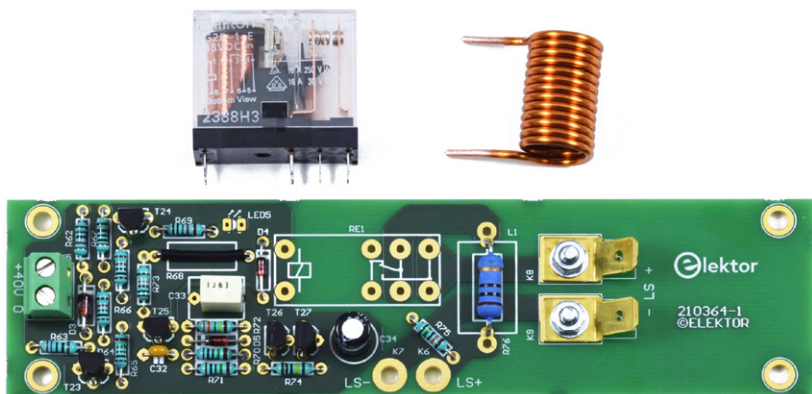
Figuur 12. De boorgaten voor de bevestiging van de eindtransistoren zijn gemarkeerd.



Figuur 13. De gaten voor de montage van de eindtransistoren zijn geboord.

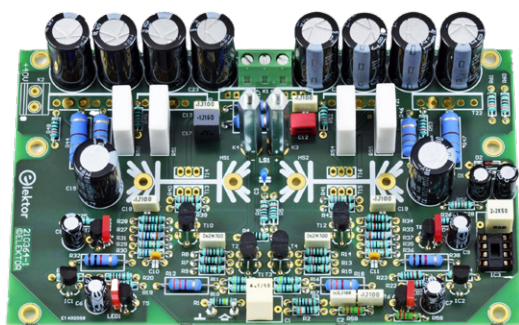
Figuur 14. De 'lage' componenten, zoals weerstanden en diodes, worden eerst op de print gemonteerd.





Figuur 15. De bijna volledig gemonteerde beveiligingsschakeling. Alleen het relais en de zelfgemaakte spoel van koperlakdraad moeten nog op hun plaats worden gesoldeerd.

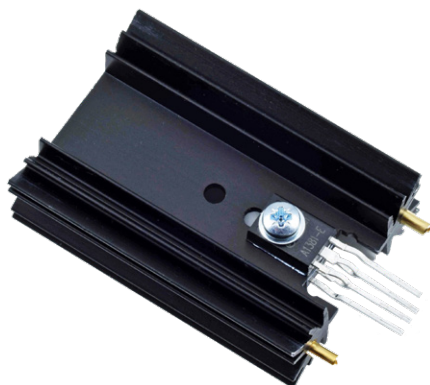
Figuur 16. De twee metalen afstandshouders van K3 naar K6 en van K4 naar K7 bevinden zich in het midden van de versterkerprint, naast elkaar.



Figuur 17. Om spanningen door thermische uitzetting te voorkomen, worden de aansluitdraden van de drivertransistoren iets gebogen. Dit gaat heel gemakkelijk met de hier afgebeelde speciale tang, maar het kan ook met een rondbektang.



Figuur 18. Een klein koellichaam met twee aan weerszijden gemonteerde drivertransistoren. Vergeet de sluitringen niet.



Bouw vervolgens de beveiligingsprint vol door de transistoren T23..T27, de twee faston-connectoren K8 en K9 (vastgezet met M3x8-schroeven en moeren met sluitringen), spoel L1 (13 windingen van 1,5 mm koperlakdraad met een binnendiameter van 10 mm) en tenslotte relais RE1 aan te brengen. Een 10mm-boortje is perfect als wikkelvorm voor L1. De draden van de spoel moeten lang genoeg zijn om hem boven R76 te monteren. Gebruik een hobbymes of zoiets om de lak aan de uiteinden van de draden weg te krabben. **Figuur 15** toont de bijna volledig gemonteerde print. Als je wilt, kun je LED5 later op de voorkant van de versterkerkast monteren en aansluiten met dunne montagedraad.

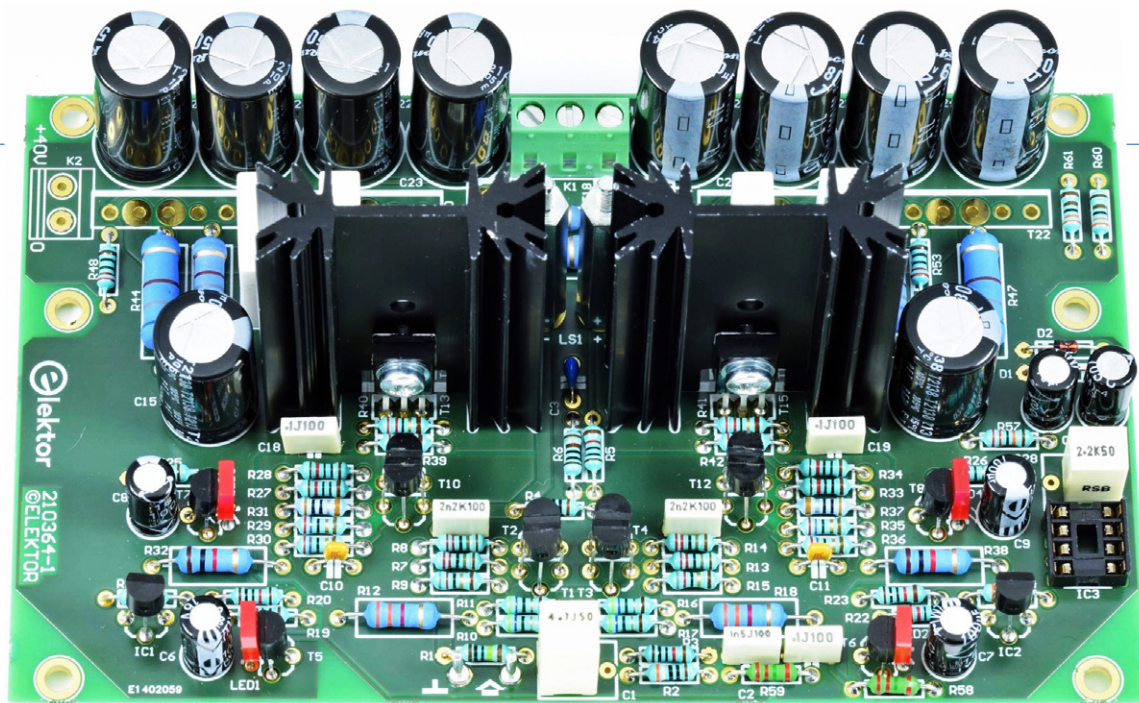
Terug naar de versterkerprint: nu zijn T5..T8 en LED1... LED4 aan de beurt. De in de LED's zichtbare chips moeten op halve hoogte van de behuizing van de aangrenzende transistoren komen. Buig de transistoren en LED's tegen elkaar na het solderen, of – beter – tijdens het solderen, om een goede thermische koppeling te krijgen.

