



300 Watt buizen eindversterker

DOOR RENCO TERWEIJ

Buizenversterkers met een vermogen tot ongeveer 50 Watt zijn redelijk gemakkelijk te maken.

Heel anders wordt het bij 300 Watt uitgangsvermogen. De trafo's zijn dan extreem zwaar en groot, er lopen fikse stromen en strooivelden, aardepunten kun je niet meer vrij kiezen, enige instabiliteit veroorzaakt echt voorwerk. De basgitarist Renco Terweij van de punkband Gewapend Beton uit Amsterdam beschrijft hier zijn ontwerp. Voor een subwoofer is deze versterker ook uitermate geschikt.

Hoe groter het geluidsvolume en hoe lager de frequenties, des te meer versterkervermogen nodig is. Hoge tonen kun je vaak nog goed met kleine vermogens weergeven. Lage tonen vragen niet alleen grote luidsprekers, maar door hun aard ook extra grote transformatoren en stromen. Bij versterking van bijvoorbeeld een basgitaar in zalen, werkt men tegenwoordig met lichtgewicht schakelende transistorversterkers van zo'n 2000 Watt. Je bent dan wel gek als je met buizen gaat werken, je roadies zijn echt niet blij met het zware gewicht van zo'n versterker. En toch prefereer ik buizengeluid, ook voor de basgitaar. Dat diepe ronken, dat zware volle geluid klinkt echt anders dan de strakke weergave van de transistorversterker. Uit die subjectieve voorliefde is dit ontwerp geboren.

De uitgangstrafo (zie 1)) is een speciaal EI-type voor basweergave. De EI-kern is hier geen probleem, immers pas bij de hoge frequenties beginnen de redelijk grote lekvelen van de trafo een hoofdrol te spelen. In het basbereik hoef je je daar niet druk om te maken. Dan is juist een grote primaire zelfinductie nodig. Een geringe spleet (de meeste EI-trafo's bezitten impliciet zo'n kernspleet) is ook voordelig om te voorkomen dat de kern in de verzadiging gaat bij sterk eenzijdig gerichte puls-vormige audio signalen. Vooral basgitaren leveren die; denk aan het typische plukken van of het slaan op de snaren. Die klanken zijn echt geen symmetrische spanningen. De voedingstrafo is een ringkern type (zie 2)) en dat is nu wel heel erg prettig, want deze zijn minder zwaar dan hun EI equivalenten. De versterker is gebouwd op een proefchassis dat door Koch (zie 3)) beschikbaar is gesteld. Dit chassis is niet algemeen beschikbaar, dus zelfbouwers zullen hun eigen behuizing moeten maken. De eindbuizen zijn EL34 of 6550 van Svetlana en voor het grote vermogen zijn er zes nodig die drie bij drie parallel in push pull geschakeld staan. De eindbuizen worden redelijk laagohmig aangestuurd. Dit is nodig omdat bij oversturing de stuurroosters stroom gaan trekken en je wilt dan geen instabiliteit doordat het werkpunt zou wegdrijven.

Alleen de eindversterker wordt in dit artikel beschreven. Deze kan door een mengpaneel worden aangestuurd of door een losse basgitaar voorversterker of door een elektronisch cross-over filter bij subwoofer toepassing. In een later stadium zal in deze eindverster-

ker nog een specifieke basgitaar voorversterker worden gebouwd, maar dat valt buiten het kader van dit artikel.

