TTP-AMP

De warme contour opnieuw uitgevonden

Rudy | tube-tone-pre-amp | ontwerpnotitie, november 2026

> Niet terug naar de jaren zestig, maar terug naar een vraag die we kennelijk vergeten zijn te stellen: waarom kon een bescheiden versterker toen bij zacht luisteren zo vanzelfsprekend compleet klinken?

Het begon niet met een buis, maar met een herinnering aan luisteren. Een Philips 590, een Dual CV12, een Transmare A500: apparaten die in hun tijd met een betrekkelijk bescheiden hoeveelheid elektronica een heel eigen gevoel voor muzikale balans leken te bezitten. Niet noodzakelijk natuurgetrouw in de enge zin van het woord. Wel prettig. Het laag had gewicht, het hoog liet zich horen, en het midden werd niet voortdurend opdringerig.

Wat mij daaraan bleef bezighouden, is dat deze ervaring doorgaans plaatsvond bij vrij gematigde luidheid. Een huiskamervolume van pakweg 65 tot 70 dB SPL, geen concertzaal in miniatuur. Tegenwoordig belanden we al snel bij DSP, kamercorrectie en oneindig instelbare equalizers. Maar misschien is de interessantere vraag wat je kunt bereiken met één dubbele ECC82, enkele weerstanden, een paar condensatoren en een slimme volumeregeling.

Van perfecte rechte lijn naar passende contour

Een lineaire frequentiekarakteristiek is een mooie technische prestatie, maar niet hetzelfde als een gelijkblijvende subjectieve klankbalans. Het menselijk gehoor verandert zijn relatieve gevoeligheid voor laag en hoog met de geluidssterkte. De historische loudnessregeling was een pragmatisch antwoord: een extra aftakking aan de volumepot, zodat de correctie vanzelf kleiner werd naarmate de knop verder openging.

Ik wil die gedachte bewaren, maar de uitvoering opnieuw doorrekenen. Niet omdat oude schakelingen verkeerd waren, maar omdat we inmiddels hun gedrag van ingang tot uitgang kunnen modelleren. Daarbij houd ik twee grenzen aan als ontwerpambitie: een karakteristiek binnen een band van circa 3 dB over 20 Hz tot 20 kHz, en minder dan 1% totale harmonische vervorming bij een nader vast te leggen uitgangsniveau. Dat is nog geen formele DIN-keuring.

Het idee: niet één potmeter, maar twee

De DAC levert maximaal 2 V RMS. Dat is voor deze toepassing ruimschoots voldoende; het stelt vooral een eis aan de wijze waarop we het volume instellen. Daarom komt vooraan een gewone stereo 100kΩ-lineaire potmeter, P1. Die dient als eenmalige gevoeligheidsinstelling. De luidheid bij mijn gebruikelijke luisterpositie wordt daarmee precies zo gekozen dat de tweede potmeter in het gebied van zijn loudnessaftakking staat.

