

MASTERCLASS
HIGH-END
BUIZENVERSTERKERS

10 maart 2007

DOOR

**ir. Menno van der Veen
ir. bureau Vanderveen bv
Sassenstraat 21
8011PA Zwolle
info@mennovanderveen.nl
www.mennovanderveen.nl
tel/fax: 038-4547-704**

IN OPDRACHT VAN

**Uitgeverij Segment B.V.
Postbus 75
6190 AB Beek
www.elektuur.nl**

LOCATIE

**Holiday Inn
Eindhoven**

INHOUD MASTERCLASS 2 HIGH-END BUIZENVERSTERKERS

- 0) **Inleiding**
- 1) **Voorversterking**
- 2) **Eindversterking**
- 3) **Tegenkoppeling**
- 4) **Weergave van micro details**

Dagplanning van Masterclass Buizen - 2 (gegeven tijden zijn ongeveer, ik streef er naar)

10.00 - 11.00	start en blok 1) voorversterking
11.00 - 11.15	korte pauze
11.15 - 12.15	blok 2) eindversterking
12.15 - 12.45	lunch pauze
12.45 - 13.45	blok 3) tegenkoppeling
13.45 - 14.00	korte pauze
14.00 - 15.00	blok 4) micro details
15.00 - 15.30	napraten

INLEIDING

Het is een hele eer als je voor de tweede keer uitgenodigd wordt om een masterclass over buizenversterkers te geven.

Bij de evaluatie van de eerste Masterclass in 2006 kwamen gelukkig veel positieve commentaren, maar eentje was kritisch: "Menno stond op de voorgrond en de masterclass was een training". Vooral dit commentaar heb ik mij aangetrokken en ga er nu op in.

Ik preek inderdaad vanuit eigen parochie, want ik vertel over mijn kennis en mijn experimenten en mijn internationale literatuuronderzoek en publicaties. Dat de naam "Menno" daar bij valt, kan ik niet voorkomen. Mijn hoofddoel is en blijft bij dit alles een gedegen kennisoverdracht, waarbij Menno slechts een middel is.

Dan de naam "masterclass": zo'n bijeenkomst kenmerkt zich doordat anderen voordoen en de "master" bijstuurt, in een open zitting. Bij zo iets zou ik zelfs de neiging hebben om heel weinig te zeggen en anderen de ruimte te geven, maar daar betaalt natuurlijk niemand een cent voor. Op de een of andere manier moet je bij de hier georganiseerde bijeenkomst kunnen garanderen dat er functionele kennis wordt overgedragen. Dat doe ik door deze kennis te bespreken en uit te leggen. Wil iemand daar iets tegenover stellen of vragen stellen of een intensieve discussie houden, dan is daar volledig ruimte voor, dan gaan we de zo gewenste discussie en bespreking aan. Dus de naam "masterclass" is inderdaad niet optimaal. Maar dat verhindert mij niet om gedegen door te gaan met kennisoverdracht.

In mijn onlangs verschenen tweede boek over buizenversterkers (High-End Buizenversterkers 2) heb ik eigenlijk de meeste kennis al uitvoerig beschreven en uitgelegd. Daarom verwijs ik in deze bijeenkomst steeds naar dat boek (of goede boeken van anderen, zoals van Dielemans). Ik wandel door de theorie heen en breng in deze training inzicht in de onderlinge verbanden aan.

Het eerste uur gaan we praten over de grenzen van het frequentiegebied, startend bij de voorversterker tot aan de luidsprekeruitgang. Hier komen belangrijke stabiliteitsvoorwaarden te voorschijn.

Het tweede uur gaat de aandacht naar eindversterking in samenspel met de uitgangstransformator. Met nadruk wordt gekeken naar het frequentiebereik en de dempingsfactor en vervorming daarin.

In het derde uur staat tegenkoppeling centraal en wordt er een methode besproken die geen afbreuk doet aan de subjectieve ervaring en uitgelegd wordt waarom dit zo is.

Het vierde uur kijkt met nadruk naar de weergave van microdetails die net op de gehoordrempel liggen. Op grond van eigenschappen van de kern van de uitgangstrafo kan uitgelegd worden waarom bijvoorbeeld SE beter klinkt dan PP, en nog meer belangrijke subjectieve waarnemingen.

Met speciale dank aan Rohde en Schwarz Nederland BV voor hun hulp en ondersteuning met de speciale meetapparatuur die ze beschikbaar hebben gesteld.

**Copyright 2007: Ir. bureau Vanderveen bv
Menno van der Veen.**

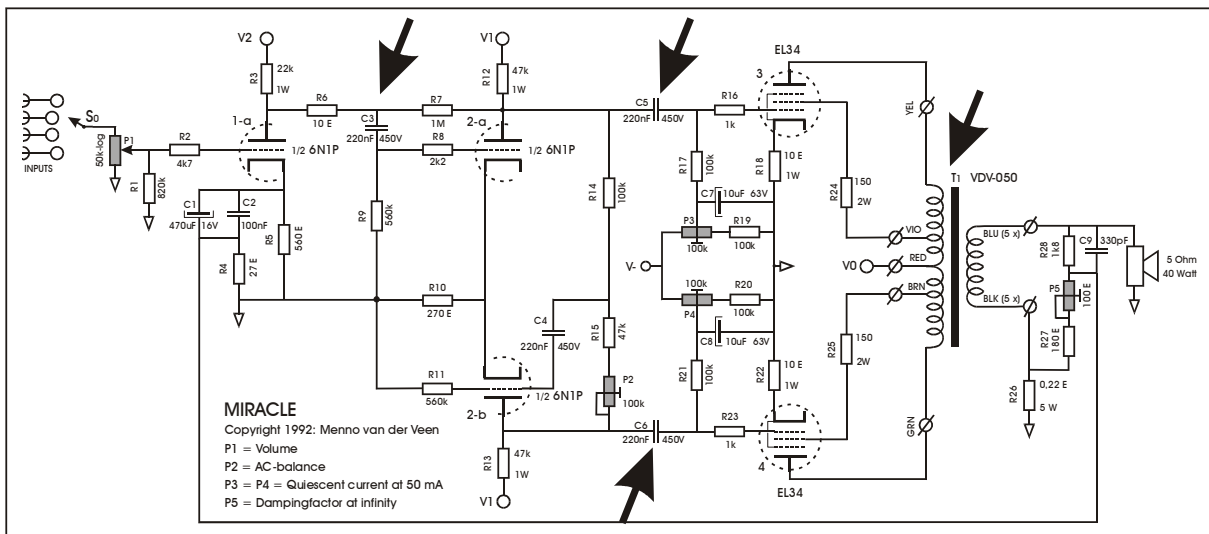
Voorversterking

- **Zeer breedbandig voor gehoorbereik en tegenkoppeling**
- RF-onderdrukking (> 100 kHz)
- Eindtrap beperkt het meest en laat dat ook zo zijn
- Uiterst lineair (weinig THD en IMD)

