



50 Watt super triode versterker

DOOR FLORIS PAETS

In het onlangs verschenen boek *High-End Buizenversterkers 2* wordt de uiterst complexe Super Triode versterker SPT70 besproken. Kan het niet wat eenvoudiger, terwijl alle goede eigenschappen bewaard blijven? Floris Paets deed onderzoek en inderdaad, het kan stukken eenvoudiger. Dit artikel beschrijft een gemakkelijk nabouwbaar ontwerp met topprestaties.

De schakeling van de super triode versterker heeft iets supers over zich, geweldige eigenschappen in de overtreffende trap. Daarin worden namelijk de eindbuizen op een bijzonder stevige manier aan de ringkern uitgangstransformator gekoppeld. Omdat de eindbuizen en de uitgangstransformator alles van elkaar opmerken, kan door middel van de locale tegenkoppeling een grote lineariteit bereikt worden. Dit stelt stevige eisen aan de voortrappen die de eindbuizen aansturen. Daarin mag geen vervorming opgewekt worden, want anders doe je die goede eindconfiguratie te kort. In 1) worden de eigenschappen volledig beschreven, wat resulteert in een complexe SPT70 schakeling die nagenoeg niet nabouwbaar is. De auteur Menno van der Veen raadt dat zelfs af en adviseert de lezer om ideeën uit zijn schematuur te destilleren en zo zelf een hanteerbare super triode

versterker te ontwerpen. Ik heb uitgebreid zijn concepten bestudeerd en zag al spoedig dat hij hier en daar wel wat erg voorzichtig en overdadig te werk ging. Het kan echt simpeler en dat bespreek ik in dit artikel.

■ Eenvoudige stuurtrap

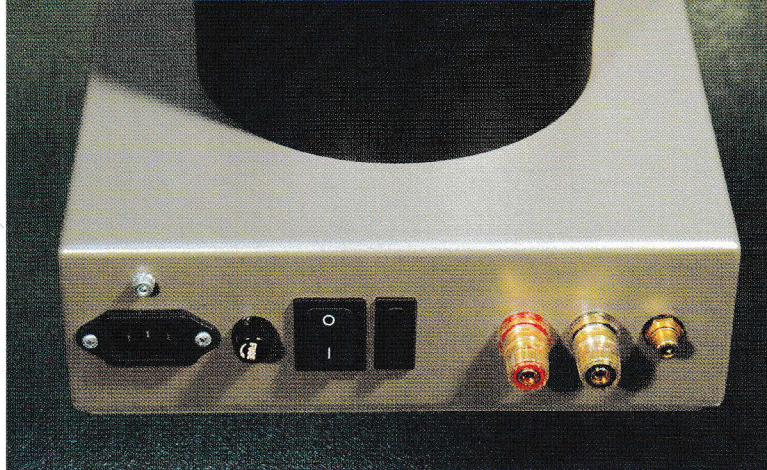
De essentie van de oorspronkelijke schematuur is dat de voorversterker en fasedraaier en stuurtrap van de eindbuizen zoveel mogelijk laag impedant uitgevoerd zijn. Dan heb je weinig last van Miller capaciteiten en wordt de bandbreedte groter dan het frequentiebereik van de uitgangstransformator. Ik heb die keuze gevolgd, en loste dat op door meer stroom door de voorbuizen te voeren. Hoe groter de stroomsterkte, des te lager zijn de inwendige buisweerstand en de bijbehorende anodeweerstand. In de audioschematuur (figuur 1) is die keuze duidelijk herkenbaar.

Bij buis 1 zijn de anodewestanden 2k5, en dat is voor een buizenversterker erg laag. De bovenste eerste buishelft versterkt, terwijl de onderste buishelft het versterkte signaal in fase omkeert. Sommigen zeggen dat de kathodeweerstand van de onderste buishelft ook met een elco overbrugd moet worden, maar die redenering is volgens mij onjuist. Via R8 en R9 wordt namelijk de effectieve versterking van de onderste buishelft gelijk gemaakt aan -1 (instelbaar met P4, de fase omkering



Frontaanzicht

Aansluitingen
achterkant



■ Wat is super triode eigenlijk?

