

The Tube

een ongebruikelijke buizenversterker

Door Gerd Reime (Duitsland)

De belangrijkste kenmerken van deze bijzondere versterker zijn goede prestaties en een indrukwekkende verschijning. Dit project combineert vakmanschap in de constructie met audiofiele schakelingen en koppelt dankzij de buizentechnologie nostalgische elementen aan een moderne verschijning.

Ik bouwde mijn eerste buizenversterker in 1971, toen ik net 15 jaar oud was. Hij was opgebouwd rond twee EL84 buizen die in push-pull modus werkten, met behulp van een schakeling die ik in Elektor vond. De rest van de onderdelen waren afkomstig van oude radio's. Even later ging ik in de leer als radio- en televisietechnicus bij Grundig. Daarna werkte ik in R&D. Toen ik met pensioen ging, wilde ik aan een speciaal project werken. Wat ik in gedachten had was een mooie, kleine eindversterker van zo'n 10 tot 15 W uitgangsvermogen - met twee EL84's, net als vroeger, maar dan beter.

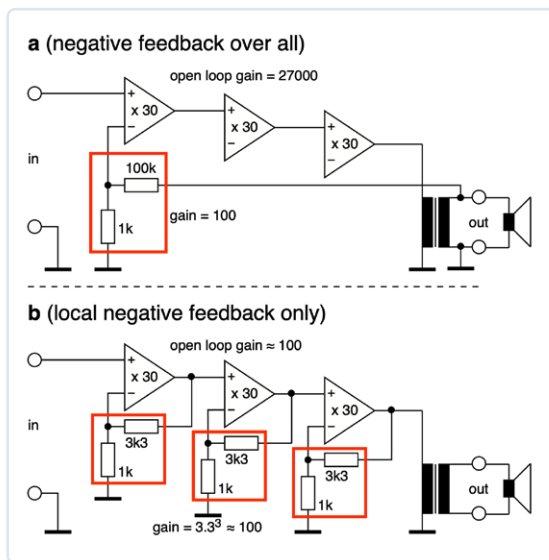
Eerst wilde ik alleen een speciale behuizing, maar toen raakte ik gefascineerd door de elektronische aspecten en probeerde met vele proefopstellingen en metingen iets zo goed mogelijk te construeren. Wat begon als een leuk project werd een serieuze onderneming. Als je inspiratie wilt putten uit mijn ideeën, vormt de volgende beschrijving een goede inleiding. De volledige bouwbeschrijving is nogal uitgebreid en eigenlijk te groot voor een Elektor-artikel. Voor alle details kun je het uitgebreide pdf-bestand raadplegen dat je kunt downloaden van [1].

Voorafgaande overwegingen

Waarom zweren zo veel audioliefhebbers bij buizenversterkers? De zogenaamd warme klank en de matige reactie op oversturing worden vaak genoemd. Bijna alle schakelingen die ik ken werken met negatieve terugkoppeling, maar wat zijn de effecten van dit soort terugkoppeling?

Een audioversterker verwerkt het zwakke signaal van een audiobron zodat het door een luidspreker kan worden weergegeven. Daartoe moeten zowel de spanning als de stroom worden versterkt, zodat de spoel en de conus van de (gewoonlijk gebruikte) dynamische luidspreker voldoende kunnen worden aangedreven om muziek of andere audiosignalen luid genoeg te maken om te worden gehoord. Dit is gemakkelijk met solid-state versterkers, maar buizenversterkers werken met relatief hoge spanningen en navenant geringe stromen, die niet rechtstreeks op de luidspreker kunnen worden aangesloten. Meestal is een uitgangstransformator nodig voor impedantieaanpassing. Vele generaties hifi-liefhebbers hebben zich gebogen over de vraag wat de beste transformator is.

Een ander aspect is dat het werkingsspectrum van buizen niet zo lineair is als je zou willen. Negatieve terugkoppeling wordt gebruikt om de resulterende vervorming van het audiosignaal te verminderen. Een deel van het uitgangssignaal wordt met tegengestelde fase teruggevoerd naar de ingang, en de doorgevoerde hoge, "overtollige" open-lus versterking (vergeleken met de eigenlijke versterking van de versterker) vermindert de niet-linea-