■ Stuurtrap

In figuur 1 wordt de eenvoudige schakeling getoond die de eindbuizen gaat aansturen. Er is niet zoveel versterking nodig omdat de ingangsgevoeligheid 2 Vrms bedraagt, terwijl de eindbuizen 35 Vrms nodig hebben op hun stuurroosters. Dus een totale versterkingsfactor van ongeveer 18 maal is voldoende. De eerste buis B2 versterkt 5 maal en is ook direct de fasedraaier. De long tailed schakeling heeft een niet perfecte stroombron R5 aan de beide kathodes hangen, waardoor herstel van symmetrie nodig is. Daarom hebben de anodeweerstand R3 en R4 een iets verschillende waarde. Direct na deze eerste versterking en fasedraaiing volgen naar verhouding wel erg grote koppelcondensatoren C1 en C2. Hun waarde is zo groot om geen conflict te krijgen bij eventuele overall tegenkoppeling, die je kunt aansluiten op het dan van aarde losgemaakte rooster van B2-b via een spanningsdeler. Verderop in deze eindversterker zijn nog meer koppelcondensatoren aanwezig die ook een hoogdoorlaat filter vormen. De eindbuizen met de zelfinductie van de primaire wikkeling vormen het daarop volgende extra hoogdoorlaat filter. In totaal zijn er dus drie eerste orde filters aanwezig en hun kantelpunten (-3 dB frequenties) horen ver uit elkaar te liggen. Anders ontstaat er bij tegenkoppeling per definitie instabiliteit. Het eerste filter met C1-R6 en C2-R7 heeft daarom een -3 dB frequentie van 0,1 Hz. Bij de bespreking van de eindtrap worden de andere filters besproken en ontstaat er zicht op de samenhang van de verschillende frequenties. De volgende buis (ECC99) versterkt 20 maal en heeft

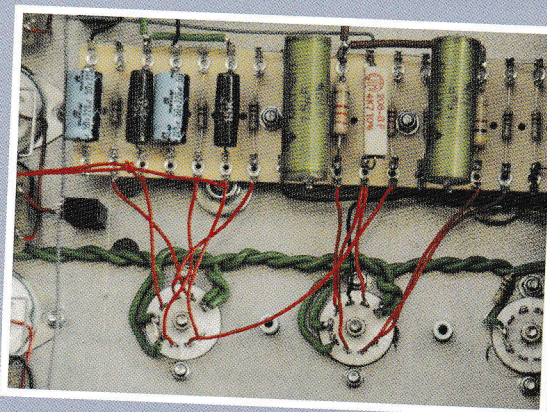
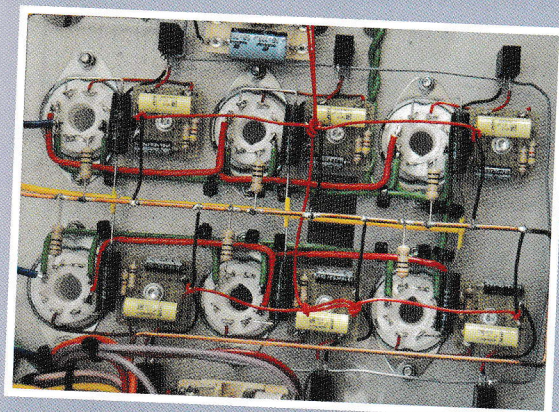
door zijn redelijk hoge ruststroom en lage anodeweerstand een lage uitgangsimpedantie, die nodig is om de eindbuizen stevig aan te kunnen sturen. Om de uitgangsimpedantie zo laag mogelijk te maken zijn ook de kathodeweerstand R12,13 via de elco's C3,4 ontkoppeld. De twee uitgangen A en B van deze stuurtrap worden naar de eindbuizen gevoerd.

De totale versterking van de gehele stuurtrap bedraagt dus $5 \times 20 = 100$ maal, terwijl 18 maal voldoende is. Daardoor is het mogelijk om maximaal 15 dB extra tegen te koppelen. Zoals al eerder is aangegeven wordt in dit ontwerp van die mogelijkheid geen gebruik gemaakt.