De essentie van de super triode schakeling is dat er op twee plaatsen, tussen de eindbuis en de uitgangstransformator, zoveel locale tegenkoppeling wordt toegepast, dat de eindbuizen zich als triode buizen gaan gedragen. De versterkingsfactor wordt als die van een triode, maar ook de inwendige weerstand wordt gelijk. De eindbuizen gedragen zich dus als triode, maar er is nog wat extra's aan de hand. Normaal kan een als triode geschakelde pentode maar de helft van het pentode uitgangsvermogen leveren. In de super triode schakeling blijft het pentode vermogen nagenoeg volledig beschikbaar, terwijl alle andere al genoemde eigenschappen echte triode eigenschappen zijn. Deze schakeling is dus een slimme combinatie van veel vermogen en prachtige triode eigenschappen.

Dit wordt bereikt door de schermroosters via R19 en R20 te koppelen aan de ultra lineaire aftakkingen van de uitgangstransformator. Hiermee wordt al een aanzienlijke winst in lineariteit geboekt. Vervolgens worden de kathodes niet aan aarde verbonden, maar aan een extra wikkeling op de transformator. Daardoor treedt er nog eens 10% extra tegenkoppeling op, met de bijbehorende winst in lineariteit zonder verlies van uitgangsvermogen. Wel is dan een grotere wisselspanning op de stuurroosters nodig, maar ook die is vergelijkbaar met de benodigde wisselspanning om een triode aan te sturen. De twee kathodeweerstand R17 en R18 zijn uitsluitend bedoeld voor het kunnen meten van de ruststroom door de eindbuizen.

Deze schakeling is nog verder uitontwikkeld door Frank Mac Intosh die de kathode wikkelingen identiek maakte aan de primaire wikkelingen aangesloten op de anodes. Zo wordt er 100% kathode tegenkoppeling toegepast, waardoor de lineariteit zo groot is dat de eindbuizen zelfs in klasse B mogen staan. De eindbuizen worden dan nauwelijks warm en hun levensduur is groot.

In de hier besproken schakeling wordt de ringkern uitgangstransformator VDV-4070-CFB toegepast die een grote bandbreedte bezit, zowel richting lage als hoge frequenties. De grote primaire zelfinductie zorgt voor onvervormd diep laag weergave. De geringe lekinductie Lsp van ringkern trafo's gekoppeld aan een lage interne primaire capaciteit Cip zijn beiden de hoofdoorzaak van het uitmuntende gedrag van deze speciale transformator.

Aan de secundaire kant is een extra belasting van R21 + C7 opgenomen om stabiliteit bij hoge frequenties te garanderen. Bij de meeste luidsprekers loopt namelijk de effectieve impedantie op naarmate de frequentie

hoger wordt. Daardoor wordt in de omgeving van 100 kHz en hoger de transformator secundair nauwelijks belast, wat tot instabiliteit aanleiding kan geven. R21 plus C7 heffen deze instabiliteit op.

Ook is het mogelijk om totaal tegenkoppeling toe te passen met R22. Nu is de combinatie van locale plus totale tegenkoppeling gehoorsmatig niet altijd gunstig. De weerstand R22 heeft daarom bewust geen waarde gekregen. Het beste kan men zelf experimenteren beginnend bij $R22 = 10 \text{ k}\Omega$ en lager, waardoor de totale tegenkoppeling steeds meer toeneemt. Op het gehoor afstemmen is volgens mij de beste methode; ik heb zelf R22 niet gebruikt omdat de lineariteit en openheid al optimaal zijn.