Bij 1 kHz gaat alles wel goed. Aan LF- en HF- kanten gaat het mis (20Hz en 20kHz), dus daar leggen we nu de nadruk op.

LAAGFREQUENT

- 1) Laagfrequent invloed van koppel condensatoren
- 2) Laagfrequent invloed van Lp



3) Formules:

$$f_{-3L} = \frac{1}{2 \pi (Z_U + R_L) C}$$

$$f_{-3L} = \frac{Z_{aa} // R_{ib-tot}}{2 \pi L_p}$$

4) Samenspel: ieder filter is high-pass en heeft een filterhelling van 6 dB per octaaf, drie filters achter elkaar levert 18dB/oct.

5) Gevolg, groepsvertraging en f-3L-totaal kruipt omhoog.

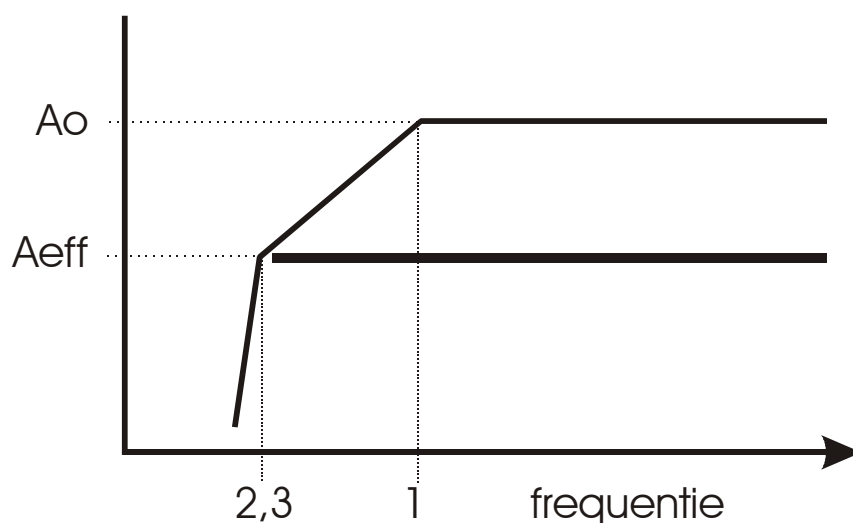
(Zie blz 175 boek-2)

DEMO: f-3L meting SPT-70 (hfdst.8 boek-2) zonder NFB

STABILITEITSEIS

6) De drie filterfrequenties mogen op elkaar liggen (niet optimaal) als er geen tegenkoppeling is

7) De drie filterfrequenties MOETEN zo ver mogelijk uit elkaar liggen als er wel tegenkoppeling wordt toegepast.



8) Er bestaan compensatie technieken (zie boek-2 blz 205-210)

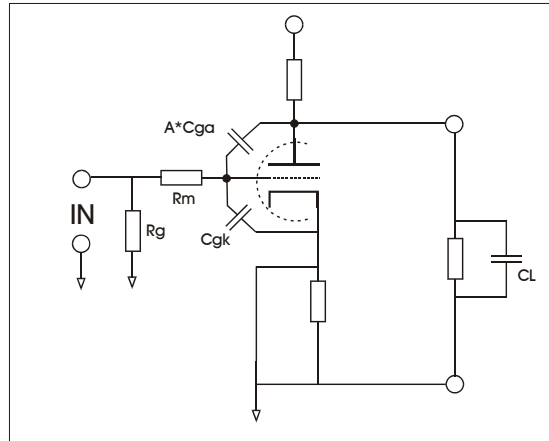
9) Probleem: Lp hangt van het signaalniveau af.

Zie laatste hoofdstuk van deze masterclass

HOOGFREQUENT

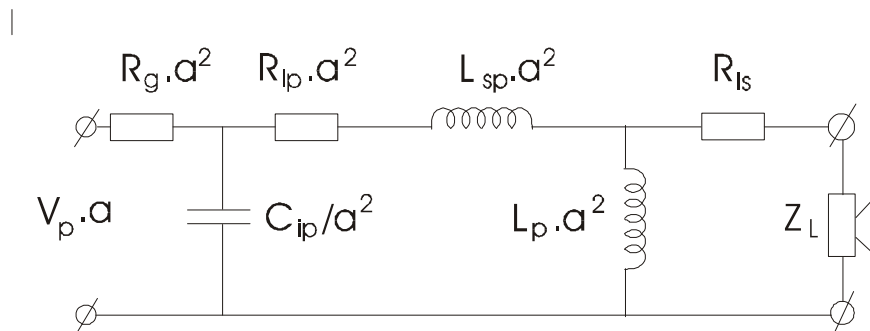
10) Hoogfrequent zijn Miller capaciteit en lay-out bepalend

(zie boek-2, blz 150, fig 4.6.1 waarbij $C7 = C\text{-Miller}$)



11) Echt hoogfrequent bepalend is de OPT met lekinductie L_{sp} en interne primaire capaciteit C_{ip}

(Zie boek-2 blz 154, fig 4.9.2)



12) Het filter dat door L_{sp} en C_{ip} gevormd wordt is een 2-e orde filter, en de f_{-3H} frequentie moet zover als mogelijk is boven 20kHz liggen (en ruim onder de Miller f_{-3M} frequenties)

Deze eis is zonder tegenkoppeling niet zo belangrijk; met tegenkoppeling is het een absolute must (zie verderop).