■ Eindtrap

Enige studie van het schema van de eindtrap laat snel zien dat er zes maal dezelfde buis met omringende componenten worden gebruikt. De bovenste drie buizen B4,5,6 staan parallel evenals de drie onderste B7,8,9. De bovenste buizen krijgen op hun stuurroosters het signaal -A- van de stuurtrap, terwijl de onderste het signaal -B- ontvangen. Per buis kan met een trimpot (neem hier voor een 10-slags type) de negatieve voorspanning op de stuurroosters worden ingesteld. De ruststroom per buis bedraagt 25 mA, dus over elke kathodeweerstand komt een rustspanning van 250 mV te staan bij correcte afregeling.

Opmerkelijk is de redelijk hoge waarde van de voor-schakelweerstand (gridstopper) bij elk stuurrooster, namelijk 22 kOhm. Dit is gedaan om bij oversturing, als de stuurroosters stroom gaan trekken, voldoende spanningsval te creëren. Daardoor regelen de stuurroosters zichzelf terug en wordt oversturing nooit hard, maar heel zacht. Voor een goede klankvorming is deze hoge voorweerstand echt belangrijk.

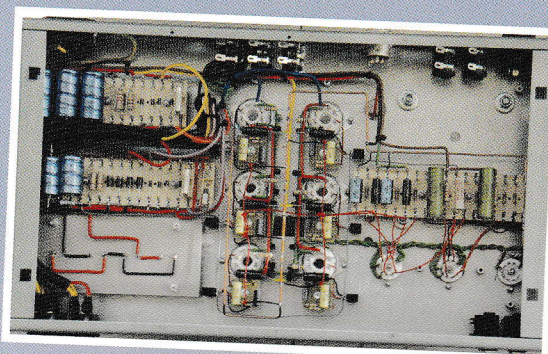
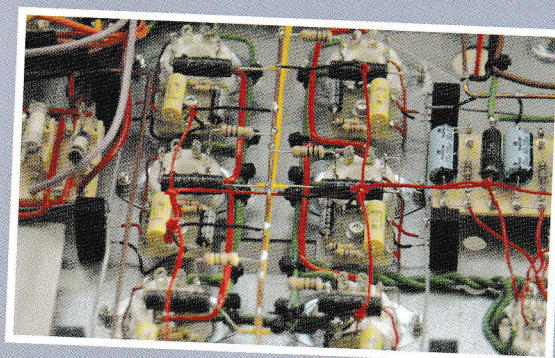


