

DE VERSTERKER

Algemeen

Feitelijk is de benaming "versterker" onjuist. Hij suggereert namelijk een werking, die niet geheel als vlag de lading dekt.

De ingangsspanning van de versterker dient namelijk als stuurinformatie voor de elektronica. Net zoals een auto vergasser de stuurinformatie van het gaspedaal volgt en de motor energie in de gedaante van een benzine/luchtmengsel levert, verzorgt ook een versterker, die door het ingangssignaal wordt gestuurd de aangesloten luidsprekers van energie.

De hoeveelheid energie, die de diverse programmabronnen zelf leveren is veel te gering om met die luidsprekers enigerlei geluidsdruk te kunnen opwekken. Alleen een hoofdtelefoon kan er direct mee worden bedroven, vandaar, dat menig cassettedeck en heel wat CD spelers een eigen hoofdtelefoonuitgang bezitten.

De verschillende thans gangbare programmabronnen geven niet alleen heel diverse spanningen af: van een tiental μV bij MC pickup elementen tot ruim 2V bij CD spelers, ze moeten ook gelijkwaardig naast elkaar kunnen worden gebruikt en soms gelijktijdig - bij het op band kopiëren van een CD of een radioprogramma bijvoorbeeld. Verder is het nuttig om de aangeboden signalen nog wat te kunnen manipuleren, compenseren en corrigeren. Ook dat maakt een goede versterker mogelijk. Dat stempelt hem tot

Hart en zenuwstelsel van de muziekinstallatie

Om al deze opgaven naar behoren te kunnen vervullen, is het goed om een versterker naar functie in drieën te verdelen.

De **voorversterker** moet

- 1) de spanningen van de signaalbronnen versterken
- 2) verschillende signaalniveaus op één waarde brengen
- 3) lineaire vervorming compenseren
- 4) diverse signaalbronnen mengen

De **stuur- of regelversterker** heeft als taak

- 1) de in de voorversterker geprepareerde signalen verder te versterken
- 2) met regel- en schakelorganen elke willekeurige verandering van het klankkarakter overeenkomstig de wensen van de luisteraar mogelijk maken
- 3) In sommige gevallen is ook nog sprake van een toegevoegde mengtrap, waarmee het mogelijk is de diverse signaalbronnen onderling te mengen (bijvoorbeeld spraakweergave via de microfoon en muziekweergave via de recordingang).

De **eindversterker** dient

met een redelijk rendement een over het hele audiobereik constante vermogensversterking te leveren met zo gering mogelijke lineaire en niet-lineaire vervorming.

Deze afzonderlijke bouwgroepen zijn als regel op één chassis in een gemeenschappelijke behuizing ondergebracht. We spreken dan van een geïntegreerde versterker. Men kan voor- en stuurversterker ook lijfelijk scheiden van de eindversterker. We spreken dan van een voor/eindversterker combinatie. Wanneer een meteen een radiotuner wordt ingebouwd, is van een tuner/versterker of receiver sprake, bij een met de voorversterker gecombineerde tuner van een precei-

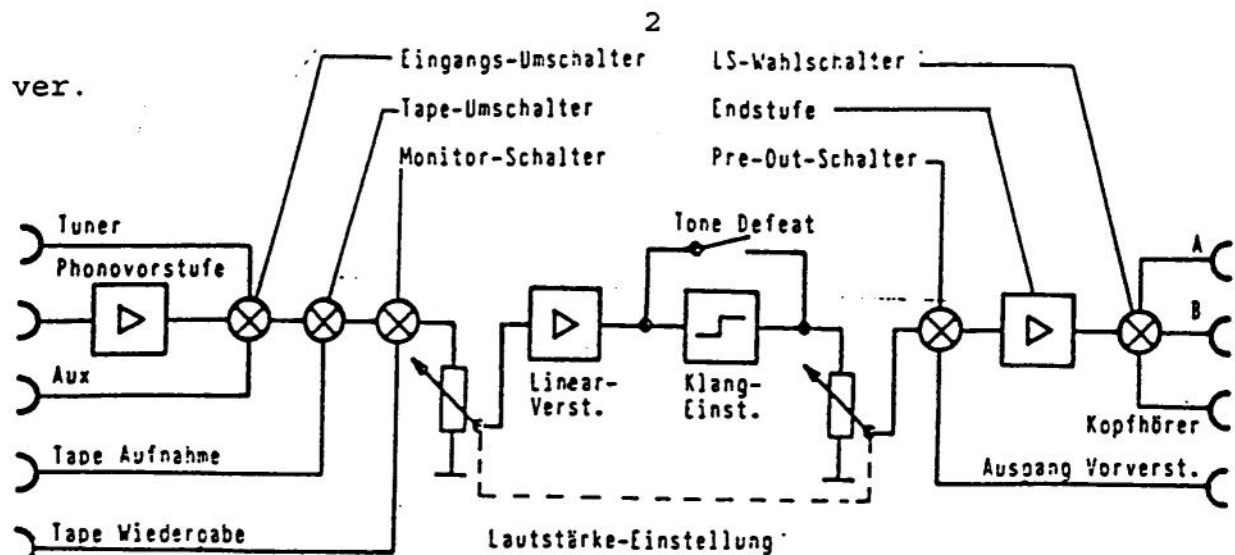


Fig. 1. Eenvoudig blokschema van een versterker

Specificaties

Om de prestaties en de kwaliteit van een versterker te bepalen, hoeft in wezen slechts naar een paar criteria worden gekeken. Niettemin is in de praktijk van alledag een hele reeks van specificaties in zwang gekomen, die hier goeddeels nader aan de orde worden gesteld:

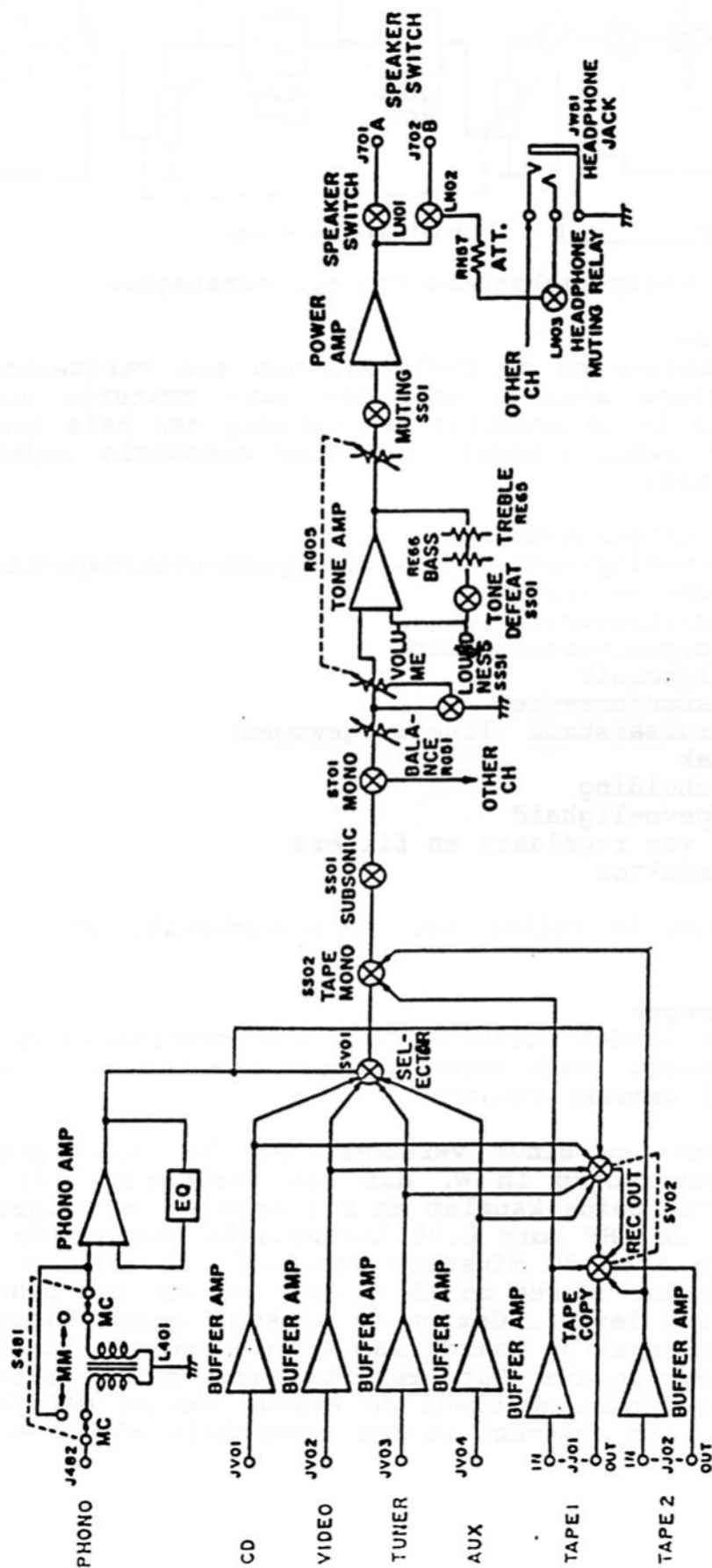
1. Eind- of uitgangsvermogen
2. Ingangsgevoeligheden en afsluitimpedanties/capaciteiten
3. Harmonische vervorming
4. Intermodulatievervorming
5. TIM- en crossoververvorming
6. Frequentiebereik
7. Vermogensbandbreedte
8. Signaal/ruisafstand (lineair/gewogen)
9. Overspraak
10. Kanaalscheiding
11. Ingangsgevoeligheid
12. Werking van regelaars en filters
13. Dempingsfaktor

Eventueel aan te vullen met stroomverbruik, afmetingen, gewicht e.d.

Uitgangsvermogen

Begrijpelijk worden versterkers vooral beoordeeld op hun afgegeven uitgangsvermogen. Mede onder commerciële invloeden is van meet af aan verschil gemaakt tussen

Continu-, RMS- en sinus vermogen. Dat is nader gedefinieerd als het uitgangsvermogen in W, dat een versterker bij gelijktijdige uitsturing van beide kanalen en bij 1kHz en de volgens de DIN norm bij 1%, bij de IHF norm 0,7% harmonische vervorming en afsluitimpedantie van 4 en 8Ω minstens gedurende 10 minuten bij een omgevingstemperatuur tussen de 15 en 30°C en met een binnen 1% nominale netspanning levert. Gezien de verschillende luidsprekerimpedanties wordt meestal de waarde aan 4 en 8Ω gespecificeerd. RMS staat voor Root Mean Square. Dat heeft te maken met de effectieve waarde van een wisselspanning ofwel de waarde van de gelijkspanning, die in dezelfde tijd evenveel warmte ontwikkelt als de wisselspanning.