CONCLUSIES

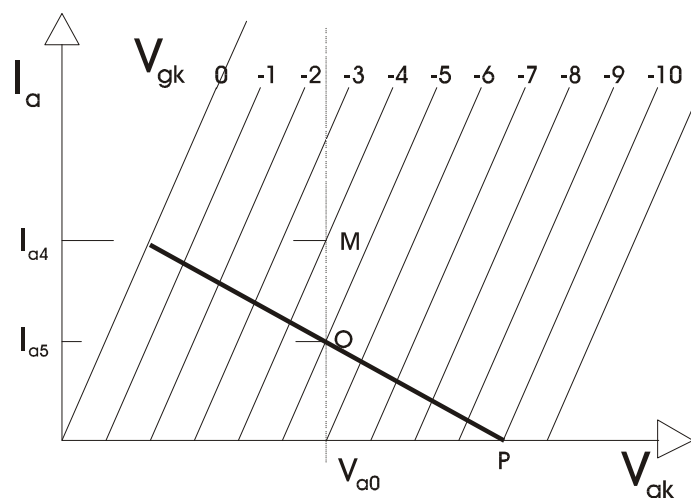
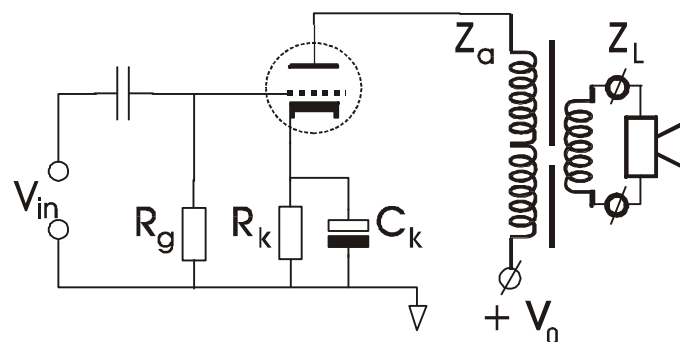
- 1) leg laagfrequent de f-3L punten uit elkaar. Dit geldt zowel met als zonder tegenkoppeling, om de vertraging in de groepslooptijd (die hoorbaar is) zo gering mogelijk te maken.
- 2) houdt er rekening mee dat L_p niet constant is
- 3) ontwerp zo laagohmig mogelijk (Miller invloed klein)
- 4) Zorg altijd dat de OPT een f-3H boven 20 kHz heeft
- 5) Als je tegen gaat koppelen MOET f-3H van de trafo ver boven 20 kHz liggen (anders ontstaat instabiliteit, of spectrum verandering van de vervorming, zie verderop).
- 6) Zonder tegenkoppeling zijn de eisen minder zwaar, instabiliteit treedt niet snel op, vooral als je er voor zorgt dat de in- en uitgang ver van elkaar verwijderd zitten.

EINDVERSTERKING

- principe en voor- en nadelen SE en PP
- samenspel met OPT in frequentie domein
- wat is dempingsfactor en DDFD

SINGLE ENDED

- 1) **enkelvoudige eindbuis** of eindbuizen parallel
- 2) OPT heeft **enkelvoudige primaire** wikkeling
- 3) door de primaire loopt een **constante DC ruststroom**
- 4) de kern heeft een **spleet** om deze I-DC te verwerken
- 5) slechts $\frac{1}{2}$ van de **magnetische ruimte** kern voor audio
- 6) vermogen evenredig met spanning in het kwadraat, dus voor hetzelfde vermogen is **bij SE de kern 4 x zo groot als bij PP**
- 7) door de spleet gaat de **Lp zelfinductie fors omlaag**
- 8) de "**loadline**" in de eindbuis is **enkelvoudig**.



- 9) Zie hfdst. 2.1 en 2.2 in boek-2 voor meer details

VOORDELEN SE

- 10) eenvoud van concept
- 11) optimaal trafo-gedrag (zie verderop)
- 12) zeer lineair bij zogenaamde low-mu buizen
- 13) uitstekende weergave micro-details (zie verderop) als trioden worden gebruikt (met nadruk op low-mu).
- 14) hoofdzakelijk 2-e harmonische vervorming (maskering)

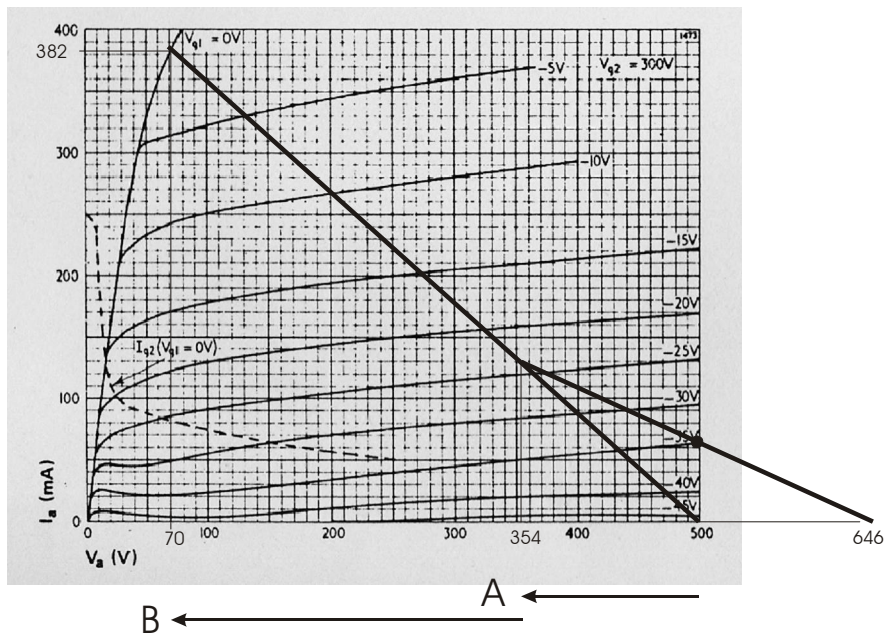
NADELEN SE

- 15) veel ijzer nodig voor gering vermogen
- 16) dure componenten
- 17) zeer zware eisen aan de voeding
- 18) volumineuze opbouw (klein kan bijna niet)
- 19) dieplaat weergave wordt begrensd door L_p

