

De Nelson Pass AMP CAMP versterker laten klinken als een buizenversterker?

De invloed van de voeding.

Verslag Tubesociety project 2024/2025

Leon Gommans

8 juni 2024

1. Inleiding

Centraal dit jaar stond de vraag “Kunnen we een op halfgeleiders gebaseerde versterker laten werken en klinken volgens de principes van een buizenversterker?”. Bij het maken van ontwerpkeuzen worden principes gebruikt als richtinggevende uitspraken op basis van standaarden, regels en richtlijnen. Voor het ontwerpen van buizenversterkers heeft Menno, op basis van zijn rijke ervaring een aantal principes opgesteld (zie appendix A). Dit jaar lag de nadruk op het algemene “keep it simple” principe de principes rondom het minimaliseren van de “Hiraga sluier”. Om aan het eerste principe recht te doen is aan het begin van de cursus gekozen voor het “Amp Camp” zelfbouwversterker ontwerp van Nelson Pass [1]. Uit een review [2] en simulaties van dit ontwerp bleek al snel dat Nelson Pass het warme vervormingsgedrag bewust heeft ontworpen. Hij volgt hiermee het gedachtengoed van Jean Hiraga [3,4]. Dit vervormingsgedrag, dat een sluier legt over de details in het geluidsbeeld, is echter niet conform de Menno principes. Hierbij wordt juist de 2^e harmonische zoveel mogelijk onderdrukt. Studie van het ontwerp brachten ook meerdere feedback loops aan het licht, iets waarbij ook Menno principes worden overtreden.

Daarnaast beveelt Nelson Pass een universele Meanwell 24V voeding [5] aan. Al direct in het begin van de cursus werden vragen gesteld of een dergelijke Switching Mode Power Supply (SMPS) negatieve invloed heeft op het geluidsbeeld. Deze vraag heeft vanaf het begin van de cursus mijn nieuwsgierigheid gewekt. Ik heb toen besloten om dit onderwerp nader te onderzoeken. De scope van dit verslag ligt derhalve op de vraag: “Wat is de invloed van een voeding op het geluid?”. Voor meer details betreffende verbeteringen aan het versterker ontwerp, verwijs ik graag naar verslagen van mijn mede-cursisten.

Tijdens dit cursusjaar hebben verschillende cursisten samen met Menno aan de hand van principes, analyses, simulaties en experimenten ontwerpkeuzes gemaakt dat heeft geleid tot meerdere Amp Camp TubeSociety (ACTS) ontwerpen. Om deze ontwerpen te kunnen realiseren heeft Erwin Reins printen ontworpen die een meerdere ACTS-configuraties ondersteunen. Met zijn printen (maar ook andere printen) zijn uiteindelijk verschillende versterkers gebouwd. Component keuze is daarbij onderdeel van verbeterexperimenten. In het hier beschreven verslag heb ik op basis van de beschikbare printen drie versterkerversies gebouwd. Versies 5x2 en 5x3 ondersteunen configuraties als resultaat van de verschillende verbeteronderzoeken. De volgende versies hebben vervolgens als basis gediend voor het onderzoek naar de invloed van voedingen in hoofdstuk 3:

- 1) Het originele Nelson Pass Amp Camp versterker ontwerp (ACTS-1), kort beschreven in hoofdstuk 2.
- 2) Versie 5 modificatie 2 (ACTS-5x2) gedimensioneerd door Menno.
- 3) Versie 5 modificatie 3 (ACTS-5x3) gedimensioneerd door Frank Leegstra (FL01).

De bouw van deze versies zullen beschreven worden in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 laat meetresultaten van het vervormingsgedrag zien. Hoofdstuk 6 beschrijft een aantal conclusies en toekomstig werk.

Het ACTS-1 ontwerp is gebruikt voor het onderzoek naar de invloed op de weergave van verschillende 19V en 24V SMPS- en 24V lineaire voedingen. Mede op basis van ander onderzoek van Leon en Jack naar de invloed van het verhogen van de voedingsspanning naar 40V is uiteindelijk in de groep besloten om 30V als een additionele ‘standaard’ voedingsspanning te kiezen. Vervolgens is een ACTS-5x2 gebruikt voor onderzoek naar 24- en 30V voedingen. Op basis van deze resultaten en luistertests is voor de slotdag een ACTS-5x3 FL01 gebouwd met 30V lineaire voeding. Na het beluisteren en oordeel op de slotdag heeft deze versie een gedeelde 2^e plaats behaald.

Om het onderzoek naar voedingen zo reproduceerbaar als mogelijk te maken, heb ik bewust gekozen om de versterker ontwerpen niet te modificeren qua componentkeuze. Op dit vlak zijn er zeker nog verbeterpunten te vinden.

2. Onderzoeksvragen en scope.

Het ontwerp van deze versterker is een kopie van de Nelson Pass Amp Camp versterker, zoals onder andere beschreven in [1]. Bijgaand het schema van deze versie die de Amp Camp Tube Society-1 (ACTS-1) versie is gaan heten. Dit ontwerp bevat op het eerste gezicht een DC-stroombron rondom MOSFET Q1 en feedback transistor Q4. MOSFET Q2 verdeelt op basis van het stuursignaal de stroom over zichzelf en via uitgangscapacitor C3 de luidspreker. In rust gaat de stroom in gelijke mate via Q1 en Q2 en werken daarmee in klasse A. MOSFET Q3 is een source volger, die hetingangssignaal na impedantie aanpassing en gatestop weerstand R7 aanbiedt aan Q2. Als eerstejaars heb ik met veel belangstelling de discussies, mede op basis van LT-Spice simulaties gevolgd om de werking van de versterker te doorgronden. Dit bleek niet zo eenvoudig. In ieder geval kwamen bij de analyses de volgende aspecten met vragen naar boven:

1. De harmonische vervorming volgt de Hiraga curve, dwz de grootte van de 2^e, 3^e, 4^e, 5^e, 6^e en hogere harmonische is afnemend en daarbij een curve volgt net onder de gehoorrens voor dit soort vervorming. De vraag daarbij is: *Hoe verminderen we de Hiraga sluier (liefst D2 onder D3)?*
2. De verhouding van weerstanden R11/R13 en R12/R14 geven een asymmetrie die medeverantwoordelijk is voor het harmonische vervormingsgedrag. *Wat is een ideale verhouding van deze weerstanden?*
3. De harmonische vervorming neemt toe naarmate de ingangsfrequentie toeneemt. Een belangrijke factor die hieraan bijdraagt is de zgn. slew-rate vervorming: de ingangscapaciteit van de MOSFET Q2 gaat bij hogere frequenties steeds meer meespelen. Dit effect zorgt voor het steeds verder achterlopen van de aansturing als functie van de frequentie omdat de stuurbron onvoldoende stroom kan leveren om de ingangscapaciteit van Q2 te kunnen (ont) laden om het stuursignaal netjes te volgen. *Wat kunnen we doen om de slew-rate vervorming te verminderen?*
4. Simulaties van Leon en experimenten van Jack toonde aan dat de slew-rate vervorming een stuk minder effect heeft als de voedingspanning naar 40V verhoogd wordt. Q3 werd daarbij via een aparte voeding met 19V gevoed. *Wat is een goede voedingspanning? 40V bij 2A bias verstoekt immers 80 Watt.*
5. Tegenkoppeling: naast de feedback via R10/R2 is ook feedback mogelijk via RV1 en R5. *Kan deze dubbele feedback vermeden/ verbeterd worden?*
6. Nelson Pass beveelt een universele SMPS-voeding aan. Een aantal cursisten vroegen zich af: *Is een SMPS wel een goede keuze?*

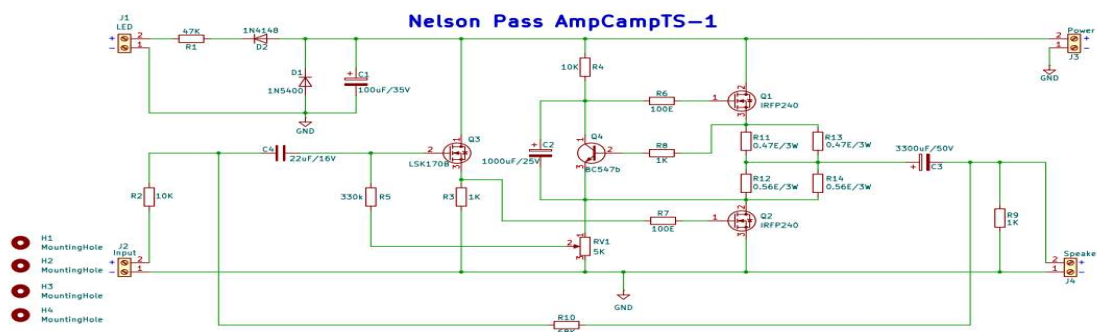


Fig1. Nelson Pass ACTS-1 versterker ontwerp als uitgangspunt.

Op basis van deze inzichten zijn er door een aantal cursisten, gecoördineerd door Menno, een aantal onderzoeksrichtingen gestart:

- Invloed verhouding/grootte R11/13 en R12/14 op vervormingsgedrag.
- Keuze voor andere MOSFETs met minder ingangscapaciteit en gunstigere eigenschappen.
- Aansturing vanuit Q3 krachtiger maken
- Bekijken alternatieven voor tegenkoppeling
- Bepalen ideale voedingsspanning
- **Wat is een goede voeding?**

Binnen dit scala aan onderwerp, voelde ik mij zoals aangegeven aangetrokken tot het onderwerp voedingen. Omdat ik geen ervaring heb met SMPS-voedingen voor audio toepassingen leek dit mij een interessant onderwerp. Tevens deelden Rene en Ruud mijn belangstelling. Ik besloot derhalve om de andere onderwerpen met belangstelling te volgen. Dit verslag zal zich derhalve verder richten op het onderzoek naar de invloed van voedingen op de kwaliteit van een ACTS ontwerp. Voor resultaten van de andere onderzoeksrichtingen verwijs ik naar de verslagen van mijn mede-cursisten.

3. Onderzoek naar voedingen.

De voeding wordt ook wel *“de andere kant”* van de versterker genoemd. Een goed versterker ontwerp kan negatief beïnvloed worden door een slechte voeding. Een aantal aspecten die vragen opwerpen zijn bijvoorbeeld:

- Overblijvende rimpel na gelijkrichting veroorzaakt (hoorbare) brom.
- Storingen vanuit het lichtnet en restanten van het schakelen-proces in een SMPS kunnen zich mengen met het geluidssignaal en daarmee inter-moduleren. Openheid van het geluidsbeeld, microdetails en hogere harmonische, belangrijk voor het karakter van instrumenten, kunnen daarmee negatief beïnvloed worden.
- De constantheid van de voedingsspanning bij een dynamische stroomvraag van de versterker kan de dynamiek van het geluid verminderen. Hoe lager de inwendige weerstand van de voeding hoe beter.
- Het regelgedrag van een switching power supply, om zo aan de dynamische stroomvraag van de versterker te voldoen, kan bij een hogere stroomvraag meer rimpel en ruis veroorzaken.
- De lichtnetspanning is niet constant. Het ontwerp van de voeding moet hier rekening mee houden zodat netspanningsvariaties niet de voedingsspanning van de versterker beïnvloeden.