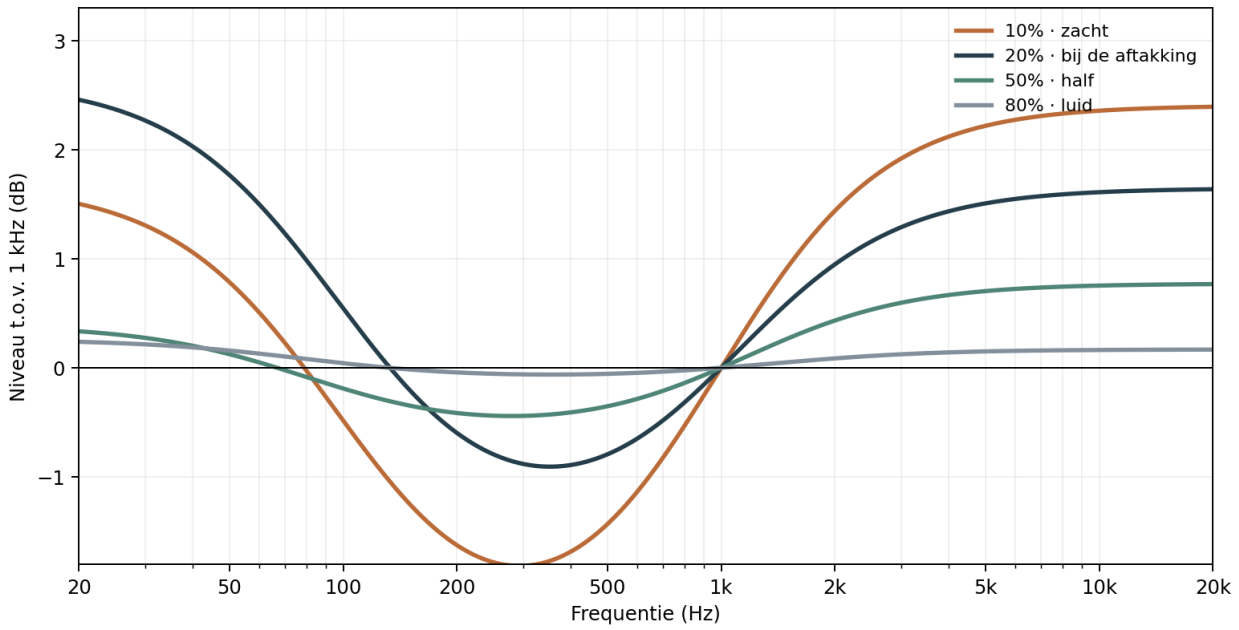
P2 is opnieuw een 100kΩ-lineaire stereopotmeter, nu van het WH-148-type met een extra aftakking per kanaal. Het grote voordeel is eenvoud bij de bestelling. Wel moet de aftakking worden nagemeten: voor deze berekening is 20% van de totale weerstand vanaf massa aangenomen. De letter B duidt doorgaans op lineair. Twee lineaire potmeters worden niet vanzelf logaritmisch zolang de eerste als vaste ijking dienstdoet; om ongeveer een kwadratische overdracht te krijgen zouden ze gekoppeld moeten meedraaien.

Twee correcties die verdwijnen als ze overbodig worden

Vanaf de vaste aftakking van P2 loopt een serietak van 27 kΩ en 47 nF naar massa. Deze tak verandert de verdeling in het lage gebied. Een tweede serietak, 100 kΩ met 1 nF, loopt van de bovenzijde van P2 naar de loper. Daardoor krijgt het hoog bij kleine volumestanden een bescheiden relatieve voorrang. Bij hogere volumestanden neemt ook dat effect vanzelf af.

Dit is geen Baxandall-toonregeling, en ook geen exacte kopie van de equal-loudnesskrommen. Het is een bewust beperkte, mechanisch zelfregelende contour. De buis blijft buiten de toonvorming. De correctie is een eigenschap van de volumeregeling, niet van een reeks frequentieafhankelijke terugkoppelingen rond de triode.

Passief netwerk: berekening bij 20% aftakking



Figuur 1. Berekend met twee lineaire 100kΩ-potmeters, P1 op 50%, een afzonderlijke vaste 20%-tap, 27kΩ/47nF voor het laag en 100kΩ/1nF voor het hoog. Genormaliseerd op 1 kHz. Met een belasting van 1 MΩ op de tweede loper; de buis zelf is niet in deze curves opgenomen.

De buis: liefst een halve ECC82 per kanaal

Wie terug wil naar weinig onderdelen, moet zich niet laten verleiden tot een tweede versterkertrap voor iets wat passief al kan. Eén helft van een ECC82 per kanaal volstaat. De andere helft zit vanzelf in dezelfde glazen envelop. De anodevoeding kies ik bewust laag: 120 V gelijkspanning, geen 250 V. Dat levert een kleinere spanningsruimte op, maar de gewenste uitgangsspanningen zijn voor een lijntrap ook bescheiden.