PUSH-PULL

20) Door de kern loopt nu geen DC-ruststroom

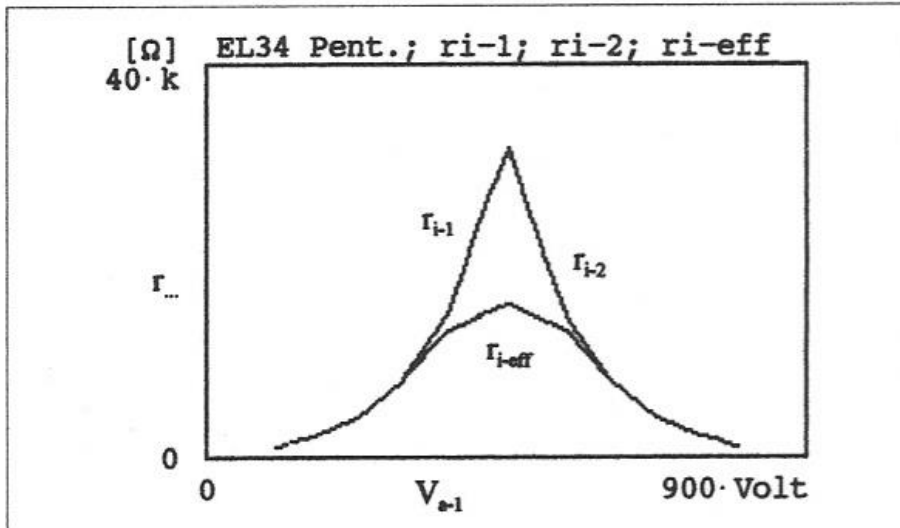
21) De "load-line" is dubbel (meestal klasse AB)



6550 PP versterker, $V_{a0} = 500V$, $I_o = 65 \text{ mA}$, $Z_{aa} = 4k5$

Zie voor meer details Masterclass 2006 en boek-2 hfdst. 2.6

22) Er ontstaat DDFD (dynamische dempingsfactor vervorming) (zie boek-2 blz 99 fig 3.3.5). Nu volgt de eerste uitleg.



↑ **Figuur 3.3.5** Inwendige weerstanden als functie van V_{a-1} .

23) Vervorming bevat geen 2-e harmonische (slechtere maskering)

DEMO : THD gedrag 1 kHz SPT-70 zonder tegenkoppeling

VOORDELEN PP

24) heel **veel vermogen** (efficiency tot > 70%)

25) **klein** en met weinig staal

26) **weinig gevoelig voor voeding**

NADELEN PP

27) **THD-spectrum minder maskerend**

28) **complexe** schakeling

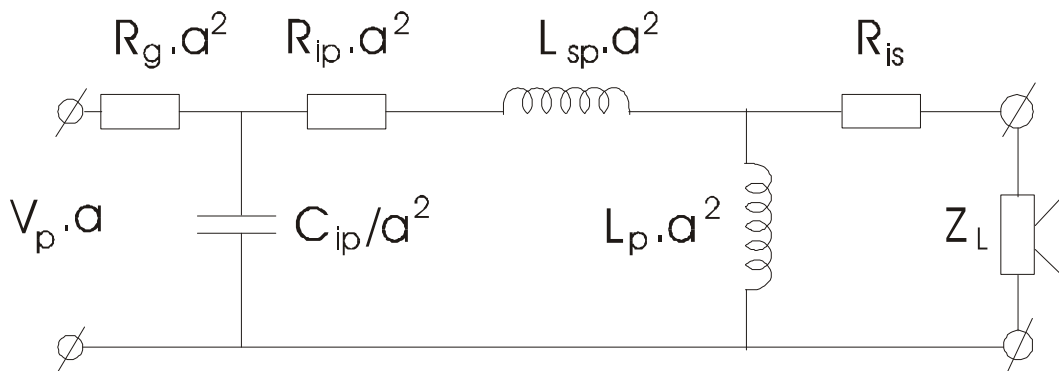
29) **DDFD-ervorming** die bijna niet grijpbaar is

30) **minder lineair dan SE**, tenzij

SAMENSPEL MET OPT

31) stel de eindbuizen voor als een enkelvoudige spanningsbron, met daarmee in serie een NIET CONSTANTE weerstand R_g , die de totale inwendige weerstand van de eindbuizen representeert.

32) gebruik het vervangingsschema van de OPT



33) R_{ip} en R_{is} stellen de wikkelingweerstand voor, ze zorgen voor vervelend warmteverlies, mijn zijn verder niet zo storend.

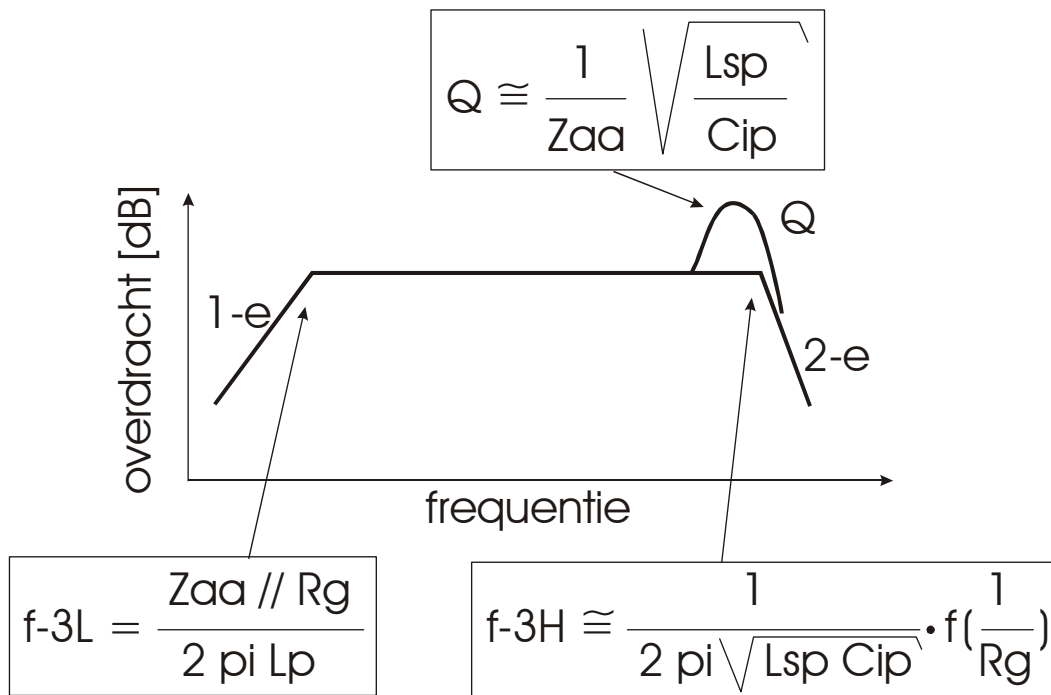
Maak de wikkelingen van zo DIK MOGELIJK draad.