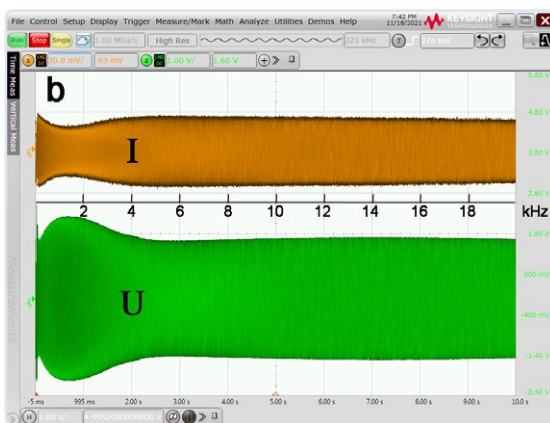
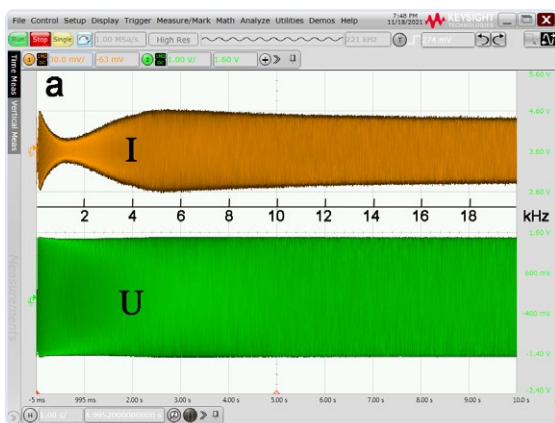
Figuur 1: Verschillende benaderingen van negatieve terugkoppeling: (a) conventionele algemene negatieve terugkoppeling en (b) lokale negatieve terugkoppeling, afzonderlijk in elke versterkertrap.

riteit die anders zou optreden. In **figuur 1a** wordt de negatieve terugkoppeling verzorgd door de spanningsdeler in het rode kader. Alle niet-lineariteit en vervorming in de versterker worden verminderd met een factor die gelijk is aan de verhouding tussen de open-lus versterking en de door de negatieve terugkoppeling ingestelde versterking. In het voorbeeld in figuur 1a is deze factor $27000 / 100 = 270$. Omdat de negatieve terugkoppeling vermoedelijk alle vervorming met deze factor vermindert, hebben tekortkomingen in het ontwerp minder effect.

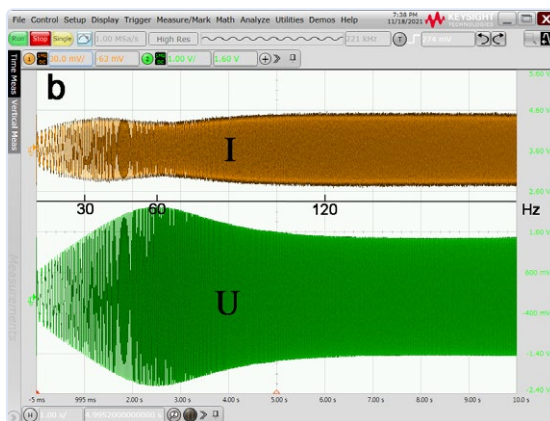
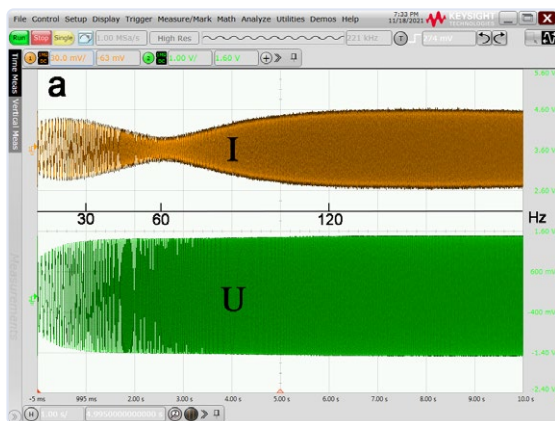
Een alternatief voor een sterke algemene negatieve terugkoppeling (van de luidsprekeruitgang naar de ingang van de eerste trap van de versterker) is het beperken van de versterking van elke trap van de versterker door lokale negatieve terugkoppeling (in **figuur 1b** wordt deze bepaald door de spanningsdelers in de drie rode kaders, die functioneel overeenkomen met de anode- en kathodeweerstanden van de buizen). Op deze manier worden de afzonderlijke versterkertrappen gelineariseerd, wat leidt tot een vrij lineaire versterker met weinig vervorming die geen totale negatieve terugkoppeling nodig heeft. De vraag is of dit een verschil maakt en of het werkelijk anders klinkt.

Vergeleken met een solid-state versterker is het opvallendste verschil dat er een uitgangstransformator voor de luidspreker zit. In de schakeling van **figuur 1a** bevindt de transformator zich in de terugkoppeling, maar in figuur 1b niet.

Het is te verwachten dat het ontwerp volgens figuur 1a een vrij vlakke frequentiecarakteristiek heeft wat betreft de spanning. Mijn metingen aan een dergelijke versterker, weergegeven in **figuur 2a**, bevestigen dit. De spanningskarakteristiek is zeer vlak, maar de stroomkarakteristiek heeft een scherpe dip rond 1 kHz omdat de impedantie van de aangesloten luidspreker op dit punt het grootst is. Daardoor is bij 1 kHz ook een vermogensdip te zien. Uit **figuur 2b** blijkt dat door de hogere belastingimpedantie bij 1 kHz de spanning stijgt en de stroomdip minder sterk is. Dit betekent dat de invloed van de luidsprekerimpedantie op het uitgangsvermogen gedeeltelijk wordt gecompenseerd, wat zou moeten leiden tot een ander (beter) geluid. Iets soortgelijks doet zich voor in het laagfrequente gebied bij de resonantiefrequentie van de woofer rond 60 Hz (**figuur 3**). Ook hier neemt de invloed van de luidsprekerimpedantie af als de uitgangstransformator niet in de negatieve terugkoppeling zit. Ik heb deze