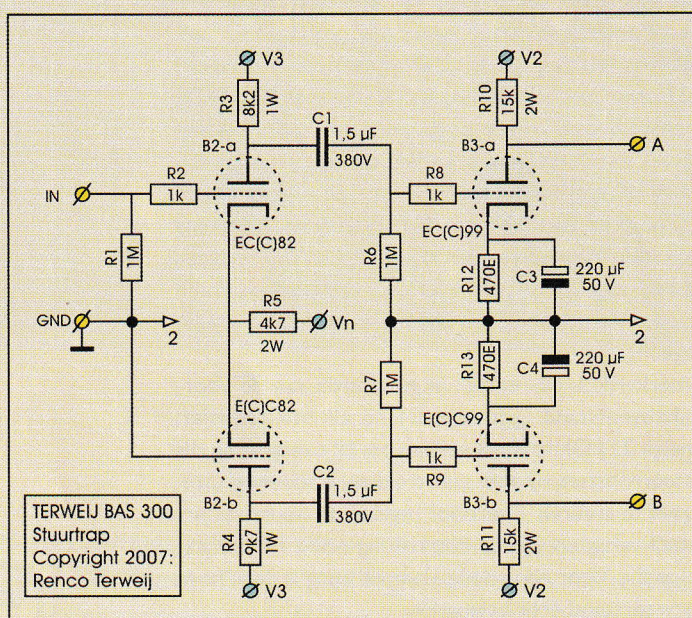
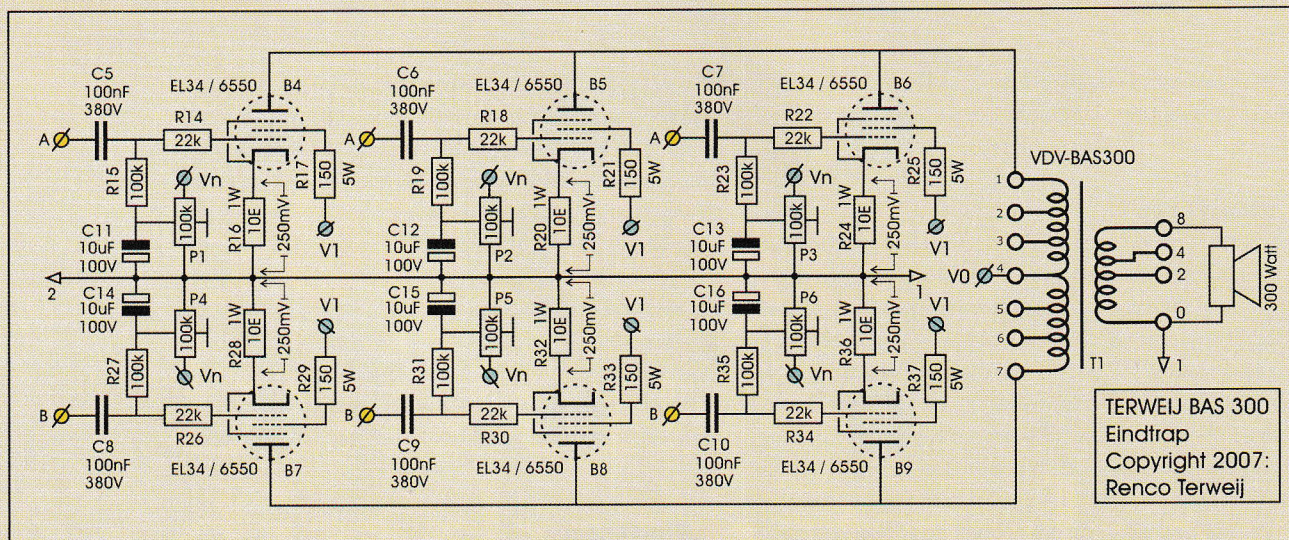
Bedrading bij de eindbuizen

Bedrading van de stuurtrap

Bedrading eindbuizen in perspectief

Overzicht aan de onderkant





Figuur 1:
Schema eindtrap

Figuur 2:
Schema stuurtrap

Elk schermrooster is via een bijbehorende 150 Ohm weerstand op de voedingsspanning V_1 aangesloten. De eindbuizen staan echt als pentode ingesteld, met per buis een inwendige weerstand van ongeveer 15 kOhm. Drie staan er parallel, dus de hele bovenste sectie heeft een inwendige weerstand van 5 kOhm, evenals de onderste sectie. De buizen in totaal vertegenwoordigen dan een impedantie van 10 kOhm, die een primaire impedantie $Z_{aa} = 1k7$ van de uitgangstrafo aanstuurt. Berekenen we nu 10k parallel aan 1k7, dan levert dat op: $Z_{\text{equivalent}} = 1,45 \text{ kOhm}$. Met deze $Z_{\text{equivalent}}$ en de zelfinductie $L_{p,\text{max}} = 700 \text{ H}$ van de primaire wikkeling kan nu de -3 dB frequentie van deze hoogdoorlaat sectie berekend worden. Dat levert op: $f_{-3 \text{ dB}} = 0,33 \text{ Hz}$. Houden we ook nog rekening met het feit dat de primaire zelfinductie maximaal 700 H is en minimaal 23 H, doordat de relatieve magnetische permeabiliteit van de kern ongeveer een factor 30 kleiner wordt bij maximum vermogen, dan komt bij $L_{p,\text{min}}$ de -3 dB op 10 Hz te liggen. Deze waarde is uitstekend omdat hij ruim genoeg onder het werkgebied van de laagste bastonen ligt. Op dezelfde manier kunnen we ook de koppelcondensatoren C5 tot en met C10 beschouwen. Deze zijn elk belast met een roosterweerstand van 100 kOhm, wat een -3 dB van 16 Hz oplevert.