In het vervolg verwaarloos ik R_{ip} en R_{is}

34) Overblijvend zijn nu R_g , C_{ip} , L_{sp} , L_p en Z_L plus $a = N_s/N_p$

35) Zie boek-2 hfdst 4.10.4 blz 156 voor de complete formules.

Onderstaand figuur vereenvoudigt ze.



CONSEQUENTIES

36) **LAAG** Z_{aa} en R_g klein is gunstig (triodes)

L_p zo groot mogelijk (PP en niet SE)

Let op: R_g is NIET CONSTANT

Let op: L_p is NIET CONSTANT (zie later)

37) **HOOG** L_{sp} en C_{ip} zo klein mogelijk maken

L_{sp}/C_{ip} voor $0.5 < Q < 0,74$

38) Meestal koop je gewoon een OPT met gegeven "Lp" en Lsp en Cip.
Toch kun je drastisch invloed hebben op de weergave

39) **LAAG** indien te weinig, dan R_g kleiner maken (triode in plaats van pentode)

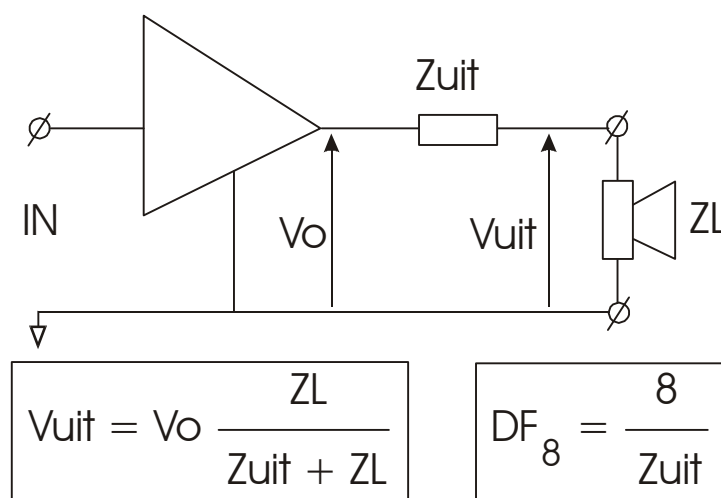
indien te veel, boemerig: dat heeft vooral met demping te maken, R_g kleiner of tegenkoppeling groter, of basreflexpoort extra dempen.

40) **HOOG** indien te weinig, dan R_g kleiner maken of tegenkoppeling groter

indien teveel, dan Capaciteit over primaire want meestal zal Q te groot zijn (opslingering)

DEMPINGSFACTOR ?

41) De dempingsfactor is een cijfer voor de eindversterker hoe goed deze de luidspreker onder controle kan houden.



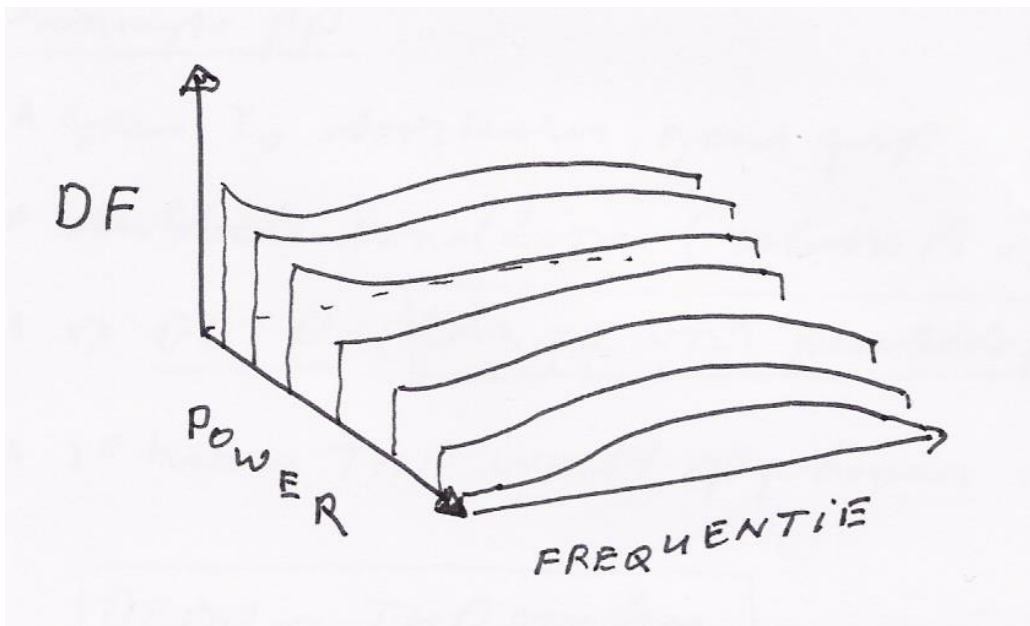
42) Als $Z_{uit} = 0$ (oneindig hoge demping), dan $V_{uit} = V_o$

43) Als $Z_{uit} > 0$ (normale situatie), dan $V_{uit} < V_o$

44) Z_L is frequentie afhankelijk, dus V_{uit} ook
(gaat mee met $Z_L(f)$ en vertoont hetzelfde gedrag)
(alleen als $DF = \infty$, dan heeft $Z_{XL}(f)$ geen invloed)

45) We weten nu:

- a) Zuit is evenredig met R_g van buizen
- b) R_g van buizen hangt af van de amplitude
- c) via de OPT wordt Zuit ook nog frequentie afhankelijk (L_p , L_{sp} , C_{ip}); dus \Rightarrow Zuit(f)
- d) dan ook de DF afhankelijk van frequentie, amplitude
- e) dan gaan $DF(f, \text{ampl})$ en $ZL(f)$ een heel complex samenspel aan wat ik DDFD gedoopt heb.