Alleen voor sinusvormige signalen geldt, dat de effectieve waarde gelijk is aan $0,7x$ de piekwaarde. Voor niet-sinusvormige signalen berekent men de effectieve waarde door de wortel uit het gemiddelde kwadraat (E: root mean square) van de momentane waarde te nemen.

Het hoort, dat bij de meting beide kanalen tegelijk worden uitgestuurd. De meting volgens (de slappe) DIN norm gaat uit van 1kHz en 1% harmonische vervorming, de wat strengere IEC norm van een frequentiebereik van 20-20.000Hz en slechts 0,03% vervorming. Dienovereenkomstig ligt het gemeten wattage daar dan ook 5 à 10% lager.

Het **Muziek- of piekvermogen** is het maximale vermogen, dat een versterker kortstondig bij een constante voedingsspanning kan leveren zonder de gespecificeerde harmonische vervormingswaarde te overschrijden. Dit houdt in, dat al naar gelang van de grootte van de inwendige weerstand van de netvoeding en de zwaarte van die voeding (mede bepaald door de elco's) het muziekvermogen zo'n 20 tot 50% groter is dan het continuvermogen. Leuk voor reclamemakers, die argeloze consumenten willen imponeren met mooiere cijfers.

Het **Impulsvermogen** is de piekwaarde van het muziekvermogen, die tijdens een piekbelasting voorkomt. Een paukenslag binnen een verder rustig muziekstuk is in de praktijk zo'n impulsbelasting. Bepaald wordt het met een 1kHz bursttoon.

Vroeger deed ook het begrip **dynamisch vermogen** nog wel opgang.

Van een versterker, die bij 4Ω en 1kHz een continuvermogen van bijvoorbeeld 2x200W levert, kan het impulsvermogen onder dezelfde condities zo bijvoorbeeld 2x275W bedragen.

Net als het vermogen van eindtrappen doorgaans bij 1% harmonische vervorming (het "clipping" of oversturingspunt) wordt gemeten, wordt ook de **oversturingsgrens** in V van de versterkeringen bepaald. Wordt deze grens overschreden, dan treedt clipping op. Bij de meeste pickup voorversterkers ligt tegenwoordig de oversturingsgrens op minstens de tienvoudige nominale ingangsspanning, bij ingangen op lijnniveau (aux of tape) van voorversterkers en de ingang van eindversterkers geldt meestal, dat ze waarden van >15V probleemloos aankunnen.

Hoeveel versterkervermogen is nodig?

Net zoals gloeilampen naar hun functie en het daarvan afhankelijke wattage worden aangeschaft, vraagt ook iedere koper van een versterker, hoeveel watt het apparaat onder de kap moet hebben. Daarvoor zijn wel vuistregels opgesteld van "zoveel watt per kubieke meter" (of 1W per m²), maar het bleef natte vingerwerk omdat er afhankelijk van o.a. het luidsprekerrendement, de luidsprekerimpedantie, het gewenste afluisterniveau en de kamerakoestiek (vooral absorpties en reflecties) zoveel variabelen zijn.

Naar grootte, belastbaarheid en rendement moet een luidspreker worden voorzien van elektrisch vermogen in de orde van grootte tussen een paar watt en ruim 100W. Anders gezegd: hoe moet gevoed worden met spanningen van een paar volt tot ruim 30V. Dat is heel wat meer dan de door een MD p.u. element geleverde 2mV of de 250mV van een cassettedeck. Een 10.000-voudige versterking is derhalve geen uitzondering!

Uitgaande van een soort standaard woonkamer, een middelbaar volume en een luidsprekerrendement van 4% zou een vermogen van 0,25W

continu afdoende moeten zijn. Maar wie iets meer van de oorspronkelijke geluidsdruk van een orkest wil benaderen, moet streven naar een dynamiek van 60dB. Om de luidste passages tot hun recht te laten komen, is daarvoor een versterkervermogen van:

$$1000.0,25W = 250W$$

noodzakelijk. Wie terecht de dynamiek wat comprimeert en realistischer op 40dB uitkomt (de ideale norm bij de omroep, die echter zelden wordt gehaald, denk aan de dynamisch platgewalste uitzendingen van Radio 3), zijn altijd nog 25W nodig.

Maar een versterker moet liefst over reserves beschikken om niet te gaan begrenzen en vervormen. Zo'n vervormd signaal wordt overigens psychisch veel luider ervaren dan een "schoon" signaal, vandaar dat bezitters van High End apparatuur vaak geneigd zijn luider af te luisteren dan bezitters van Low End spullen.

Zo bezien is een 2x25W continu versterker echt te krap bemeten en is een 2x100W dito bepaald geen luxe. Bedenk bovendien, dat een vertienvoudiging van het wattage (van 25 naar 250W) slechts resulteert in een maximale verdubbeling van de luidsterkte. Het hoorbare luidsterkteverschil tussen een versterker van 30W en eentje van 50W is nauwelijks hoorbaar.

Overdaad schaadt bij versterkervermogen nooit, zeker niet omdat belastbaarheidscijfers van luidsprekers zo weinig zeggen. Bovendien is versterkervermogen in de loop der jaren steeds goedkoper geworden.

Ingangsgevoeligheid

Vroeger was het heel belangrijk om de ingangsgevoeligheden van met name de pickup ingangen en van de recorderingang te weten, omdat deze mede bepalend waren bij de keus van het element en het cassettedeck. Vooral de vraag naar eventuele extra voorversterking van een MC element werd zo beantwoord en - in de tijd, dat recorders nog waren voorzien van een 5-polige DIN in/uitgang de keuze van de aansluitwijze.

Wat in de fabrieksspecificaties wordt vermeld, is als regel de minimaleingangsspanning, die de bewuste versterker nodig heeft om het signaal storingsvrij te verwerken. Vermelding van de ingangsspanning sec is onvoldoende: ook de weerstand, waarmee de betreffende versterkeringang is afgesloten, is van wezenlijk belang om de juiste aanpassing te verwezenlijken. De fabrikant noemt derhalve met de ingangsspanning ook de ingangsimpedantie. Deze impedanties zijn deels genormeerd.

Zo gelden voor de MD pickupingang gangbare waarden van 2.0mV/47k Ω en voor de MC pickupingang van 0,2mV/100 Ω . Voor de ingangen op lijnniveau is dit alles minder kritisch en wordt bijvoorbeeld uitgegaan van 200mV/56k Ω .

Harmonische vervorming

De harmonische vervorming (E: THD voor Total Harmonic Distortion, D: Klirrfaktor of Verzerrung) is een maat voor de in een schakel van de audioketen optredende vervorming. Deze wordt in % uitgedrukt en is verklaard in het inleidende hoofdstuk over HiFi.

De gangbare opvatting is, dat het ongetrainde oor bij versterkers een waarde van 1% net kan waarnemen, het getrainde oor vanaf 0,5%.

Bij de opgave van de harmonische vervorming moeten bij eindversterkers altijd het continu eindvermogen en de impedantiewaarde (als regel liefst behalve aan 8 en 4 Ω ook 2 Ω , omdat het impe

DATEN UND MESSWERTE VOLLVERSTÄRKER

Modell		Alkal AM-59	Harman/Kardon HK 1200	Kanwood KA-5050 R	Nakamichi IA-3	Pioneer A-602 R	Rotel RA 960 BX	Sony TA-F 505 ES	Technics SU-A 800	Minimum/ Maximum
Klangqualität										
Sinusleistung (1 kHz)										
an 8 Ohm	W	2x134	2x38	2x103	2x55	2x91	2x90	2x97	2x79	20/200
an 4 Ohm	W	2x207	2x57	2x159	2x72	2x133	2x133	2x142	2x111	20/200
an 2 Ohm	W	2x145	2x64	2x210	2x78	2x153	2x162	2x153	2x128	20/200
Impulsleistung (1 kHz) an 4 Ohm	W	2x233	2x64	2x182	2x86	2x133	2x150	2x163	2x144	20/200
Ausgangswiderstand bei 40 Hz	mOhm	60	110	40	180	90	120	70	70	500/100
Minimaler Lastwiderstand	Ohm	2	<1	<1	<1	<1	2	<1	<1	
Klirrfaktor (1 kHz)/Intermodulation										
1 dB unter Volleistung	%	0,01/0,05	0,03/0,2	0,01/0,05	0,1/0,3	0,01/0,9	0,07/0,2	0,01/0,1	0,01/0,3	0,5/0,02
bei 5 Watt	%	<0,01/0,09	0,04/0,09	<0,01/0,05	0,04/0,06	0,01/0,08	0,02/0,05	<0,01/0,08	<0,01/0,04	0,5/0,02
bei 50 Milli watt	%	0,01/0,03	0,02/0,1	0,01/0,06	0,04/0,05	0,01/0,2	0,03/0,04	0,01/0,04	0,01/0,03	0,5/0,02
Transientenintermodulation (TIM)	%	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,5/0,02
Geräuschspannungsabstand										
Hochpegel bei 5 Watt	dB	91	104	84	91	100	81	85	85	90/90
Hochpegel bei 50 Milli watt	dB	79	88	70	76	89	59	72	67	65/75
Phono MM bei 5 Watt	dB	84	-	82	-	85	77	83	82	75/85
Phono MC bei 5 Watt	dB	74	-	75	-	74	72	75	71	70/80
Frequenzgang Hochpegel, Phono: siehe Diagramm		-	-	-	-	-	-	-	-	
Stereo-Kanaltrennung (10 kHz)										
Hochpegel, Quellwiderstand 1 k Ω /10 k Ω	dB	59/53	72/56	44/41	60/60	69/49	55/45	43/39	44/43	40/60
Praxistauglichkeit										
Anschlußwerte Hochpegel										
Eingangsempfindlichkeit	mV	195	150	210	150	205	160	150	160	250
Übersteuerungsfestigkeit	V	10	3	8	>12	>12	>12	>12	>12	3/6
Eingangswiderstand	k Ω	41	38	38	46	47	47	21	43	10/50
Eingangskapazität	pF	710	90	1200	1600	620	80	130	770	2000/200
Ausgangswiderstand Pre-Out	k Ω	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0/2,2
Anschlußwerte Phono MM										
Eingangsempfindlichkeit	mV	2,4	-	2,5	-	3,0	2,5	2,8	2,7	2,5
Übersteuerungsfestigkeit	mV	122	-	100	-	250	190	170	200	20/200
Eingangswiderstand	k Ω	47	-	50	-	50	51	53	48	47
Eingangskapazität	pF	70	-	<50	-	55	140	210	160	600/150
Anschlußwerte Phono MC										
Eingangsempfindlichkeit	mV	0,2	-	0,15	-	0,20	0,18	0,18	0,16	0,15
Übersteuerungsfestigkeit	mV	12	-	7	-	20	16	14	15	2/20
Eingangswiderstand	Ohm	100	-	100	-	110	100	100	250	50/100
Subsonic-Filter: Einsatzfrequenz	Hz	12	-	17	-	15	9	15	5	15
Steilheit	dB pro Okt	12	-	18	-	12	6	6	6	6/18
Lautstärkesteller:										
Gleichlauffehler bis -60 dB max.	dB	1,5	0,6	0,7	3,5	0,9	3,8	3,6	2,5	3,0/0,5
Übersprechdämpfung zwischen den Eingängen	dB	73/57	96/74	82/65	72/57	80/60	76/59	83/66	77/66	80/80
(10 kHz), Quellwiderstand 1 k Ω /10 k Ω										
Übersprechdämpfung Vor-/Hinterband	dB	74/62	80/64	82/66	71/57	85/68	85/66	84/67	75/63	50/70
(10 kHz), Quellwiderstand 1 k Ω /10 k Ω										
HF-Einströmfestigkeit		befriedigend	-	sehr gut	-	sehr gut	mäßig	gut	sehr gut	
Wirksamkeit der Schutzschaltung		befriedigend	befriedigend	befriedigend	befriedigend	befriedigend	befriedigend	befriedigend	befriedigend	
Leistungsaufnahme bei Leerlauf/Volleistung	W	45/620	10/180	30/480	10/220	20/400	40/400	45/400	15/340	
Allgemeines										
Garanzzeit	Monate	24	24	24	24	24	24	24	24	
Abmessungen (Breite/Höhe/Tiefe)	cm	43/10/39	45/11/35	44/15/39	43/9/35	42/17/41	44/10/33	43/15/36	43/14/38	
STEREO-Empfehlung		*	*	*	*	*	-	*	-	
Ungefährer Handelspreis	DM	900,-	800,-	900,-	800,-	850,-	800,-	800,-	800,-	