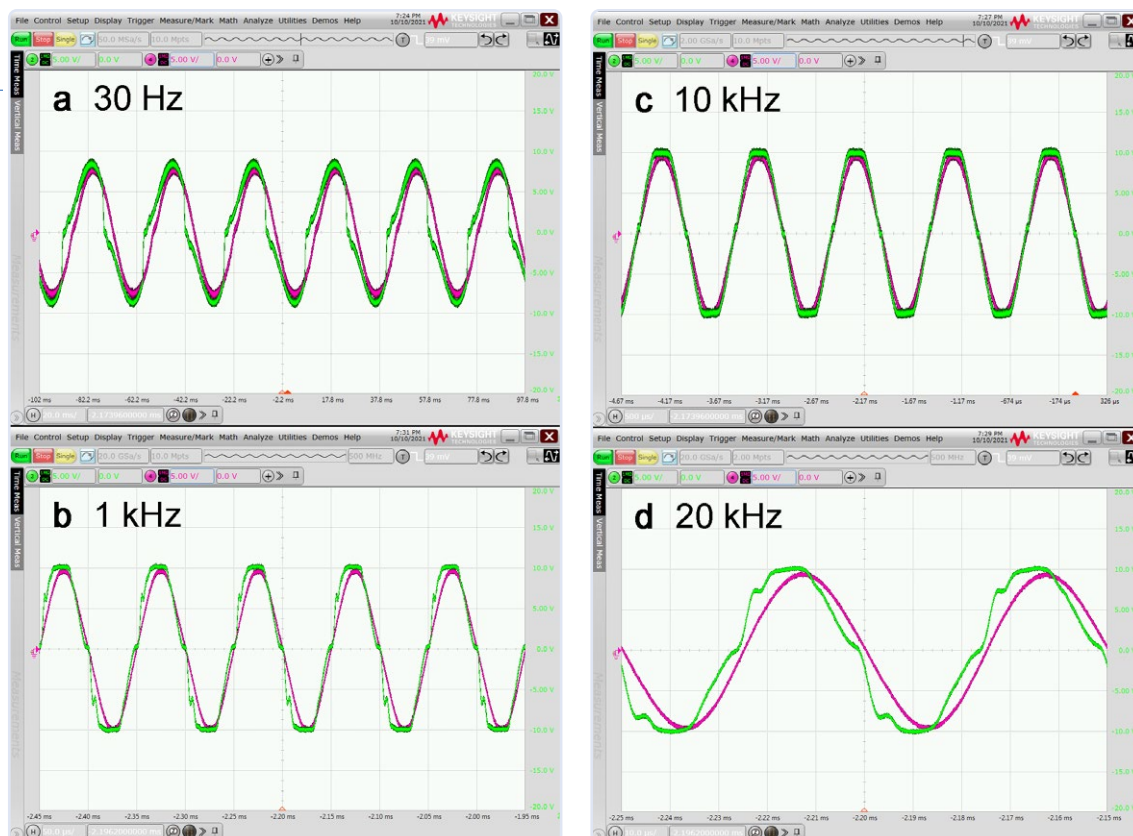


Figuur 2: Stroom (geelbruin) en spanning (groen) over het frequentiebereik (20 Hz tot 20 kHz): (a) met conventionele negatieve terugkoppeling en b) met lokale negatieve terugkoppeling.



Figuur 3: Stroom (geelbruin) en spanning (groen) in het laagfrequente gebied: (a) met conventionele negatieve terugkoppeling en b) met lokale negatieve terugkoppeling.

Figuur 4: Overdrive-gedrag bij verschillende frequenties (groen = conventionele negatieve terugkoppeling; rood = lokale negatieve terugkoppeling).



metingen herhaald met verschillende luidsprekers, en die laten over het algemeen een vergelijkbaar beeld zien.

De conclusie is dat een buizenversterker zonder negatieve terugkoppeling van de luidspreker naar een van de eerdere trappen (versie b) zich significant anders gedraagt dan een conventionele versterker (versie a). Natuurlijk heb ik het niet gelaten bij eenvoudige metingen van de twee versterkerontwerpen, maar heb ik ook collega's gevraagd deel te nemen aan luistertests. En de resultaten waren dat versie b, zonder totale negatieve terugkoppeling, in deze vergelijkingen altijd als beste uit de bus kwam. Het geluid werd als aanzienlijk warmer en evenwichtiger ervaren. Deze resultaten zijn niet verrassend, gezien de verschillende meetcurves.

Een ander verschil is dat een push-pull A/B eindtrap bij weinig vermogen of volume in klasse A werkt en daardoor van nature minder vervorming heeft. Daarom zou de harmonische vervorming met een goede uitgangstransformator bijna gelijk moeten zijn bij een laag volume, met of zonder negatieve terugkoppeling. Verrassend genoeg had het ontwerp zonder totale negatieve terugkoppeling een duidelijk geringere harmonische inhoud, vooral in klasse A. Overigens zijn naar mijn mening de beste uitgangstransformatoren die van Menno van der Veen [2].

