

EEN LEGENDE HERLEEFT

Gerhard Haas



De legendarische LF-vermogenspentode EL156 was heel robuust en werd daarom vooral in professionele versterkerinstallaties gebruikt. Niet alleen ziet de buis er schitterend uit, maar ook de goede LF-eigenschappen zijn bepaald verleidelijk voor veel elektronici. Een goede reden dus om hiermee een eindtrap te ontwerpen, met enerzijds de blik gericht op klassieke schakelingen en anderzijds gebruikmakend van moderne kwaliteitsonderdelen.

De EL156 werd in de beroemde buizenfabriek van Telefunken in Ulm aan de Donau gemaakt. Met de EL156 waren vermogensversterkers tot 130 W uitgangsvermogen mogelijk. Daarvoor waren slechts twee eindbuizen en een voorversterker annex fase-draaier nodig, in totaal dus drie buizen.

Originele exemplaren van de EL156 zijn nieuw niet meer te koop en gebruikte vrijwel niet. In ieder geval zijn ze onbetaalbaar. De originele buis zat in een metalen voet die overigens wel weer verkrijgbaar is. Tot nu toe zijn er geen nieuwe ontwerpen met deze buis op de markt verschenen

omdat ze praktisch niet verkrijgbaar was. Dat is nu echter veranderd!

Buizen uit China

Het is toch werkelijk verbazingwekkend, dat deze buis nu in China weer wordt gemaakt, nota bene met de oor-

HiFi-buizeneindtrap met EL156

spronkelijke Telefunken-machines. Eén verschil is er wel, de buis past nu in een octal-voet in plaats van een staalbuisvoet. De aansluitingen zijn gelijk aan de EL34, 6L6, KT88 e.d. De buis is niet echt goedkoop, maar voor een echte fan is de prijs overkomelijk en ze is vrij goed verkrijgbaar. De benodigde octal-voeten zijn er zelfs in meerdere uitvoeringen. In vergelijking met de originele Telefunken buis scoort de 'replica' zowel mechanisch als elektrisch zeer goed. Het is daarom een heel aantrekkelijke gedachte om hem te gebruiken in een nieuw eindversterkerontwerp.

Voordat we met de beschrijving van dit ontwerp beginnen, moeten we eerst op enkele bijzonderheden van deze buis ingaan. In een kader hebben we de belangrijkste gegevens van de bekende EL34 naast die van de EL156 gezet. Hieruit zijn dan al direct de hoofdlijnen af te leiden waaraan het ontwerp moet voldoen. Zo moet voor een groot uitgangsvermogen de anodespanning bijna tweemaal hoger zijn dan de schermroosterspanning. Verder moet de stuurtrap een lage uitgangsweerstand hebben om de laagohmige lekweerstand van de stuurroosters 'aan te kunnen'. De veel gebruikte ECC83 is dus niet bruikbaar omdat die met slechts ongeveer 1 mA kan worden gebruikt. De LF-dubbeltriode ECC82 zou door de anodestroom van 10 mA in het werkpunt gebruikt kunnen worden, maar de versterking van $\mu = 17$ is te weinig voor voldoende ingangsevoeligheid en laat ook te weinig ruimte voor de tegenkoppeling. Bruikbaar is wel de ECC81 die met een anodestroom van 10 mA kan worden gebruikt en daarmee voldoende laagohmig is en die bovendien een versterking van $\mu = 60$ heeft.

Met twee EL156's kan 130 W uitgangsvermogen worden geproduceerd met een vervorming van ongeveer 6%. Onze schakeling is niet voor dit maximale vermogen ontworpen, maar voor een iets lager omdat de buizen dan veel langer meegaan en de kans op storingen kleiner is. Bovendien is 100 W aan hifi-vermogen toch veel aantrekkelijker dan 130 W met 6% vervorming, waarvan het