In der Spalte STEREO Minimum/Maximum finden Sie zunächst den Wert, den wir als Grenzwert für die STEREO-HIFI-Norm definieren. Der zweite Wert bildet den Grenzwert, dessen Unter- oder Überschreitung keinen nennenswerten Vorteil - sei es klanglich oder technisch - mehr bringt. Ist in der Spalte STEREO Minimum/Maximum nur ein Wert angegeben, sollte das Testgerät diesen möglichst genau erreichen.

Fig. 3. Voorbeeld van een goed testrapport van 8 versterkers

dantieminimum van heel wat luidsprekers zo laag uitkomt) en de frequentie (als regel 1kHz) waarbij wordt gemeten, worden vermeld en bij voorversterkers inplaats van de afsluitimpedantie de spanningsafgifte (dus bv. metingen bij 0,03, 0,3 en 1V). Deze extra voorzieningen zijn nodig omdat de harmonische vervorming met het afgegeven vermogen oploopt, maar ook naar de laagste vermogens toe oploopt en daar met brom- en ruis wordt aangevuld. Verder is - zoals zoveel in de audiowereld - ook de vervorming frequentieafhankelijk.

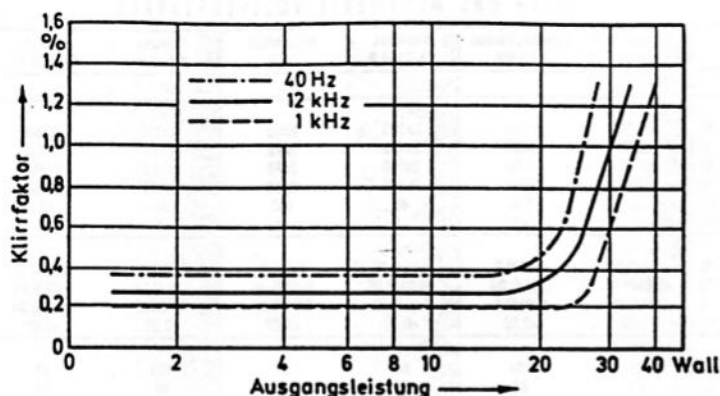


Fig. 4. Harmonische vervorming versus uitgangsvermogen

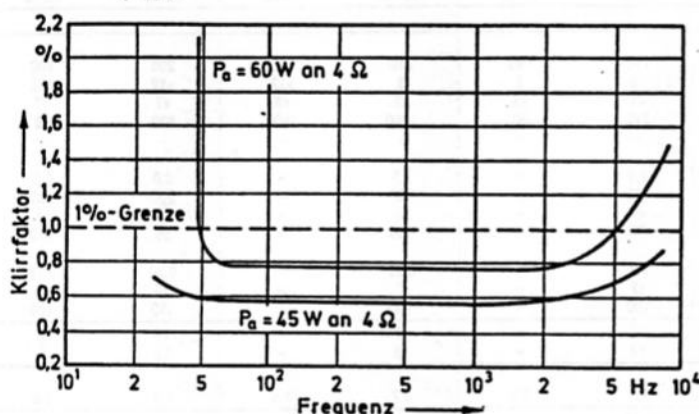


Fig. 5. Harmonische vervorming versus frequentie en eindvermogen

Elke betrouwbare opgave van de harmonische vervorming vermeldt de grensbereiken tot waar die vervorming onder de gegeven specificatie blijft. Een opgave van "0,1% bij 1kHz, 0,3% van 40-20.000Hz" geeft duidelijk aan, wat men van zo'n versterker mag verwachten. Natuurlijk zou ook nog onderscheid kunnen worden gemaakt tussen 2e, 3e, 4e en 5e harmonische vervorming (hogere graden zijn oninteressant, omdat ze geringer zijn en geleidelijk boven het hoorbereik terechtkomen). Gehoormatig kunnen ze echter van invloed zijn en het kan interessant zijn om eens naar het totale vervormingsspectrum te kijken. Even harmonischen tasten het klankbeeld minder aan dan oneven dito's.

Hier schuilt ook het hoorbare verschil tussen buizen- en transistorversterkers in. Een transistorversterker levert in het algemeen meer oneven harmonischen, een buizenversterker meer even, waardoor de weergave "rijker" en "luchtiger" lijkt te worden, ook al loopt die vervorming bij buizenversterkers sneller op. Een letterlijk verzachtende omstandigheid is, dat hij ook "weker" klinkt.

Intermodulatievervorming

De intermodulatie vervorming - afgekort tot IM - is een maat voor het ongewenste ontstaan van nieuwe frequenties in een elektronische component (zie ook inleidende hoofdstuk over HiFi). Omdat dergelijke som- en verschiltonen in het oorspronkelijke klankbeeld ontbreken, dragen ze bij aan een vervormd resultaat.

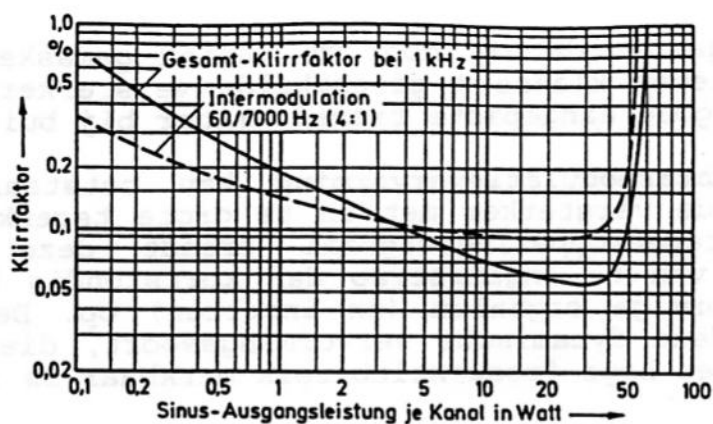


Fig. 6. Totale harmonische vervorming en IM vervorming versus het eindvermogen

Een IM waarde van al onder de 1% kan vanwege zijn onharmonische gedrag hoorbaar worden, of tenminste zorgen voor vrij ondefinieerbare vervaging en versluiering. Ook hier is een nadere vermelding van de meetfrequenties en het vermogen bij meting wezenlijk. Een opgave als "IM vervorming bedraagt 0,4%" zegt niets. Meestal worden testsignalen van 60 en 7.000Hz of van 250 en 8.000Hz gebruikt in een amplitudeverhouding van 4:1.

Crossover- en overlappingsvervorming is een niet-lineaire vervorming, die ontstaat in klasse A/B of B geschakelde eindversterkers tengevolge van de geringe ruststroom in de eindtransistoren en doet zich met name voor bij kleine signalen wanneer die de 0-spanningslijn kruisen.

Transistoren hebben namelijk om geleidend te worden een kleine basis voorspanning nodig; zonder deze zou de crossoververvorming aanmerkelijk groter worden. Door een goede basis emitter voorspanning in te stellen wordt een lage ruststroom gekozen, zodat de vervorming die door de knik in de karakteristiek in het onderste bereik wordt veroorzaakt, kan worden vermeden.

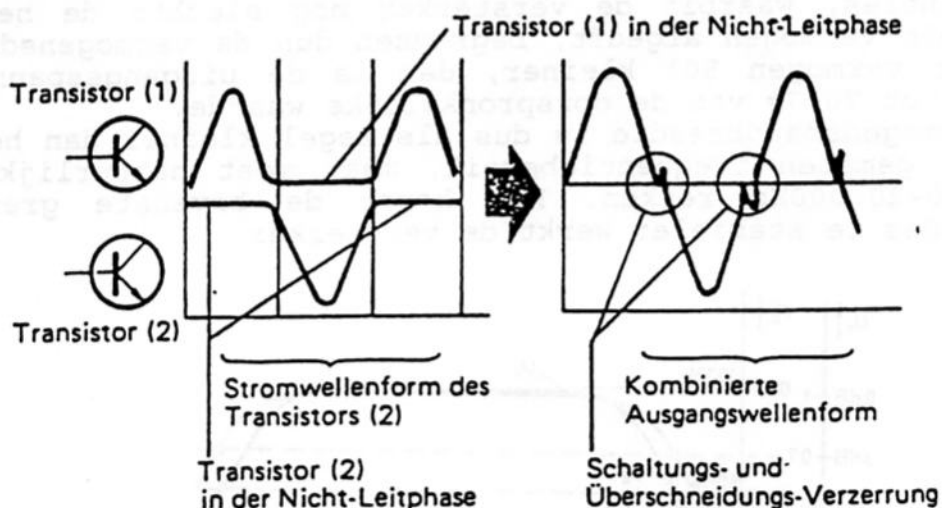


Fig. 7. Ontstaan van crossoververvorming

Deze vervorming doet zich telkens dan voor, wanneer de ene transistor de verdere signaalverwerking van de andere overneemt. Het resultaat is een ruwe, hese klank in zachte geluidspassages. Dat is onaangenaam, omdat de vervorming daar het meeste opvalt. In

luide passages wordt hij door de muziek gemaskeerd. Een radicale oplossing bieden klasse A geschakelde versterkers (zie aldaar) en de door een goed aangepaste transformator bij buizenversterkers.