Nu wordt het duidelijk waarom de stuurtrap zulke grote koppelcondensatoren gebruikt. In de voortrap is f-3 dB gelijk aan 0,1 Hz. Het trafo-deel levert een vermogens afhankelijke f-3 dB op die ligt tussen 0,33 Hz en 10 Hz. In de eindtrap is f-3 dB gelijk aan 16 Hz ten gevolge van de koppelcondensatoren. Onder alle condities overlappen al deze f-3 dB frequenties elkaar niet, zodat geen keihard derde orde hoogdoorlaat filter ontstaat, met alle nadelige gevolgen van dien als men tegenkoppeling toe zou passen.

De uitgangstrafo heeft meerdere primaire taps. De gehele primaire is in zes gelijke secties verdeeld, dus in principe zou een 33 % Ultra Lineaire schakelwijze mogelijk zijn, met de bovenste schermroosters op tap 3 en de onderste schermroosters op tap 5. Hoe mooi het ook lijkt, het kan niet, want V_0 bedraagt 665 V en zo'n hoge spanning kunnen de schermroosters niet veilig verdragen. Dus: van de trafo mag ultra lineair, van de schermroosters mag het niet, dus daarom zet ik de schermroosters gewoon op $V_1 = 420 \text{ V}$.

De secundaire wikkeling heeft aansluitingen voor luidspreker impedanties van 2 en 4 en 8 Ohm. De waarde van 2 Ohm lijkt laag, maar deze komt in de praktijk redelijk vaak voor omdat daar luidsprekerkasten aan elkaar parallel geschakeld worden.

De voeding

De ringkern voedingstransformator moet nogal wat spanningen aanleveren. Primair moet de netspanning kunnen lopen van 100 V (Japan) tot 230 V (Europa). Door parallel-serie schakeling zijn alle huidige netspanningen over de hele wereld te realiseren. Neem voor de zekering Z1 (de netzekering) echt een super traag type, of koop 12t zekeringen bij Amplimo. Deze kunnen de redelijk grote inschakelstroom van de voedingstrafo goed opvangen en knallen er niet te snel uit.

De eerste secundaire wikkeling levert de hoogspanning voor de eindbuizen. Door serie-parallel schakeling van de vier bufferelco's van 220 μF wordt een totale effectieve capaciteit van 220 μF bereikt, terwijl de werkspanning daarvan ($2 \times 385 \text{ V}$) de effectieve spanning V_0 voldoende overstijgt. De bleeder weerstanden van 220 kOhm zorgen ervoor dat de spanning V_0 gelijkmatig over de condensatoren wordt verdeeld. Ook hebben

ze de functie van ontlad weerstanden als de versterker wordt uitgeschakeld. Neem voor de zekering van deze spanning ook een traag type.

De tweede wikkeling levert de spanningen voor de schermroosters van de eindbuizen en van de voortrappen. Let hier op de aardpunten. Aardpunt 1 hoort bij de hoogspanning en de spanning voor de schermroosters. Daar lopen de grote stromen. Aardpunt 2 hoort bij de stuurtrap, daar lopen kleine stromen. Door deze twee aardpunten gescheiden te houden (onderling wel doorverbinden via een enkele draad) wordt het doordringen van grote stroomvariëaties (de eindtrap) in het gevoelige deel van de schakeling (de stuurtrap) voorkomen. De zekering van dit voedingsgedeelte moet ook traag zijn.