Na het eerder beschreven 'matchen' van transistorpaartjes T1/T2, T3/T4, T9/T10 en T11/T12 voor dezelfde U_{BE} en h_{FE} , kunnen ze nu op de print worden gemonteerd. Let er bij het solderen van de transistorpaartjes op dat de platte kanten elkaar over het gehele oppervlak raken voor een goede thermische koppeling. Monteer vervolgens de vermogensweerstanden R50, R51, R54 en R55, daarna de condensatoren C15 en C16, en tenslotte de condensatoren C20..C27.

Nu komt nog wat mechanisch werk. Bevestig de twee afstandshouders die de uitgangen van de print bij K3 en K4 vormen, aan de bovenzijde van de versterkerprint met M3x8-schroeven die van onderaf worden ingebracht. **Figuur 16** toont het resultaat.

Montage van de transistoren

De volgende stap is het monteren van transistoren T13... T16 op de twee kleine koellichamen HS1 en HS2. Om mechanische spanningen ten gevolge van temperatuurschommelingen te verminderen, moeten de pootjes van de transistors een klein bochtje krijgen. **Figuur 17** toont een speciale tang en een transistor met gebogen aansluitdraden, en **figuur 18** toont twee transistoren die op een koellichaam zijn geschroefd met een beetje warmtegeleidende pasta. De bochtjes moeten dicht genoeg bij de behuizing zitten om de transistorpootjes door de print te laten passen. Breng een sluitring aan onder de schroefkop om de transistoren te beschermen. Draai de moeren nog niet helemaal vast. De schroefkop moet aan de kant van T13 respectievelijk T15 zitten, omdat je er anders later met een schroevendraaier niet meer bij komt. Plaats nu de koellichamen en transistors op de print, waarbij je eerst beide metalen pennen van de koellichamen soldeert. Gebruik dan een kleine platbektang om de M3 moeren aan de achterkant vast te houden (tegenover de dikke condensatoren) en draai de schroeven vanaf de voorkant vast met een passende schroevendraaier.



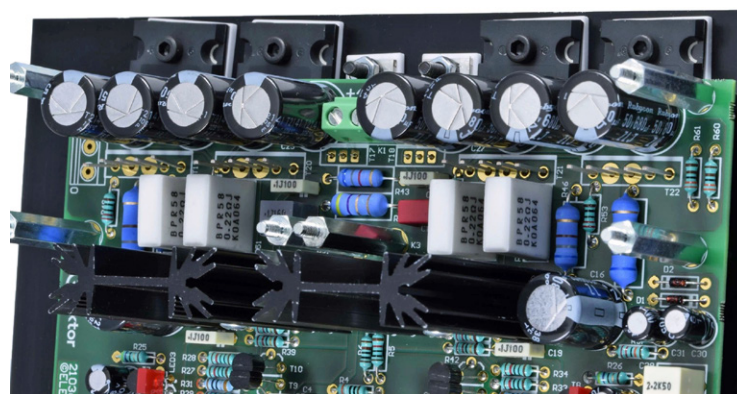
Figuur 19. De twee koellichamen met T13||T14 en T15||T16 zijn op de versterkerprint gesoldeerd.

Soldeer tenslotte de pootjes van de vier transistoren. De print moet er nu uitzien als op de foto van **figuur 19**. In **figuur 20** zijn transistoren T17...T22 provisorisch met schroeven en moeren op het koellichaam bevestigd, zodat ze op de juiste posities kunnen worden gesoldeerd. Monteer hiervoor ook tijdelijk de print op het koellichaam met behulp van de 10mm-afstandshouders, waarbij de print met moertjes op zijn plaats wordt gehouden (of met de 30mm-afstandshouders, zoals op de foto). Natuurlijk moeten de keramische isolatiepads ook onder de transistors komen, zodat alles later past. Voor T17 en T18 moeten kleine isolatiebusjes op de schroeven worden geschoven om een nauwkeurige plaatsing te verzekeren. Soldeer nu tenminste de twee buitenste pootjes van elke transistor aan de bovenzijde van de print. Let hierbij goed op dat je de condensatoren in de buurt niet beschadigt met de soldeerbout. Bij voorkeur soldeer je alle pootjes aan de bovenkant meteen vast. Een lange, dunne soldeerstift is handig.