De keuze voor de anodeweerstand bleek veel interessanter dan ik vooraf vermoedde. Met 22 kΩ anode en 3,3 kΩ kathode komt een klassieke Koren-benadering op ongeveer 3,24 maal versterking. Met 47 kΩ anode en diezelfde kathodeweerstand stijgt die naar bijna vijfmaal: te veel voor mijn eigen doel. Door de kathodeweerstand tot 4,7 kΩ te verhogen komen we weer terug op circa 3,89 maal. Dat is praktisch precies de bovengrens die ik had gesteld.

Ik wil niet per se de kleinst mogelijke vervorming; ik wil begrijpen welke harmonischen de buis toevoegt. Het is verleidelijk om een grotere anodeweerstand gelijk te stellen aan meer warme tweede harmonische. De berekening laat iets anders zien: bij gelijke uitgangsspanning hangt die vervorming niet alleen van de anodeweerstand af, maar van het hele werkpunt, de belasting en de tegenkoppeling die de ongekoppelde kathodeweerstand vanzelf oplevert.

Werkpunt bij 120 V, niet-lineair Koren-model

Grootheid	Waarde / berekening
Anodeweerstand	47 kΩ
Kathodeweerstand	4,7 kΩ (niet ontkoppeld)
Anodestroom	0.819 mA
Anodespanning (naar massa)	81.51 V
Kathodespanning	3.85 V
Anode-kathodespanning	77.66 V
Anodedissipatie	63.6 mW
Spanningsversterking	circa 3,89 × (100 kΩ AC-belasting)

De buis werkt daarmee in een betrekkelijk zuinig gebied. De theoretische anodedissipatie is klein. Dat zegt nog niet dat de voeding en de inschakelcondities onproblematisch zijn: 120 V blijft levensgevaarlijke gelijkspanning. Voor een werkelijk apparaat zijn de volledige voedings- en gloeidraadschakeling, bescherming, aarding en ontlading van condensatoren nog noodzakelijk.

Hoeveel harmonischen?

De niet-lineaire berekening hieronder gebruikt het Koren-model met zijn gepubliceerde parameters voor de 12AU7/ECC82 en een 100kΩ wisselstroombelasting aan de uitgang. De uitgangscondensator wordt bij 1 kHz als vrijwel transparant behandeld. De stroom door de triode wordt per tijdstap opgelost; uit de resulterende golfvorm worden de harmonischen berekend. Dit is meer dan een lineaire AC-berekening, maar minder dan een volledige LTspice-simulatie met alle parasitaire componenten en de concrete buis.

Uitgang (RMS)	THD (model)	H2 / fundamenteel	H3 / fundamenteel
0.39 V	0.111%	0.111%	0.0004%
0.78 V	0.222%	0.222%	0.0016%
1.17 V	0.333%	0.333%	0.0035%
1.94 V	0.556%	0.556%	0.0098%

Dat de tweede harmonische overheerst, is technisch interessant en muzikaal misschien relevant. Maar een uitspraak als "meer H2 klinkt warmer" is niet zonder meer een natuurwet. Het hangt ook af van het niveau, de bron, de luidsprekers en van het overige harmonische spectrum. De gegevens bevestigen vooral dat de gekozen trap voor normale lijnniveaus ver onder de beoogde 1% THD lijkt te blijven.

En is de totale versterking dan niet te groot?