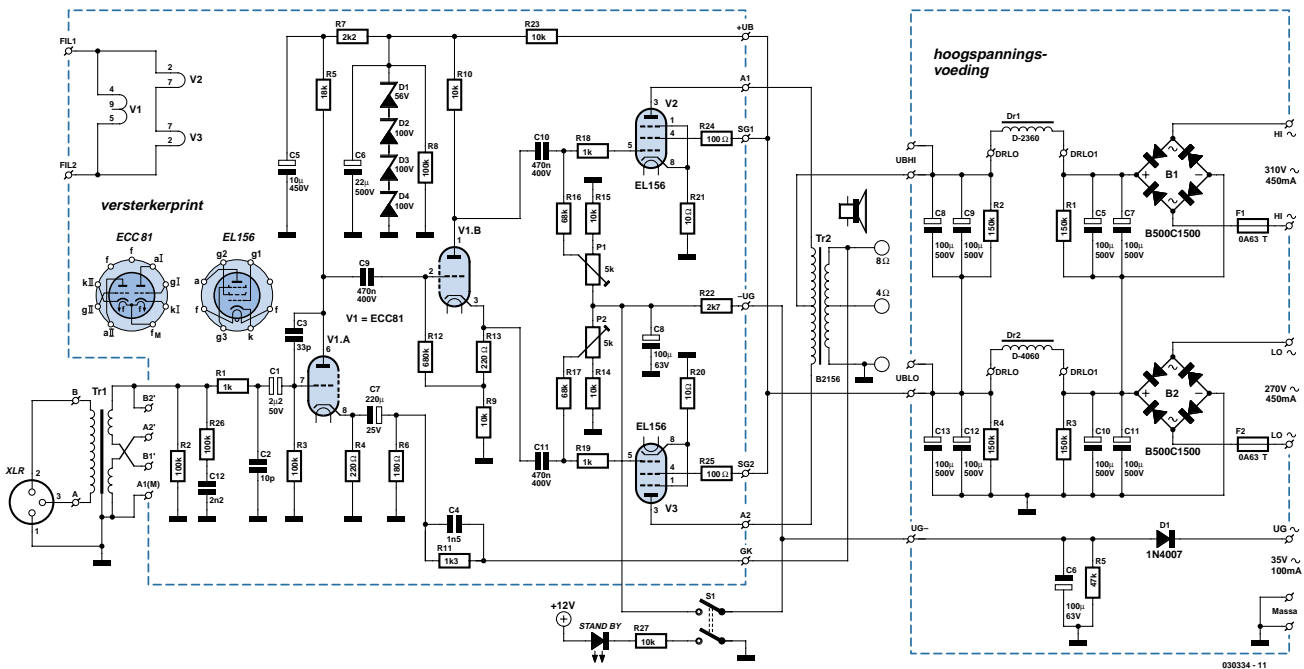
overgrote deel derde harmonischen. De schakeling wordt op vier printen opgebouwd en is als monoblok uitgevoerd. In **figuur 1** zijn het voedingsdeel (hoogspanning en negatieve roosterspanning) en de versterker zelf te zien. Vanwege de hoge anodespanning worden in serie geschakelde afvlakelco's gebruikt. De schermroosterstromen van de EL156's zijn relatief gezien vrij hoog, daarom worden twee galvanisch gescheiden transformatorwikkelingen gebruikt om twee afzonderlijke hoogspanningen op te wekken (Hi en Lo). Direct na de bruggelijkrichters worden deze spanningen in serie geschakeld en individueel gefilterd. Voor de anodespanning wordt smoorspoel Dr1 (2,3 H) gebruikt die 300 mA kan voeren en voor de schermroosters smoorspoel Dr2 (4 H) met 180 mA belastbaarheid. De voorversterkerbuis wordt ook uit de schermroosterspanning UBLo gevoed. De schermroosterspanning moet goed zijn gefilterd, want eventuele bromrestanten komen versterkt op de anode terecht (het schermrooster is immers een soort stuurrooster). Met de aangegeven waarden is de filtering heel goed en is de versterker vrijwel bromvrij. Er worden staande elco's van 100 μ F/500 V gebruikt, die zeer bedrijfszeker zijn, voldoende spanningsreserve hebben en een compacte opbouw van de voeding mogelijk maken. Parallel aan de elco's zijn ontlaadweerstand geschakeld; onmisbaar voor de veiligheid. De negatieve roosterspanning wordt enkelfasig gelijkgericht met D1 en afgevlakt met C6, op de versterkerprint is nog een filtertrap aanwezig.

De maximale anodespanning van de EL156 (en de EL34) is veel hoger dan de maximale schermroosterspanning. Dat is dan ook de reden dat voor een groot uitgangsvermogen ultralineaair gebruik niet mogelijk is, want dan is een hoge anodespanning een noodzakelijkheid. Dat is tevens de reden dat door de dimensionering van de uitgangstransformator, de roosterlekweerstand - in vergelijking met de meeste andere buizenschakelingen - heel laagohmig moet zijn. Maximaal is 100 k Ω toegestaan, hier is er voor een

lagere waarde gekozen omdat dan ook buizen met een grotere tolerantie kunnen worden gebruikt. Het is dus niet nodig om geselecteerde - gepaarde - buizen te gebruiken.

Door de lage ingangsimpedanties is het nodig om de koppelcondensatoren C9...C11 een vrij hoge waarde te geven (470 nF) om de karakteristiek tot in de lage frequenties te laten doorlopen. De ingangs- en de fasedraaiertappen (V1a en V1b) hebben relatief lage anode- en kathodeweerstanden. De voedingsspanning voor deze beide trappen wordt door zenerdiode-keten D1...D4 gestabiliseerd. Daardoor zijn de gelijkstroominstellingen onafhankelijk van de onvermijdelijke spanningsfluctuaties bij de sturing van de eindbuizen. R1 en C2 vormen een HF-filter. Parallel aan de tegenkoppelweerstand R11 is C4 opgenomen om HF-oscillaties te onderdrukken. Daartoe dient ook C3 tussen de anode en het stuurrooster van V1a. De weerstanden R4 en R6 zijn voor wisselstroom parallel geschakeld en vormen met tegenkoppelweerstand R11 een spanningsdeler die bepalend is voor de totale versterking. De tegenkoppeling is trouwens vrij laag, wat volgens sommige audiofielen gunstig is voor de klankeigenschappen.