Verwijder vervolgens alle schroeven van de transistoren en de moeren die de print vasthouden. Let er bij het verwijderen van de printplaat op dat je geen transistorpootjes verbuigt. Draai nu de printplaat om en soldeer ook de transistorpootjes aan de achterkant vast. De tweepolige printkroonsteen K2 is nog niet gemonteerd, om beter bij de aansluitingen van T19 te kunnen. Dat moet nu gebeuren.

Breng vervolgens een uiterst dun laagje warmtegeleidende pasta aan op de achterkant van de zes transistoren en op die zijde van elk keramisch isolatiepad die op het koellichaam komt. Zet vervolgens het koellichaam rechtop, zodat de gaten voor de transistoren bovenaan zitten. Steek de zes M3-schroeven voor de transistoren half door de gaten vanaf de achterkant. Zo kun je alle zes keramische pads (met de gecoate zijde naar het koellichaam) één voor één over de schroeven schuiven (zie **figuur 21**).

Plaats nu de print voorzichtig op de afstandshouders en zorg er daarbij voor dat de schroeven door de gaten van de transistors gaan. Zet de print vervolgens vast met de

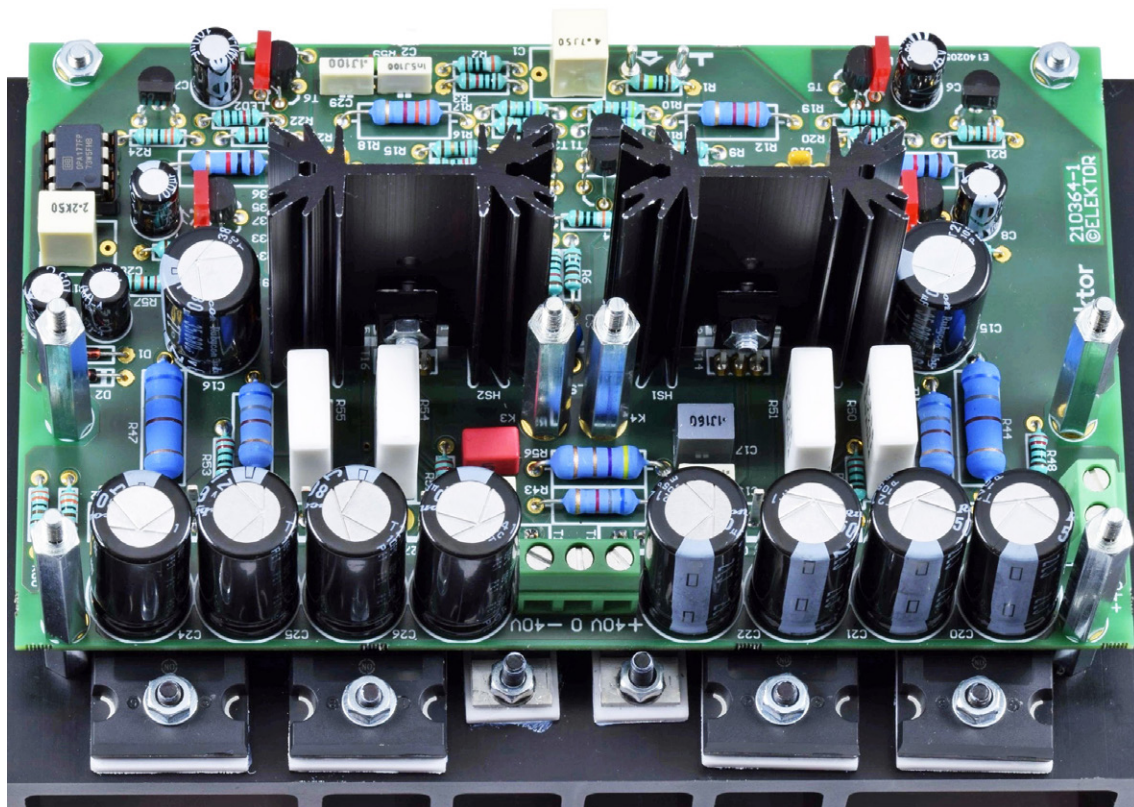


Figuur 20. Transistoren T17...T22 tijdelijk met kreamische isolatiepads gemonteerd op het koellichaam. Na de voorlopige montage van de printplaat worden de pootjes van T17...T22 aan de bovenzijde van de print gesoldeerd.



Figuur 21. De keramische isolatiepads worden aan één zijde bestreken met een dun laagje warmtegeleidende pasta en over de half ingestoken schroeven geschoven. Het koellichaam moet hiervoor rechtop staan.

Figuur 22. Nu wordt de print met de transistoren op het koellichaam geplaatst en worden de transistoren stevig vastgeschroefd, zoals hier te zien.



vier 30mm-afstandshouders (bij de transistoren), draai M3-moeren op de andere twee draadeinden, en draai ze vast. Breng aan de bovenzijde van de vier eindtransistoren (T19...T22) M3-ringen aan om de behuizingen te beschermen. Monteer ook de isolatiebussen voor T17 en T18. Draai tenslotte alle schroeven vast. **Figuur 22** toont de volledig gemonteerde eindtrap.