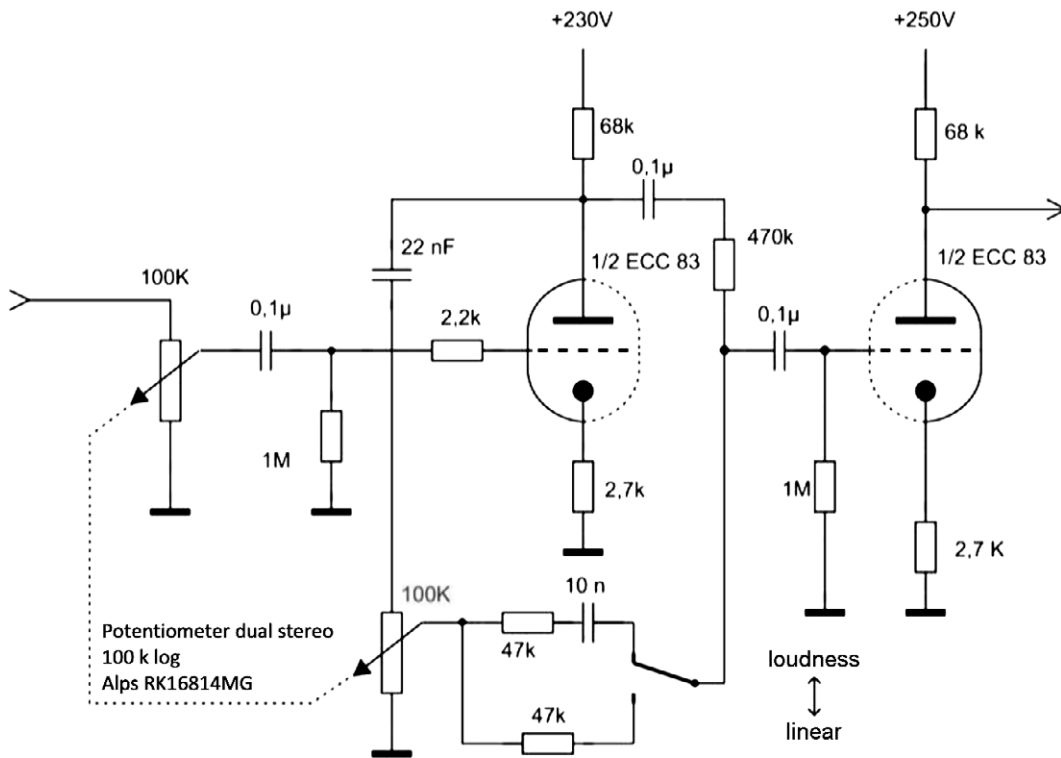
Oversturing

Bijna iedereen weet dat buizenversterkers een matigere begrenzing vertonen bij hoge geluidsstrekte, wanneer de piekwaarden van het signaal de voedingsspanningen benaderen. Gewoonlijk begrenzen de eindbuizen de amplitude, samen met de uitgangstransformator, die

op dat punt in verzadiging raakt. Vooral in deze situatie wordt totale negatieve terugkoppeling problematisch, omdat bij clipping de terugkoppeling ervoor zorgt dat de niet-overgestuurde upstream-trappen de eindtrap nog forser aansturen met het correctiesignaal, wat direct leidt tot een sterke toename van de harmonische vervorming. Zonder deze vorm van negatieve terugkoppeling is het harmonische vervormingsgedrag bij overdrive aanzienlijk geringer.

Vooral bij lage frequenties in het bereik van 20 tot 30 Hz kunnen uitgangstransformatoren vaak geen groot vermogen omzetten. Als gevolg daarvan worden de negatieve effecten van negatieve terugkoppeling hoorbaar in het lage frequentiegebied, zelfs bij weinig vermogen. Daar komen nog de effecten bij van de fasekarakteristiek van de transformator, die eveneens ongewenste geluidseffecten veroorzaken als gevolg van negatieve terugkoppeling.

Mijn metingen met 10% overdrive bij verschillende frequenties ondersteunen deze overwegingen. De rode curven van de versterker zonder totale negatieve terugkoppeling in **figuur 4** zien er consequent beter uit dan de min of meer vervormde groene signalen van de versterker met totale negatieve terugkoppeling. De verschillen bij 20 kHz zijn bijzonder sterk, maar relevante verslechteringen bij een conventioneel versterkerontwerp zijn ook te zien bij 30 Hz. Interessant genoeg is de 10% overdrive bij deze frequentie goed voor 85% van het nominale signaalniveau. Samenvattend kan met recht worden gesteld dat echt matig clippen met nauwelijks storend effect alleen mogelijk is zonder totale negatieve terugkoppeling.



Figuur 5: Schakeling voor auditief gecompenseerde volumeregeling met een Alps quadpotentiometer.