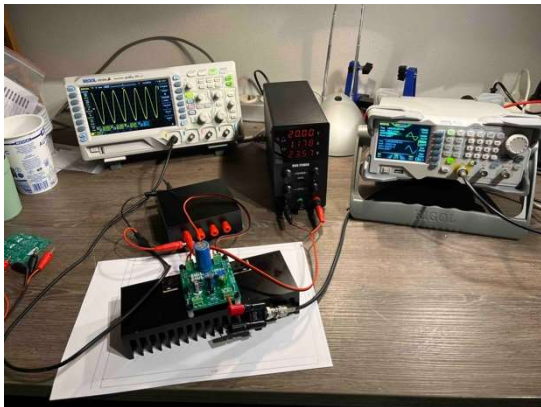
Gestuurd door het bovenstaande zijn er gedurende het cursusjaar een reeks van metingen verricht een aantal luister sessies gedaan en om voedingsaspecten nader te onderzoeken. Het doel was om de kwaliteit van voedingen objectief te kunnen vergelijken en invloeden op de geluidswaergave te kunnen duiden.

Een drietal methoden zijn tijdens de lessen voorgesteld en uitgevoerd:

1. Statische metingen aan een reeks van verschillende voedingen met behulp van een vaste belasting. Met behulp van een oscilloscoop is vervolgens gekeken naar aanwezige AC rimpel- en ruis componenten.
2. Dynamische metingen aan de voeding met behulp van de ACTS1 versterker als belasting. De versterker werd met behulp van een functiegenerator aangestuurd met periodieke bursts van sinussen. Met een oscilloscoop werd vervolgens gekeken naar de impact op de voedingsspanning.
3. Luistertests met als centrale vraag of de invloed van (verbeteringen aan) een voeding als verschil hoorbaar zijn.

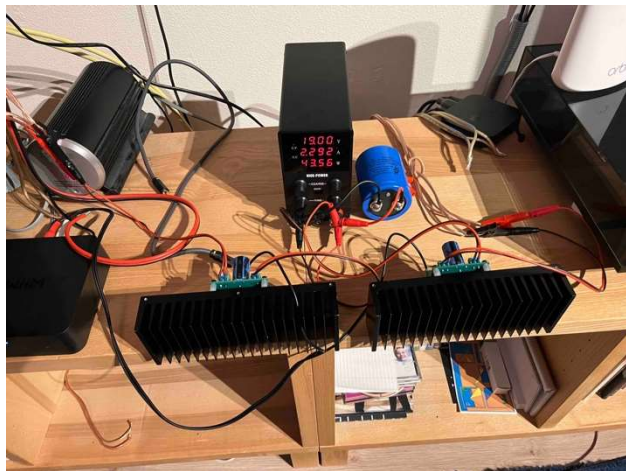
Hierna een volgen een aantal van de belangrijkste resultaten van gevolgde methoden en haar belangrijkste conclusies

3.1 Labvoeding al dan niet met grote condensator.



Na het bouwen van de ACTS-1 op basis van Erwins printjes, is het een logische stap om de versterker voor het eerste op te starten met behulp van een lab voeding. Je kunt dan de stroomtoevoer langzaam opschroeven om vervolgens onmiddellijk bij rookverschijnselen te kunnen ingrijpen. Hiernaast een foto van de eerste levensmomenten van het eerste ACTS-1 kanaal. De getoonde NICE-Power SPS3010 voeding kan 0-30V met een stroom tot 10A leveren. Na het bouwen, testen en afregelen van het tweede ACTS-1 kanaal kon er geluisterd worden. Wat een geluid voor deze 2x4.5Watt versterker! Mijn Audio Pro Black Diamond speakers kwamen echt tot leven, krachtige bas en

aangenaam om naar te luisteren. Nelson Pass heeft inderdaad iets moois ontworpen! Mijn nieuwsgierigheid ging vervolgens uit naar een experiment met de voeding: Wat als ik op de voeding een grote elco aansluit als extra buffer? Uit ervaring met versterkers bouwen in mijn jeugd wist ik dat je hiermee met name de laagweergave strakker kon maken. Ik had nog een 68.000uF/40V elco liggen. Hiernaast de ACST-1, aangesloten op de labvoeding met de grote elco. Links, mijn net aangeschafte Wiim Pro Plus streamer: Een zeer betaalbare streamer die als What HI*FI? Awards 2024 uit de bus kwam [6]. Ik vond een nummer op Tidal waarmee ik het verschil met en zonder elco goed kon laten horen: "Pink Panther" van het album Saxnbass van Markusphilippe. Een contrabas en saxofoon spelen het bekende nummer uit de film "Pink Panther". Je hoort met elco veel beter de details en nuances van het bespelen van beide instrumenten. Dit verschil was zeer evident tijdens de herhaling van dit experiment tijdens de TS-les eind oktober. Hiermee was het onderzoek naar voedingen als onderzoeksonderwerp geboren.

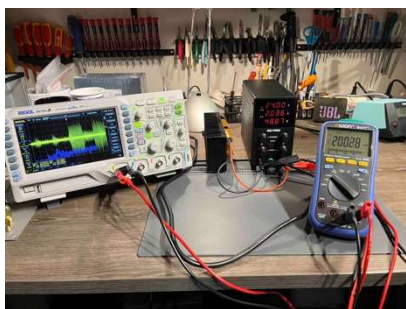


3.2 Meetomgeving.

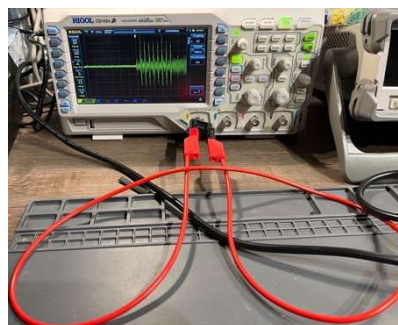
Een voeding levert in theorie een stabiele spanning zonder rimpel en ruis. In hoeverre een voeding hiertoe in staat is, is onderwerp van dit onderzoek. Zowel de voeding zelf, alsmede zijn omgeving, kunnen oorzaak zijn van onvolkomenheden:

- Variatie van de netspanning: Volgens NEN-EN 50160 mag de 230V netspanning + of - 10% afwijken van de norm (tussen 207V en 253 V)
- Ongewenste verstoringen van de ideale sinus vorm door niet lineaire belasting van apparaten.
- Electro-Magnetische Interferentie (EMI): hoogfrequente componenten die op het lichtnet terecht komen door middel van elektromagnetische inductie, elektrostatische koppeling en geleiding. Bronnen voor dit soort componenten kunnen zijn: radiozenders, industriële- & medische apparatuur, digitale apparatuur, schakelende voedingen, zonnepanelen en haar omvormers, mobiele telefoons, en veel meer. EMI-componenten veroorzaken in algemene zin ruis die via de voeding kunnen interfereren met het audiosignaal.

Het is zaak om bij het meten aan voeding rekening te houden met deze factoren die zowel een interne- als externe oorzaak kunnen hebben.



Een eerste poging om de AC-componenten van de NICE lab voeding te meten lieten gelijk stoorsignalen zien. Aangesloten op een 24 Ohm meetweerstand laat de scope allerlei periodieke stoorsignalen zien die o.a. afkomstig bleken de zijn van Ethernet-powerline adapters. In mijn huis gebruik ik ook het lichtnet om een thuisnetwerk te bouwen om zo mijn WiFi-routers aan te sluiten. Na het verwijderen van deze adapters bleef er nog best wel wat vervuiling zichtbaar op de uitgangsspanning. Zelfs een simpel meetsnoer aansluiten op de ingang van de scope laat al een geïnduceerd storingssignaal zien. Om dit soort storingen niet mee te meten is het erg belangrijk om lussen in het meetcircuit te voorkomen. Joost gaf mij een nuttige tip om bij dit soort metingen een coax-meetsnoeren rechtstreeks aan de uitgang van de voeding te solderen. Fijn om iemand met deze ervaring in de groep te hebben. Daarnaast besloot ik om een netfilter aan te schaffen dat speciaal bedoeld is om vervuiling uit het net te filteren. Dit filter is speciaal ontworpen voor audio toepassingen. Hiernaast de foto van mijn Audioquest PowerQuest2 netfilter [7].

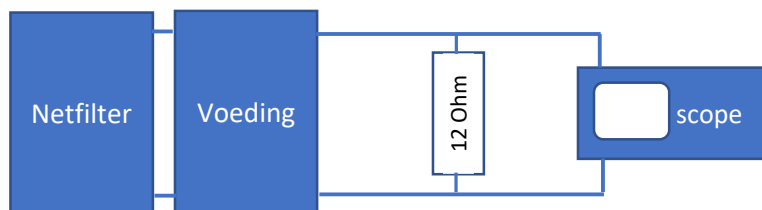


3.3 Statische belasting metingen aan schakelende voedingen.

Het uitvoeren van statische metingen aan schakelende voedingen heeft als doel:

1. Het meten van de aanwezigheid van 100 Hz rimpel componenten.
2. Het meten van ruis componenten, veroorzaakt door zowel het schakel gedrag van de voeding alsmede storingen vanuit het lichtnet en omgeving. Zowel schakelfrequentie als amplitude van de schakel pulsen zijn meetbare elementen.

Op basis van deze meetgegevens kunnen we vervolgens voedingen gaan vergelijken. Hieronder het algemene schema van de metingen. Een meetweerstand van 12 Ohm vormt een representatieve belasting voor de voeding: 2A bij 24 Volt komt in de buurt van de belasting die 2 ACTS-1 versterkers vormen.

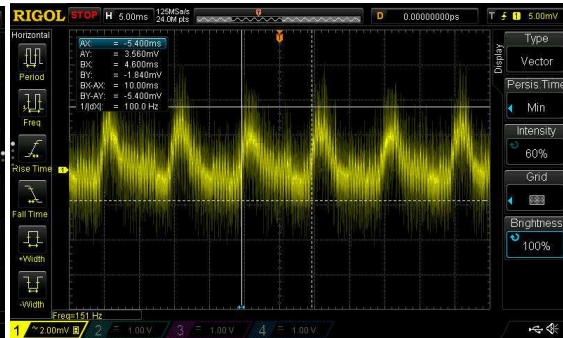


Met behulp van de meetfuncties van de oscilloscoop kunnen frequenties, piek-piek en RMS-waarden van aanwezige AC-componenten bepaald worden.