Transiënt Intermodulatievervorming kan ontstaan in een slecht geconcipeerde versterker met en te grote tegenkoppeling. Bij een te groot tegenkoppelingssignaal treedt deze vervorming door oversturing van de ingangstrap dan kortstondig bij het verwerken van impulsvormige signalen (en inzetten) op. De Fin Matti Otala "ontdekte" deze dynamische vervormingssoort, die als looptijdvertraging in het hoge frequentiebereik merkbaar is in 1970.

Frequentiebereik

Het frequentiebereik van een versterker is dat bereik, dat de versterker zonder noemenswaardige lineaire vervorming via de diverse ingangen weergeeft. Aan de grensfrequenties is de versterking 3dB (ca. 30%) geringer; dit is de algemeen aanvaarde tolerantie. In de praktijk bedraagt de afwijking bij de lijningangen meestal niet meer dan een paar honderdsten van een dB. Moeilijker is het tengevolge van de noodzakelijke RIAA correctie bij de pickupingangen, maar daar is de afwijking ook meestal niet groter dan enige tienden van een dB.

Omdat dit niet zo moeilijk realiseerbaar is, streefden ontwikkelaars naar steeds grotere bandbreedtes. Hoewel strikt genomen in het hoog de grens bij 15kHz haast al genoeg is (en bij FM radio en digitale signaalverwerking met 32kHz bemonsteringsfrequentie ook wordt aangehouden) is het nuttig wat reserve te hebben, niet tot slechts 20, maar tot 30kHz. Dit om ook de hoogste harmonischen nog te kunnen doorgeven. Die zijn zelf vaak niet meer hoorbaar, maar hun verschiltonen vallen vaak best nog in het hoorbare bereik.

Vermogensbandbreedte

Als vermogensbandbreedte geldt het frequentiebereik, waarbinnen bij de gespecificeerde vervorming de helft (-3dB) van het nominale eindvermogen wordt afgegeven door een eindversterker. De beide frequenties, waarbij de versterker nog slechts de helft van dat nominale vermogen afgeeft, begrenzen dus de vermogensbandbreedte. Is het vermogen 50% kleiner, dan is de uitgangsspanning gereduceerd tot 70,7% van de oorspronkelijke waarde.

De vermogensbandbreedte is dus als regel kleiner dan het bij lager niveau gemeten frequentiebereik, maar moet natuurlijk liefst wel van 20-20.000Hz reiken. Hoe hoger de bovenste grensfrequentie ligt, des te stabiel werkt de versterker.

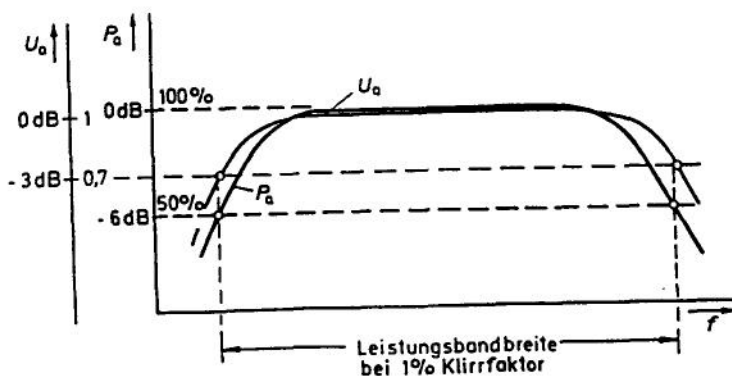


Fig. 8. Uitgangsspanning en -vermogen bij de vermogensbandbreedte

Signaal/Ruisafstand (S/R)

De S/R verhouding geeft de verhouding in dB aan tussen het zo groot mogelijke effectieve signaal en het maximaal hoorbare stoorniveau.

Bij de aanduiding van de S/R verhouding onderscheiden we twee specificaties: die van de lineair gemeten waarde en die van de met behulp van een weegcurve overeenkomstig onze gehoorgevoeligheid gemeten waarde. Het gaat hier om een in dB uitgedrukte verhouding van een referentie signaal tot het uit brom, ruis en soms vervormingsresten bestaande stoorniveau. Hoe hoger het getal, des te beter de prestaties van het onderhavige apparaat in deze discipline.

Bij de beoordeling van de S/R verhouding moet de dB waarde niet op zichzelf worden beschouwd, maar in samenhang met de ingangsspanning en het aan die ingangsspanning gerelateerde eindvermogen worden gezien.

Bij het meten van S/R waarden levert een generator een dusdanig grote spanning aan de betreffende versterkeringang, dat het nominale eindvermogen wordt bereikt. Dan wordt de generator ontkoppeld en de versterkeringang volgens de norm afgesloten. Vervolgens meet men aan de uitgang de door de versterker zelf veroorzaakte stoorspanning en ontleent daaraan de verhouding:

$$\text{lineaire S/R verhouding in dB} = 20 \cdot \log \frac{U_a}{U_{\text{stoor}}}$$

Bij de lineaire meting wordt de ruisspanning bepaald bij een lineaire frequentie karakteristiek van 20 - 20.000 Hz.

De gewogen waarde wordt gemeten met tussenkomst van een filter op basis van de gehoorgevoeligheid. De zo verkregen waarde - die altijd hoger is dan de lineair gemeten dito - geeft een juistere indicatie van de subjectief ondervonden hinderlijkheid. Ter onderscheid wordt hier de term dBA gehanteerd. Hoe hoger de gewogen S/R verhouding, des te geringer is het door de versterker zelf opgewekte ruisaandeel. In het Duits wordt respectievelijk over Fremdspannung en Geräuschspannung gesproken. Ruis klinkt zo ongeveer als het afblazen van stoom. Een elektrisch ruissignaal is te beschouwen als een verward mengsel van een ontelbaar aantal sinusgolven met verschillende frequenties en amplitudes.

Waarom versterkers ruisen en brommen

Zoals uit de transistortheorie bekend is wekken beweeglijke ladingsdragers de stroom op in een transistor. Door de voortdurende opwekking en recombinatie van positieve en negatieve ladingsdragers komt een gemiddeld constant vloeiende hoeveelheid ladingsdragers tot stand, die de stroomsterkte bepaalt.

Het aantal momentane aantal ladingsdragers is niet steeds gelijk. Er treden voortdurend geringe fluctuaties op, terwijl de opwekking en recombinatie volgens statische wetten plaatsheeft. De effectieve waarde van de stroomsterkte in de transistor hangt van het ingangssignaal af. De onregelmatige fluctuaties worden gesuperponeerd op deze effectieve stroomsterktewaarde of de ruststroom, die zonder ingangssignaal vloeit.

Hieruit volgt, dat het uitgangssignaal van een transistorversterker met of zonder versterkt ingangssignaal nog ruis bevat, wat natuurlijk met name opvalt tijdens muziekpauzes. In welke mate een versterker ruist, hangt onder andere van het gebruikte transistor-

type af. Vooral bij pickup voorversterkers, die met heel lage ingangsspanningen werken, is het belangrijk om te selecteren op zo ruisarm mogelijke types. Overigens ontstaat ruis ook in radiobuizen en weerstanden.

Brom is een gelijkmatige laagfrequent storing, die zich als hinderlijk bijgeluid manifesteert. Hij ontstaat met name bij platenspelers en in versterkers door onvoldoende afscherming van elektrische en magnetische velden (ook in stekers of pluggen en tengevolge van aardlussen, die ontstaan wanneer bv. een platenspeler op twee punten op de versterker is geaard). Maar ook wanneer de netvoeding niet voldoende in afgevlakt, kan brom ontstaan. Brom bestaat logisch genoeg vooral uit 50Hz componenten met bij slechte afvlakking ook veel 100Hz- en bij magnetische stoorvelden vooral ook veel 150Hz componenten.

Overspraak

Hierbij gaat het om de wederzijdse beïnvloeding van verschillende signaalwegen of kanalen. Daarbij moeten we twee mogelijkheden beschouwen:

1. Overspraak tussen de twee kanalen bij stereoweergave. In dit geval spreken we liever van kanaalscheiding. Ook deze wordt in Db aangegeven en het spreekt vanzelf, dat hoe hoger de waarde is, des te minder er van overspraakhinder last wordt ondervonden.

Bij de meting worden beide kanalen met een ohmse weerstand afgesloten. Het ene kanaal wordt met een generator tot de nominale uitgangsspanning uitgestuurd. Het andere kanaal wordt aan de uitgang volgens de norm afgesloten. Nu meet men de uitgangsspanningen van beide kanalen en berekent de logaritmische verhouding:

$$\text{Kanaalscheiding in dB} = 20 \log \frac{U_1}{U_2}$$

Hoe minder signaal van het actieve signaal naar het inactieve "lekt", des te beter is de kanaalscheiding en dus ook het stereo effect, des te hoger ook de overspraakdemping (en des te geringer de overspraak).

2. Overspraak tussen de diverse ingangen. Hierbij wordt onderzocht, in hoeverre een actieve ingang instraalt bij een andere, meest inactieve. Ook hier wordt de verhouding van de betreffende uitgangsspanningen in dB bepaald en gebruikt. Gemeten wordt meestal bij 1kHz. Interessanter zouden metingen bij hogere frequenties zijn, waar de waarden normaal afnemen, maar juist heel bepalend zijn voor het stereo-effect.

Dempingsfaktor

Wanneer de door de eindversterker geleverde stroom door de spreekspoel van een luidspreker vloeit, wordt elektrische energie in elektromotorische energie omgezet; de conus komt in trilling en wekt geluidsenergie, een hoorbaar signaal op. Helaas is het zo, dat de trillingen niet onmiddellijk stoppen wanneer geen stroom meer wordt toegevoerd: er is sprake van natrillen.

De versterker moet deze ongecontroleerde trillingen zodanig dempen, dat ze geen negatieve invloed op de geluidswaergave hebben. Deze taak van de versterker kennen we uit de specificaties als dempingsfaktor. De grootte geeft aan, in hoeverre de versterker dergelijke ongewenste trillingen onderdrukt.

De dempingsfaktor geeft de verhouding aan tussen de nominale luidsprekerimpedantie en de inwendige impedantie van de eindversterker. Hij bepaalt de mate, waarmee onbeheerste bewegingen van de luidsprekerconussen worden gedempt. Hoe hoger de bij impedanties van 4 en 8 ohm bepaalde dempingsfaktor is, des te beter worden de conusbewegingen gecontroleerd en des te minder vervorming treedt in de lage tonen op. Naar overdreven hoge waarden hoeft niet te worden gestreefd. In de praktijk zijn dempingsfactoren boven de 20 mooi genoeg. Niet zelden halen gemiddelde versterkers al waarden >80 van 40-12.500Hz aan 8Ω.

$$df = \frac{8\Omega \text{ (luidsprekerimpedantie)}}{0,08\Omega \text{ (uitg.imp. versterker)}} = 100$$

In de praktijk telt echter ook de luidsprekerkabel mee. Stel er wordt een 10m lange kabel met een eigen impedantie van ca. 0,24Ω gebruikt, dan ziet het beeld er ineens een stuk minder florissant uit:

$$df = \frac{8\Omega}{0,08\Omega + 0,24\Omega} = 25$$

Gebruik van niet overdreven lange en dempingsarme luidspreker bedrading is dus wenselijk.