Auditief gecompenseerde volumeregeling

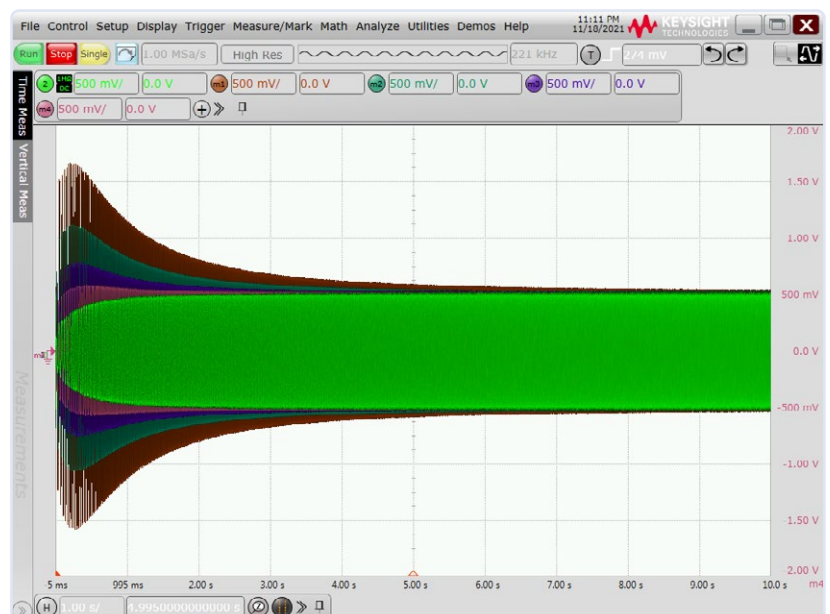
Je leest vaak dat een lineaire respons de enige juiste is. Volgens dit argument moeten topversterkers een vlakke frequentierespons hebben. Ik vermoed daarentegen dat de eis van een vlakke frequentierespons alleen gebaseerd is op het feit dat potentiometers met taps nu niet meer verkrijgbaar zijn. De equivalente schakelingen die online te vinden zijn werken slechts matig. Wat hierachter zit is dat het menselijk gehoor minder gevoelig is voor hoge en lage frequenties bij een laag volume, of (afhankelijk van hoe je het bekijkt) dat onze oren de voorkeur geven aan de frequenties in het middengebied.

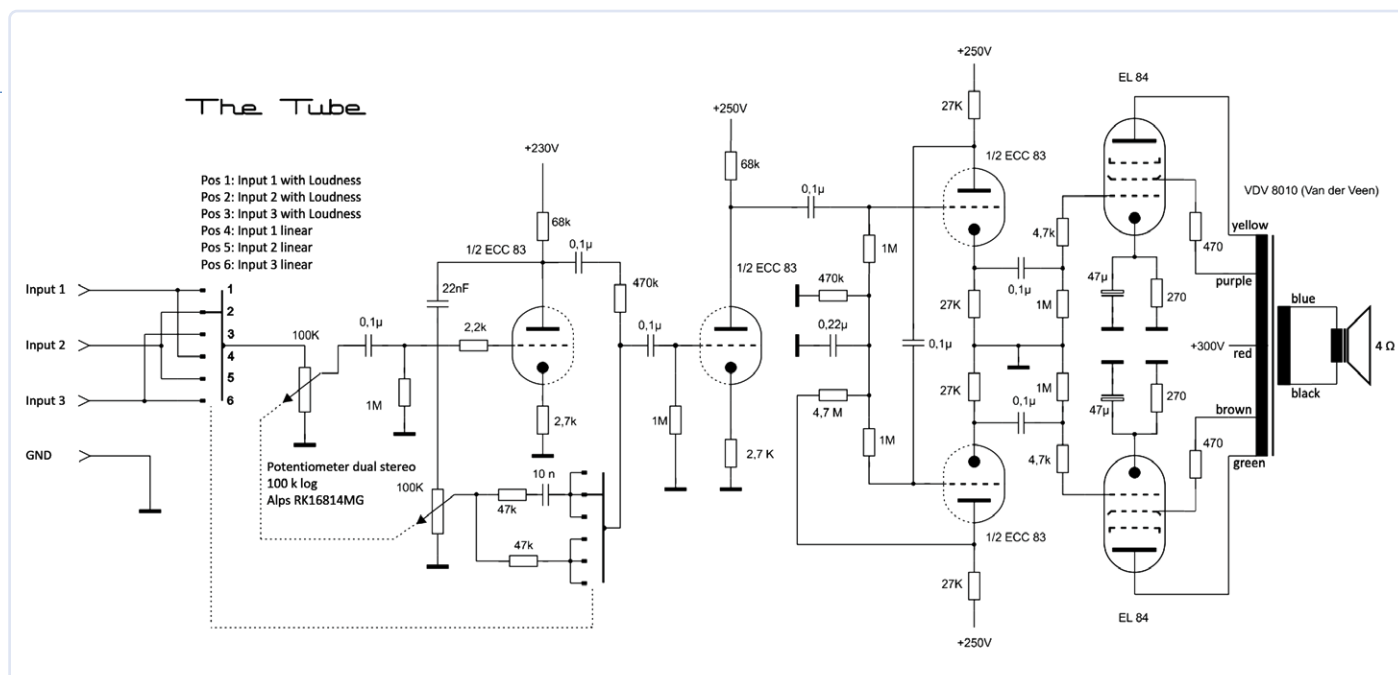
In het verleden was auditief gecompenseerde volumeregeling (ook wel fysiologische volumeregeling genoemd) de gebruikelijke norm. Ze benadrukten de hoge en lage frequenties bij een laag volume, waarbij deze nadruk afnam naarmate de geluidsterkte toenam. Maar hoeveel moderne versterkers bieden deze functie? Bijna geen.