Als eerste heb ik gekeken naar de invloed van de Powerquest2 netfilter. Uit onderstaande meting blijkt dat zonder netfilter een rimpel en ruis signaal aanwezig is van 22,4 mVpp. Met netfilter is dit 5,4 mVpp. Je ziet dat de Nice labvoeding een 100 Hz rimpel component toont met daarop een ruissignaal gesupponeerd. Met name het ruissignaal is met netfilter minder geworden. Hiermee een eerste indicatie van het nut van een netfilter. Vanaf nu zal ik bij iedere meting aan een voeding dit netfilter toepassen.



Nice labvoeding zonder netfilter



Nice labvoeding met netfilter.

Om een indruk te krijgen van de aard van een SMPS zijn verschillende voedingen van 19 en 24V bekeken met mijn Rigol DS1054Z oscilloscoop. Het is een scope met 50 MHz bandbreedte met een minimale gevoeligheid van 1.0 mV/div. Bij de metingen is altijd een bandbreedte limiet van 20 MHz ingesteld zoals bij dit soort metingen wordt aanbevolen.

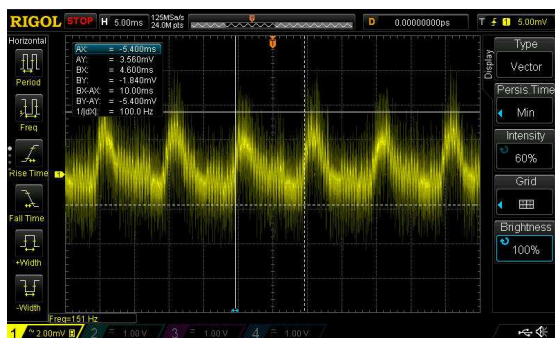
Hierna de resultaten van een selectie van SMPS-voedingen, die een aantal kenmerken van dit type voeding laten zien. Er zijn veel meer voedingen onderzocht, maar deze resultaten lieten zien hoe complex het uitvoeren van deze metingen kunnen zijn. Er zijn namelijk vele werkingsprincipes van SMPS voedingen [10] die ieder een eigen ruis- en rimpel gedrag laten zien. Het verslag toont derhalve allen die voedingen die het meest bijgedragen hebben aan het maken van keuzes.

3.3.1 NICE-Power SMP3010

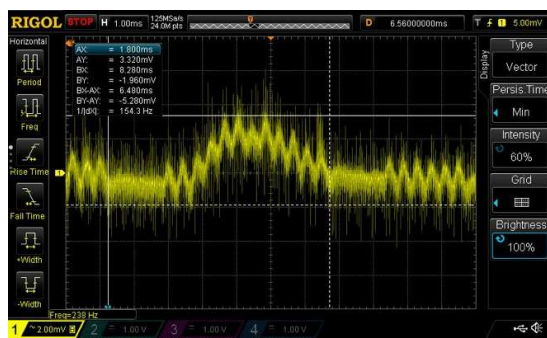
De NICE-Power SMPS3010 is een low cost labvoeding uit China. Deze voeding laat een complex van ruis en rimpel patronen zien.

- een 100 Hz rimpel
- een asynchrone schakelrimpel patroon van c.a. 154 Hz
- een schakelrimpel van 2.36 kHz
- HF componenten

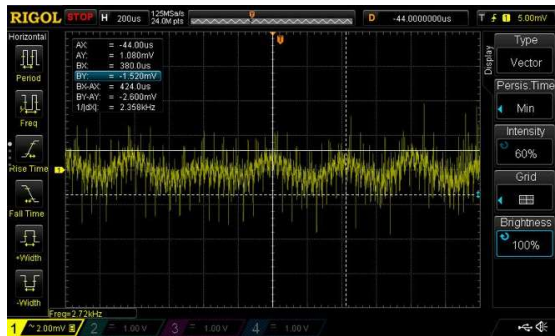
In de reek van gemeten voedingen bleek deze voeding veel storingscomponenten in- en nabij het audiospectrum te vertonen. Het is derhalve verklaarbaar dat toepassen van een grote condensator een merkbaar effect had op het audiobeeld.



a) 100Hz rimpel van 5.38 mVpp



b) 154.3 Hz patroon 5.28 mVpp



c) 2.06 mVpp patroon van 2.36 kHz met d) hoogfrequent componenten

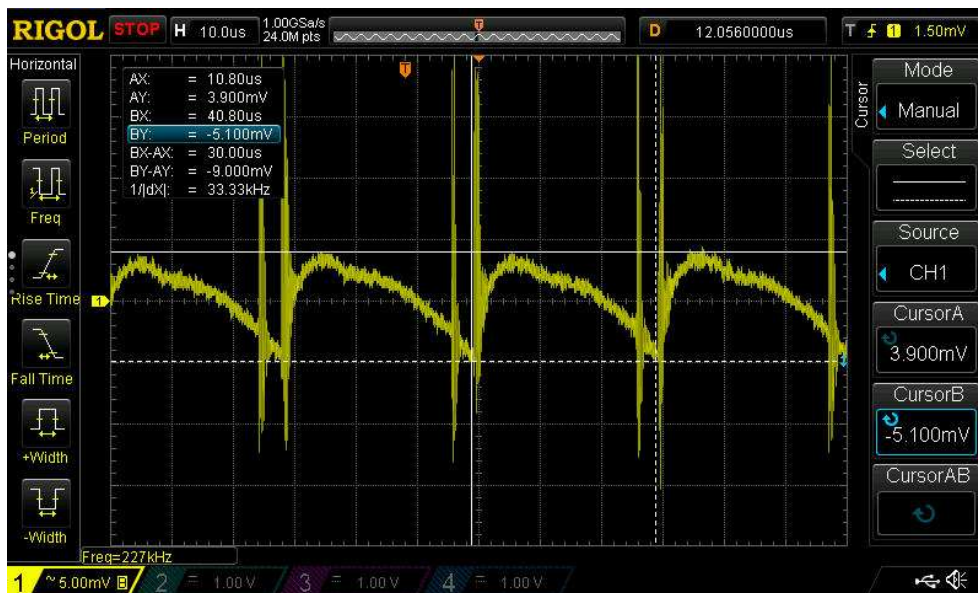
3.3.2 DTS100-ES



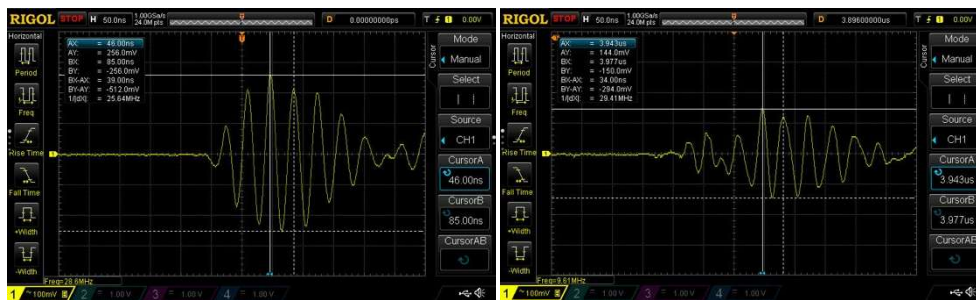
De DTS100-ES is een merkloze 24V/6A SMPS verkrijgbaar voor c.a. 7 euro bij een bekende webwinkel uit China. Het bijzondere aan deze voeding is dat het geen randaarde aansluiting heeft en dat er een spanning van 115V meetbaar is op het koellichaam. Een CE keurmerk ontbreekt ...

De voeding kenmerkt zich door de aanwezigheid van een hoofdrimpel van 9 mVpp met een frequentie van 33 kHz met daarop twee schakelpieken. Bij dieper kijken meten de schakelpieken 512 mVpp en 294 mVpp die, als je nog dieper kijkt uitslingeren op frequenties van 25 respectievelijk 30 MHz. Dit soort gedrag zagen we vaak ook bij andere SMPS-en uit de categorie "laptop" voedingen.

Omdat de frequentie (33 kHz) van het schakelgedrag zich in de nabijheid van het audio-spectrum bevindt, is de verwachting dat de invloed van dit gedrag merkbaar is.



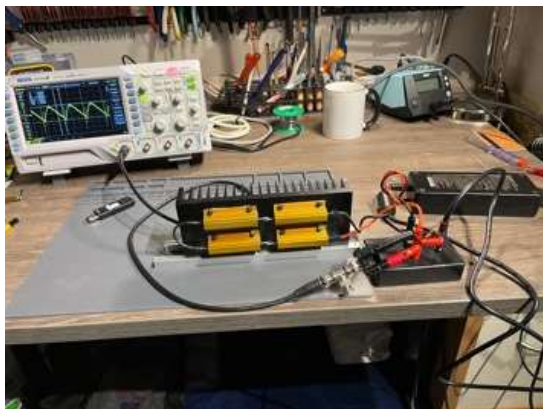
a) Hoofdrimpel 9 mVpp / 33.33 kHz



Uitslinger 512 mVpp/25.64 MHz

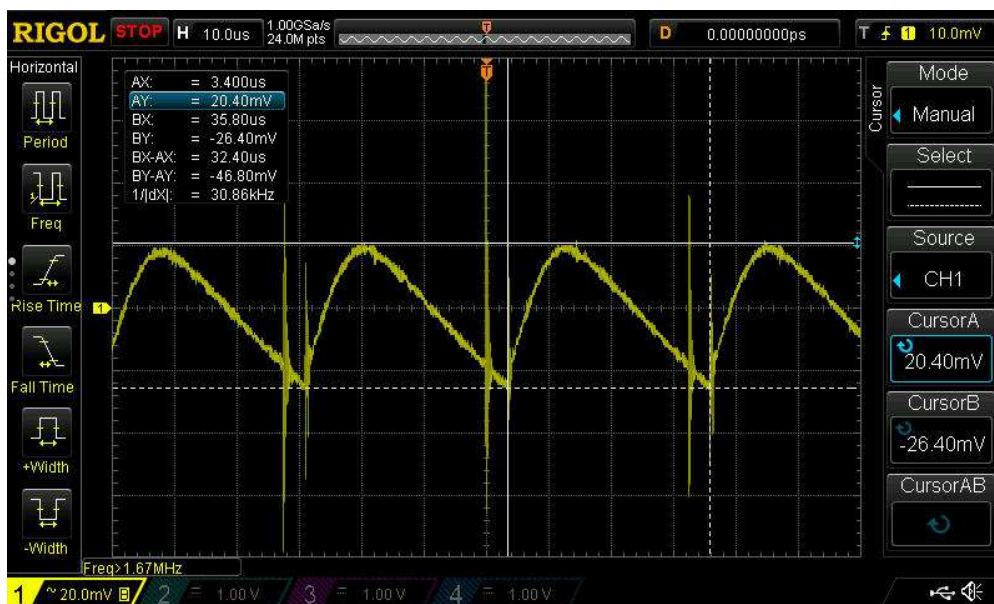
Uitslinger 294 mVpp/29.41 MHz

3.3.3 Mean Well GST120A24-P1M

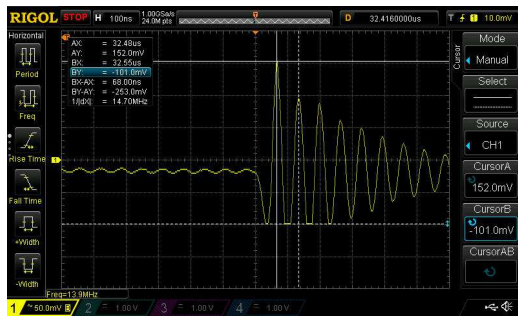


Deze Mean Well 24V/5A voeding is als beste [5] getest door Nelson Pass en daarmee aanbevolen als meest geschikte voeding voor het AMP CAMP project. De voeding is voor \$59 te bestellen by DIYaudio. Deze aanbeveling is mede aanleiding geweest om in eerste instantie onze ACTS-1 ook te gaan voeden met een SMPS.