Aan de ingang van de versterker is transformator E-1220 (Tr1) opgenomen, die de spanning 2x omhoog transformeert. Enerzijds wordt daardoor voldoende ingangsevoeligheid gewaarborgd en anderzijds is een galvanische scheiding mogelijk. Aardvrije symmetrische of quasi-symmetrische LF-verbindingen zijn principieel storingsvrij en voorkomen brom tengevolge van aardlussen. Door de 1:2 transformatieverhouding wordt ruisvrij 6 dB aan versterking gewonnen en is er wat meer reserve voor de tegenkoppeling. De print is trouwens zo ontworpen dat deze trafo ook in 1:1 kan worden gebruikt, maar dan is een tweemaal hogere ingangsspanning nodig voor volle uitsturing. De gewenste transformatieverhouding kan door draadbruggen worden gekozen. Door RC-filter C12/R26 wordt het frequentieverloop van de trafo in de hoge regionen gelineariseerd.



Figuur 1. Het hart van de buizen eindtrap met uitgangstransformator en hoogspanningsvoeding.

Standby-mogelijkheid

Buizenversterkers zijn vaak uitgerust met een zogenaamde standby-mogelijkheid. Daartoe wordt om de eindbuizen te sparen meestal de anodespanning uitgeschakeld, terwijl alle overige spanningen aanwezig blijven. De buizen blijven dus ook gloeien. Na het weer inschakelen van de anodespanning is de versterker onmiddellijk bedrijfsklaar. Door de hoge anodespanning kan geen

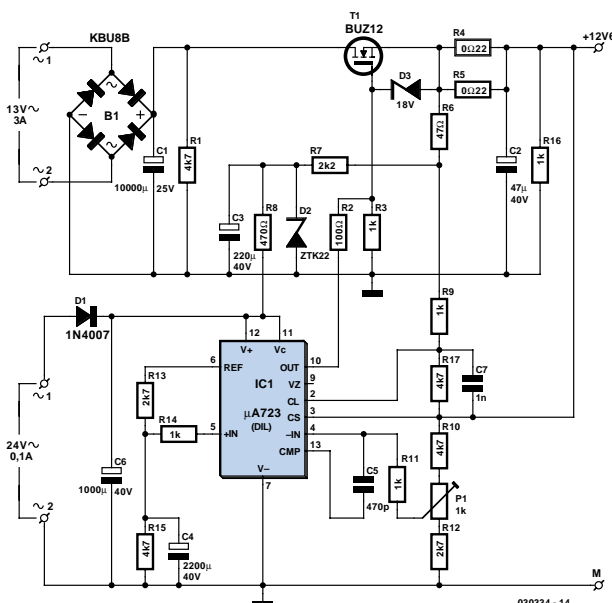
normale netschakelaar of een relais worden gebruikt. Hier wordt door de standby-schakelaar weerstand R22 overbrugd, waardoor de negatieve roosterspanning van de eindbuizen wordt verhoogd (negatiever wordt). Dan loopt er nog maar een heel lage ruststroom. Volgens sommige buizen-databoeken is dat gunstiger dan het uitschakelen van de anodespanning, omdat dan met de tijd de emissie van de kathode slechter wordt. Voor de standby-schakelaar wordt een dubbel-poolig type gebruikt. Een helft dient

voor de standby-functie, de andere helft wordt gebruikt om een LED te laten branden ter indicatie dat standby actief is. De LED wordt uit de gloei-spanning gevoed.