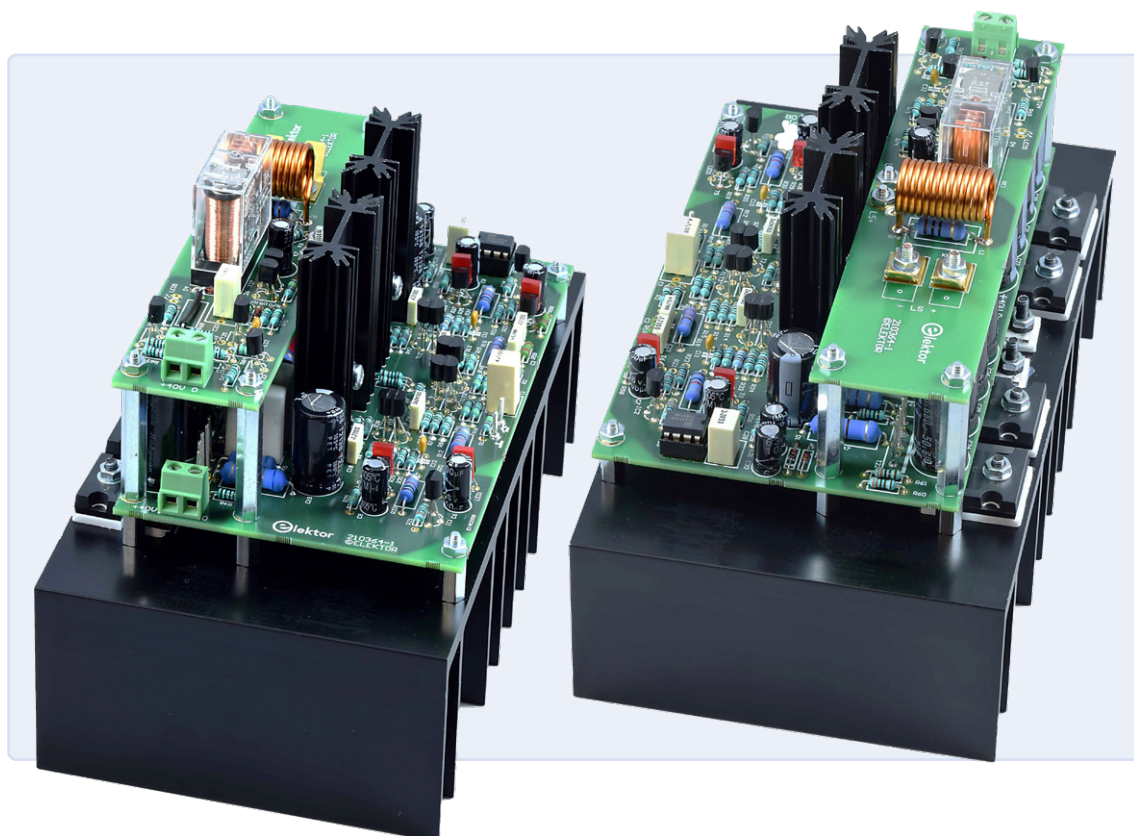
30mm-afstandshouders en zet de print vast met zes M3-moeren. **Figuur 23** toont het linker en rechter zijaanzicht van de vrijwel complete versterkermodule vóór aansluiting op de voeding. Op dit moment is LED5 nog niet op de beveiligingsprint aangesloten. Je kunt nu gaan testen.

Eindmontage

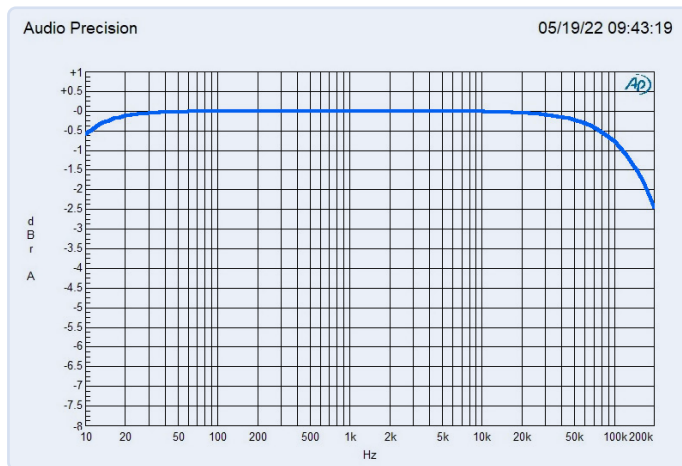
Monteer de volgebouwde beveiligingsprint op de zes

Metingen

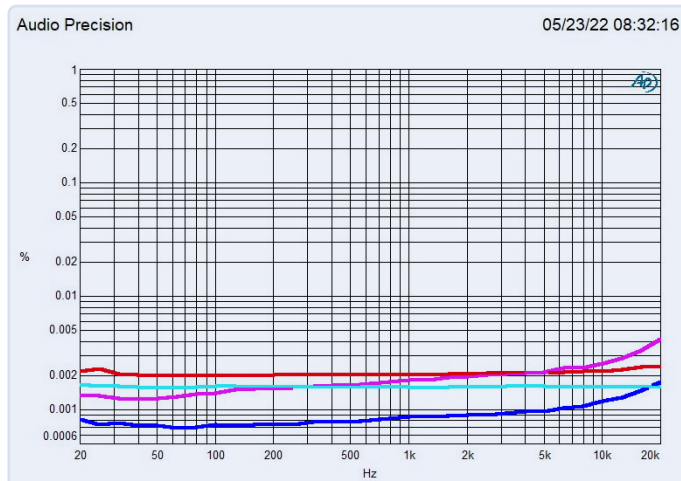
Hieronder beschrijven we verschillende relevante grafieken op basis van metingen aan het prototype.



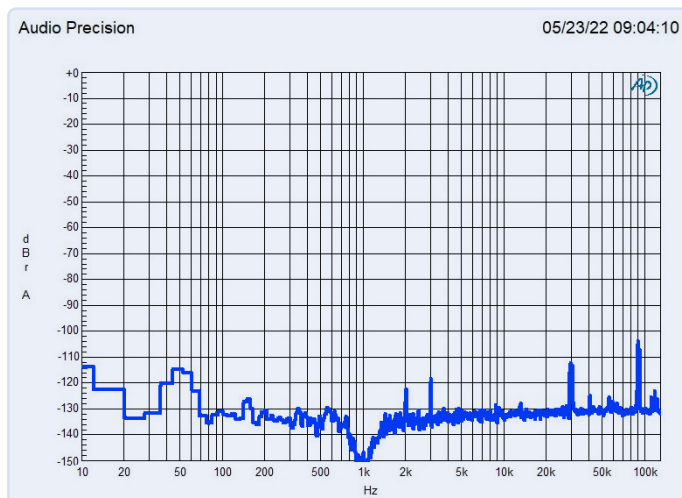
Figuur 23. Met de beveiligingsprint bovenop de versterkerprint is het resultaat een compacte module – hier het linker en rechter zijaanzicht.