De derde wikkeling levert de negatieve voorspanning voor de stuurroosters van de eindbuizen en de 'stroombron' R5 aan de kathodes van B2. Dubbele gelijkrichting en dubbele buffering via een C-R-C sectie is hier echt nodig om doordringen van rimpelspanningen in de versterker te voorkomen. Ook hier is een zekering aanwezig; de wet eist het omdat de spanning groter is dan 40 V, maar het liefst zou ik hier de zekering weglaten. De negatieve voorspanning mag namelijk nooit uitvallen, daarom heb ik deze zekering wat te ruim gedimensioneerd.

Dan is er nog een extra wikkeling voor eventuele relais in een voorversterkersectie, maar voor deze eindversterker speelt dat nog geen rol.

De gloeidraadspanning met fikse stromen tot 10 A is ongezekerd omdat deze lager is dan de 40V-eis en de aarding ervan is symmetrisch in het midden met twee 100 Ohm weerstanden.

Aanwijzingen voor zelfbouw

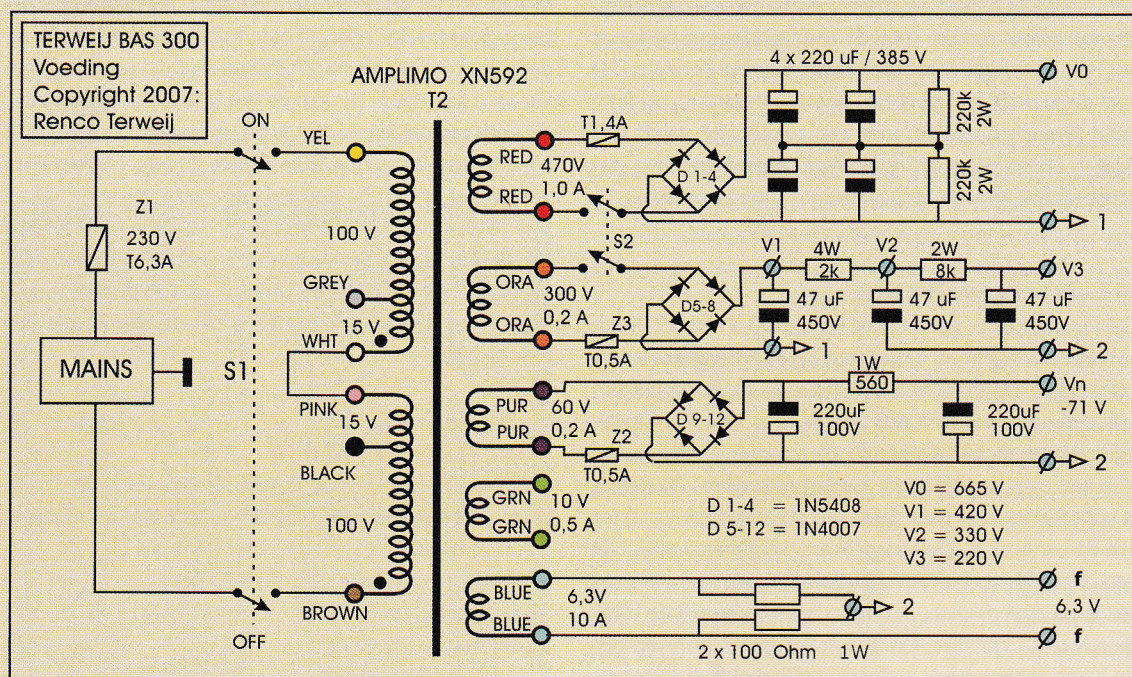
De foto's tonen voldoende duidelijk hoe ik de versterker heb gebouwd. Belangrijk is de lange stevige blanke