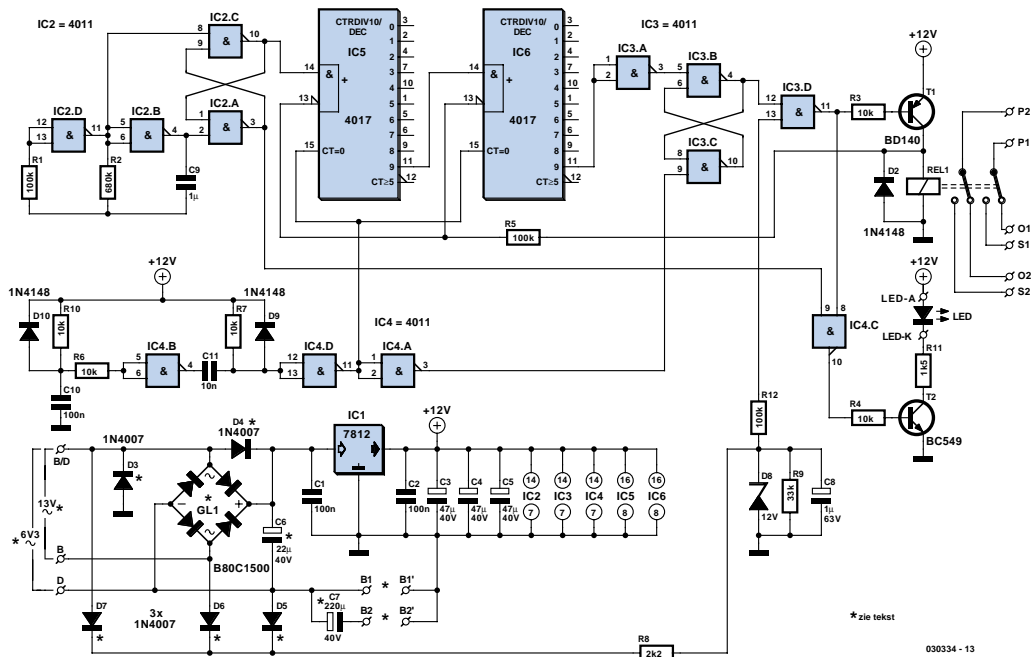
Gelijkstroomverhitting

Om zelfs de kleinste kans op brom te vermijden worden de gloeidraden van de buizen met gelijkstroom gevoed. Daarvoor wordt de welbekende 723-spanningsregelaar gebruikt in combinatie met een MOSFET (figuur 2). Belangrijk is dat de dissipatie van de regelaar klein is en daarom worden de gloeidraden van de twee EL156's in serie geschakeld. Bij de ECC81 zijn de gloeidraden van de twee triodes al in serie geschakeld, zodat deze buis zonder meer met 12,6 V kan worden gevoed. Bij een tweemaal hogere spanning (12,6 V in plaats van 6,3 V) is de stroom half zo groot, waardoor alleen al in de gelijkrichter de verliezen veel kleiner worden. De schakeling is zodanig opgezet dat ook T1 weinig dissipatie heeft.

Door een slimigheid wordt de stroombegrenzing van de 723 bij een lagere spanningsval actief dan normaal het geval zou zijn. De 723 bevat een transistor voor de stroombegrenzing, waarvan de basis/emitter-overgang parallel is geschakeld met de stroomsensor-weerstanden R4/R5. Een silicium transistor begint bij een spanning van ongeveer 0,6 V tussen basis



Figuur 2. Het voedingsgedeelte voor de gloeidraden van de buizen.



Figuur 3. De inschakelvertraging onderdrukt plop- en bromgeluiden.

en emitter te geleiden. Hier krijgt de basis via R7 en R8 een kleine voorspanning die door de (temperatuurgecompenseerde) zenerdiode D2 wordt gestabiliseerd. Zo treedt de stroombeperking al bij een vrij lage spanningsval over R4/R5 in werking.

De referentiespanning van de 723 (pen 6) wordt door R13 en R15 gedeeld. Door C4 wordt de ruis verminderd, maar de waarde ervan is veel hoger dan daarvoor nodig is. De reden van de hoge waarde (2200 μ F) is dat daardoor de referentiespanning op pen 6 heel langzaam in waarde stijgt, waardoor ook de gloeispanning langzaam toeneemt. Een 'softstart' eigenlijk. Voor T1 is een vermogens-FET BUZ12 gebruikt, die ruim voldoende stroom kan leveren en een $R_{\text{DS(on)}}$ van slechts 28 m Ω heeft.

Het is belangrijk dat tussen de kathode en de gloeidraad van de buizen geen hoog spanningsverschil bestaat. Dat zou tot spanningsoverslag kunnen leiden. Daarom moet de 'min' van de gloeidraadvoeding worden verbonden met de 'min' van de hoogspanning.

In- en uitschakelen

Bij het aanzetten en 'warmlopen' van de eindtrap worden de afvlak- en koppelcondensatoren ongelijk opgeladen, wat brom- en plop-geluiden kan veroorzaken. Deze verschijnselen worden door de schakeling in **figuur 3** onderdrukt. De uitgang van de versterker

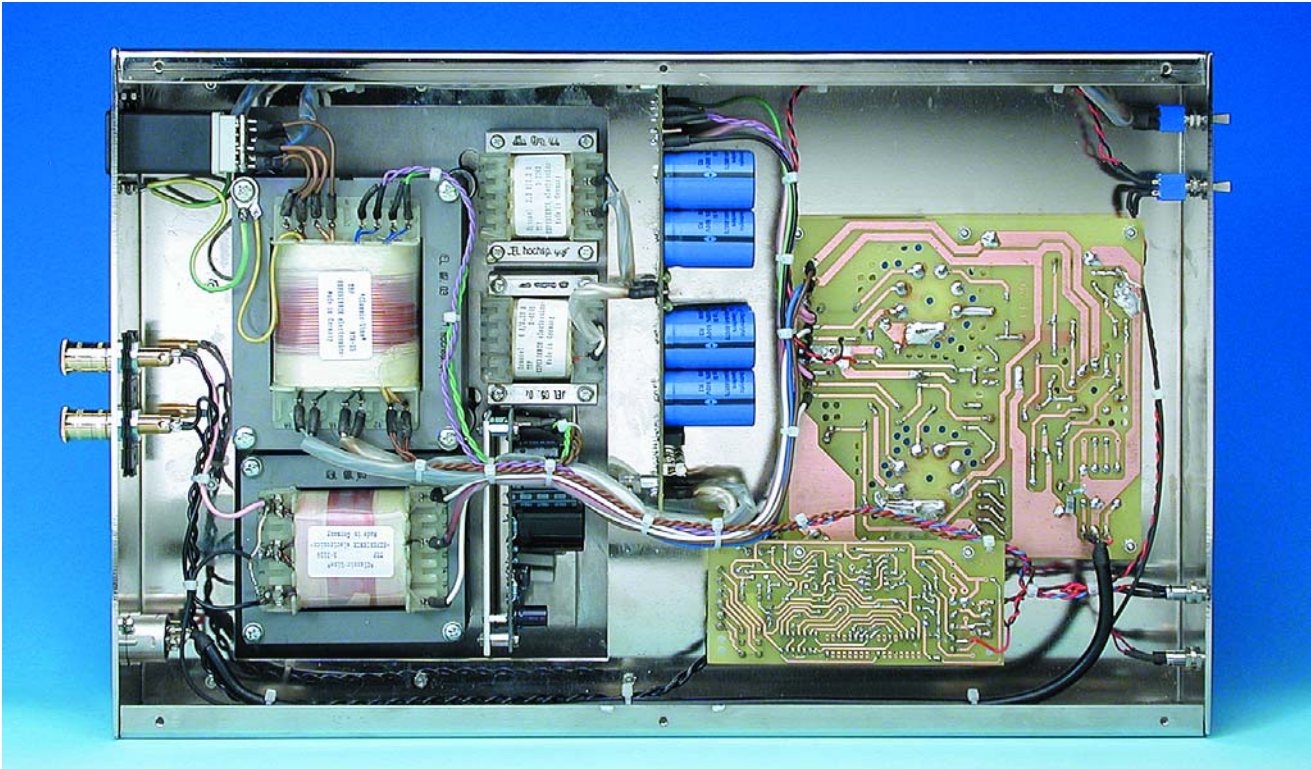
wordt door relaiscontacten namelijk in eerste instantie kortgesloten gehouden, wat de eindbuizen zonder problemen verdragen. Na een bepaalde tijd wordt het relais bekrachtigd en de kortsluiting opgeheven. Als de versterker in bedrijf is, zijn er geen relaiscontacten in het signaalpad. Op de print is plaats voor een relais met twee omschakelcontacten, waardoor de schakeling ook voor andere toepassingen zoals stereo-eindtrappen kan worden gebruikt.