Toonregeling en filters

Elke rechtgeaarde luisteraar wenst een klankbeeld, dat aan zijn voorstellingsvermogen en zijn smaak tegemoet komt. Omdat o.m. de kamerakoestiek en de luidsprekerkwaliteit grote invloed hebben op de weergavekwaliteit is het nuttig om wat compensatie- en correctiemogelijkheden bij de hand te hebben.

Daarbij gaat het voornamelijk om de volume- en balansregeling, de toonregeling, de eventuele fysiologische sterkteregeling of ook de loudness- of contourschakeling, de toonregeling en het presence-, ruis-, rumble- en subsonisch filter.

De volumeregeling beïnvloedt gelijktijdig en als het goed is in dezelfde mate de luidsterkte van het linker- en rechter kanaal. Soms wordt in versterkertests de "gelijkloop" (de onderlinge afwijking in dB) gemeten. Erg belangrijk is deze niet, want onregelmatigheden kunnen makkelijk met de balansknop worden opgevangen en of de elektrische balans exact klopt, is minder interessant dan dat de akoestische balans tussen de luidsprekers, beoordeeld vanaf de favoriete luisterplek, klopt.

In versterkers kan de volumeregeling op verschillende plaatsen worden aangebracht. Om de eindtrap optimaal aan te sturen en zo gunstig mogelijke ruisafstanden te halen, wordt hij meestal tussen voor- en eindversterker geplaatst.

Een nadeel hiervan is, dat de overstuurbaarheid van de voorversterker eronder te leiden heeft. Daarom treffen we de volumeregeling ook wel aan direct na de ingangselector, maar wel met als gevolg een wat minder goede S/R verhouding. Een mooie oplossing vormt de dubbele volumeregeling op beide plaatsen gedeeld: het ideale compromis.

Vanaf de ingangselector voor de programmabronnen gaan de signalen voor het linker- en rechter kanaal meestal eerst naar de balansregeling. Deze helpt asymmetrieën van linker- en rechter stereoka-

naal tengevolge van verschillen in versterking te compenseren. Maar zoals gezegd, met de balansknop kan ook het stereo-effect onder akoestisch ongunstige luisteromstandigheden worden geoptimaliseerd.

In de hoofdstukken, die aan de fysiologie van het menselijk oor en de beginselen van de HiFi techniek zijn gewijd, kwam aan de orde, dat het menselijk oor niet linear reageert op het aanbod van het frequentiebereik. Ter compensatie kan men in spiegelbeeld van het verloop van de glijdende ionofoonschaal naar lagere geluidsvolumes toe de luidsterkte wat ophalen. In dit geval spreekt men van een met de volumeknop geïntegreerde fysiologische sterkteregeling. Eigenlijk is dat de mooiste oplossing.

Wat primitiever, want in één handomdraai en met een vaste waarde werkt de Loudness schakeling, die het frequentieverloop bij lage geluidsdrukkniveau's lineariseert door met name de lage en in wat mindere mate de hoge tonen te bekrachtigen.

De primaire opgave van de toonregeling is een correctie van het frequentieverloop van het klankspectrum om tekortkomingen van de ruimte-akoestiek en de luidsprekers te corrigeren.

Meestal kunnen de hoge en lage tonen afzonderlijk worden bekrachtigd en verzwakt. Soms bij sophisticated versterkers kan dat zelfs kanaalsgewijs apart. In enkele gevallen kunnen de middentonen afzonderlijk worden behandeld, of is er een soortgelijk presence-filter om de middentonen wat op te halen: nuttig bij de spraakverstaanbaarheid. Een stap verder is natuurlijk de equalizer, die met zijn voor- en nadelen al in het inleidende HiFi verhaal aan de orde kwam.

Omdat zelfs in de 0-stand bij heel wat toonregelingen het frequentieverloop niet exact lineair is, wat in de vorm van klankverkleuring en vervorming hoorbaar kan worden, hebben meer en meer versterkers een tone defeat schakelaar, waarmee het signaal zonder beïnvloeding door een correctie netwerk buiten de toonregeling om wordt doorgegeven. Nog puristischer is de CD en/of Line direct schakeling. Daarmee worden de bewuste ingangen op lijnniveau (750-2000mV) zonder enige beïnvloeding door regelnetwerken rechtstreeks naar de volumeregeling doorgeschakeld, waarmee het signaal "puur" wordt gehouden.

Dan zijn er nog diverse filterschakelingen. Uit de tijd van de grammofoonweergave dateren het rumble- en ruisfilter; dit laatste werd ook wel bij gestoorde radioweergave en reproductie van ongeDolbyseerde banden gebruikt. Het rumblefilter diende vooral om motordreun van platenspelers en resonantiefrequenties van pickup/armcombinaties tussen de 4 en 20Hz geen kans te geven. Belangrijk voor het betreffende filter is, dat het inzetpunt goed is gekozen (25Hz) en dat de flanksteilheid groot is: 12dB/octaaf. Ruisfilters zetten meestal bij 8 à 9kHz in met een steilheid van 8dB/octaaf. Heel mooi is, wanneer een versterker de mogelijkheid biedt om zelf het inzetpunt en de flanksteilheid te kiezen.

Sinds versterkers bijna tot 0Hz toe werkzaam zijn, is het subsonisch filter van meer betekenis geworden. Het rekent ook radicaal af met de ellende, die door kromme grammofoonplaten en slecht gedempte pickuparmen wordt veroorzaakt en het hoort bij 20Hz in te zetten en radicaal met 18dB/octaaf te kappen.

Nabandcontrole (monitor)

Wie een of meer recorders gebruikt met drie gescheiden kopjes (opname, weergave en wissen), wil gebruik maken van de mogelijk-

heid om de kwaliteit van de opname tijdens de registratie te controleren. Daarvoor dient de nabandcontrole knop (Tape Monitor). In de stand "Source" gaat het ingangssignaal direct via de versterker naar de luidsprekers, in de stand "Tape" is het geluid van de net gemaakte opname via de weergavekop te horen. Men spreekt ook van resp. "voor de band" en "na de band".

DE VOORVERSTERKER

Zoals al werd geformuleerd, heeft een voorversterker verschillende taken. Hij hoort:

1. de spanningen van de signaalbronnen te versterken
2. de verschillende signaalniveaus op één waarde te brengen
3. lineaire vervorming van pickup elementen te compenseren
4. diverse signaalbronnen met elkaar te mengen.

Om al deze taken naar behoren te kunnen vervullen en omdat de kwaliteit van de ingangstrappen in hoge mate bepalend is voor de S/R verhouding van de hele versterker, is het belangrijk, dat de voorversterker gevrijwaard wordt van ruis en brom. Daarom worden bijvoorbeeld heel ruisarme epitaxiaal-planaar transistoren gebruikt en wordt de voedingsspanning afgevlakt met zeeffilters. Het werkpunt van de eerste versterkertrap wordt dusdanig gekozen, dat van minimale ruis sprake is.

Wanneer we de microfoonversterker, die in huiskamerapparatuur niet zo belangrijk is, even vergeten, komen we als eerste bij de

Pickup (voor-)voorversterker

Deze heeft allereerst tot taak om het relatief lage niveau van enige tienden van millivolts bij MC pickup elementen tot enige millivolts bij hun MD soortgenoten zodanig te versterken, dat het op het peil van de andere programmabronnen - op lijnniveau dus - komt. Om het verschil tussen de MC en MD ingang te overbruggen, heeft de MC ingang nog een extra voortrap (de zg. voor-voorversterker); deze taak kan ook worden waargenomen door een goed in mumetaal afgeschermd transformator.

Helemaal mooi is, wanneer de bewuste ingangen ook nog zijn voorzien van extra aanpassing. De afsluitweerstand van een MD element is weliswaar genormeerd op $47k\Omega$, maar in de loop der tijd zijn ook types, die afgestemd zijn op 32 of $50k\Omega$ in omloop geweest. Bij MD elementen is het fijn, als de standaard van 100Ω ook kan trapsgewijs kan worden gewijzigd in 10, 30 en 50Ω .

Nuttig is bovendien een afsluitcapacitieve aanpassing voor MD elementen van bv. 25, 50 en $100pF$. Dit om resonantiepieken in de hoogweergave boven 15kHz te dempen. Bij het instellen van al deze waarden, is het goed om steeds uit te gaan van de door de fabrikant van het p.u. element in kwestie verstrekte specificaties.

Bovendien moet de p.u. voorversterker het door het element geleverde signaal in zijn frequentieverloop nog corrigeren volgens de RIAA (Record Industry Association of America) of de daarmee overeenkomende DIN norm 45.541 karakteristiek.

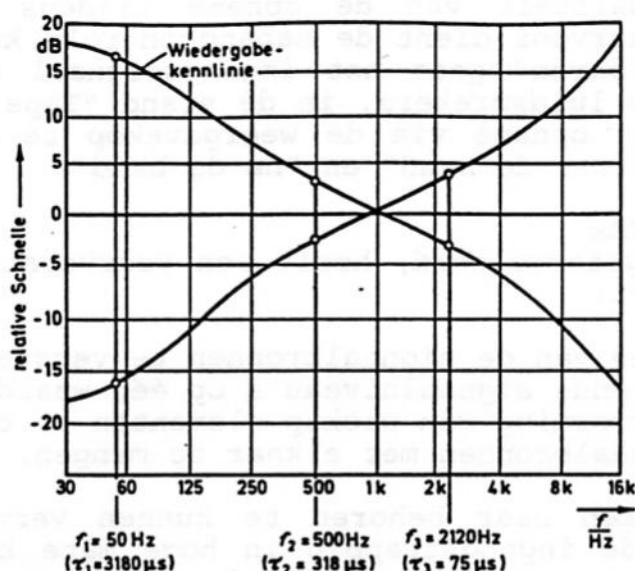


Fig. 9. De RIAA plaatcorrectie karakteristiek

Wat is het geval? Bij het snijden van grammofoonplaten worden om ruimte op het plaatoppervlak te sparen en groefsprongen te voorkomen de laagste frequenties verzwakt opgenomen. Daarentegen worden ter verbetering van de S/R verhouding, dus ter verbetering van de dynamiek, de hoogste frequenties bij registratie op de plaat bekrachtigd.

Vroeger, teruggaande tot de 78-toeren tijd, had vrijwel elke fabrikant zijn eigen snijnormen. In de jaren vijftig zijn deze genormeerd volgens de RIAA standaard. Wat deze bij opname aan niet-lineariteit teweegbrengt, moet bij weergave in spiegelbeeld weer zo exact mogelijk worden teruggebogen.