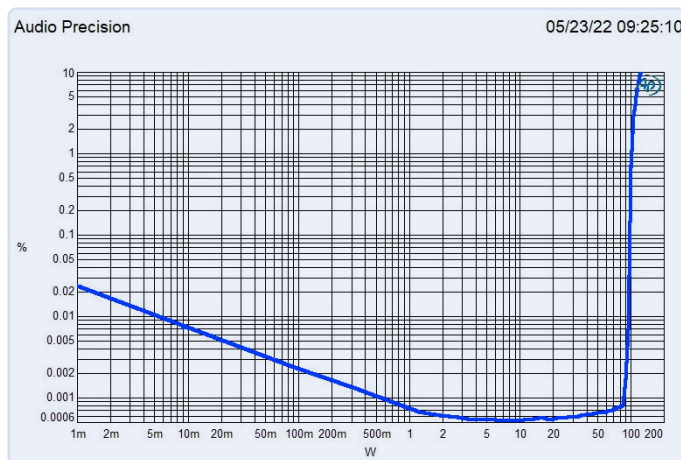
Figuur 24. De gemeten frequentierespons: de $-0,5\text{dB}$ -bandbreedte loopt van 10,8 Hz tot 78 kHz.



Figuur 25. THD versus frequentie met 4Ω - en 8Ω -belasting en verschillende vermogensniveaus: cyaan: 1 W in 8Ω ; rood: 1 W in 4Ω ; blauw: 50 W in 8Ω ; magenta: 100 W in 4Ω .



Figuur 26. Het harmonische spectrum bij aansturing van de versterker met een 1kHz-sinus en een vermogen van 1 W in 8Ω . De in theorie hoorbare pieken bij 2 kHz en 3 kHz zijn minimaal.



Figuur 27. THD + ruis versus uitgangsniveau bij aansturing van de versterker met een 1kHz-sinus; de belasting is 8Ω en de bandbreedte 22 kHz.

Frequentierespons

Figuur 24 toont de frequentierespons, ofwel de amplitude in dB versus de frequentie. De -3dB -bandbreedte van de Fortissimo is 3,3 Hz tot 237 kHz – een groter bereik dan de generator van onze Audio Precision-analyzer kan produceren. De smallere $-0,5\text{dB}$ -bandbreedte loopt van 10,8 Hz tot 78 kHz.

THD+N versus frequentie

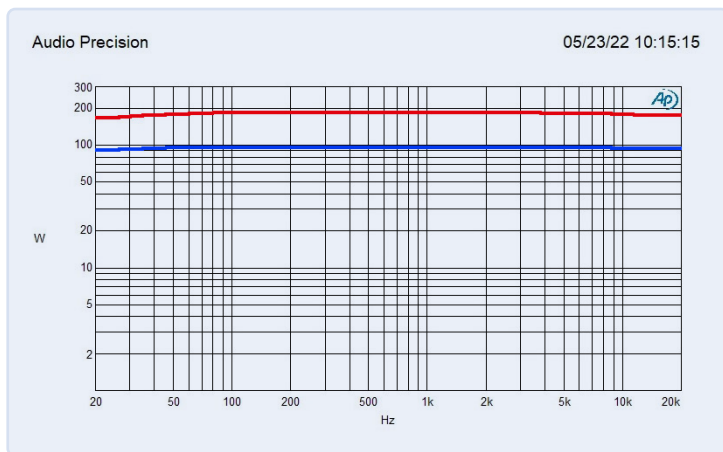
De grafiek van **figuur 25** toont de THD plus ruis versus frequentie bij belastingen van 4Ω en 8Ω , in beide gevallen bij 1 W en 50 W uitgangsvermogen en een bandbreedte van 80 kHz. De curve voor 1 W in 8Ω (cyaan) bestaat voornamelijk uit ruis. Bij 1 W in 4Ω (rood) is de uitgangsspanning lager en het relatieve ruisoniveau hoger. De invloed van harmonischen is ook te zien bij hogere frequenties. De curve voor 50 W in 8Ω (blauw) is extreem laag beneden 1 kHz, met minder dan 0,0008%. Zelfs bij 20 kHz stijgt het niveau tot slechts 0,0018%. Met 4Ω en dezelfde uitgangsspanning (100 W, magenta) is de THD hoger, maar nog steeds uitstekend: 0,0023% bij 1 kHz en 0,0042% bij 20 kHz.

Spectrum

Figuur 26 toont het frequentiespectrum met de versterker bij aansturing met een 1kHz-sinus en een vermogen van 1 W in 8Ω . Er zijn twee harmonischen zichtbaar in het hoorbare bereik, bij 2 kHz en 3 kHz. De eerste heeft een niveau van slechts $-122,6\text{ dB}$, en de tweede piek haalt $-118,5\text{ dB}$. De resulterende THD is dus slechts 0,00015% – een ongelooflijke 1,5 ppm. De pieken bij 30 kHz en 90 kHz zijn afkomstig van de restrimpel van de hier gebruikte labvoeding, wat verklaart waarom de THD bij een bandbreedte van 22 kHz kleiner is dan bij een bandbreedte van 80 kHz. Bij hogere uitgangsniveaus zijn de artefacten van de voeding niet langer zichtbaar.