De schakeling wordt (in ons geval) gevoed uit de 13-V-gloeidraadwikkeling van de transformator en neemt maximaal 200 mA op. De meeste bestaande versterkers hebben echter alleen een 6,3-V-gloeispanning en ook dan kan de schakeling worden gebruikt, omdat in de mogelijkheid is voorzien om spanningsverdubbeling toe te passen. De opgenomen stroom is dan wel meer dan tweemaal zo hoog, dus de gloeidraadwikkeling moet in staat zijn om deze extra stroom te leveren. Afhankelijk van de keuze van de voedingsspanning (13 of 6,3 V) moeten bepaalde onderdelen worden gemonteerd of weggelaten. Op de print-layout (beschikbaar op www.elektuur.nl) is dit aangegeven.

Inschakelen

Zodra de spanning opkomt, wordt C8 via R8 opgeladen en wordt pen 13 van IC3d hoog. Ook C10 wordt via R10 opgeladen en als de schakeldrempel

van IC4b wordt overschreden, wordt de uitgang laag en levert via C11/R7 een korte negatieve puls op de ingang van IC4d. Door de positieve puls op de uitgang worden de 4017-tellers gereset, door IC4a wordt de positieve puls nogmaals geïnverteerd en reset dan flipflop IC3b/c waardoor de uitgang daarvan (pen 4) laag wordt - als dat al niet het geval was. Het voorlopige resultaat van dit alles is dat de uitgang van IC3d hoog blijft, transistor T1 spt en het relais onbekrachtigd is. De rustcontacten zijn gesloten en de uitgang van de versterker blijft kortgesloten. IC2d en IC2b vormen een blok golfgenerator, de frequentie van ongeveer 1 Hz wordt bepaald door C9/R2. Door flipflop IC2a/c wordt het blok golf signaal gebufferd en als klok gebruikt voor de twee in serie geschakelde tellers IC5/6. Na 100 klokpulsen wordt via inverter IC3a flipflop IC3b/c gezet, waardoor de uitgang van IC3d laag wordt. De collector van T1 wordt hoog en het relais trekt aan. De kortsluiting is nu opgeheven en het audiosignaal bereikt de speakers. Door de collectorspanning die nu hoog is, worden via R5 de tellers geblokkeerd. Tijdens de inschakelprocedure is een ingang (pen 8) van IC4c hoog en op de andere ingang (pen 9) staat het blok golf signaal. De LED knippert in een 1-Hz-ritme. Na afloop van de inschakelprocedure wordt ingang pen 8 laag; de uitgang van IC4c blijft nu hoog en de LED brandt continu.



Figuur 4. De versterker gezien vanaf de onderkant.

Uitschakelen

Als de eindtrap wordt uitgeschakeld, levert de transformator geen spanning meer. De spanning over C8 valt snel weg (wordt niet meer geladen via R8 en D5/D6) en het relais valt af. Bij 6,3 V wordt trouwens C8 geladen

via R8 en D5/D7. Door D10 en D9 worden respectievelijk C10 en C11 snel ontladen. Onafhankelijk van het feit of de netspanning onmiddellijk weer wordt aangezet of pas veel later, toch moet altijd de hele cyclus worden doorlopen.