Voorbeeld van complexe DF gedrag als functie van amplitude en frequentie

46) Conclusie

- a) complexe relatie Zuit en ZL
- b) afhankelijk van amplitude en frequentie
- c) bijna niet afzonderlijk traceerbaar

d) in de ontwerp-fase mee rekening houden

Metingen bij 1 kHz zijn echt NIETS zeggend over wat er bij de HOORBARE grenzen van 20Hz en 20kHz gebeurt.

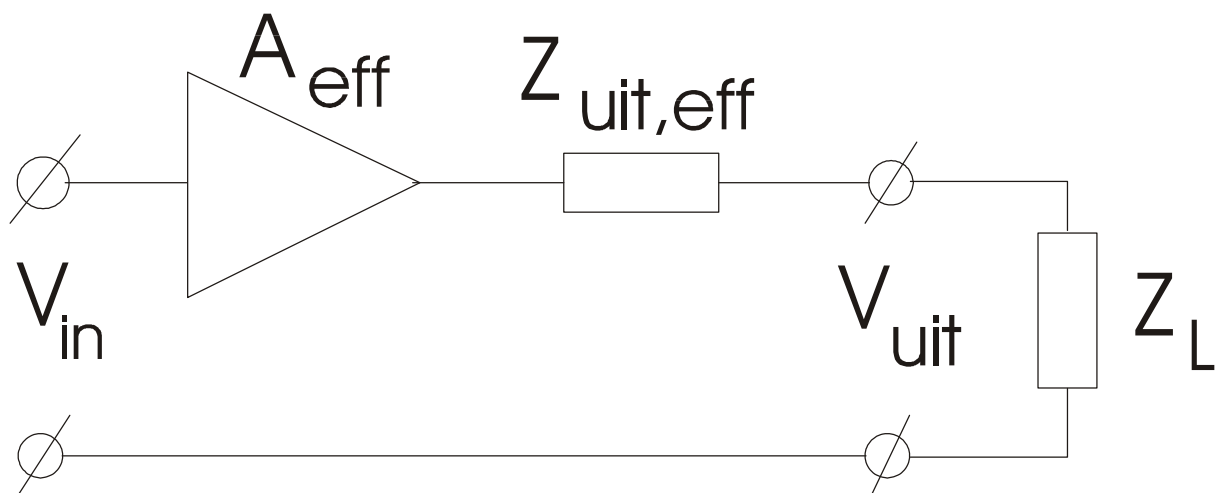
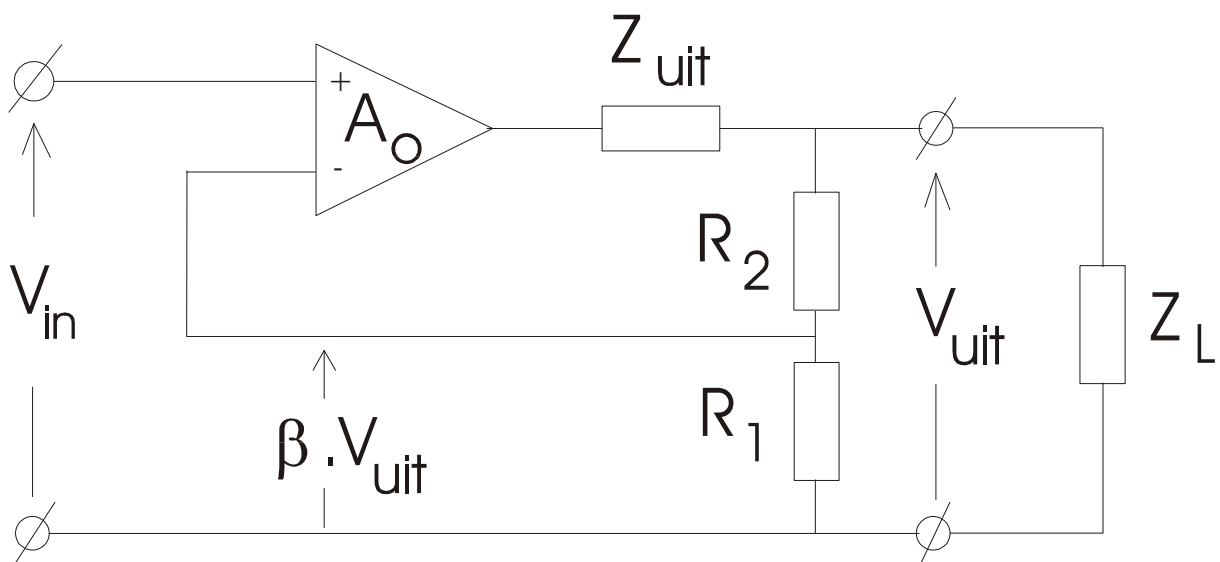
TEGENKOPPELING

Zie mijn boek-2 hoofdstuk 5 voor de complete bespreking.
Nu richt ik me op hoofdlijnen en geef een toepassing.

1) Functie tegenkoppeling:

- a) wegwerken van fouten (oeps)
- b) verhoging DF
- c) verlaging THD
- d) stabilisatie versterkingsfactor
- e) stabilisatie frequentiebereik
- f) omdat het beter klinkt ?