■ De voeding

In de schakeling van de voeding zijn een paar bijzonderheden aan te wijzen. De voedingstransformator is een ringkern type met uiterst gering magnetisch lekveld. Daardoor kon ik de uitgangstrafo op het chassis en de voedingstrafo onder het chassis met één hoofdschroef vast zetten. Normaal moet je dat met EI-trafo's nooit doen, want het lekveld van de voeding dringt dan rechtstreeks in de uitgangstrafo door, met brom als het gevolg. Met de hier gebruikte trafo's treedt dat effect niet op, want er is nauwelijks een magnetisch lekveld. Opmerkelijk is de plaatsing van enkele 10 nF condensatoren bij de hoogspanningswikkeling. De eerste twee staan parallel aan de secundaire wikkeling en blokkeren daardoor hoogfrequent stoorsignalen die van de netspanning afkomen. Na de gelijkrichting volgt opnieuw een 10 nF condensator die eventuele schakelpulsen van de diodes hoogfrequent effectief naar aarde afvoert. In principe doet de grote elco van 330 μF dat ook, maar een snelle afzonderlijke C van 10 nF doet het nog beter. De eerste buis krijgt een gestabiliseerde spanning $V2 = 100 \text{ V}$ aangeboden. Stabilisatie met een gewone zenerdiode is hier echt voldoende terwijl de daarover geplaatste elco van 100 μF de zenerruis effectief en voldoende kortsluit.

De negatieve hulpspanning is zwaar gebufferd met 10.000 μF . Er loopt daar een aanzienlijke stroom en enige stoorspanning in de voortrap bij buis 2 is echt ongewenst. Na buis 1 is de versterker symmetrisch uitgevoerd, waardoor invloeden van rimpelspanningen op Vneg automatisch gecompenseerd worden, maar toch: voorkomen is beter dan genezen.

De gloeidraden zijn symmetrisch aan aarde gekoppeld door twee weerstanden van 100 Ω en verder valt er over deze voeding niet zoveel meer te zeggen.

■ Meetresultaten

Bij de meet evaluatie zijn de ruststromen door de beide eindbuizen ingesteld op $I_0 = 60 \text{ mA}$. Er staat dan in rust een spanning van 600 mV over R17 en R18. De maximale ruststroom mag 40 W (anode dissipatie) gedeeld door 385 V (V_0) = 104 mA bedragen, maar dan staan de anodes van de eindbuizen licht rood te gloeien en is hun levensduur kort.

De beide anodes van buis B1 hebben in rust een spanning van 77 V ten opzichte van aarde. De beide anodes van buis B2 staan op ongeveer 234 V ten opzichte van aarde. Bij zorgvuldige afregeling van de ruststromen, zodat ze exact (binnen 0,1 mA) aan elkaar gelijk zijn, verschijnt er op de luidsprekeruitgang een rest brom signaal van 3 mV_{eff}. Deze lage waarde is niet hoorbaar in de luidspreker, zelfs niet met het oor er pal tegen aan.

Als een luidspreker van 4 Ohm op de uitgang wordt aangesloten, versterkt de gehele versterker precies 50 maal. De ingangsgevoeligheid bedraagt dan 283 mV en dat is een vriendelijke waarde. Alle soorten bronnen, inclusief CD, kunnen rechtstreeks op de ingang worden aangesloten en een extra voorversterker is niet nodig. Gaat men met R22 extra tegenkoppelen, dan wordt de ingangsgevoeligheid 1 of 2 V en dan is een voorversterker wel gewenst.

Het -3dB frequentiebereik van de versterker start bij 8 Hz (invloed van C3,4 en R13,14) en loopt door tot 60 kHz. Ik had verwacht dat aan de hoogfrequente kant het bereik wat groter zou zijn, omstreeks 100 kHz. Tot nu toe heb ik de oorzaak van de 60 kHz niet kunnen achterhalen, vermoedelijk heeft de lay-out hiermee te maken. In een later stadium heeft Menno van der Veen de versterker ook nog eens doorgemeten. Hij ontdekte dat bij de hier gebruikte instelling het tweede orde filter van Lsp en Cip van de uitgangstrafo en eindbuizen een Q-factor heeft de zelfs kleiner is dan 0,5. Dit betekent dat de versterker hoogfrequent meer dan kritisch gedempt is, en daardoor ook een geringer frequentiebereik heeft. De tijd ontbrak echter om hier nader aandacht aan te besteden en gehoorsmatig is een -3 dB bereik tot 60 kHz meer dan voldoende, vooral omdat het bereikt wordt zonder enige totaal tegenkoppeling. De invloed van P2 (symmetrie fasedraaier) is gering, zoals voorspeld werd. Buis B2 symmetriseert echt de eventuele afwijkingen van de fasedraaier. Een en ander is duidelijk zichtbaar in de meting van de blok golfweergave met een frequentie van bijvoorbeeld 70 Hz, uitgestuurd tot net aan het maximum vermogen. Er is geen enkele uitslingering van deze blok golf op het oscilloscoop scherm zichtbaar.