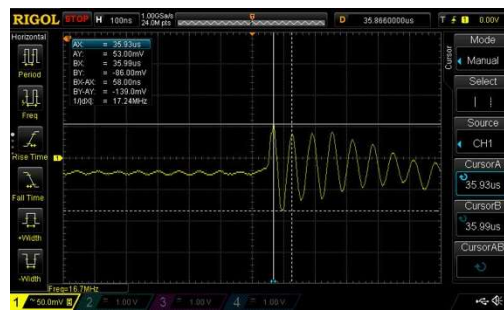
Bij de metingen valt direct de overeenkomst op met het signaalgedrag van de DTS100. De hoofdrimpel van de Mean Well is wel significant groter dan de DTS100: 46.8 mVpp ipv 9 mVpp met een iets lagere frequentie van 30.86 kHz. De uitslingers zijn wel kleiner. In potentie produceert deze voeding dus meer ruis op een iets lagere frequentie dan de veel goedkopere DTS100 variant.



Hoofdrimpel 46.8 mVpp / 30.86 kHz



Uitslinger 253 mVpp/14.7 MHz



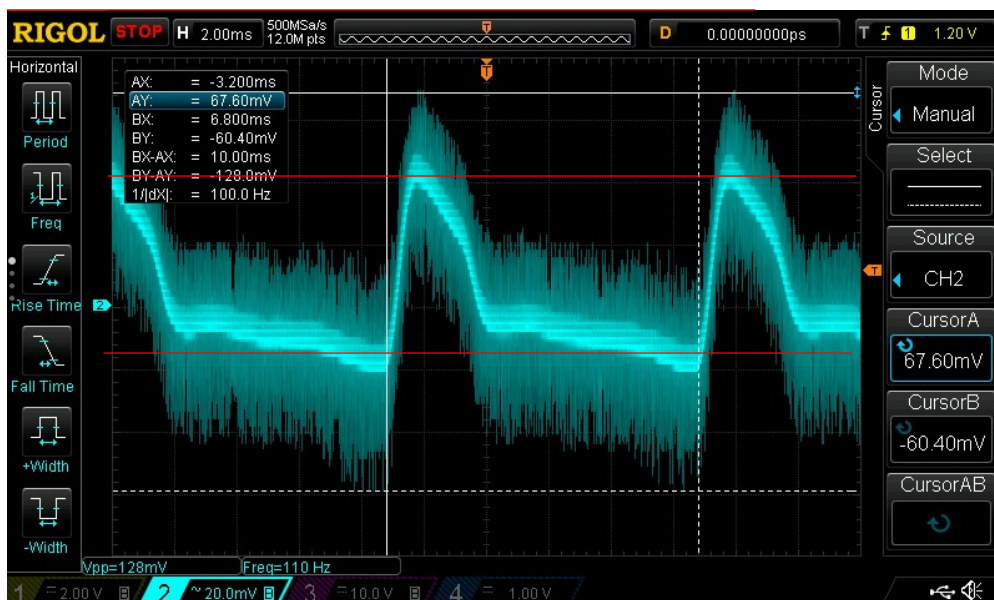
Uitslinger 139 mVpp/17.24 MHz

3.3.4 Connex SMPS300RS van Audiophonics

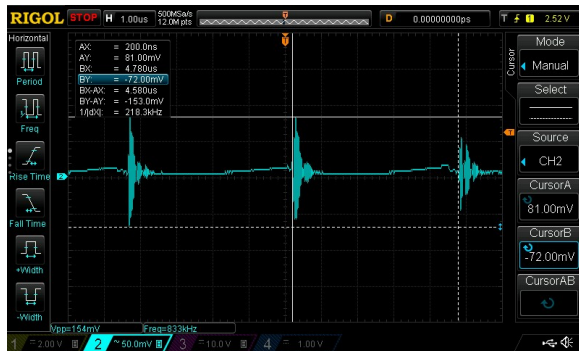


De 24V/300W Connex SMPS300RS voeding is speciaal ontworpen voor audio toepassingen. De fabrikant claimt dat de hoeveelheid EMI-storing veel lager is dan een conventionele “hard switching” voeding omdat deze voeding een LLC-converter met soft-switching toepast. Voor meer uitleg zie [8]. Een soft-switching voeding schakelt precies op een nul doorgang van de stroom, waarmee schakelverschijnselen geminimaliseerd worden. Tevens zijn verschillende in- en uitgangsfilters toegepast om storingen vanuit het net en de voeding te minimaliseren. Deze voorzieningen zou deze voeding volgens de fabrikant vergelijkbaar moeten maken met een goede geregelde lineaire voeding. Verder ligt de schakelfrequentie (218 kHz) een stuk hoger dan de andere SMPS voedingen. Luistertesten lieten zeker een verschil horen met de bijvoorbeeld de Mean Well voeding op gebied van openheid en ruimte.

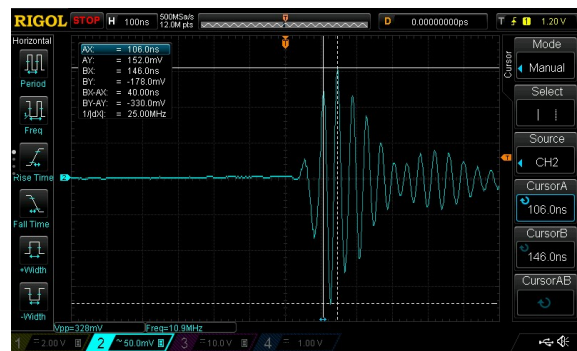
Wat opvalt bij deze voeding is de aanwezigheid van een 100 Hz rimpel.



Hoofdrimpel 128 mVpp (59.2 mV tussen rode lijnen) / 100 Hz



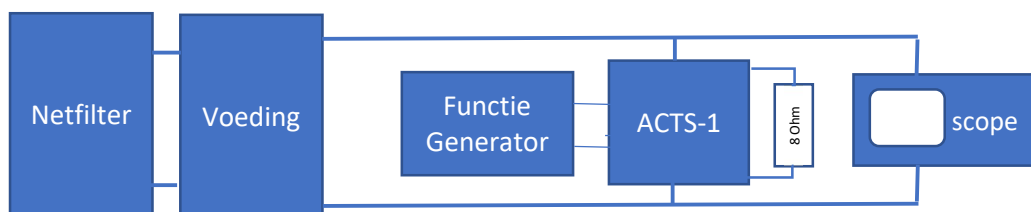
Schakelrimpel 153 mVpp / 218.3 kHz



Schakelrimpel uitslingering 328 mVpp / 25 MHz.

3.4 Dynamische belasting metingen aan schakelende voedingen

In het begin ontstond het idee om de voeding te bekijken wanneer de belasting dynamisch zou zijn. Hiertoe was onderstaande meetopstelling bedacht waarbij de versterker, aangestuurd door een functie-generator, als belasting gebruikt wordt. De metingen hebben als doel om te kijken of de voeding, bij het aanzetten van de burst, even minder spanning levert.



De functiegenerator werd ingesteld op het genereren van periodieke bursts, bestaande uit een periode met 10 sinussen gevolgd door twee perioden zonder sinussen. Tijdens het onderzoek zijn sinussen gegenereerd met een frequentie tussen 20 Hz t/m 20 kHz met amplituden van 1 Vpp t/m 4 Vpp. Hieronder een voorbeeld van een dergelijke meting aan de 24V Mean Well voeding en (met dank aan Ruud) een 24V Audiophonics Connex voeding. Daarbij is geel de uitgang van de functie generator, paars de uitgang van de versterker en cyaan de voedingsrimpel. Het voorbeeld gebruikt bursts met 2kHz sinussen.



MeanWell: Voedingsrimpel 188 mVpp



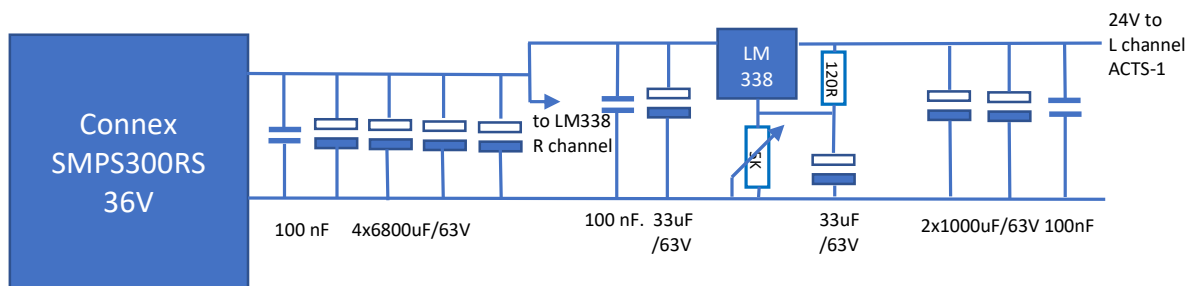
Audiophonics Connex: Voedingsrimpel 188 mVpp

Wat opvalt is dat we weinig verschil zien in rimpelgedrag die de bursts bij beide voedingen veroorzaken. We hebben veel voedingen op deze manier bekeken, maar kwamen uiteindelijk tot de conclusie dat dit onderzoek te weinig verschillen tussen de voedingen lieten zien. Wat wel duidelijk zichtbaar is, is een verschil in rimpel- en ruis componenten. De Audiophonics Connex produceert duidelijk minder ruis dan de Mean Well voeding. De Connex heeft echter wel meer last van een 100 Hz rimpel. Op basis van dit soort observaties is, in overleg met Menno, het onderzoek naar het dynamisch gedrag afgesloten. We besloten toen om verbeteringen van rimpel en ruis gedrag verder te onderzoeken. De 100 Hz rimpel zou op eenvoudige wijze verminderd kunnen worden

door het toepassen van een traditionele voltage regulator chip op basis van een LM338 of LM1084. Deze gedachte inspireerde de bouw van een regulator circuit en verder onderzoek op dit vlak. Menno vroeg of ik een dergelijk experiment kon bouwen.