aardedraad, die vanaf de hoofdvoeding (aarde-1) langs alle buizen loopt. Ieder aardpunt is direct met deze aardedraad verbonden. Het uiteinde ervan (aarde-2) is bij buis 2 aan het chassis gelegd. Op deze manier wordt goed voorkomen dat de grote stromen van de eindtrap doordringen in de gevoelige voortrap. De onderdelen zijn op montagebordjes geplaatst (zie 4)) en alle draden zijn stevig aan elkaar gehecht met strips. In de praktijk zal er stevig met deze versterker gesjouwd worden, stommelen en stoten komt regelmatig voor. Daarom is uiterste mechanische stabiliteit erg belangrijk. De ECC99 zit in een onafgeschermd buisvoet, terwijl de ECC82 een afschermkoker om zich heen heeft. Hij staat vlak bij de uitgangstrafo en enige instraling van lekvelen aldaar zou instabiliteit kunnen geven. De luidsprekeruitgangen zijn uitgevoerd met jacket chassisdelen, wat in de muziekwereld een gebruikelijke connector is. Ook is een Speakon uitgang aanwezig die met de 4 Ohm tap is verbonden.

Meetresultaten

De stuurtrap is eerst afzonderlijk doorgemeten en is bijzonder breedbandig. Het -3dB bereik loopt van 1 Hz tot 250 kHz, terwijl bij de uitgangen -A- en -B- een maximale uitgangsspanning van 200 Vtt beschikbaar is. Voor de uitsturing van de eindbuizen is per uitgang 100 Vtt nodig (bij de 6550 buizen), dus er is een prettige extra uitsturingmarge van 6 dB aanwezig. Vooral bij oversturing van de versterker is dit gewenst, omdat dan alleen de eindbuizen in de begrenzing gaan, terwijl de voortrap volledig stabiel blijft. De versterker zal daarom niet in de oversturing blijven hangen, maar zich daar onmiddellijk van herstellen.

De eindtrap is getest met EL34 eindbuizen die per buis op een ruststroom van 25 mA zijn ingesteld. Het continue uitgangsvermogen bedraagt dan 220 Watt in alle aangegeven secundaire impedanties. Het piekvermogen

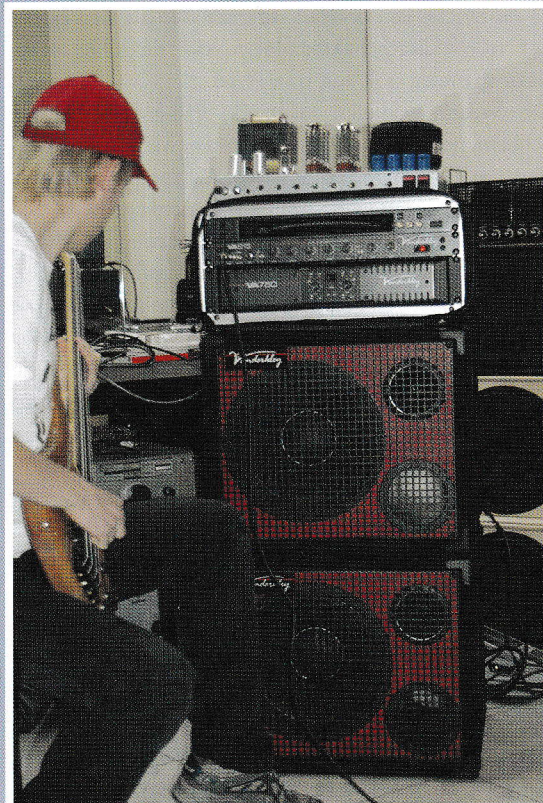
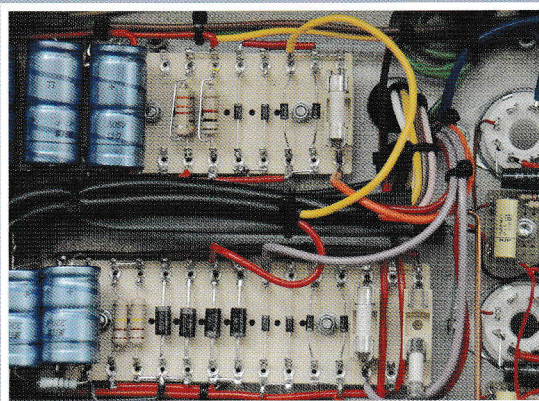