In plaats van vintage potentiometers te gebruiken met twee of drie taps, die daarom sowieso niet ideaal waren, kan dit probleem op een andere en elegantere manier worden opgelost. Je gebruikt een dubbele stereopotentiometer, wat in feite een quadpotentiometer is, zoals die onder andere bij Alps nog verkrijgbaar is. Hiermee en met een eenvoudige schakeling kun je een uitstekende volumeregeling met auditieve compensatie bouwen. Bovendien kun je met een eenvoudige schakelaar wisselen tussen auditieve compensatie en lineair, zonder enige verandering aan de versterker.

Figuur 5 toont de schakeling die ik gebouwd heb met de Alps RK16814MG potentiometer. Hoewel dit een motor-aangedreven potentiometer is, kan de motor wanneer gewenst worden verwijderd zodat de potentiometer met de hand kan worden bediend. Om het effect van de auditief gecompenseerde volumeregeling te verduidelijken, heb ik de frequentierespons bij verschillende instellingen gemeten, deze genormaliseerd naar hetzelfde signaalniveau bij 1 kHz, en de curven over elkaar gelegd. Het effect in het lage frequentiegebied is te zien in **figuur 6**. Zoals duidelijk te zien is, neemt de frequentierespons-correctie geleidelijk af met toenemend volume.

Figuur 6: Effect van auditief gecompenseerde volumeregeling: **bruin** = zeer stil; **donkergroen** = stil (achtergrondmuziek); **blauw** = matig volume; **rood** = hoog volume (lineaire frequentierespons); **groen** = maximum volume vlak voor overdrive.





Figuur 7: Schema van één kanaal van The Tube. Bijzondere kenmerken zijn de auditief gecompenseerde volumeregeling en de symmetrische aansturing van de push-pull eindbuizen.

Aansturing van de eindbuizen

Zoals bekend hebben push-pull trappen signalen nodig met een faseverschil van 180°. Vergeleken met eenvoudige schakelingen met slechts één buis, kun je met wat meer complexiteit een betere kwaliteit bereiken. **Figuur 7** toont de schakeling van één kanaal van The Tube. Elk van de twee EL84's die dienst doen als eindbuis wordt aangestuurd door zijn eigen kathodevolger, bestaande uit de helft van een ECC83. Dankzij identieke anode- en kathodeweerstanden kan de bovenste triode het rooster van de onderste triode precies aansturen om een bijna perfecte, symmetrisch geconfigureerde faseverschuiving te produceren. Deze opstelling vermindert vervorming

en fasefouten. Op deze manier kan een goede versterker worden geproduceerd met een typisch buisengeluid, maar zonder harmonische vervorming, zelfs zonder totale negatieve terugkoppeling. Diverse vergelijkende luister-tests bevestigen dat dit ontwerp (subjectief) zelfs beter is dan een dure en energieverblindende buizenversterker van topklasse A, en het laat zelfs goede solid-state versterkers achter zich.

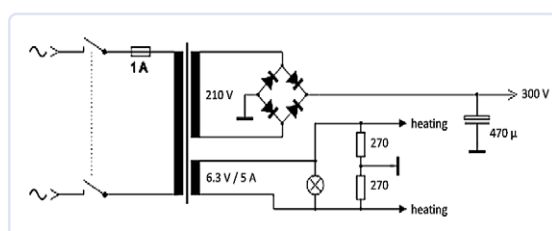
Het relatief eenvoudige basisontwerp van de voeding is weergegeven in **figuur 8**. Details zijn te vinden in [1].

Bouw

Het begon allemaal toen mijn zoons ergens een verzameling grote metalen buizen vandaan haalden. En ik dacht, met zulke buizen kun je eigenlijk maar één ding maken: een buizenversterker.

De massieve aluminium bovenplaat dient als basis voor de mooie buisvoeten. Zoals te zien is in **figuur 9** zijn de buizen van de tussentrap dicht bij de eindbuizen geplaatst. Vanwege de verwachte thermische belasting kan hier geen kunststof worden gebruikt.

Figuur 8: De basisschakeling van de voeding is vrij eenvoudig.



Figuur 9: Aantrekkelijke mechanische constructie voor de elektronische componenten: de voeten voor alle buizen van de stereoversterker.