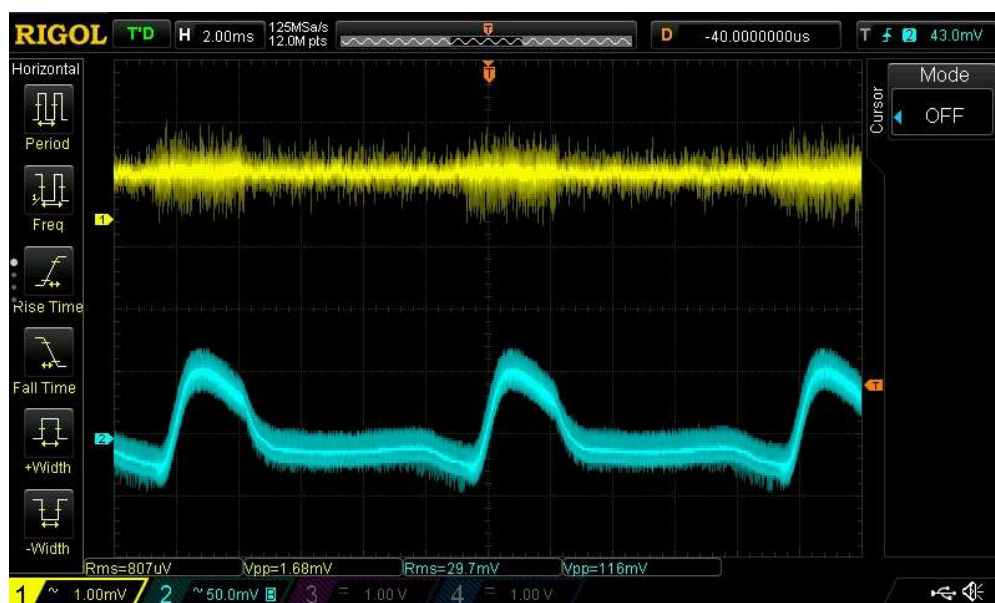
3.5 Statische metingen aan schakelende voeding met spanningsregelaar

Op basis van de conclusie uit het vorige hoofdstuk is de gedachte ontstaan om een regulator te bouwen die de 100Hz rimpel van de Connex SMSP300RS gaat onderdrukken. Er zijn genoeg voorbeelden van fabrikanten als Texas Instruments [9] die toepassing van dergelijk circuits illustreren. Ik heb besloten om een voeding te bouwen op basis van de LM338 met regel mogelijkheid en hoge piekbelastbaarheid (12A). Ik wilde een circuit waarmee een 24V-32V voedingsspanning geleverd kan worden omdat inmiddels uit ander onderzoek van Leon & Jack bleek dat een hogere voedingsspanning op de ACTS-1 significant minder slew-rate vervorming levert. Om deze regulator van voldoende spanning te voorzien heb ik een 36V versie van de Connex SMPS300RS bij Audiophonics aangeschaft. Het nut van grote buffer elco's uit het experiment met de labvoeding overwegende, heb ik gekozen voor grote buffer elco's gevolgd door een aparte regulator voor ieder kanaal:



De regulator werd afgeregeld op 24V. Dat betekent dat de regulator $12\text{ V} \cdot 1.2\text{ A} = 14.4\text{ Watt}$ warmte ontwikkelt.

Onderstaand plaatje laat het effect van de regulator zien. De cyaan lijn laat de output van de 36V SMPS zien met een rimpel van 116 mVpp. De gele lijn laat de output van de regulator zien, belast met een weerstand van 25 Ohm. De 100 Hz rimpel is volledig verdwenen. Je ziet nog wel ruis van 1.68 mV pp dat intensiever wordt in het ritme van de 100 Hz rimpel.



Output van de 36V SMPS300RS voeding (cyaan). Output van de LM338 regulator (geel)

Tevens ontstond de vraag of deze regulator ook van nut kan zijn bij een traditionele “hard switching” SMPS. Dit zou een aanzienlijke kostenbesparing kunnen betekenen. Ik maakte het gebouwde voedingschassis (zie H 4.2) mede geschikt voor het herbergen van een goedkope generieke 36V 7A variant uit China.

Hieronder het resultaat van de metingen aan deze goedkope voeding.



De “harde” schakelrimpel aan de uitgang van de voeding (cyaan) bedraagt 56 mVpp met een frequentie van 45 kHz. Deze rimpel wordt verzwakt door de regulator naar 2.36 mVpp (geel). Een verzwakking van 20 log $(2.36/56)=27.5$ dB.

Nu was het mogelijk om de 24V SMPS300RS naast de 36V SMPS300RS met regulator te beluisteren. De eerste luistertest is bij Menno in Hichtum gedaan. Hij gebruikte het nummer “Kyrie” van het album SPES door Frode Fjellheim. Hier hoor je een solist met koorzang op de achtergrond. Bij het gebruik van de regulator was onmiddellijk een toename van detail en ruimte waarneembaar. Bij de voeding zonder regulator kon je individuele zangers uit het koor veel minder goed onderscheiden en je hoorde een soort dispersie (fonkeling) in de samenzang. Het verschil was behoorlijk evident. Deze luistertest is vervolgens herhaald tijdens de eerstvolgende TS les waar we allemaal dit verschil konden horen. Luistertesten met de goedkope SMPS met regulator variant waren ook redelijk goed, maar de SMPS300RS met regulator toonde meer details en ruimte.

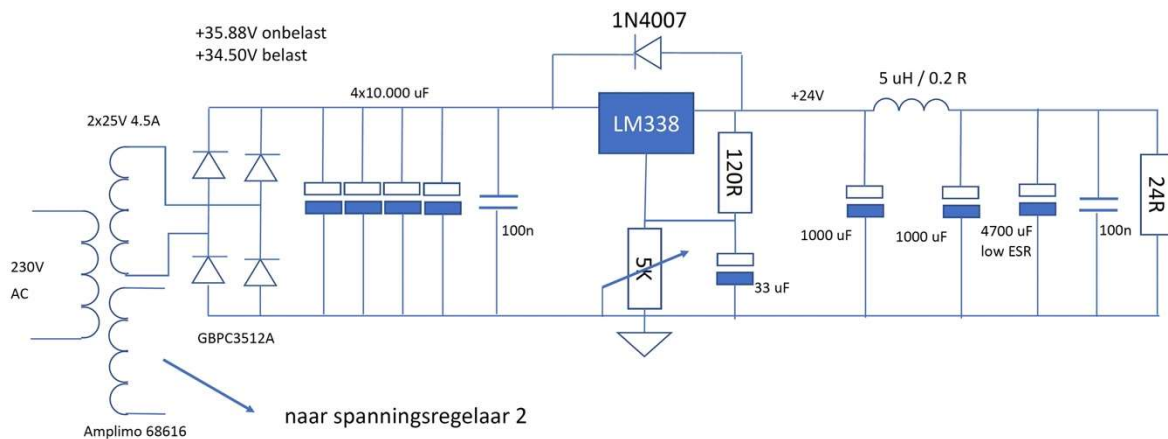
Conclusie: de voedingsruis van een SMPS heeft dus behoorlijk invloed op de ruimte en details van het geluidsbeeld. Deze observatie liet ons de vraag stellen: *Wat is het verschil tussen een regulator aangesloten op een SMPS versus een regulator aangesloten op een lineaire voeding* (een trafo met brugcel en elco's).

Parallel aan dit werk heeft Menno vervolgens ook aan Joost en Erwin gevraagd om een regulator met bijbehorend printplaatje te ontwerpen om het aan de TS leden beschikbaar te stellen. Dit geeft TS leden de mogelijkheid om deze regulator met trafo te gebruiken. Joost had metingen gedaan aan een regulator met een LM1084 vanwege zijn low drop-off voltage (1.5V) en gaf hierover nadere uitleg tijdens een TS les.

3.6 Statische metingen aan een lineaire voeding.

Inherent aan het gebruik van een SMPS is dus de aanwezigheid van switch ruis. Afhankelijk van het ontwerp weet een SMPS deze ruis te minimaliseren en haar componenten te verplaatsen tot ver boven het audio bereik zoals bij de Connex SMPS300RS voeding. Echter als je de deze hoogfrequente ruist nog verder weet te onderdrukken, dan geeft dit toch een gunstig effect op met name de definitie en ruimte binnen het geluidsbeeld. Een traditionele lineaire voeding produceert geen switching ruis. Dit rechtvaardigt de vraag: is een Lineaire power supply met regulator beter dan een SMPS met (dezelfde) regulator?

Hieronder het ontwerp van een lineaire voeding waarbij ik wederom mijn voorliefde voor grote elco's naar boven liet komen:



De regulator kan ik instellen op 24V voor de ACTS-1 en op 30V voor toepassing op de hogere ACTS-versies. Uit observaties van binnenwerken van low-noise lineaire powersupplies, zag ik aan de uitgang dat vaak een zogenaamd low pass pi-filter gebruikt wordt. Ik heb dit concept dan ook in deze voeding toegepast met twee condensatoren van 1000 uF en een spoel van 5 uH (met een lage ohmse weerstand van 0.2 Ohm). Voor dit 3^e orde Butterworth filter netwerk geldt voor de cut-off frequentie $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Voor dit filter komt deze frequentie dan uit op c.a. 7 kHz.

Een volgende luistertest met de ACTS-1 en deze voeding lieten weer meer details horen. Tijdens een luistersessie met hem kwam Clemens met een zeer illustratief percussie nummer "Psappha" van het album "Contemporary works for percussion" van Adelaide Ferriere. In dit nummer komen los van elkaar staande slagen op percussie instrumenten voor. Bij het uitsterven van deze klanken krijg je een indruk van de ruimte zelf. Met de lineaire voeding was deze ruimtelijke waarneming veel sterker. Bij de SMPS-voeding met regulator verdween de ruimtelijke informatie als het ware in een "gordijn" van ruis. Deze test is herhaald tijdens een TS-les. Daarbij kwamen we snel tot de conclusie dat lineaire voedingen in principe toch beter klinken vanwege het ontbreken van de schakelruis. De kwaliteit van een voeding speelt dus een essentiële rol bij geluidsproductie van versterkers.