Figuur 3:
Schema voeding

Bedrading
van de voeding

Totaal overzicht
van de testopstelling

Overzicht van
gebruikte versterkers



van pulsvormige signalen schiet ruim over 300 Watt heen. Het -3dB frequentiebereik loopt van 18 Hz tot 25 kHz, terwijl 22 Hz nog met het volle vermogen van 220 Watt kan worden weergegeven. Bij frequenties onder 22 Hz gaat de kern van de uitgangstrafo bij vol vermogen zachtjes en mild in verzadiging, wat duidt op een welkome kleine restspleet in die kern. De uitgangsimpedantie van de versterker is hoog, namelijk 78 Ohm. Dat komt omdat er geen enkele tegenkoppeling wordt toegepast. Deze versterker gedraagt zich echt als een stroombron en niet als een spanningsbron. Bij de bespreking van de luisterresultaten zal dit verschijnsel een hoofdrol blijken te spelen. Bij nauwkeurige instelling van gelijke ruststromen door de eindbuizen bedraagt het rest bromsignaal aan de 4 Ohm uitgang 10 mVtt. Dat is in de praktijk onhoorbaar, vooral omdat een podium altijd lawaaiig is. Thuis, met een subwoofer, is dit iets teveel brom, wat door geringe tegenkoppeling tot acceptabele waarde teruggebracht moet worden.

■ Luisterresultaten

De versterker is getest met twee 500 Watt 12" luidsprekers, aangestuurd door de VA615 basgitaar voorversterker van Marc van der Kley, die bij de eindevaluatie zelf ook aanwezig was (zie de foto's en 5)). Opvallend was de diepe lage ronde klank van mijn versterker met een ongelooflijk stevig zwaar fundament. Dit gedrag is volledig verklaarbaar door het stroombron karakter van de versterker. De luidsprekers worden namelijk niet gedempt, dus op hun resonantiefrequenties slingeren ze extra uit, maken grote conusuitslagen en wordt de klank diep warm. Gaat men extra tegenkoppelen, dan worden de luidsprekers meer gedempt en is de klank strakker,

maar voor mij was juist dit ronde warme geluid zeer belangrijk. Dit wilde ik, en het is ook precies gerealiseerd. De versterker is snel en puntig, zelfs bij oversturing. Hij gaat dan zacht in de verzadiging en blijft volledig muzikaal klinken. Zelfs bij vol volume ontstaat geen onaangename druk op de oren, het muzikale karakter blijft op alle niveaus aangenaam. Marc had ook zijn VA750 2000 Watt eindtrap meegenomen die we met mijn versterker hebben vergeleken. Die VA750 is een echte spanningsversterker, de speakers worden stevig gedempt en dat is goed hoorbaar. Het sublaag klinkt dan strakker en minder luid. Bij mijn versterker trillen de ramen van de werkruimte mee, met de versterker van Marc doen ze dat niet. Bij mijn buizen voel je je buik en de grond trillen, bij de VA750 voel je druk op je oren. Ga zo maar door, elk van deze eigenschappen is volledig verklaarbaar en door middel van tegenkoppeling ook volledig instelbaar. Het ontwikkelen en bouwen van deze versterker is een heftige klus geweest, maar de muzikale beloning op al die arbeid is groot. Deze buizen eindversterker is een prachtig muziekinstrument, met een eigen karakter. Kom maar eens naar een optreden van onze band luisteren, hartelijk welkom, dan kun je het met je eigen oren horen.

Literatuur/Bronnen

- 1) info@mennovanderveen.nl: VDV-Bas300 aanvragen via e-mail; bij voldoende belangstelling volgt aparte productie voor verkoop.
- 2) www.amplimo.nl
- 3) www.koch-amps.com
- 4) www.conrad.com
- 5) www.vanderkleyamp.com
- 6) voor vragen: RstreepjeGB@zonnet.nl