Bij het snijden van een grammofoonplaat verloopt de curve onder de overgangsfrequentie $f_2 = 500 \text{ Hz}$ ($\tau = 318 \mu\text{s}$) met een steilheid van 6dB/octaaf naar beneden om bij de overgangsfrequentie $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ($\tau = 3180 \mu\text{s}$) weer wat af te vlakken. Deze afvlakking onderdrukt laagfrequente storingen (rumble, niet alleen van de platenspeler bij weergave, maar ook van de snijmachine). Op vergelijkbare manier wordt hoogfrequente storing (ruis) onderdrukt. Frequenties boven de overgangsfrequentie $f_3 = 2120 \text{ Hz}$ ($\tau = 75 \mu\text{s}$) worden met 6dB/octaaf bekrachtigd.

MD pickup elementen geven een uitgangsspanning af, die recht evenredig is met de snelheid van de groefuitslag (versnelling). Deze neemt echter naar de lagere frequenties toe af. Om opnieuw een lineair frequentieverloop te krijgen, moet de voorversterker niet alleen het geringe uitgangsniveau bekrachtigen, maar ook en vooral deze lineaire vervorming corrigeren. Hij moet daarom de in onderstaande afbeelding getoonde spiegelbeeld curve van de RIAA snijcurve vertonen.

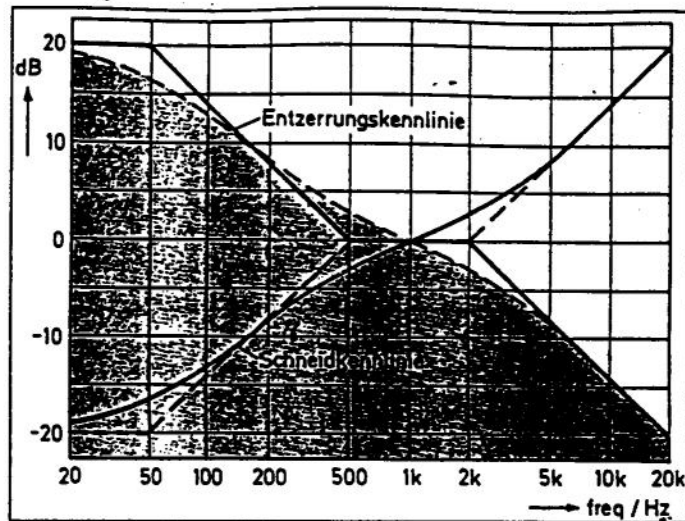


Fig. 10. Genormde RIAA opname/weergavekarakteristiek

De pickup voorversterker moet daarom bij lagere frequenties een grotere versterking hebben dan bij de hogere. Een dergelijke correctie kan worden bereikt met de hieronder aangegeven ééntraps schakeling. Naarmate de frequentie lager wordt, grijpt de tegenkoppeling minder in, waardoor de versterking groter wordt. De spanningsversterking van 10dB is voldoende.

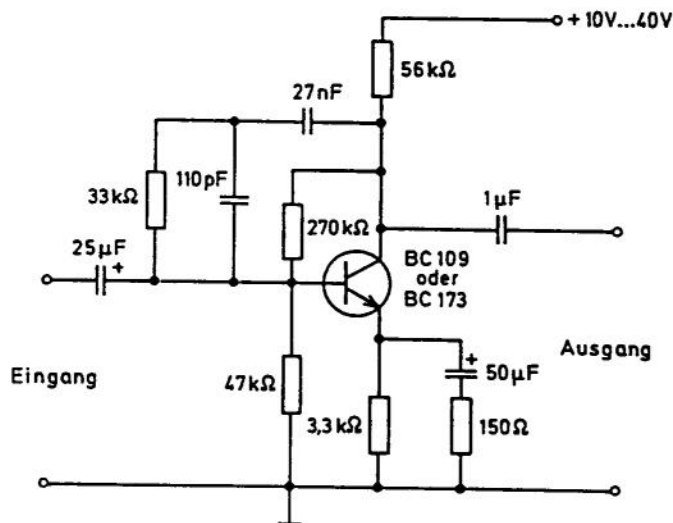


Fig 11. Eéntraps pickup versterker

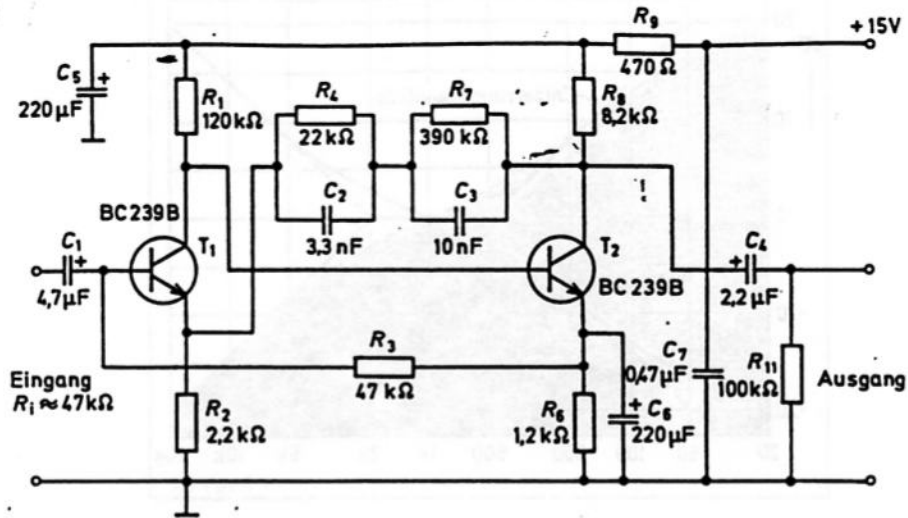


Fig. 11a. Tweetraps pickup versterker

Wat mooier is de hierboven weergegeven tweetraps oplossing, waarbij de RIAA correctie in de tegenkoppelings lus is opgenomen. Een derde oplossing is gebaseerd op het gebruik van een op-amp, zoals in fig. 12 te zien is.

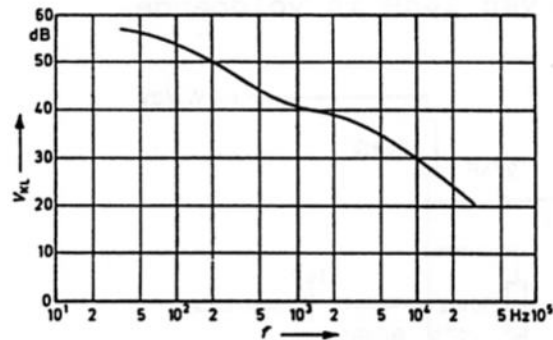


Fig. 12. Frequentieverloop van de spanningsversterking van een opamp als p.u. voortrap

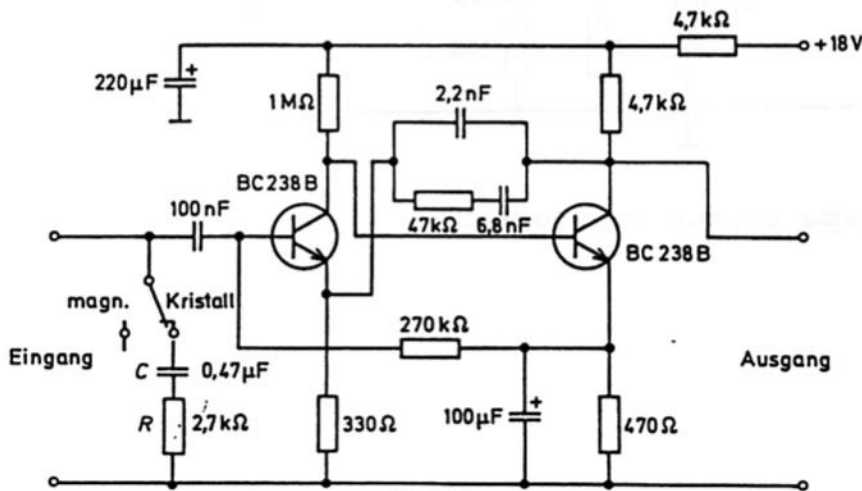
Bild 6.16
Phonovorverstärker für magnetischen und Kristall-Tonabnehmer

Fig. 13. "Ouderwetse" p.u. voorversterker voor keramisch- en MD p.u. element

Omschakelbare stuurversterker

De meeste versterkers zijn zodanig van opzet, dat via de voorversterker verschillende programmabronnen kunnen worden verwerkt. Met de keus van die bron wordt tegelijk ook de werking van de versterker bepaald en o.m. ook de mate van tegenkoppeling aangepast. De ingangselector ontvangt naast de signaalspanning van de pickup voorversterker ook de programmabronnen met signaalspanningen op lijnniveau, zoals die van CD speler, tuner en recorder. Omdat de stuurversterker de aangekoppelde signaalbronnen niet met zijn eigen ingangsweerstand belast, heeft hij doorgaans een ingangsweerstand $>200\Omega$.

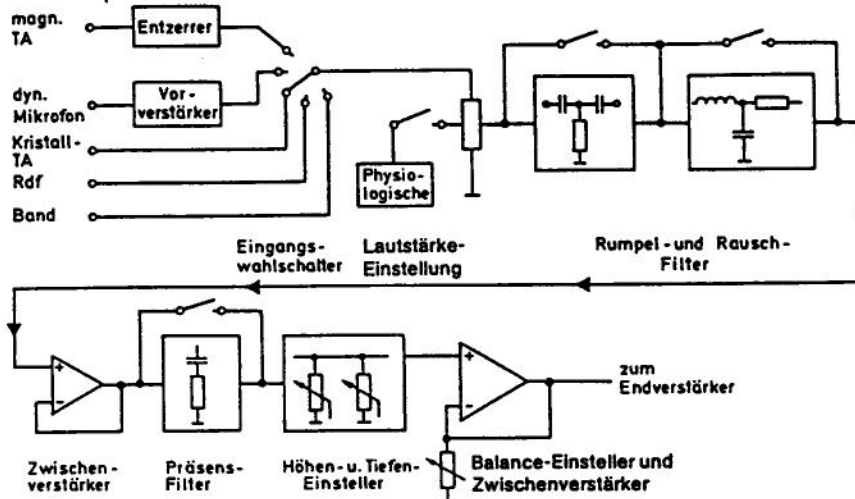


Fig. 14. Blokschema van een stuurversterker met filters e.d.

Het is de taak van de stuurversterker om de via meerdere achter elkaar geschakelde versterkertrappen de aan de ingang binnenkomende signaalspanningen zodanig te bekrachtigen, dat de eindversterker daarmee volledig kan worden uitgestuurd.