THD+N versus vermogen

De curven in **figuur 27** tonen de THD + ruis als functie van het uitgangsniveau, bij aansturing met een 1kHz-sinus en een 8Ω -belasting, gemeten met een bandbreedte van 22 kHz. Bij 10 W is de THD slechts 0,00052%. De THD loopt op tot 0,0008% bij ongeveer 85 W en neemt sterk toe bij hogere vermogens.



▲
Figuur 28. Vermogen versus frequentie bij 0,1% THD. De blauwe curve is gemeten bij 8 Ω en de rode bij 4 Ω .

Vermogensbandbreedte

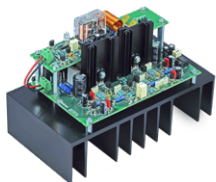
Figuur 28 toont het maximale uitgangsvermogen versus frequentie bij 0,1% THD. De blauwe curve vertegenwoordigt een 8 Ω -belasting, terwijl de rode 4 Ω representeert. In een 8 Ω -belasting is het uitgangsvermogen bij verschillende frequenties: 20 Hz – 89,5 W; 1 kHz – 94 W; 20 kHz – 92,4 W. In een belasting van 4 Ω zijn de cijfers: 20 Hz – 163 W; 1 kHz – 181 W; 20 kHz – 171 W. De exacte waarden zijn afhankelijk van de voedingsspanning. Elk spanningsverlies over de bedrading van de versterkervoeding is merkbaar. Daarom zijn in de testopstelling twee elco's van 10.000 μ F bij printkroonsteen K1 geplaatst. Bij 181 W in 4 Ω bedraagt de piekstroom van het sinussignaal 9,5 A, dus voor een maximaal vermogen in 4 Ω moet de voeding ten minste 10 A DC kunnen leveren.

Je zult versteld staan

De Fortissimo-versterker bewijst op indrukwekkende manier dat de tijd niet heeft stilgestaan op het gebied van analoge audioversterkers. Met een geoptimaliseerde schakeling en (deels) betere halfgeleidercomponenten kan de kwaliteit ten opzichte van de oorspronkelijke Power Amp worden verbeterd, en dat tegen een acceptabele prijs. De bouw van deze versterker is waarschijnlijk niet aan te bevelen voor beginners, maar de afzonderlijke fasen zijn zo gedetailleerd beschreven dat vrijwel iedere elektronica-hobbyist met een redelijke mate van ervaring in staat zou moeten zijn om de versterker met succes na te bouwen. Een ander voordeel is dat er absoluut geen afregeling nodig is.

Als je niet helemaal zeker van je zaak bent, kun je de versterker beschermen door een gloeilamp van 100 W in serie met elke voedingsaansluiting te schakelen voor een eerste test, ervan uitgaande dat je nog gloeilampen kunt vinden (halogeenlampen zijn ook geschikt). Die lampen hebben een koude weerstand van ongeveer 10 Ω . Als ze merkbaar warm worden of licht opglowen in het donker, is er iets mis. Voordat de versterker zonder deze vorm van serieweerstanden wordt gebruikt, kun je de gelijkspanningen over diverse componenten controleren (zie de tabel **Gelijkspanningen**) om te zien of er montagefouten zijn. De spanningen moeten ongeveer binnen $\pm 20\%$ van de bij het prototype gemeten waarden liggen.

Als alles goed is, hoop ik dat je geniet van de eerste luistertest. Je zult versteld staan! ◀



Tabel. Gelijkspanningen

R7	7,90 V
R8	7,85 V
R13	7,90 V
R14	7,96 V
R19	1,06 V
R22	1,05 V
R27	1,20 V
R28	0,90 V
R33	1,20 V
R34	0,95 V
R25	1,006 V
R26	1,007 V
R39	0,28 V
R40	0,28 V
R41	0,28 V
R42	0,28 V
R55	18,7 mV (koud) 28,3 mV (opgewarmd, geen uitgangsvermogen)
LED's	1,675 V (gemiddeld)



Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

De Fortissimo-100 Kit

De Fortissimo-100 is in juli 2022 door Elektor als een Jumpstarter-project gelanceerd. Zie de Fortissimo-100 poster in dit nummer voor meer details. Ga naar www.elektor.nl/20273 om een kit te bestellen.



GERELATEERDE PRODUCTEN

- ▶ **Elektor Fortissimo-100 Power Amplifier Kit**
www.elektor.nl/20273
- ▶ **OWON AG1022F 2-ch Arbitrary Waveform Generator with Counter (25 MHz) (SKU 18781)**
www.elektor.nl/18781
- ▶ **PeakTech 1404 2-ch Oscilloscope (100 MHz) (SKU 20229)**
www.elektor.nl/20229
- ▶ **PeakTech 6227 DC Switching Power Supply (0-60 V, 0-6 A) with color LCD & 2x USB (SKU 19323)**
www.elektor.nl/19323

210364-03

Transistorselectie

Voor de selectie van de transistoren voor de differentiële ingangstrappen kunnen eenvoudige schakelingen zoals die in **figuur 4** op een breadboard worden gebouwd. De twee transistoren moeten dicht bij elkaar worden geplaatst en stevig tegen elkaar worden geklemd. Het verschil tussen de 3,3k Ω -weerstanden moet zo gering mogelijk zijn. Over de weerstanden van 10 k Ω worden de basisstromen gemeten. Hoewel de h_{FE} -waarden van het NPN- en PNP-paar enigszins mogen verschillen, zijn ze in het ideale geval gelijk.