3.7 Conclusies onderzoek naar voedingen.

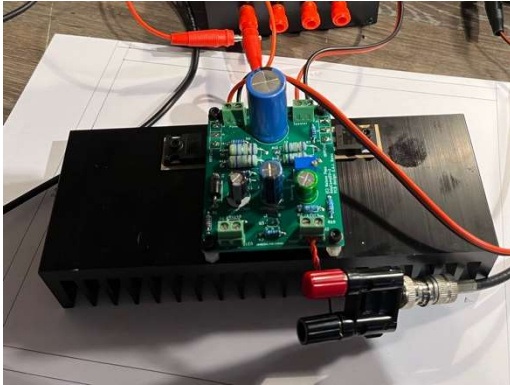
Het onderzoek naar voedingen heeft veel inzichten gegeven in de beïnvloeding van het geluidsbeeld door met name ruis componenten als restanten van het switching-proces van SMPS-voedingen. Ook werd duidelijk dat voedingen ruis vanuit het lichtnet doorgeven, hetgeen toepassing van netfilters motiveert. Ofschoon methoden als resonante LLC conversie met soft-switching op frequenties ver boven het audio bereik de geluidskwaliteit aanzienlijk verbeteren, blijft tijdens het vergelijk met een lineaire voeding de invloed op micro-details toch waarneembaar. Voorwaarde is wel dat je juiste nummers weet te vinden die de verschillen ook duidelijk waarneembaar maken. Ik heb tijdens het onderzoek op luistervlak veel geleerd van Menno, Clemens, Jack en mijn medecursisten.

4. Bouwfase

In dit hoofdstuk zal ik kort ingaan op het bouwen van een drietal versterkers, samen met verschillende voedingen die aan de basis hebben gestaan van de besproken experimenten. De experimenten hebben uiteindelijk gevoerd tot de bouw van de versterker voor de slotdag.

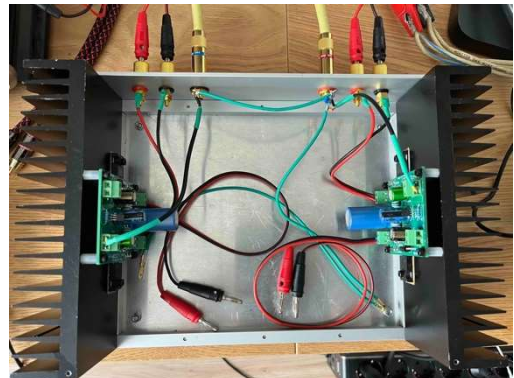
4.1 Bouw ACTS-1

De ACTS-1 is als eerste gebouwd om zo vergelijkende luisterexperimenten te kunnen uitvoeren en tevens als belasting te kunnen gebruiken voor dynamische voedingsmetingen.



Na het bouwen van de ACTS-1 printjes van Erwin zijn de printjes gemonteerd op een Fisher koelplaat van 75x200x40 mm met behulp van afstandsbusjes. Met een kolomboor heb ik daartoe gaten van 2.5mm geboord van 8mm diep om ze vervolgens met een 3mm “blinde-gat” tap van schroefdraad te voorzien. Mijn kolomboor kan de diepte van het gat tijdens het boren meten. Ook zijn op deze manier gaten met schroefdraad gemaakt voor de MOSFETs. Pas na het bevestigen op de koelplaat, heb ik de FET's vast gesoldeerd op de print. Hiermee voorkom je onnodige mechanische spanningen. Daarna kon ik de versterkers voor het eerst uitproberen. Ik heb de biasspanning afgeregeld op 10V bij een voedingspanning van 19V.

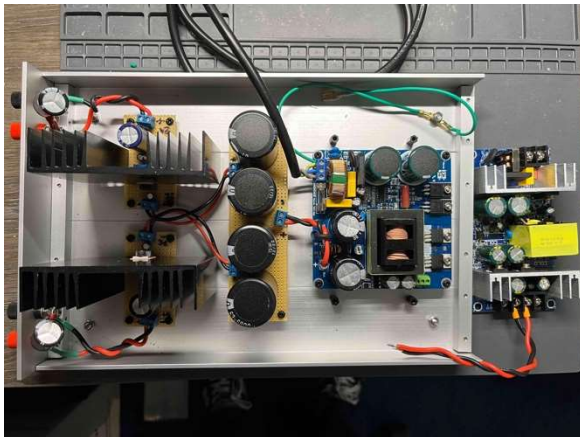
Omdat ik de versterker best wel intensief ging gebruiken voor metingen en luistertests, besloot ik een chassis te maken waar ik de twee koelplaten met versterkers op kon monteren. Dit maakte het geheel minder kwetsbaar. Omdat de uitgangen van de terminals op gelijke hoogte van de rand van de koelplaat uitkwamen heb ik de koelplaten gemonteerd op een 4mm aluminiumplaat, waarop ik randen met 10x10mm profielen had gemaakt. Door eerst gaten te boren in de plaat, en deze plaat vervolgens als mal te gebruiken voor het boren van de gaten in de profielen, kon ik alles netjes monteren. Vervolgens heb ik de profielen met gaten weer gebruikt als mal om de gaten te maken in de koelplaten. Daarna heb ik nog een 3mm aluminium profiel gebruikt voor het monteren van de luidspreker en RCA pluggen. Voor het zagen van de profielen gebruik ik een afkortzaag met speciaal blad waarmee je ook (zachte) metalen kunt zagen. Op deze manier kun je eenvoudig constructies maken met standaard aluminium profielen. Deze techniek heb ik hierna ook gebruikt om een tweetal chassis te bouwen voor de experimenten met voedingen en een nieuwe versie van de ACTS.



4.2 Bouw schakelende voeding experimenten.

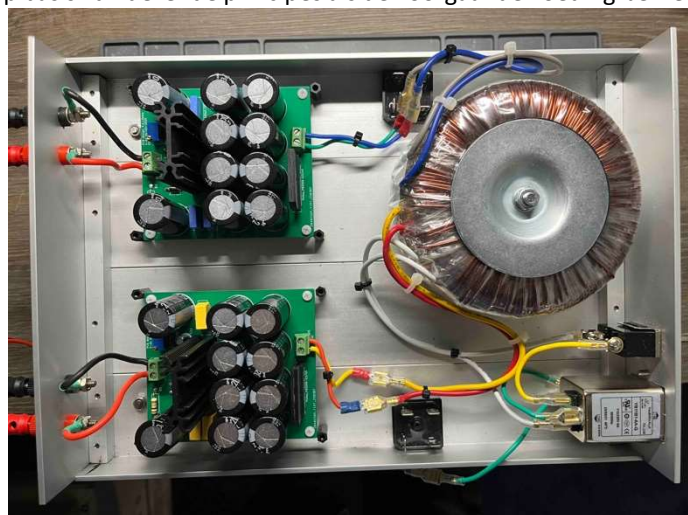
Bij de experimenten heb ik gekozen om de voedingen te voorzien van banaanpluggen. Ik voorzag eenvoudige plastic kastjes van banaan stekers om ze aan te sluiten op de klemmen van verschillende voedingen of kabels (zie H3.3.4). Voor experimenten met bijvoorbeeld de Audiophonics of andere voedingen met regulators, besloot ik een chassis te bouwen met behulp van aluminium profielen.

Het eerste chassis kan zowel de Connex 36V SMPS300RS als de merkloze 36V 7A voeding herbergen. Met behulp van 3mm hoekprofielen en platte profielen heb ik een U chassis gebouwd die bij elkaar gehouden wordt door 2 10x10mm profielen. Aan beide kanten heb ik een plat profiel gemonteerd voor de banaanstekkers. De regulator



beschreven in H3.4 is gebouwd op experimenteer print. De printen zijn bevestigd met afstandsbusjes met aan een kant een uiteinde met 3mm schroefdraad. Door op de juiste plekken een 2.5 mm gaatje te boren en er 3mm draad in te tappen (met een tap voor doorlopende gaten) kun je op een snelle manier een goede bevestigingen van de printplaatjes krijgen. Je ziet nog 4 loze zwarte afstandsbusjes boven en onder de Connex voeding. Hierop kan de merkloze voeding, die naast het chassis ligt, gemonteerd worden. De twee regulator koelplaten zijn zo groot gekozen omdat ze bij een 24V uitgangsspanning 12 Volt bij een stroom van c.a. 1.2A moeten kunnen verwerken.

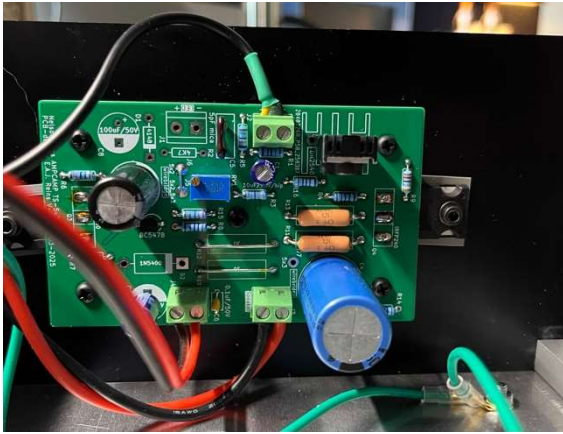
De experimentele lineaire voeding is gebouwd op basis van dezelfde principes als de voorgaande voeding. Je ziet alleen dat ik ook nog een profiel heb gebruikt voor een netaansluiting met filter om zo nog netvervuiling verder te kunnen dempen. De trafo is een Amplimo 225VA 2x25V ringkerntrafo. Hiernaast bevat het chassis is de voedingsprintjes met LM1084 ontworpen door Erwin Reins. Deze voeding is bedoeld om 30V te leveren. Dit chassis kan ook mijn eigen ontworpen regulators herbergen (zie H3.5) In dit geval worden de 2 bruggelijkrichters naast de trafo gebruikt. De zwarte afstandsbusjes kunnen de eigen regulator printjes herbergen.



Hiernaast hetzelfde chassis met eigenbouw regulator als 24V voeding voor mijn ACTS-1 experimenten. De regulators hebben daarom een grotere koelplaat. Het chassis past netjes op het chassis van de ACTS-1. Door nog aan de onderkant rubber dopjes met behulp van M4 boutjes te monteren (die je normaal als muurbescherming tegen deurklinken gebruikt) heb je ook een nette manier om het chassis op een ondergrond te plaatsen zonder te krassen.

4.3 Bouw ACTS-5x2.

De 5x2 versterker is primair gebouwd om het verschil tussen de ACTS-1 en ons verbeterde TS-ontwerp te kunnen beluisteren. Ik heb daarbij gekozen voor een voedingspanning van 30V. Het chassis is weer op dezelfde principes gebouwd als de ACTS-1 versterker. Vanwege de hogere voedingspanning en bias stroom van c.a. 1.8A heb ik gekozen voor een Fisher koelplaat van 100x200x40 mm. Hierop heb ik het printje van Erwin in 5x2 configuratie gemonteerd. Het chassis is weer opgebouwd met een 4mm aluminium grondplaat waar rechtstreeks de koelplaten op zijn geschroefd. Op de achterkant zijn de



luidspreker en RCA-connectoren bevestigd. Om experimenten met verschillende voedingen mogelijk te blijven maken, zijn de voedingskabels nog steeds uitgevoerd met banaanstekkers. Je ziet tevens dat het geheel is voorzien van veiligheidsaarding. Deze aarde is via een 100 Ohm weerstand met 100nF condensator verbonden met de audio-aarde. Het voedingschassis kan nu weer op het versterker chassis geplaatst worden voor een compact geheel.