Bouw

De mono-eindtrap bestaat uit drie printen en een aantal inductieve onderdelen die, zoals in **figuur 4** is te zien, samen in een behuizing worden gemonteerd. Voor het prototype is een naadloos gelaste aluminium behuizing

EL34 en EL156 vergeleken

Parameter	Symbol	EL34	EL156	Eenheid
Gloeispanning	U_f	6,3	6,3	V
Gloeistroom	I_f	1,5	1,9	A
Maximale anodespanning	U_{amax}	800	800	V
Maximale kathodestroom	I_{kmax}	150	180	mA
Maximale anodedissipatie	P_{Vmax}	25/27,5	40	W
Maximale schermroosterdissipatie	P_{vg2}	8	8/12	W
Schermroosterstroom	I_{g2}	11/22	5/25	mA
Maximale schermroosterspanning bij AB-bedrijf	U_{g2max}	425	350	V
Negatieve roosterspanning	U_{g1}	-39	-24	V
Roosterwisselspanning	U_{g1AC}	23	18	V
Steilheid	S	11	13	mA/V
Inwendige weerstand	R_i	15	20	k Ω
Maximale roosterlekweerstand	R_{g1max}	700	100	k Ω

De waarden zijn deels afgerond en moeten als indicatie worden gezien, omdat in de databoeken niet altijd identieke waarden worden vermeld. De waarden achter de schuine streep gelden bij uitsturing.

De EL34 en EL156 zijn echte LF-pentodes en geen beam-power-tetrodes zoals de 6L6, KT88 of de 6550. De buizen lijken veel op elkaar, maar enkele belangrijke parameters verschillen wel. De EL156 trekt ongeveer 27% meer gloeistroom, maar de maximale kathodestroom is ook circa 20% hoger. Verder is de maximale anodedissipatie ongeveer 60% groter dan van de EL34. Een hogere inwendige weerstand, grotere steilheid, hogere stroom en een lagere negatieve roosterspanning zijn typische eigenschappen van de EL156. Verder is de roosterwisselspanning voor volledige uitsturing lager dan die van de EL34. Door deze eigenschappen heeft de EL156 een hogere versterking



Figuur 5. Sfeervol: De EL156 in werking.

gebruikt. Het aluminium is vernikkeld en glanzend gepolijst. Door aluminium in plaats van staal te gebruiken worden magnetische vervormingen voorkomen ten gevolge van de magnetevelden van de transformatoren. Alle massa-aansluitingen van de schake-

ling moeten bij de versterkerprint samen komen en worden van daaruit met een enkele verbinding met het aardpunt van de behuizing verbonden: een aan de behuizing vastgeschroefd soldeeroog. Dat is nodig omdat anders de behuizing als antenne werkt en de

versterker broemt. Vanwege de hoge spanningen die worden gebruikt is het beslist noodzakelijk om een geaard stopcontact te gebruiken en de behuizing met de randaarde te verbinden. Ter voorkoming van aardslussen moeten alle in- en uitgangconnectoren van de

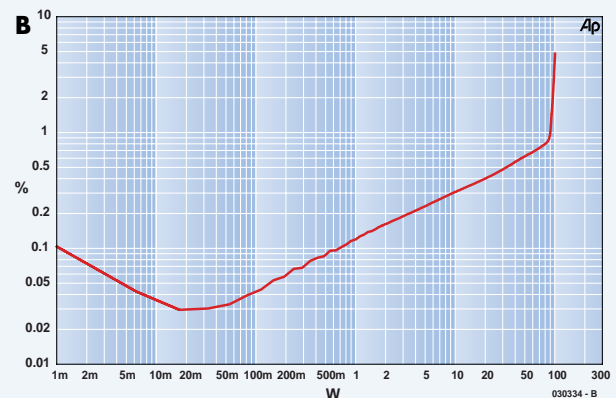
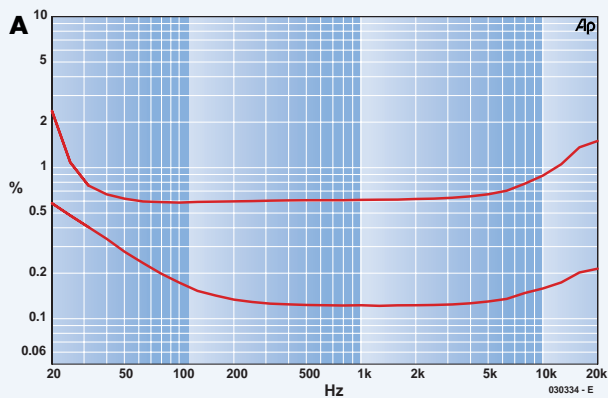
dan de EL34, zodat in de driver-trappen één dubbeltriode toereikend is om het grote uitgangsvermogen te bereiken.

Voor een groot vermogen moet bij beide buizen op enkele details worden gelet. Bij een hoge voedingsspanning moet de schermroosterspanning een bepaalde maximale waarde hebben. Verder is meestal een vaste negatieve roosterspanning nodig. De maximaal toelaatbare waarde van de roosterlekweerstand is bij de EL156 veel lager als bij de EL34. Deze waarde staat in de datasheets van de buizen. Theoretisch kan een buis 'vermogensloos' worden gestuurd. In de praktijk is er altijd wel sprake van enige roosterstroom die effectief moet worden afgevoerd. Bij het ontwerp van de stuurtrap moet hier terdege rekening mee worden gehouden. Verder is voor een efficiënte werking van de EL156 een voldoende hoge anodespanning nodig. Met een buis van een dergelijk kaliber en met zo'n prijskaartje willen we toch wel vermogen! In een triodeschakeling in een AB-balansschakeling is slechts circa 30 W vermogen bereikbaar. Voor een groot vermogen moet in een AB-balansschakeling de schermroosterspanning een vaste waarde van ongeveer 350 V hebben. Bij de EL34 is dat ruim 400 V.