Figuur 10: De afstandhouders staan ook mooi op de massieve aluminiumplaat.



Figuur 11: Geheel passend bij de buizentechniek: een "circuit board" van massief messing.

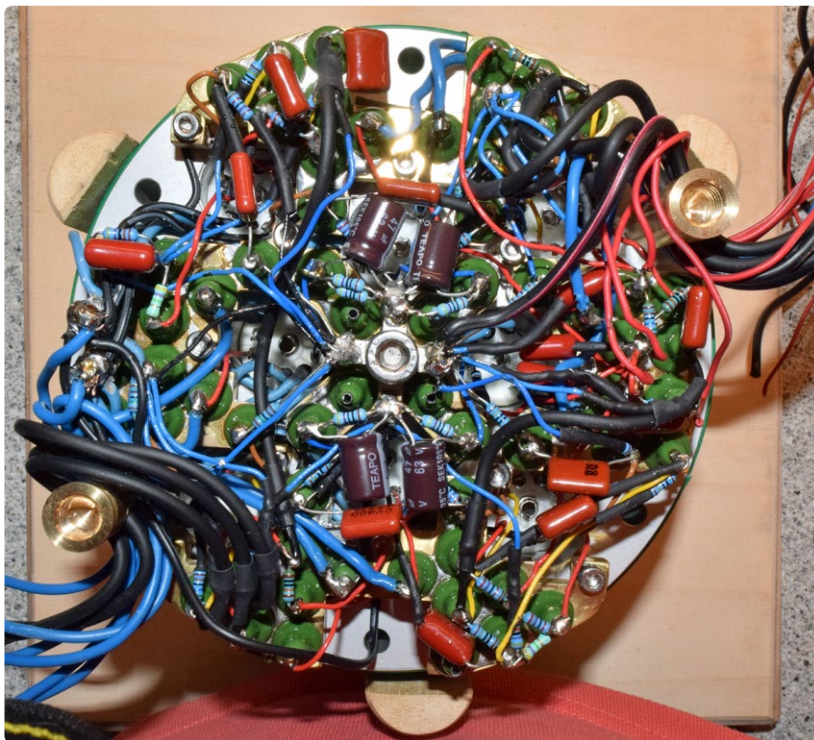


Figuur 12: Soldeerterminals met bijna vintage groene glazen isolatoren.

De onderkant van de aluminiumplaat (**figuur 10**) is voorzien van verschillende afstandhouders, waaraan het "circuit board" met schroeven is bevestigd. De term "circuit board" staat hier tussen aanhalingstekens om twee redenen: ten eerste omdat een board (print) niet gebruikelijk is in een buizenversterker, en ten tweede omdat het bestaat uit componentenhouders (**figuur 11**) gefreesd uit massief messing, zonder epoxy. Het inwendige van een dergelijke buizenversterker moet toch ook mooi zijn, nietwaar? **Figuur 12** toont de onderkant van



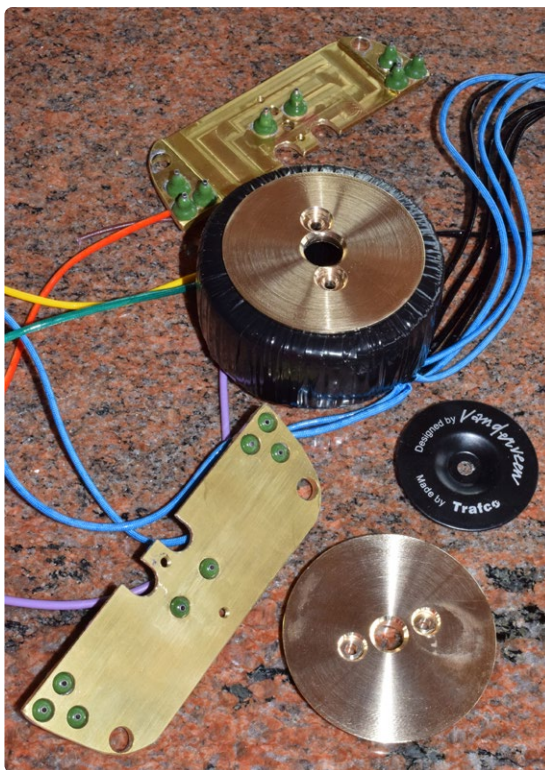
Figuur 14: De volumieuze elektrolytische condensatoren benodigen hun eigen messing plaat.



de aluminiumplaat met de afgewerkte messing plaat en de fraaie soldeerterminals met groene glazen isolatoren.

In volledig geassembleerde vorm ziet deze plaat eruit als **figuur 13**. Een ander "circuit board" bevat relatief grote componenten, zoals elektrolytische condensatoren (**figuur 14**). Ook voor de nettrafo, die zoals dat voor een ringkerntransformator hoort, rond is, zijn dragende messing platen gemaakt, die te bewonderen zijn in **figuur 15**.

Figuur 13: Onderaanzicht (soldeerzijde) van het volledig gemonteerde "circuit board". Een beetje een rats nest, maar perfect stabiel.