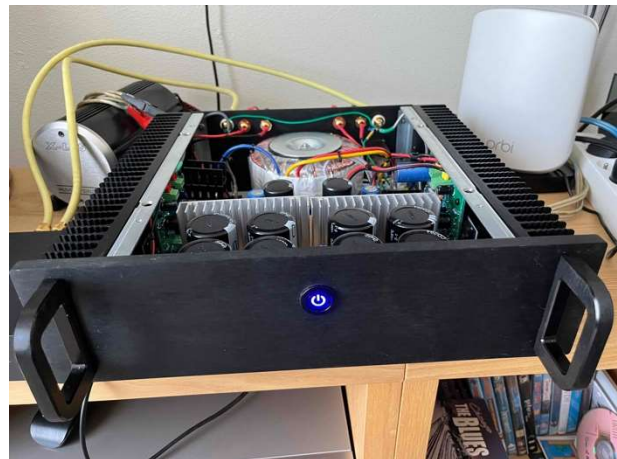


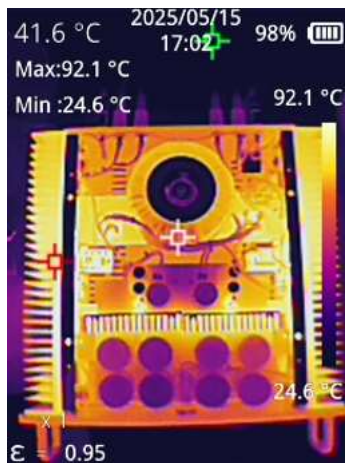
4.4 Bouw ACTS-5x3 FL01 met 30V lineaire eigenbouw voeding voor slotdag

Op basis van luistertesten tijdens de TS-lessen heb ik uiteindelijk gekozen voor het bouwen van de ACTS 5x3 configuratie die Frank Leegstra liet horen. Hij had daarbij ook een LHY lineaire low-noise voeding van 24V gebruikt. Deze versie klonk heel erg goed! Ik was benieuwd naar het effect van een nog hogere voedingspanning van 30V. Ik besloot mijn eigenbouw voeding hiervoor te gebruiken. Samen met twee printplaatjes in 5x3 configuratie, heb ik deze versterker samengebouwd in een Audiophonics Hifi 2000 2U "MiniDissipante" chassis van 400x250mm voorzien van koelplaten. Met behulp van standaard profielen heb ik een sub-chassis gemaakt om de twee regulators en trafo te monteren. De trafo is dit keer een 300VA 2x25V exemplaar. Voor de netschakelaar moest ik een 19mm gat in het 10 mm dik front boren. Met een 19mm boor,



smeerolie en een portie geduld ging het boren netjes. Ouderwets figuurzaag- en vijlwerk was nodig om een netfilter als chassisdeel te monteren. Voor de beugels aan het front moest ik nog een paar gaatjes boren om ze van binnenuit te kunnen monteren. Een paar mooie voetjes maakten het werk compleet. Het mooie blauwe licht van de aan/uit schakelaar bleek een goede keuze.

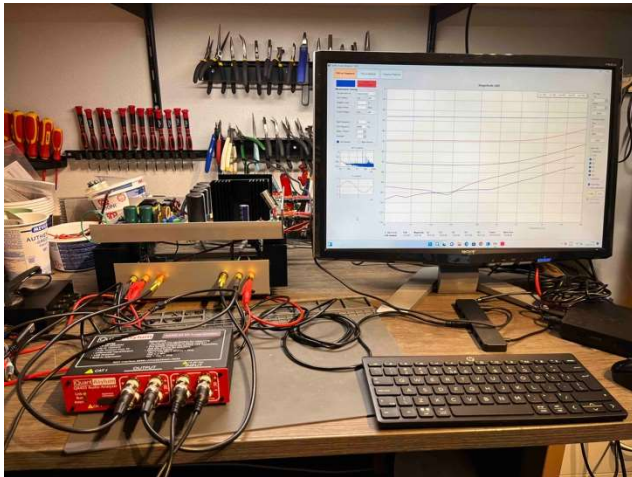




Kwa warmteontwikkeling is deze versterker best wel een uitdaging. Met name de DN2540 ingangs-FETs moest ik koelen met twee TO-220 koellichamen rug aan rug om de temperatuur onder de 100 graden te houden. Uit IR opnamen, zoals hiernaast, blijkt dat het chassis zelf c.a. 55 graden wordt. Een volgende versie zal zeker een 3U chassis van hetzelfde formaat moeten worden. Dit ook vanwege de beperkte hoogte van het chassis. Het chassis geeft namelijk geen ruimte om ook de DN2540's op de koelplaat te monteren. De koeling van de regulators zijn ruim voldoende.

5. Metingen aan de versterkers

Als nieuwe cursist heb ik dit jaar een ARTA-2 bouwpakket aangeschaft. Ik moest eerst een tijdje wachten op de levering van een speciale potmeter die niet op voorraad bleek bij Mouser. Toen ik even tijd had, heb ik de ARTA afgebouwd en afgeregeld volgens de procedure die Erwin op zijn website beschrijft. Ik gebruik een Scarlett Solo geluidskaart. Helaas bleek de ARTA-2 samen met deze kaart te gaan oscilleren. Ik heb toen de opstelling meegenomen naar de cursus en toen zag Menno dat de oscillatie veroorzaakt werd door een foutje in de printplaat: een weerstand aan de uitgang van een opamp werd niet opgenomen in het uitgangscircuit. Erwin heeft toen een modificatie aan de print voorgesteld om het probleem – dat alleen met deze geluidskaart optreedt – te corrigeren.



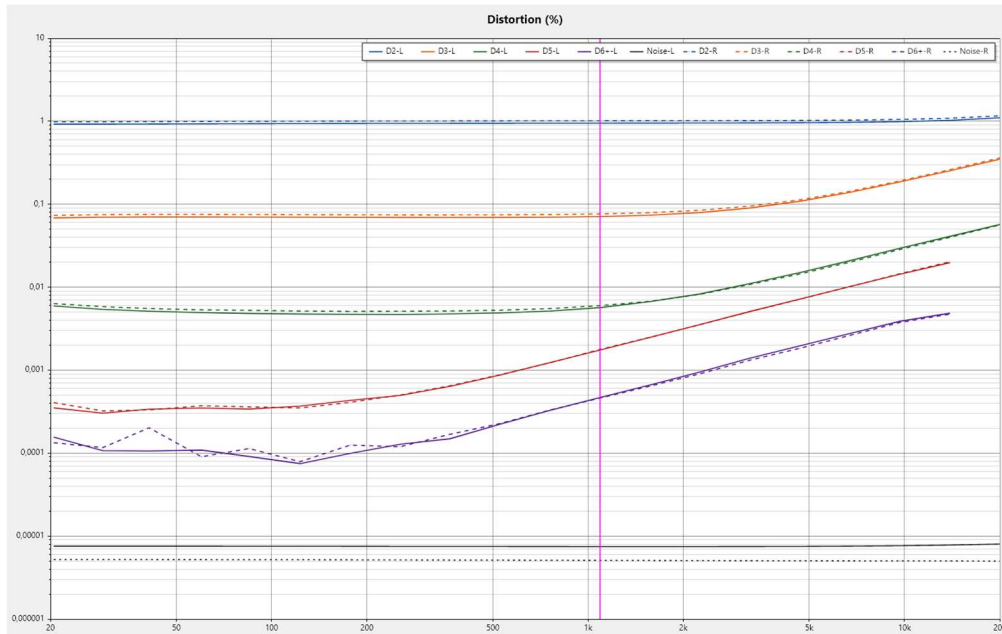
Tijdens dezelfde les liet Joost een nieuwe meetopstelling voor het meten van de harmonische vervorming zien op basis van een Quant Asylum audio analyzer. Joost had een meetscript ontwikkeld dat automatisch metingen kalibreert en vervolgens uitvoert. Ik besloot om deze analyzer aan te schaffen en het script van Joost te gebruiken voor het uitvoeren van mijn metingen. Het script is zeer eenvoudig in gebruik. Joost is bezig met nieuwere versies, maar voorlopig geeft het zeer bruikbare resultaten die ik voor de drie gebouwde versterkers hierna zal tonen. Hiernaast een indruk van de meetopstelling waarbij de ACTS-1 aan de tand gevoeld wordt. Een zeer eenvoudige Windows mini PC is al voldoende om

deze opstelling aan te sturen omdat al het werk door de Quant Asylum gedaan wordt. Je hebt wel een USB hub met aparte voeding nodig. Dit, omdat de Quant Asylum best wel wat stroom van de USB bus vraagt (810 mA).

De navolgende metingen geven voor mijn drie versterker versies de percentages harmonische vervorming (D%) weer voor de 2^e t/m 6^{de} harmonische. De metingen worden gelijktijdig voor het zowel het linker als het rechter kanaal uitgevoerd. Ook wordt de ruisvloer gemeten. Het meetprogramma staat toe dat het window van de metingen als bestand kan worden opgeslagen. Bij het configureren van de metingen geeft je aan dat de signaal generator zich moet instellen op “output power”. Hier geef je dan 1Watt op. Bij het opstarten van de meting zie je dat de toongenerator van de analyzer zich dan op deze waarde gaat instellen. Je kunt vervolgens ook de schaal van de grafiek instellen. De X as heb ik ingesteld op 20Hz-20 kHz en Y as van 0.000001%-10%.