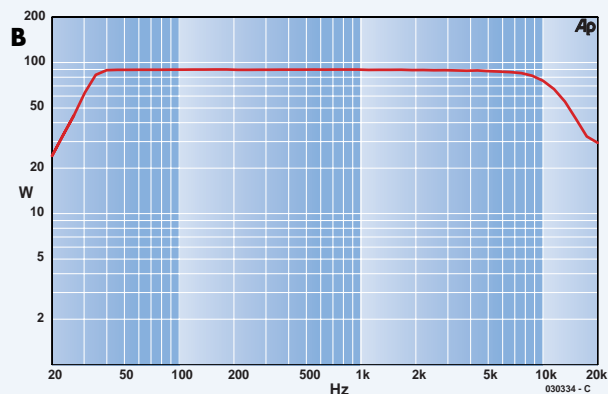


De prestaties

Meetwaarden (alle metingen met 8 Ω belasting)				
Parameter	Voorwaarden		Meetwaarde	Eenheid
Ingangsgoedigheid	90 W, 1 % THD+N		1,4	V _{eff}
Ingangsimpedantie	20 Hz		4	kΩ
	1 kHz		9	
	20 kHz		1,08	
Sinusvermogen	1% THD+N		90	W
Bandbreedte	-3 dB, 1 W		41	kHz
Stijgsnelheid	tijd 10 μs		5	V/μs
Signaal/ruis-verhouding	bij 1 W, B = 22 Hz ... 22 kHz		88	dB
			102	BA
Harmonische vervorming en ruis bij bandbreedte 80 kHz	1 W	1 kHz	0,12	%
		20 kHz	0,21	
	50 W	1 kHz	0,6	%
		20 kHz	1,43	
Intermodulatievervorming	50 Hz : 7 kHz = 4:1	1 W 50 W	0,5 2,6	%
Dynamische intermodulatievervorming	blok golf 3,15 kHz met sinus 15 kHz	1 W	0,064	%
		50 W	0,33	
Dempingsfactor	1 kHz 20 kHz			-
			2,9 2,3	

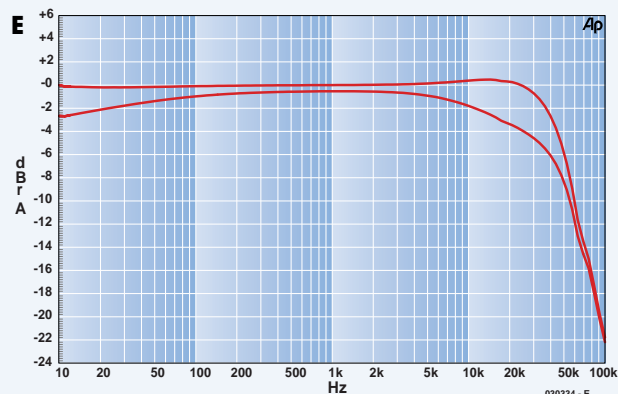
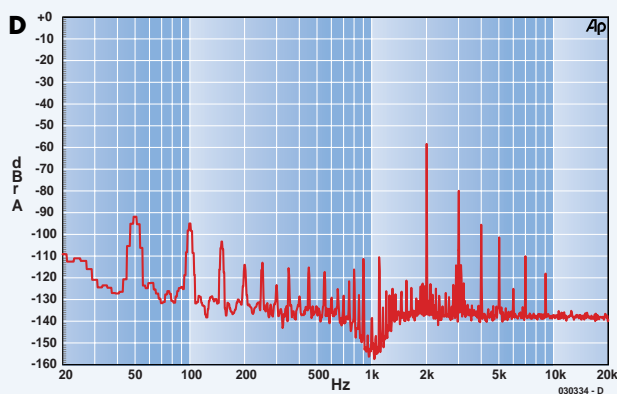


Figuur A laat de totale harmonische vervorming plus ruis (THD + N) zien als functie van de frequentie bij uitsturingen van 1 W respectievelijk 50 W. De meting is gedaan bij een bandbreedte van 80 kHz. Zoals te verwachten is bij buizeneindtrappen, neemt de vervorming toe door toenemende verzadiging van het ijzer van de uitgangstransformator. Dat is niet echt een probleem, omdat ons gehoor ongevoeliger is voor lage frequenties, waardoor wat hogere vervormingen niet als storend worden ervaren.



Figuur B laat de vervorming als functie van de uitsturing zien. Vanaf 18 mW neemt de vervorming snel toe en vanaf 50 mW zijn het hoofdzakelijk harmonischen. De meting is met een bandbreedte van 22 Hz...22 kHz gedaan, hoofdzakelijk om bij een laag niveau de invloed van de harmonische vervorming beter uit te laten komen. Bij 90 W is de versterker volledig uitgestuurd.

Figuur C laat het maximale vermogen als functie van de frequentie zien bij een bandbreedte van 80 kHz, waarbij de analyser de vervorming constant houdt (hier 1%), door het ingangsniveau bij te regelen. Zowel bij de lage als de hoge frequenties vermindert de maximale uitsturing. Voor de hoge frequenties is dat geen probleem omdat daar toch minder vermogen nodig is. Dat is niet het geval onder 40 Hz, omdat voor lage tonen juist wel flinke vermogens nodig zijn.