Een tweede taak is het corrigeren van eventuele tekortkomingen in de signaaloverdracht.

Dat begint bij de

Volumeregeling

Eén van de belangrijkste organen van elke versterker is de volume potentiometer. Doorgaans wordt hij als eenvoudige spanningsdeler aangesloten.

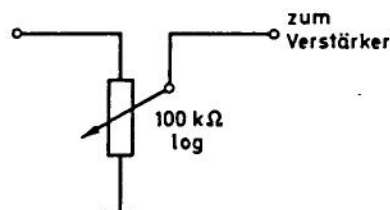


Fig. 15. Eenvoudige opzet van de volumeregeling

Tussen de door ons gehoororgaan waargenomen luidsterkte en de door de luidsprekers afgegeven geluidsdruk bestaat een bij benadering

logaritmische relatie (de wet van Weber-Fechner). Opdat de door de oren ervaren luidsterkte evenredig is met de draaihoek van de volumeknop dient men liefst een variabele weerstand met een logaritmisch weerstandsverloop te kiezen. Het verschil met een lineair verlopende karakteristiek blijkt uit fig. 16.

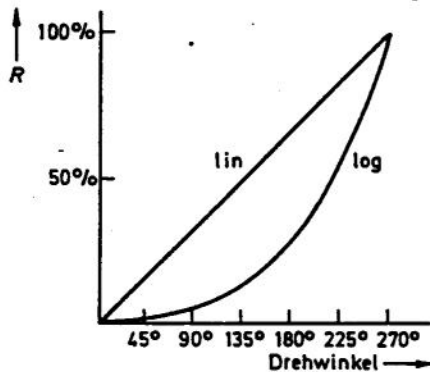


Fig. 16. Weerstandsverloop van een logaritmische en lineaire potentiometer

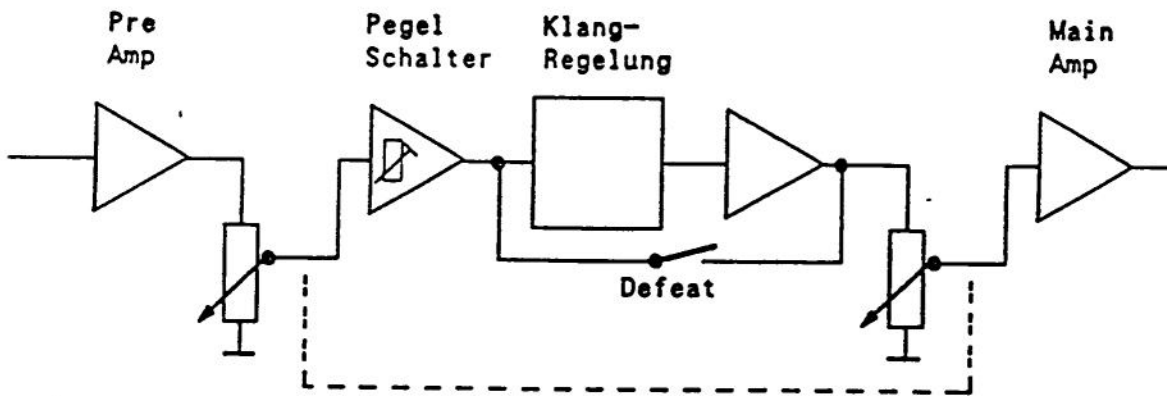


Fig. 17. Dubbel uitgevoerde volumeregeling terwille van minder ruis

Om de sterk frequentie-afhankelijke oorgevoeligheid te compenseren, is de **fysiologische sterkteregeling** eigenlijk mooier, maar hij wordt weinig meer toegepast. Zo'n Loudness- of contour regeling ziet er als volgt uit

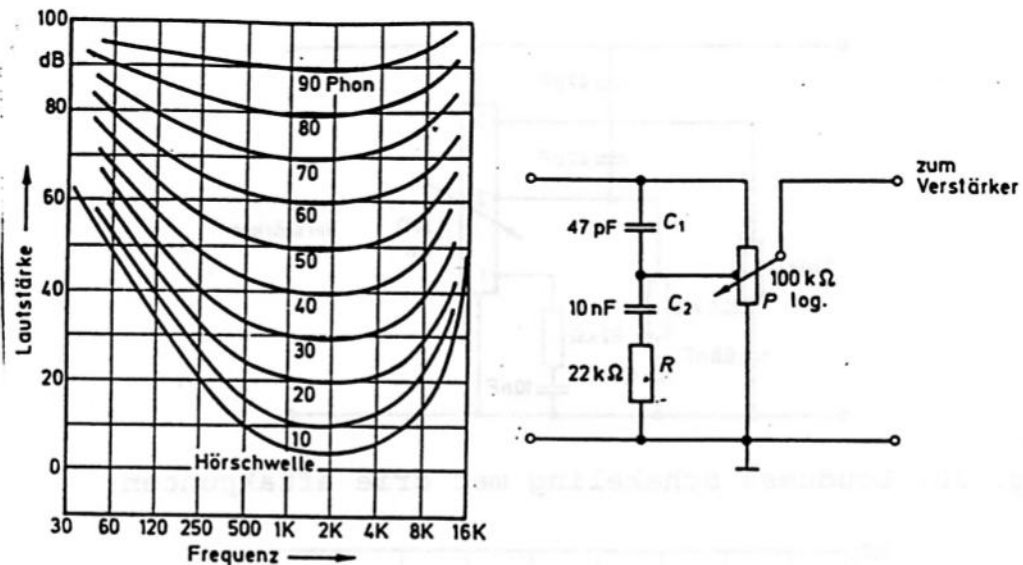


Fig. 18. Links nog eens de oorgevoeligheidscurven, rechts de fysiologische sterkteregeling

De correctie van het frequentieverloop is afhankelijk van de stand van de potentiometer P. De condensator c_1 zorgt voor een bekrachtiging van de uitgangsspanning bij hogere frequenties, de condensator c_2 en de weerstand R helpen de lage frequenties.

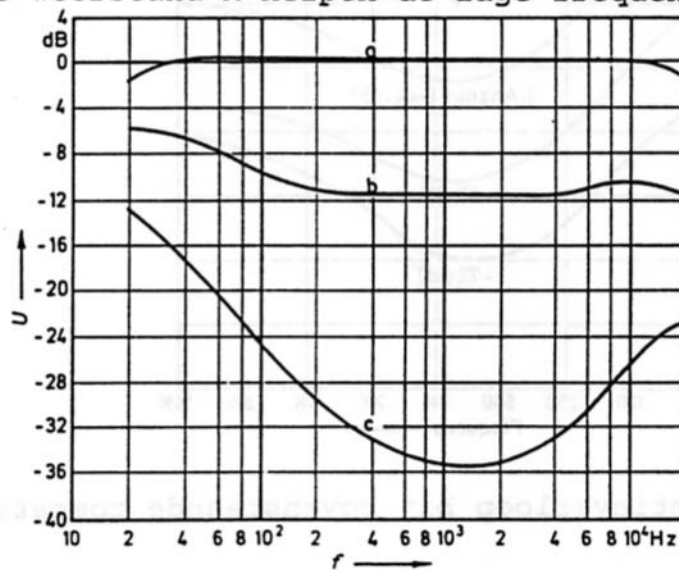


Fig. 19. Frequentieverloop van een fysiologische sterkteregeling. (a) bij geheel open stand, (b) bij gemiddeld luisterniveau en (c) bij zachte weergave.

Een nog mooiere oplossing is te bereiken met onderstaande schakeling, waarin een potmeter met drie aftakkingen wordt gebruikt, wat echter in de praktijk niet zo makkelijk realiseerbaar is.

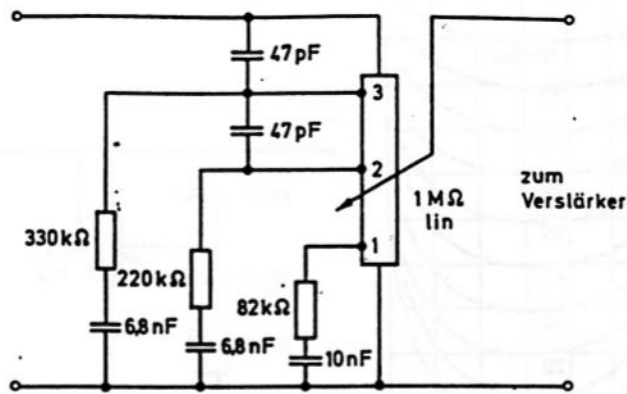


Fig. 20. Loudness schakeling met drie aftakpunten

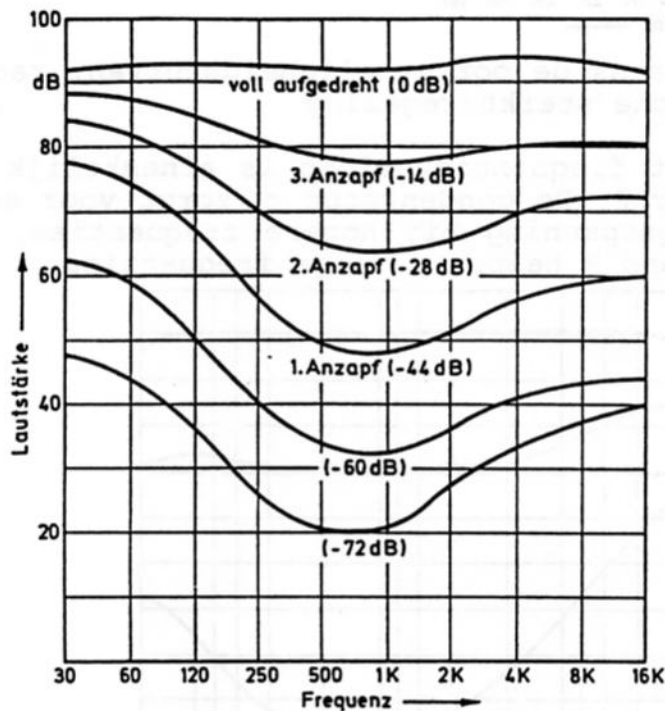


Fig. 21. Frequentieverloop bij bovenstaande toepassing

Toonregeling

Het zijn meer smaakmakers dan tegenwoordig nog echt noodzakelijke voorzieningen. Bij puristische versterkers zal men ook vergeefs naar een toonregeling zoeken. Wie over goede programmabronnen en kwaliteits luidsprekers beschikt, zal er ook weinig behoefte aan hebben. De gemiddelde toonregeling heeft een continue en geen stapsgewijze werking.