2) Principe van spanningtegenkoppeling (niet inverterend):



3) Formules: $A_{eff} =$

NB: als het goed is $A_{eff} < A_o$

$Z_{uit,eff} =$

NB: als het goed is $Z_{uit,eff} < Z_{uit}$

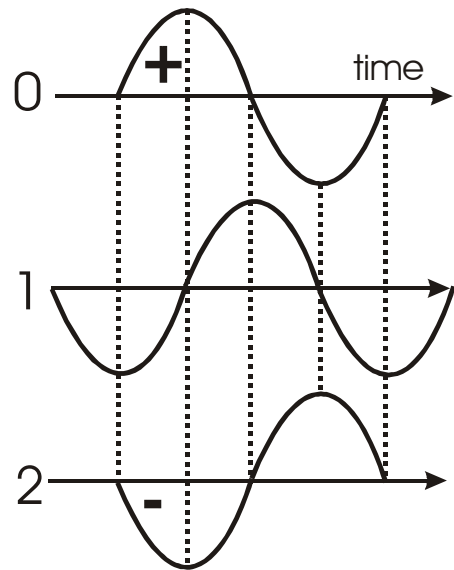
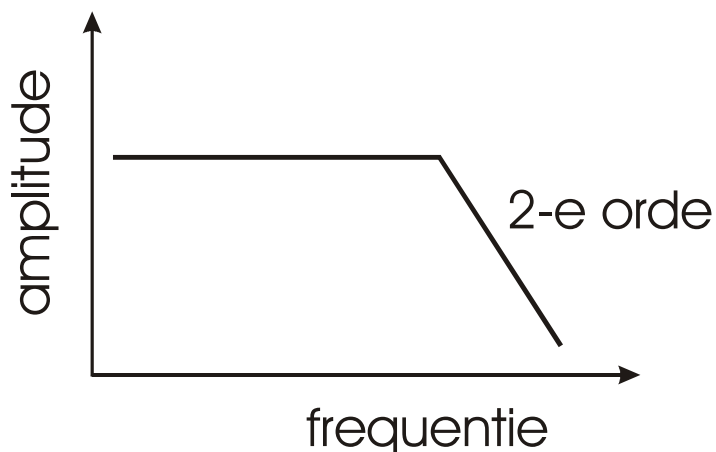
4) In formules heel eenvoudig, de praktijk is weerbarstig.

5) Dat komt omdat A_o niet constant is, maar $A_o(f)$

6) Dat komt omdat Z_{uit} niet constant is maar $Z_{uit}(f, \text{amplitude})$

7) Voorbeeld:

- goede versterker met nauwelijks invloed C-Miller
- bij hoge frequenties heeft de OPT invloed met L_{sp} en C_{ip}
- dit is een tweede orde filter in de OPT
- een 2-e orde draait het signaal over 2×90 graden
- dan verandert het "teken" van het uitgangssignaal
- plus wordt min en omgekeerd
- $\beta \cdot A_o$ wordt negatief, $(1 + \beta \cdot A_o)$ wordt kleiner, $A_{eff} > A_o$
- dan verandert tegenkoppeling in meekoppeling
- wat overblijft is dan een middengolf zender.



TEGENKOPPELEN VAN DE SPT70

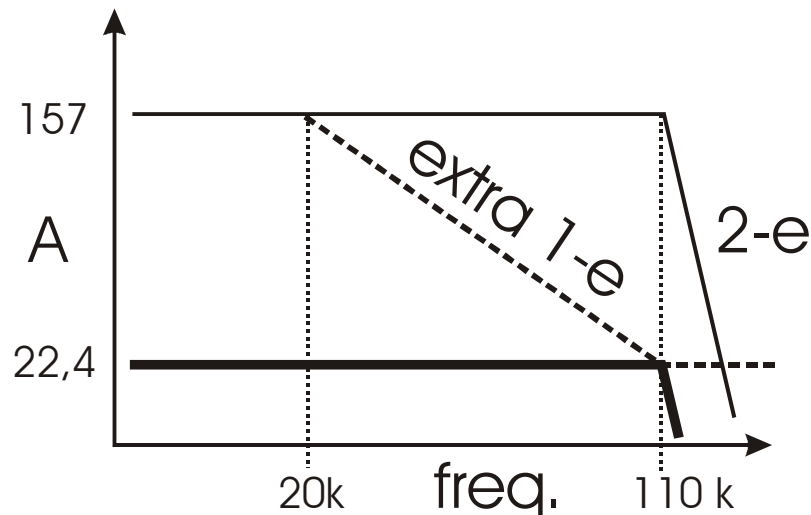
8) Zie voor details hoofdstuk 8 van boek-2.

Wat ik nu bespreek is in het boek NIET behandeld.

9) Gegeven SPT70 : **$A_o = 157 \times$, naar $A_{eff} = 22,4$**
 $f_{-3H} = 110 \text{ kHz}$ (2-e orde, geen NFB)
Zuit = 3,2 Ω
Miller invloed ver boven 110 kHz
We kijken nu alleen hoogfrequent

10) **Menno-eis** : (zie Radio Bulletin februari 1994)

- zorg dat A_o constant is tot 20 kHz
- maak hierboven zelf een 1-e orde filter
- dan zorgt de tegenkoppeling tot 20 kHz voor een constante versterkingsafname; $(1 + \beta A_o)$ is constant.
- dan worden **alle** vervormingen tot 20 kHz precies evenveel onderdrukt
- dan verandert **HET SPECTRUM** van de vervorming niet en blijft de "klank" gelijk. (boek-2 blz 218-221 !!!!!!!!)



11) Wat ik dus extra toevoeg is:

eerste orde filter
 startend bij ongeveer 20 kHz
 stoppend bij 110 kHz

12) Daardoor weet ik ZEKER dat tot 20 kHz A_o/A_{eff} constant is en dat alle vervorming tot 20 kHz evenveel onderdrukt wordt.

13) Van 20 kHz tot 110 kHz is een eerste orde filter werkzaam, dat door zijn 90 graden fasedraaiing geen oscillatie geeft.