De vervorming in de spectrumanalyse van een 1-kHz-sinussignaal bij een uitgangsvermogen van 1 W, zoals **figuur D** laat zien, komt vrijwel geheel op het conto van de tweede harmonische bij -58,3 dB. De derde harmonische is al -80 dB, alle andere evenals de netrimpel liggen onder -90 dB. De netrimpel wordt hoofdzakelijk door het magneetveld van de transformator veroorzaakt, anders zou de 100-Hz-component sterker zijn geweest.

Figuur E tenslotte laat de invloed van deingangsschakeling van de versterker zien (de trafo met het daarachter geschakelde correctienetwerk R26/C12). Als de uitgangsimpedantie van de voorversterker hoger is dan 50 Ω neemt de invloed van deingangsimpedantie van de eindversterker duidelijk toe. De bovenste frequentie karakteristiek loopt vrij netjes bij een impedantie van 20 Ω , terwijl bij 600 Ω de frequentie karakteristiek aan de hoge en lage kant duidelijk afvalt.

behuizing geïsoleerd zijn en behalve het ene eerder genoemde punt van de schakeling mogen geen andere punten met de behuizing zijn verbonden.

Voor de verbinding van de relaiscontacten met de luidsprekeruitgang moet draad worden gebruikt met een doorsnede van minstens 0,5 mm². Te dun draad heeft te veel weerstand, waardoor de inschakelgeluiden niet volledig worden onderdrukt. Voor de gloeidraadverbindingen wordt draad met een doorsnede van 1,5 mm² gebruikt, voor de massaverbindingen minimaal 0,75 mm², voor de hoogspanning 0,5 mm² en voor de overige verbindingen 0,25 mm².

Nadat men er zich van overtuigd heeft dat alles op de juiste wijze is opgebouwd en verbonden, worden eerst de hulpspanningen gecontroleerd. De zekeringen voor de hoogspanning worden verwijderd voor het geval ze al geplaatst waren. Na het inschakelen van de netspanning moet op de buisvoeten vrijwel direct de negatieve roosterspanning aanwezig zijn. Controleer dan eerst of deze spanningen met de instelpotentiometers regelbaar zijn en zo ja, stel ze in op de maximale negatieve waarde. Dan wordt de gloei spanning getest en afgeregeld op 12,6 V. Als de spanning wel regelbaar is over een bereik van 2 à 3 V, maar niet op 12,6 V kan worden afgeregeld, dan moet weerstand R10 respectievelijk R12 worden aangepast. Dan kunnen de buizen in hun voeten worden gedrukt en na korte tijd moeten de gloeidraden oplichten zoals in **figuur 5** is te zien.

De volgende stap is het testen met hoogspanning. Essentieel daarbij is een belastingsweerstand van minstens 150 W op de uitgang van de versterker.

De hoogspanningszekeringen mogen alleen worden geplaatst als de versterker is uitgeschakeld, dat spreekt voor zich. Parallel aan de belastingsweerstand wordt een oscilloscoop geschakeld als monitor, waarna de versterker wordt aangezet. Na de warmlooppfase worden de ruststromen van de eindbuizen ingesteld. Daartoe worden met een multimeter afwisselend de spanningen over de kathodeweerstanden R20 en R21 gemeten. Beetje bij beetje verdraait men de instelpotentiometers van V2 en V3 tot de spanningen 450 mV zijn. Dat komt voor iedere buis overeen met 45 mA. Dan wordt op de ingang een sinusgenerator met een 1-kHz-testsignaal aangesloten. De sterktegeleer, die op 'nul' was gezet, wordt nu heel langzaam open gedraaid terwijl men op de oscilloscoop het uitgangssignaal bekijkt. Totdat de versterker gaat vastlopen mogen er geen vervormingen of oscillaties zichtbaar zijn. Bij

oscillaties is waarschijnlijk de bedrading niet helemaal correct. Vooral onjuiste massaverbindingen kunnen oscillaties oorzaken.

Als direct na het inschakelen en warmlopen de versterker begint te oscilleren met een frequentie van circa 100 Hz - op de oscilloscoop is dan een vervormde blokgolf te zien en de uitgangstransformator en de eindbuizen beginnen te brommen - schakel dan onmiddellijk de versterker uit. Dan is er namelijk sprake van meekoppeling in plaats van tegenkoppeling. Dat kan eenvoudig worden gecorrigeerd door van de uitgangstransformator anode 1 en anode 2 te verwisselen. Als de versterker direct wordt uitgezet, is de kans op schade vrijwel nihil.

(030334)

De print-layouts en componentenopstellingen zijn in dit artikel uit plaatsoverwegingen niet opgenomen. Ze zijn als gratis downloads via Internet verkrijgbaar op www.elektuur.nl.
Printen en bouwpakketten zijn bij de auteur verkrijgbaar (experience.electronics@t-online.de)

Attentie!

In dit ontwerp is een voedingstrafo aanwezig die op het lichtnet wordt aangesloten. Dit kan een levensgevaarlijke situatie tot gevolg hebben als niet goed op de veiligheidsregels voor zulke schakelingen wordt gelet. Daarom is het noodzakelijk dat u de aanwijzingen op de Veiligheidspagina (regelmatig achterin dit blad) goed opvolgt.

Wees bij metingen aan de versterker extra voorzichtig, aangezien in deze schakeling gewerkt wordt met zeer hoge gelijkspanningen!