De transistoren zijn niet duur, dus je moet er meer kopen dan je nodig hebt en verschillende transistoren uitproberen tot je exemplaren hebt gevonden met de kleinste offset gemeten tussen de collectorweerstanden. Deze manier van meten is slechts in geringe mate temperatuurafhankelijk. In de twee bovenste meetopstellingen is de collectorstroom 2,16 mA per transistor met de 6,8k Ω -weerstand in het emittercircuit. Als je nauwkeurig wilt meten met 2,42 mA zoals in de schakeling van figuur 3, hoeft je slechts de negatieve rail op -33,4 V in te stellen.

Voor de tweede verschiltrap moeten een paar dingen worden aangepast. De stroom moet worden vergroot tot ongeveer 9 mA per transistor. Gebruik hiervoor de weerstandswaarden en spanningen tussen haakjes.

Een eenvoudiger methode is om U_{BE} en h_{FE} voor elke transistor afzonderlijk te meten en de resulterende tabel met meetwaarden te gebruiken om de beste overeenkomsten te bepalen. Door het ontbreken van thermische koppeling is deze methode echter veel sterker afhankelijk van de temperatuur.

SPECIFICATIES

De metingen zijn verricht met een laboratoriumvoeding van ± 40 V. De voedingsspanningen werden gebufferd door twee elektrolytische condensatoren van 10.000 μ F (werkspanning ≥ 50 V) dicht bij connector K1.

Ingangse gevoeligheid:

1,076 V voor 94 W in 8 Ω bij 0,1% THD

Ingangsimpedantie:

10 k Ω

Continu vermogen (1 kHz):

94 W in 8 Ω bij 0,1% THD

98 W in 8 Ω bij 1% THD

181 W in 4 Ω bij 0,1% THD

188 W in 4 Ω bij 1% THD

Belastingimpedantie:

≥ 3 Ω

Bandbreedte:

3,3 Hz – 237 kHz; -3 dB bij 1 W in 8 Ω

10,8 Hz – 78 kHz; -0,5 dB bij 50 W in 8 Ω

generatorimpedantie 20 Ω

Bandbreedte zonder tegenkoppeling:

≈ 20 kHz

Open-lus versterking:

≈ 140.000 in 8 Ω

Stijgsnelheid:

45 V/ μ s

Stijgtijd:

1,5 μ s

SNR:

103 dB met B = 22 Hz...22 kHz

106 dBA bij 1 W in 8 Ω

THD+N:

0,0008% bij 1 kHz; 1 W in 8 Ω ; B = 22 kHz

0,0016% bij 1 kHz; 1 W in 8 Ω ; B = 80 kHz

0,0016% bij 20 kHz; 1 W in 8 Ω ; B = 80 kHz

0,0008% bij 1 kHz; 50 W in 8 Ω ; B = 22 kHz

0,0008% bij 1 kHz; 50 W in 8 Ω ; B = 80 kHz

0,0020% bij 20 kHz; 50 W in 8 Ω ; B = 80 kHz

0,0012% bij 1 kHz; 1 W in 4 Ω ; B = 22 kHz

0,0020% bij 1 kHz; 1 W in 4 Ω ; B = 80 kHz

0,0025% bij 20 kHz; 1 W in 4 Ω ; B = 80 kHz

0,0023% bij 1 kHz; 100 W in 4 Ω ; B = 22 kHz

0,0023% bij 1 kHz; 100 W in 4 Ω ; B = 80 kHz

0,0042% bij 20 kHz; 100 W in 4 Ω ; B = 80 kHz

Intermodulatievervalsing

(50 Hz:7 kHz, 4:1):

0,0012% bij 1 W in 8 Ω

0,0015% bij 50 W in 8 Ω

0,0024% bij 1 W in 4 Ω

0,0041% bij 100 W in 4 Ω

Dynamische IMD (3,15kHz-blokgolf

met 15kHz-sinus):

0,0016% bij 1 W in 8 Ω

0,0010% bij 50 W in 8 Ω

0,0019% bij 1 W in 4 Ω

0,0021% bij 100 W in 4 Ω

Dempingsfactor (bij K8/K9):

570 bij 1 kHz in 8 Ω

315 bij 20 kHz in 8 Ω

Voedingsspanningsdetectie

(alleen positieve rail):

$\leq 36,5$ V = uit (licht temperatuurafhankelijk)

$\geq 36,7$ V = aan (licht temperatuuraafhankelijk)

DC-beveiliging:

+0,54 V en -0,89 V

Inschakelvertraging (relais):

3,5 s

WEBLINKS

[1] T. Giffard, "The power amp", Elektor oktober 1990: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-199010/37422>

[2] Datasheet NJL3281D/NJL1302D: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/njl3281d-d.pdf>

[3] Download print-layout: <https://www.elektormagazine.com/labs/fortissimo-100>



ONDERDELENLIJST

Weerstanden:

(tenzij anders vermeld: metaalfilm, 1%, 0,6 W)

R1,R74 = 1 M

R2,R4 = 390 Ω

R3,R5,R20,R23,R64,R66,R69 = 10 k

R6,R67 = 1 k

R7,R8,R13,R14,R60,R61 = 3k3

R9,R15,R27,R28,R33,R34 = 120 Ω

R10,R11,R16,R17 = 68 Ω

R12,R18 = 5k6 5%, 1 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

R19,R22,R48,R49,R52,R53 = 220 Ω

R21,R24 = 33 Ω

R25,R26 = 56 Ω

R29,R30,R35,R36 = 27 Ω

R31,R37 = 1 Ω

R32,R38 = 1k5 5%, 1 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

R39,R40,R41,R42 = 22 Ω

R43 = 6k8 5%, 1 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

R44,R47 = 680 Ω 5%, 3 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5,5 × 16 mm

R45,R46 = 1 k 5%, 2 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

R50,R51,R54,R55 = 0,22 Ω 5%, 5 W, metaalfilm, radiaal, steek 9 mm, max. 5 × 14 mm, Koa BPR58CR22J