Ik had bij de berekening van deze versterker bepaald dat het uitgangsvermogen maximaal 50 W zou bedragen. Vandaar de naam ST50. De metingen lieten iets minder vermogen zien, namelijk 42 W en 46 W als in de voeding de weerstand van 15 Ohm na S2 overbrugd wordt. In de berekeningen had ik V_0 op 405 V gesteld. Onder

belasting wordt V_0 echter 385 V, waarmee de afwijking tussen berekening en meting voldoende wordt verklaard. De voedingsspanning zakt iets meer naar beneden dan ik had verwacht. Bij nader inzien kan men de eerder genoemde 15 Ohm weerstand misschien beter weglaten, alhoewel hij keiharde inschakelstromen bij de voeding voorkomt. Zoals gewoonlijk is er aan alles een plus en een min kant.

De gemeten uitgangsimpedantie bedraagt $Z_{uit} = 2,8 \text{ Ohm}$. Dus de dempingsfactor $DF_4 = 4 / 2,8 = 1,4$. Dit is een typische buizenwaarde en toch, ondanks dat, klinkt de basweergave snel en doortekend.

■ Subjectieve evaluatie

De versterker klinkt doodstil, geen brom of ruis te horen. Hij klinkt niet alleen bij de bastonen snel, maar ook bij alle frequenties. Het luistergedrag is alsof je naar een klasse A versterker luistert, terwijl we hier echt met een klasse AB versterker hebben te maken. Als je de ruststromen nog groter maakt, dan breidt het klasse A werkgebied zich uit. De door mij gebruikte 60 mA is een heel goede balans tussen levensduur van de buizen en detaillering en rust van het geluid. Een stroom van 100 mA is iets beter, maar je ziet de buizen voor je ogen slijten, en dat voel je in je beurs. Het ruimtelijk beeld is opmerkelijk open en gedetailleerd en geeft de instrumenten met juiste dimensie weer. De weergave van pulsvormige signalen is vlekkeloos. Er verschuift niets in het geluidsbeeld, de versterker blijft volledig in rust. De ST50 produceert geen hoorbare harmonische of intermodulatie vervorming. Op alle niveaus en alle frequenties blijft het geluid strak en schoon. Voor mij is de ST50 een paradepaardje, bloedmooi!

■ Met dank aan

Bij de bouw van deze versterker heb ik de nodige steun gekregen. De medewerkers van het bedrijf Brakel Interieurgroep (zie 3)), met name de tekenaar Edwin Nater, hebben mij geholpen om de prachtige stalen kast te maken. Menno van der Veen heeft de versterker ook doorgemeten en subjectief beoordeeld. Hij beaamde de door mij alhier genoemde resultaten. Hij vond zijn eigen SPT70 ontwerp iets beter qua rust in de voeding en automatische instelling van de ruststroom, maar de ST50 vond hij veel gemakkelijker nabouwbaar. Dus heb ik dat doel bereikt.

Literatuur, Bronnen

- 1) Menno van der Veen: "High-End Buizenversterkers 2"; hoofdstuk 8; Segment; ISBN 90-5381-204-0
- 2) vragen: fpaets@gmail.com
- 3) www.brakelgroup.com
- 4) www.amplimo.nl : bestellen van de trafo's