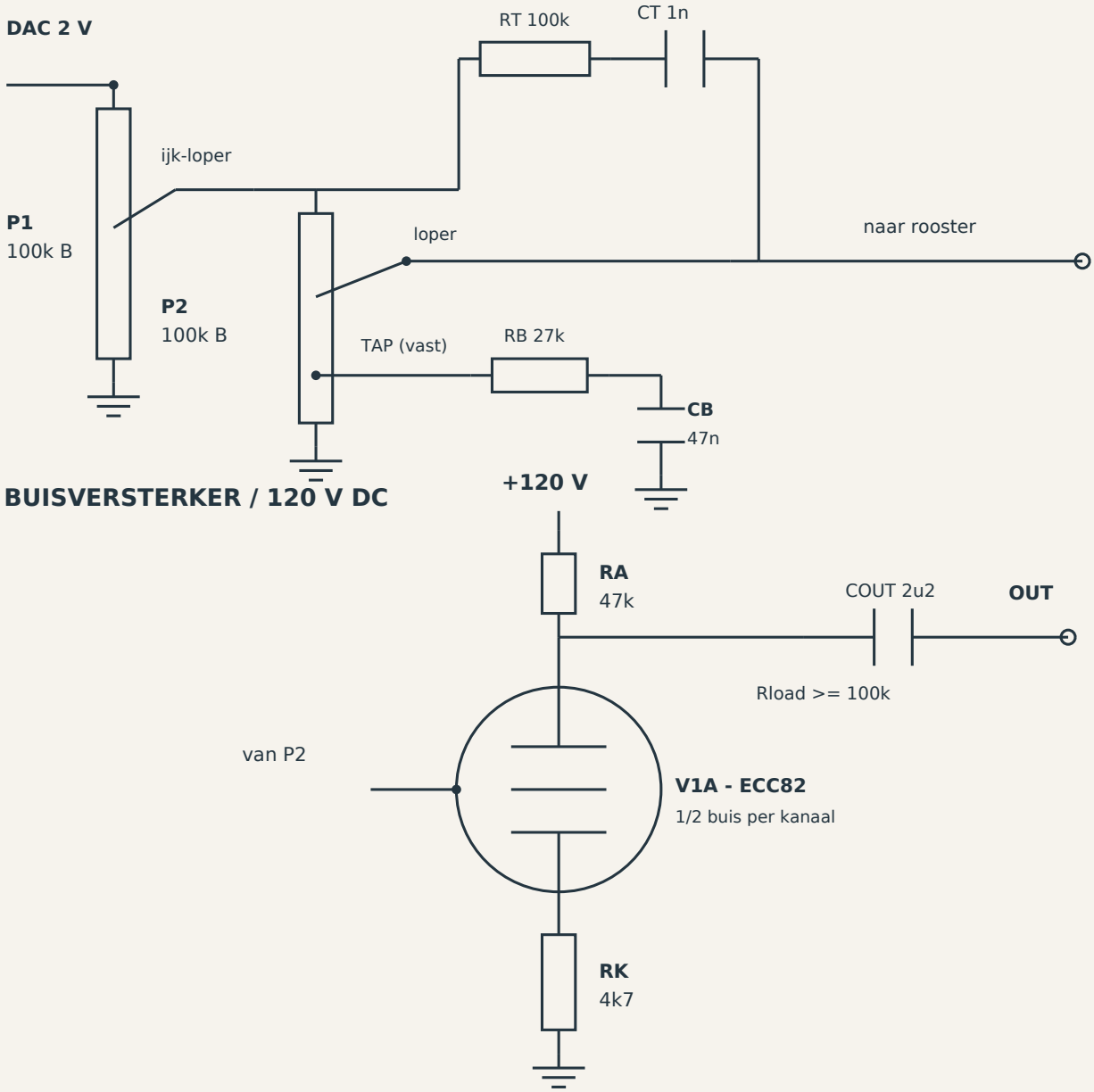
Dit is een kwestie van waar we meten. De 3,89 maal is de versterking van de triode alleen. De eerste en tweede potmeter staan ervoor en verzwakken. In het uitgewerkte voorbeeld met P1 halverwege en P2 op 20% is de overdracht bij 1 kHz van de twee potmeters samen slechts circa 0,054 maal. Vermenigvuldigd met 3,89 blijft ongeveer 0,21 maal over van DAC naar uitgang. Bij 2 V RMS uit de DAC is dat ongeveer 0,42 V RMS uit de voorversterker. Zet je P2 veel verder open, dan neemt de totale overdracht toe, maar de loudnesscorrectie verdwijnt ondertussen grotendeels.

Daarmee krijgt de extra voorverzwakker een tweede betekenis: niet alleen een handigheidje voor de potmeterstand, maar een manier om de correctie aan de eigen luisterpraktijk te koppelen. De juiste kalibratie is geen kwestie van een fictieve klokstand uit een datablad, maar van meten of luisteren aan de eigen installatie.