R56 = 4,7 Ω 5%, 2 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

R57 = 220 k

R58,R59 = 2M2

R62 = 1k2

R63 = 270 Ω

R65,R70,R71 = 10 M

R68 = 0 Ω (draadbrug)

R72 = 3M3

R73 = 100 k

R75 = 150 k

R76 = 10 Ω 5%, 2 W, metaalfilm of metaaloxide, max. 5 × 12 mm

Condensatoren:

C1 = 4μ7 50 V 5%, steek 5 / 7,5 mm, PET, max. 7,6 × 9,7 mm

C2 = 1n5 100 V 5%, steek 5 mm, max. 2,5 × 7,2mm

C3 = 10 p ±0,5 p 100 V, steek 5 mm, C0G/NP0 (TDK FG28C0G2A100DNT00)

C4,C5 = 1 n 63 V 5%, steek 5 mm, PET, max. 2,5 × 7,2 mm

C6...C9 = 100 μ 16 V 20%, diameter 6,3 mm, bij voorkeur 105 °C

C10,C11 = 220 p 100 V 5%, steek 5 mm, C0G/NP0, max. 2,5 × 7,2 mm

C12 = 100 p 100 V 5%, steek 5 mm, PP, max. 4,5 × 7,2mm

C13,C14,C18,C19,C29 = 100 n 100 V 5%, steek 5 mm, PET, max. 2,5 × 7,2 mm

C15...C16 = 680 μ 35 V 20%, diameter 12,5 mm, steek 5 mm, 5000 h bij 105 °C (Rubycon 35ZL680MEFC12,5X20)

C17 = 100 n 160 VDC 5%, steek 5 mm, PP, max. 5 × 7,2 mm (Kemet R79GC3100Z340J)

C20...C27 = 680 μ 50 V 20%, diameter 13,5 mm, steek 5 mm, 10.000 u bij 105 °C (Rubycon 50ZLJ680M12,5X25)

C28 = 2μ2 50 V 10%, steek 5 / 7,5 mm, PET, max. 7,6 × 9,7 mm

C30,C31 = 10 μ 63 V 20%, diameter 6,3 mm, steek 2,5 mm, bij voorkeur 105 °C

C32 = 10 n 50 V 10%, steek 5 mm, X7R, max. 2,5 × 7,2 mm

C33 = 1 μ 63 V 5%, steek 5 / 7,5 mm, PET, max. 7,6 × 9,7 mm

C34 = 22 μ 35 V 20%, bipolair, diameter 8 mm, steek 2,5 / 3,5 mm

Spoelen:

L1 = 1,5 mm koperlakdraad, ca. 60 cm, 13 windingen, ID 10 mm

Halfgeleiders:

D1,D2 = zenerdiode 20 V 5%, 0,4 W, DO-35 (Nexperia BZX79-C20,113)

D3 = zenerdiode 33 V 5%, 1,3 W, DO-41 (Nexperia BZV85-C33,113)

D4,D5 = 1N4148, DO-35

LED1...LED4 = LED rood, 2 × 5 mm rechthoekig (Multicomp Pro MCL453MD)

LED5 = LED groen, 5 mm

T1,T2,T6,T7,T9,T10,T23,T26,T27 = BC546B, TO-92

T3...T5,T8,T11,T12,T24 = BC556B, TO-92

T13,T14 = KSA1381, TO-126

T15,T16 = KSC3503, TO-126

T17 = MJE15032, TO-220

T18 = MJE15033, TO-220

T19,T20 = NJL3281D, TO-264, 5 aansluitingen

T21,T22 = NJL1302D, TO-264, 5 aansluitingen

T25 = BS170, TO-92

IC1,IC2 = LM334Z, TO-92

IC3 = OPA177FP, DIP-8

Overig:

K1 = 3-polige printkroonsteen, steek 0,2" (Phoenix Contact 1729131 of MKDSN 1,5/3-5,08)

K2,K5 = 2-polige printkroonsteen, steek 0,2" (Phoenix Contact 1729128 of MKDSN 1,5/2-5,08)

2× soldeerpen 1,3 mm voor ingang (Ettinger 13.14.419)

6× metalen afstandhouder, 10 mm, M3 M/F

6× metalen afstandhouder, 30 mm, M3 M/F

K8,K9 = faston-connector, printmontage, gat 3,3 mm, contact 6,35 × 0,81 mm (Amp/TE Connectivity 42822-2 of soortgelijk)

RE1 = relais 16 A/250 VAC/30 VDC (Omron G2R-1-E 48DC)

4x M3×8 kolomschroef (voor standoffs bij K3/K4 en mesklemmen bij K8/K9)

8x M3 × 12 kolomschroef, zwart (voor print-afstandhouders en T17/T18 op koellichaam, TR Fastenings M312 PRSTMCB100-)

4x M3×16 kolomschroef, zwart (voor T19/T20/T21/T22 op koellichaam, Toolcraft 839672)

18× M3-moer

8 × M3-sluitring, glad, staal

HS1,HS2 = koellichaam, 9 K/W, lengte 50,8 mm (Fischer Elektronik SK 104 50,8 ST)

Koellichaam, 0,6 K/W, 100 × 180 × 48 mm (Fischer Elektronik SK53-100-SA)

4× keramisch isolatiepad voor T19...T22, 23 × 20 × 2 mm (Silfox SL-012-AL20)

2× keramisch isolatiepad voor T17/T18, 18 × 12 × 1,5 mm (Silfox SL-019-AL15)

2× isolatiebus voor T17/T18, TO-220 (Fischer Elektronik IB 6)

1× IC-voet, DIP-8, voor IC3

print 210364-1 v1.1