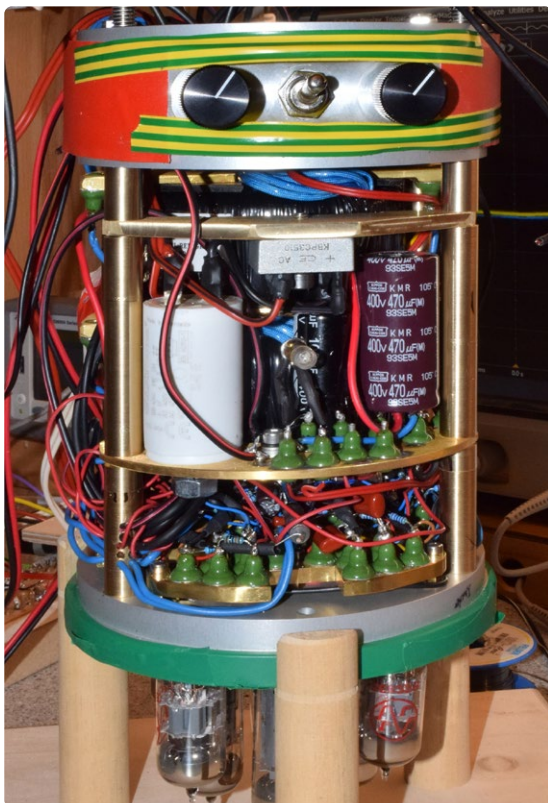


Figuur 15: Een ronde transformator voor een ronde versterker. Ook hier zijn extra mechanische onderdelen nodig voor de bevestiging.

Figuur 16: De onderdelen van de gebruikersinterface (keuzeschakelaar, aan/uit-schakelaar en volumepotmeter) zijn gemonteerd op hun eigen aluminium ring.



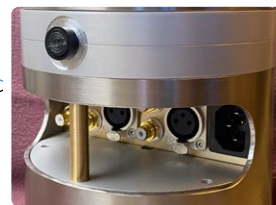
Figuur 17: Voorlopige montage van de volledige versterker, zonder de beschermende buisbehuizing.



Figuur 18: De afgewerkte versterker in zijn volle glorie. Een waar juweeltje - meer dan alleen geschikt voor de woonkamer.

Dat is natuurlijk niet het hele verhaal over de mechanische kant. Het frontpaneel bestaat logischerwijs uit een aluminium ring waarop de ingangskeuzeschakelaar, de aan/uit-schakelaar en de potentiometer voor de volumeregeling zijn gemonteerd (figuur 16). Het provisorisch gemonteerde geheel van figuur 17 geeft een goede indruk van deze opstelling. En nu – tromgeroef! – de voltooide versterker in zijn behuizing (figuur 18).

Met de nodige aandacht voor detail is een buizenversterker als deze altijd een bijzonder esthetisch stukje techniek. Maar ontbreekt er niet iets belangrijks? Zoals bij elke versterker heeft The Tube connectoren nodig waar



Figuur 19: Een uitsparing aan de achterzijde bevat de ingangs- en uitgangconnectoren en de netspanningsconnector.

de zwakke audiosignalen binnenkomen en connectoren waar de versterkte signalen naar de luidsprekers gaan. En op de een of andere manier moet de netspanning de geïnstalleerde transformator bereiken. De oplossing voor dit probleem wordt getoond in **figuur 19**. Deze uitsparing in de buisvormige behuizing van de buizenversterker bevat de vergulde cinch-bussen voor de ingangen, de XLR-bussen voor de luidsprekers en een voedingsaan-sluiting voor het netsnoer.

Voel je je geïnspireerd?

Zoals uit mijn project blijkt, is voor een buizenversterker een goede schakeling slechts de helft van het verhaal. Om Thomas A. Edison te parafraseren, samen met de inspiratie (elektronica) is veel transpiratie (mechanica) nodig. Als je inspiratie wilt putten uit mijn project, moet je bereid zijn veel werk in de constructie te steken om een buizenversterker te bouwen die niet alleen goed klinkt, maar er ook geweldig uitziet. Het oude gezegde "no pain, no gain" is vooral waar als het gaat om buizen-technologie. ◀

220089-03 (vertaling: Willem den Hollander)

Over de auteur

Na zijn opleiding tot radio- en televisietechnicus werkte Gerd Reime achtereenvolgens in de ontwikkelingsafdelingen van Grundig en Nokia. Hij bezit verschillende octrooien.

Vragen of opmerkingen?

Heb je technische vragen of opmerkingen over dit artikel? Neem contact op met de Elektor-redactie via redactie@elektor.com.



Verwante producten

➤ **Elektor Audio Collection (USB Stick)** (SKU 19892) www.elektor.nl/19892

➤ **R. A. Honeycutt, The State of Hollow State Audio (Elektor 2020)** www.elektor.nl/19170

WEBLINKS

- [1] Uitgebreide projectbeschrijving (PDF): <https://www.elektormagazine.nl/220089-03>
- [2] Van der Veen-transformatoren <https://www.mennovanderveen.nl>