Het ontwerp, in één oogopslag

EEN KANAAL / PRINCIPESCHEMA

P1 en P2 zijn stereo uitgevoerd; de vaste tap is voorlopig 20% vanaf massa.



Werkhypothese, geen bouwvrijgave: voeding, gloeistroom en veiligheidsdetails ontbreken.

Figuur 2. Elektrisch principeschema van één kanaal. De buistrap is als afzonderlijke sectie getekend, aangesloten op de P2-loper; Rgrid (roosterreferentie), gridstopper, voedingsontkoppeling en het volledige veiligheidsontwerp moeten bij het definitieve schema worden toegevoegd. De P2-tap en loper zijn nadrukkelijk verschillende contacten.

Wat er nu staat - en wat nog niet

Het ontwerp is in zijn kern verrassend klein: één dubbele ECC82 voor stereo, twee stereopotmeters van 100 kΩ, twee weerstanden en twee condensatoren per kanaal voor het contourenwerk, plus de gebruikelijke onderdelen van de buizenlijntrap. Het heeft geen actieve loudnessprocessor en geen correctie die per se aan een bepaalde bronspanning vastzit. Het maakt de klankbalans juist afhankelijk van de stand van de dagelijkse volumeregeling.

Wat nog onzeker is, is precies wat telt voor een definitieve bouwversie. De WH-148-aftakking is op 20% verondersteld, niet geverifieerd. De echte karakteristiek van de potentiometer, de aansluitwijze van de loper en de bronimpedantie kunnen de contour veranderen. Ook heeft de belasting van de eindversterker invloed op de uitgang van de ECC82. Ten slotte zijn de werkpunt- en THD-getallen modellen, geen metingen aan een echte buis. Aan de DIN-eis kan pas een betekenisvolle toetsing worden verbonden als we meetniveau, belasting, toleranties en meetmethode vastleggen.

Hoe we het ontwerp werkelijk zouden afmaken

Eerst meet ik de werkelijke aftakking en de weerstand tussen loper en massa op meerdere knopstanden. Daarna kalibreer ik P1 zodat het normale luistervolume van circa 65–70 dB SPL samenvalt met de gewenste P2-stand. Vervolgens draai ik een volledige AC- en transiëntsimulatie van de exacte schakeling met minstens twee verschillende ECC82-modellen en belastingen. Pas na die controle volgt een proefopstelling, met een meetmicrofoon voor het gekozen geluidsniveau en een audio-interface voor de uitgangsvervorming.

Bij het afregelen zou ik de contour niet dogmatisch uit een gehoorkromme kopiëren. De voorkeur voor een volle, ontspannen weergave is immers niet identiek aan het mathematisch compenseren van de ISO-gehoorkrommen. De interessante vraag blijft of een correctie van hooguit enkele decibels, precies op het moment dat we haar nodig hebben, de oude vanzelfsprekendheid kan oproepen.

> Misschien is de winst van moderne rekenkracht uiteindelijk dat we weer minder onderdelen nodig hebben. Niet méér techniek tussen de muziek en de luisteraar, maar eindelijk genoeg begrip om de techniek wat beter op zijn plaats te zetten.

Bronnen en rekenstatus

Norman Koren, Improved vacuum tube models for SPICE (2003), parameters 12AU7: MU=21.5, EX=1.3, KG1=1180, KP=84, KVB=300. https://normankoren.com/Audio/Tubemodspice_article.html

Norman Koren, SPICE and the art of preamplifier design. https://www.normankoren.com/Audio/Spice_preamp_2.html

Alle numerieke waarden in dit artikel zijn eigen modelberekeningen op basis van deze parameters. De contouren gebruiken een afzonderlijk doorgerekend lineair passief netwerk; geen complete, in LTspice geverifieerde schakeling. Voor de historische DIN-verwijzing is geen specifieke editie als keuringsgrondslag geclaimd.