14) Bij 110 kHz laat ik dit eerste orde filter stoppen

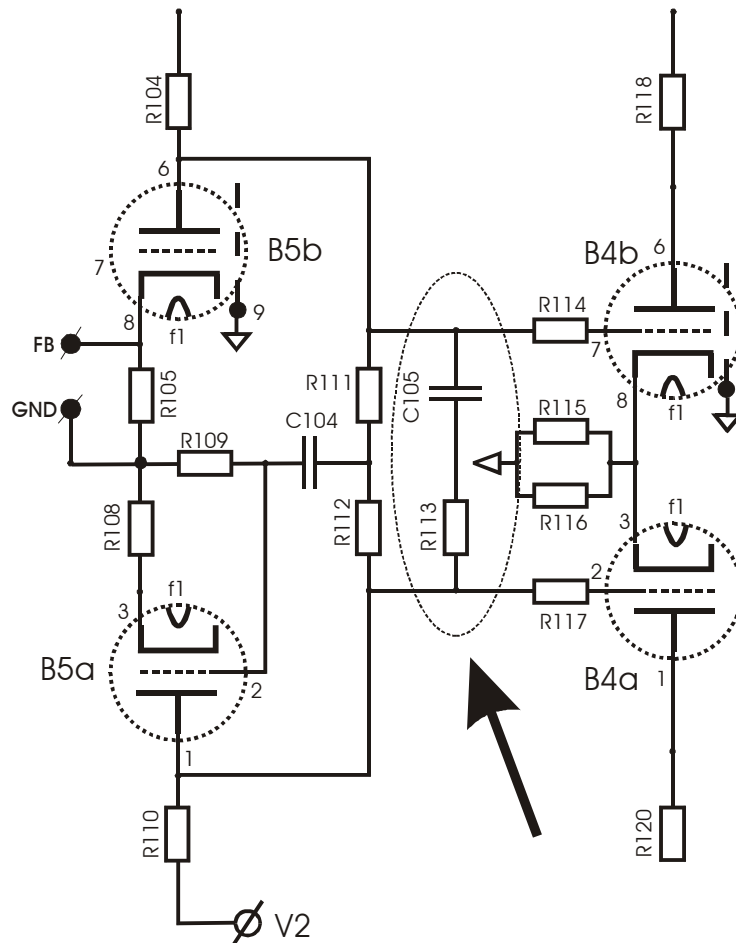
15) Dan treedt de 2-e orde filterwerking van de OPT in werking

16) Die zou instabiliteit kunnen veroorzaken, maar ik ben dan al gestopt met tegenkoppelen, dus geen gevaar meer.

17) Nu wordt ook duidelijk dat 2-e orde f-3H van de OPT ver boven 20 kHz moet liggen, want anders kunnen we het eerste orde filter (startend bij 20 kHz) niet meer invoegen.

18) Zie nu het hoofdschema op blz 255 fig. 8.2.1 en blz. 262 fig. 8.5.1.

19) Vanaf FB in fig. 8.5.1 gaat extra nu $R_2 = 6k8$ naar FB in fig. 8.2.1, waarbij R_1 van dit verhaal is $R_{105} = 270\Omega$



Detail SPT70, zie figuur 8.2.1 boek-2

20) C_{105} , samen met de uitgangsimpedantie van B5a,b, bepaalt (in hoofdlijn) het startpunt van het 1-e orde filter.

21) $Z_{uit,5ab} = 16k\Omega$. Gekozen is voor $C_{105} = 330 \text{ pF}$. Dan is het startpunt 1-e orde filter bij 29 kHz. Dit ligt voldoende bij 20kHz. Dit moet ook zo zijn, want eigenlijk bepalen C_{105} en $(Z_{uit,5ab} + R_{113})$ samen het startpunt; zie 23).

22) C_{105} en R_{113} samen bepalen het stoppunt van het 1-e orde filter (ongeveer 110 kHz). $\implies R_{113} = 3k\Omega$

23) Terug naar stap 21: Het eerste filter start in werkelijkheid bij 330 pF met $(16k\Omega + 3k\Omega)$ en dat levert 23,5 kHz op. Prima.

- DEMO**
- SPT70 zonder filter en tegenkoppeling
 - SPT70 met eerste orde filter
 - SPT70 met 1-e orde en tegenkoppeling

24) Over het algemeen maakt tegenkoppeling het geluidsbeeld kapot, daarom nu het vergelijk tussen de SPT70 + NFB en de UL40-S2 zonder tegenkoppeling. (sorry, Menno versterkers, maar die heb ik nou eenmaal beschikbaar), (opnieuw sorry, een Menno evaluatie, wat hebben wij daar aan? Tja, ik ben hopelijk niet voor niets jarenlang recensent geweest)

Subjectieve Evaluatie

ITEM	SPT70+NFB	UL40-S2
richting	9	8
diepte	9	9
naar voren	8	9
details	9	8
omhulling	8	9
structuur	8	9
betrokkenheid	8	8,5

SAMENVATTEND

- tegenkoppeling kan goed gaan
- maar filter niet beneden 20 kHz
- hetzelfde geldt voor Lp-invloed laagfrequent
- zorg dat je daar de vele f-3L frequenties ver uit elkaar hebt liggen, zodat je binnen je werkgebied van tegenkoppeling eigenlijk met een enkel 1-e orde filter te maken hebt.
- is dat laatste makkelijk? Nee, het leven is niet makkelijk, maar wel leuk.

Weergave van Micro Details

In mei 2007 presenteer ik officieel de resultaten van een totaal nieuw onderzoek op de AES conventie in Wenen.

Ik heb hierover al een paper geschreven, maar daar rust tot eind 2007 een eerste publicatierecht op van de AES.

Daarom heb ik dit onderzoek, waar ik nu over ga vertellen, hier niet uitgeschreven, maar behandel ik het aan de hand van schetsen op de overhead projector.

Maak aantekeningen voor jezelf, dat kan zonder problemen.

Mijn streven is om dit onderzoek begin 2008 ook te publiceren in nationale en internationale vakbladen.

demo: transfer functie SPT70 zonder NFB op uitgangsniveaus van 1 μ W tot 1 Watt. Deze metingen zullen mijn redenering volledig onderbouwen.

Heel grote dank voor uw betrokken aandacht.

Meer nieuws: www.mennovanderveen.nl

Zwolle: 20-2-2007