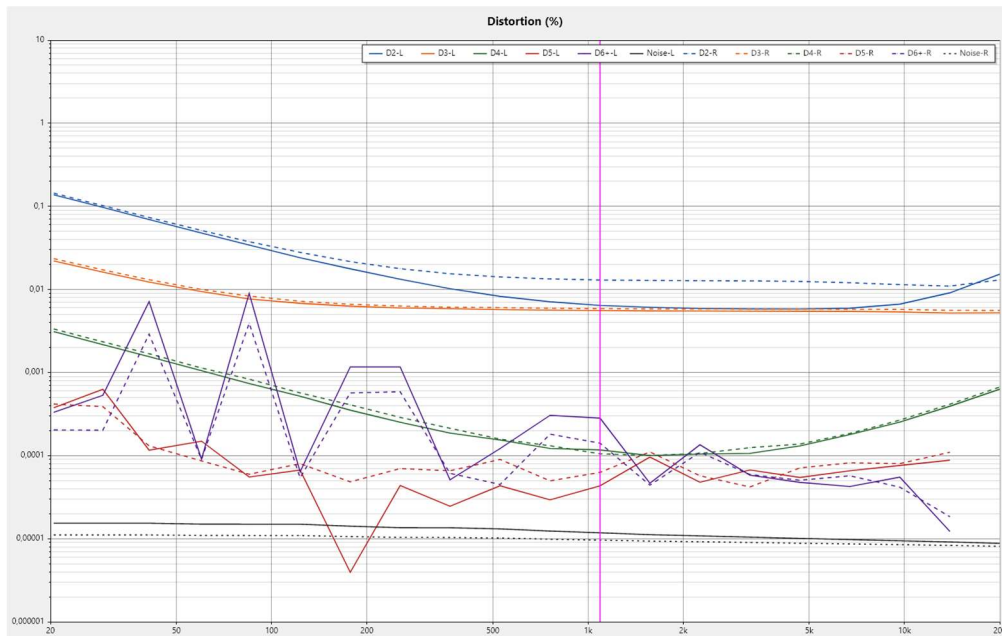
In de volgende jaren hoop ik dat deze metingen tot een TS-standaard worden verheven, zodat iedereen dan op dezelfde manier, snel, en zonder zelf te hoeven kalibreren, uniforme resultaten kan opleveren

5.1 ACTS-1



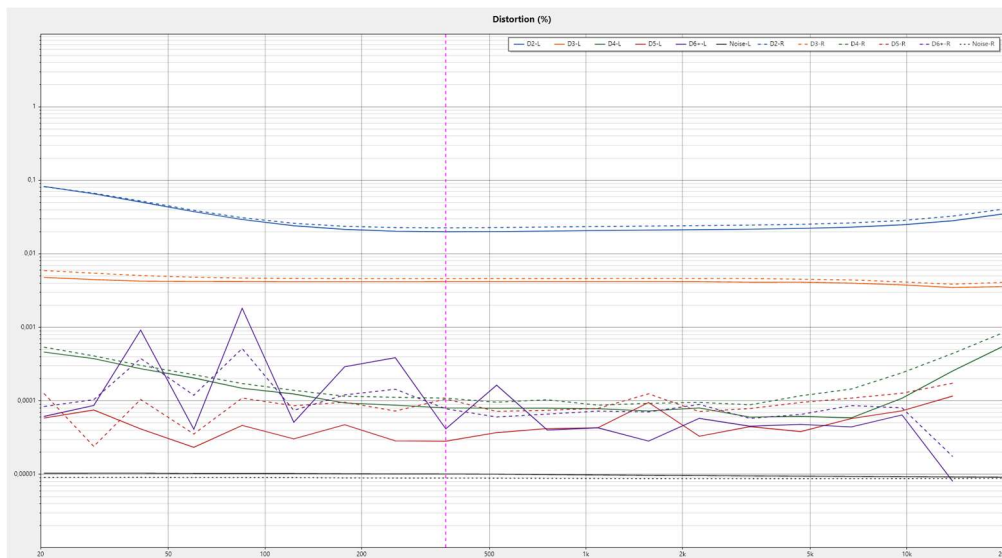
De versterker wordt gevoed met een 24V voeding op basis van de 36V Connex SMPS300RS voeding met regulator afgeregeld op 24V

5.2 ACTS-5x2



De voeding is een 225VA 2x25V trafo met TS-regulators per kanaal op basis van de LM1084 afgesteld op 30V.

5.3 ACTS-5x3 FL01



De voeding is een 300VA 2x25V trafo met eigenbouw regulators per kanaal op basis van de LM338 afgesteld op 30V.

5.4 Observaties bij de metingen

De ACTS-1 meting laat het karakteristieke Hiraga gedrag met aflopende Dn% met relatief veel harmonische vervorming zien. Ook nemen de vervormingen als functie van de frequentie toe als gevolg van het slew-rate effect. Corrigeren van deze aspecten vormen de belangrijkste uitdagingen van dit project.

De 5x2 laat een aanzienlijke reductie van D2% en D3% zien, waarbij D2% en D3% tussen de 500Hz en 5kHz redelijk gelijk zijn, ware het niet dat het R-kanaal meer vervorming laat zien dan het L kanaal. Het R-kanaal blijft bij de hogere frequenties wel langer vlak. De oorzaak hiervan moet verder onderzocht worden.

Bij de 5x3 FL01 zie je een hogere D2% en lagere D3% en D4% die ook vlakker verlopen. Op het oog minder last van slew-rate vervorming door de veel krachtigere aansturing vanuit Q3/R3. Alleen is de vraag waarom D2% hier hoger is dan bij de 5x2. Frank gebruikte 24V als voedingsspanning bij zijn experimenten.

6. Conclusie en toekomstig werk.

Dit studiejaar heeft mij heel veel geleerd over de kwaliteitsaspecten van audioversterkers en hoe je hierna moet kijken en moet beluisteren. De Menno principes, in contrast met de principes van Jean Hiraga, stonden centraal. Wat is de invloed van harmonische vervorming op het geluidsbeeld. Beide principes hebben hun charme. Harmonische vervormingscomponenten, die de verhoudingen van de Hiraga curve volgen, klinken warm en muzikaal. Een lekker glas wijn past volgens Menno hier heel goed bij. Maar dit gedrag versluiert ook de details en helderheid. Dit hoor je aan details die het bespelen van een instrument karakteristiek maken. Daarnaast bleek ook dat de ruis, veroorzaakt door het schakelgedrag van voedingen, een belangrijke invloed hebben op de details en ruimte. Dit effect verbaasde ons nog meer dan we in het begin konden verwachten. Naast de verbeteringen aan het versterker ontwerp, heeft mijn onderzoek aangetoond hoe belangrijk een low-noise voeding is voor detail en ruimte van het geluidsbeeld. Ik luister nu zeer regelmatig naar mijn slotdag versterker en ontdek steeds meer nummers die bijzondere details laten horen.

Mijn versterkers zijn nog zeker niet af. Ik kan proberen om de lineaire voeding nog stiller te maken door toepassen van betere in- en uitgangsfilters. In dit geval heb ik wel gevoeligere meetapparatuur nodig om de verbeteringen verder te onderzoeken.

Waar ik me nu op wil focussen is de versterker zelf. Allereerst ben ik benieuwd waarom het L en R kanaal van mijn 5x2 zo verschilt. Ook wil ik kijken of ik D2% van mijn 5x3 FL01 nog lager kan krijgen door te spelen met de verhoudingen van R11/13 en R12/14. Heeft een lagere voedingspanning effect? Welk effect heeft de kwaliteit van ingangs- en uitgangscondensatoren, temperatuur coëfficiënten van weerstanden, etc.

Mijn collega TS-ers hebben veel onderzoek gedaan naar het gedrag van de versterker met LT-Spice en experimenten met kwaliteit- en dimensionering van componenten. LT-Spice wordt het volgend studiejaar een nog belangrijker onderwerp, ik zie er naar uit!

Dankwoord

Tot slot, in het bijzonder Menno heel veel dank voor het geven van zoveel inzichten in de aspecten die bij het bouwen van een versterker belangrijk zijn. Dit geeft het werken aan het project zoveel voldoening. Daarnaast in het bijzonder Joost voor zijn kennis over LT-Spice, componenten en vele tips bij het bouwen en meten. Clemens, voor het samen uitvoeren van luistertests en zijn muziekk keuze. Cor en Rene voor de nuttige discussies tijdens het uitvoeren van de metingen aan de voedingen. Ruud voor het mogen lenen van zijn Audiophonics SMPS. Alle andere mede cursisten voor het bijdragen aan de verschillende ACTS versies en de leuke en nuttige discussies tijdens de TS lessen die voor mij voelden als een warm bad.

Referenties

- 1] Nelson Pass, “**Amp Camp Amp #1**”, diyAudio, juni 2012,
<https://www.diyaudio.com/community/threads/amp-camp-amp-1.214808/>
- 2] Amirm, “**Pass ACA Class A Power Amplifier Review**”, Audio Science Review, Nov, 2019.
- 3] Jean Hiraga, “**Amplifier Musicality - A Study of Amplifier Harmonic Distortion Spectrum Analysis**”, audioXpress, maart 2004, p.23
- 4] Jan Didden, Dennis Collin, Jean Hiraga, “**Musicality and Distortion: A Conversation**”, audioXpress, juli 2015
- 5] Mean Well voeding <https://diyaudiostore.com/products/meanwell-24v-5a-psu-with-power-cord>
- 6] Review Wiim Plus Pro: <https://www.whathifi.com/reviews/wiim-pro-plus>
- 7] Review Powerquest stroomfilters: <https://hifi.nl/artikel/28890/Review-AudioQuest-PowerQuest-2-en-3-stroomfilters.html>
- 8] Resonant LLC converter uitleg en principe
https://www.infineon.com/dgdl/Application_Note_Resonant+LLC+Converter+Operation+and+Design_Infineon.pdf
- 9] LM338 application sheet: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf>
- 10] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, **Fundamentals of Power Electronics**, Springer 2020,
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>

Appendix A

Lijst van enige Menno-regels voor buizenversterkers

1. Uitgang en Ingang mogen elkaar niet zien (Geen globale tegenkoppeling (omdat A_o niet $A_o = \text{constant}$ is voor alle van belang zijnde variabelen zoals tijd en frequentie en lineariteit en geheugen effecten en vooral de stapeling van transfers is hier ernstig)
2. Cure before you apply
3. Wel opeenvolgende lokale tegenkoppelingen
4. Stuur OPT laagohmig aan voor lage magnetische vervorming (Trans benadering)
5. Balanceer de ruststromen voor geringe LF Trafo-vervorming. OORZAAK van warm buizen-geluid (NFB kan dit nauwelijks genezen)
6. NFB vanaf primaire OPT gaat goed, vanaf secundaire is vragen om problemen (waaronder f-stabiliteit)
7. Het is zeer de vraag of NFB over OPT diens vervorming bij muziek kan reduceren (wel bij continue signalen, maar dat is geen muziek; hysteresis is een geheugen effect, NFB is een momentane correctie, vandaaruit al strijdig)
8. Vraagwaardig of NFB op twee verschillende aansluitingen ingang (+ en – ingangen) moet. Liever één inverterende ingang (virtuele aarde) waarop stroom-FB wordt toegepast Houdt hier HF in de gaten (C-Miller en eventueel delta-C-Miller). De aftrekking mag geen 2 transfers bevatten (voor + en voor -). Wat als die transfers ook nog verschillend zijn.
9. Hiraga benadering (met -n- afnemende Dn-componenten) geeft warm sluier geluid
10. D2 onder D3 voorkomt de Hiraga-sluier (Menno noemt dat het D2-gordijn)
11. D2,3... sluier plaats het geluid wel goed in de ruimte
12. Hoge DF is heel vraagwaardig, aldaar een zekere grens (DF richting 10 is meer dan voldoende)
13. Streef naar één bepalende transfer-functie (b.v. aan de ingang), schakel andere door hoge lokale NFB uit (Trans-benadering)
14. Maak geen stapeling van Transfer functies binnen een tegenkoppel-lus. Naar welke luister je dan uiteindelijk
15. Constante $A_n(f)$ tot minstens 20 kHz geldt ook voor buizen

KISS in het algemeen