De schakeling van een toonregeling, waarmee hoge en lage tonen gescheiden en onafhankelijk van de luidsterkte met twee variabele potentiometers (en een derde voor de fysiologische luidsterkteregeling) kunnen worden bekrachtigd en verzwakt zou er als volgt kunnen uitzien

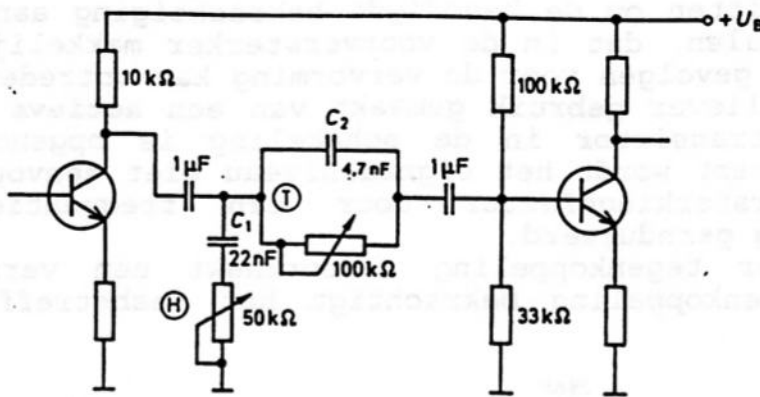


Fig. 22. Eenvoudigste vorm van toonregeling

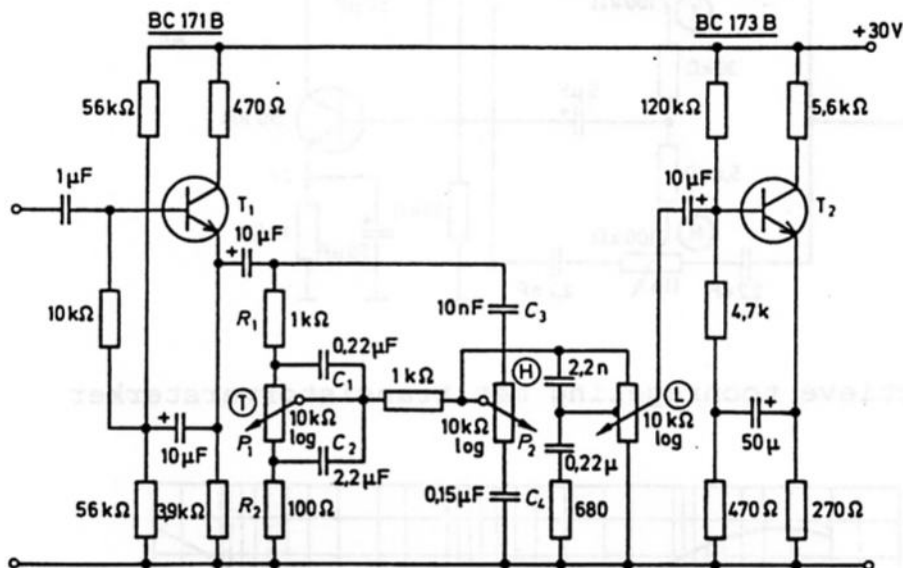


Fig. 23. Passieve toonregeling

Gebruik van deze toonregeling leidt tot het onderstaande frequentie/amplitude diagram.

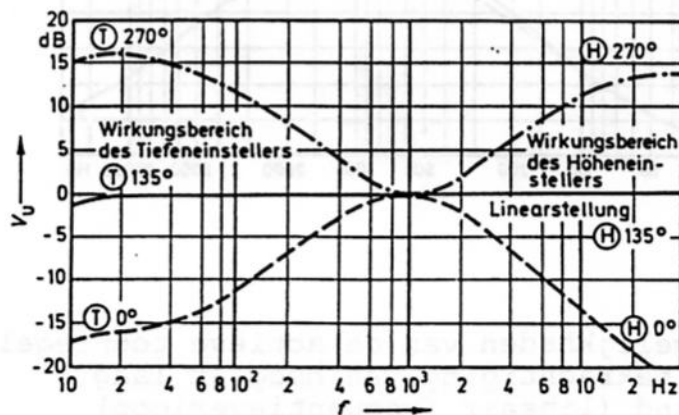


Fig. 24. Werking van de toonregeling

Een nadeel van een dergelijke passieve schakeling is, dat de voorafgaande versterkertrap een dusdanig grote mate aan versterking moet bezitten om de benodigde bekrachtiging aan de grensfrequenties te halen, dat in de voorversterker makkelijk oversturing met negatieve gevolgen voor de vervorming kan optreden. Daarom wordt liever gebruik gemaakt van een **actieve** toonregeling, waarbij een transistor in de schakeling is opgenomen. Bij een dergelijk concept wordt het signaalniveau niet eenvoudig verzwakt, maar de versterkingsfactor door een frequentie-afhankelijke tegenkoppeling gereduceerd. Een krachtiger tegenkoppeling veroorzaakt een verzwakking, een geringere tegenkoppeling bekrachtigt het desbetreffende frequentiegebied.

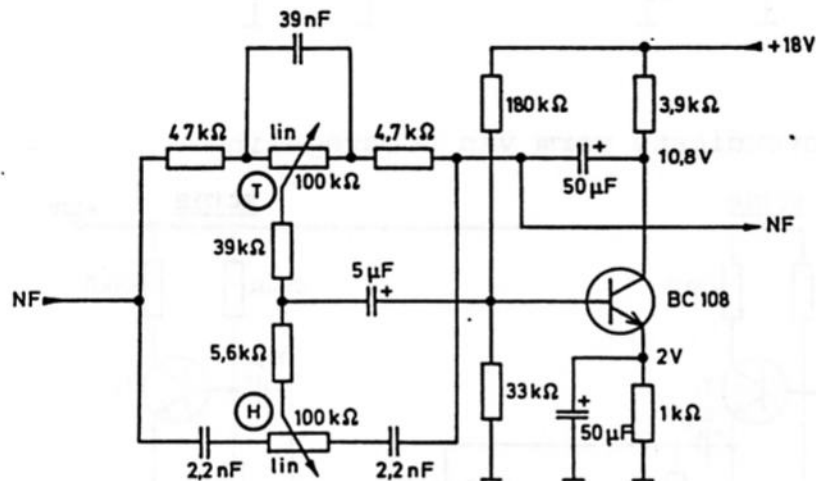


Fig. 25. Actieve toonregeling met transistorversterker

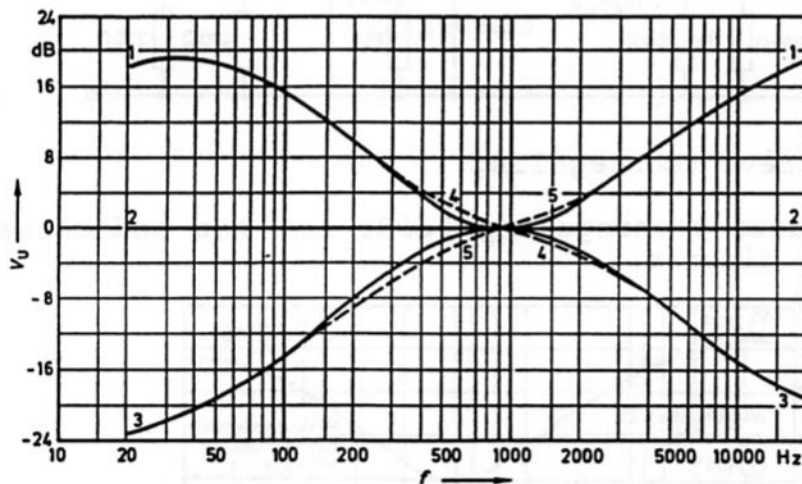


Fig. 26. Instelmogelijkheden van de actieve toonregeling

- Curve 1: maximale bekrachtiging van hoog en laag
- 2: middenstand (lineair frequentieverloop)
- 3: maximale verzwakking van hoog en laag
- 4: maximale bekrachtiging van het laag, maximale verzwakking

- van het hoog
 5: maximale verzwakking van het laag, maximale bekrachtiging van het hoog

Vroegere versterkers beschikten nog wel eens over een **Presence** filter, dat diende om de spraakverstaanbaarheid te verbeteren. Het veroorzaakte een bultje in de frequentiekaracteristiek tussen 600 en 3.000Hz met piek bij 2kHz.

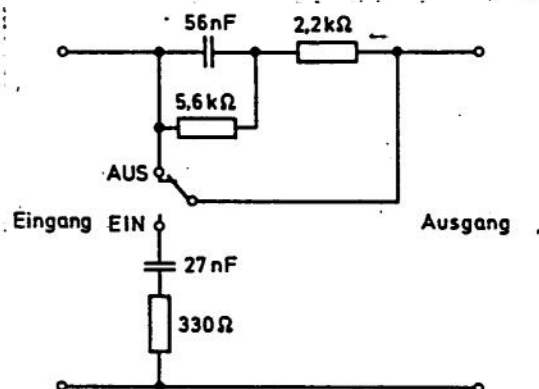


Fig. 27. Opzet van de presence schakeling

Dergelijke onzin is nu mooier en makkelijker met een equalizer te realiseren.

Filters

Zeker zolang het programmamateriaal en de programmabronnen (ruisende analoge bandopnamen en FM programma's, rumbelende LP's en platenspelers, resonerende pickup element/arm combinaties, dreunende houten vloeren, gestoorde AM radioprogramma's e.d.) grote beperkingen vertoonde bij weergave, waren de diverse filters op een versterker onontbeerlijk. Met de verbetering van zowel programmamateriaal als signaalbronnen zijn ze geleidelijk overbodiger geworden. Niettemin is het goed een paar van dergelijke filters aan de orde te stellen. Eén van de zwakke punten was in de praktijk vaak, dat dergelijke filters een verkeerde, of in elk geval ongelukkige karakteristiek hadden. Dat wil zeggen: ze grepen op het verkeerde punt in het frequentiedomein aan en hadden niet de gewenste werking tengevolge van een ongelukkig gekozen flanksteilheid.

Rumblefilter

Rumble werd in het Nederlands vertaald als motordreun of -gestommel, een term die sloeg op minder goede platenspelers, maar eveneens op oudere LP's, die op een rumble veroorzakende snijtafel waren gesneden. De veroorzaakte storing doet zich vooral voor in het frequentiegebied onder de 40Hz. Om rumble te elimineren, wordt wel een rumblefilter toegepast dat uit twee, een Highpass filter vormende RC takken bestaat. Om een nuttige grotere flanksteilheid te bereiken, kan een derde tak worden toegevoegd (of een LC tak). In de praktijk ziet een eenvoudig rumblefilter er als volgt uit

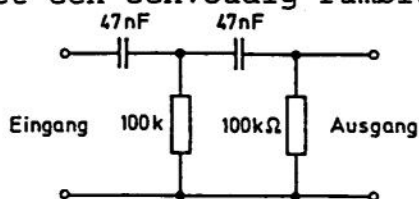


Fig. 28. Rumblefilter bestaande uit een dubbele RC tak

Ruisfilter

Met een ruisfilter worden hoogfrequente storingen onderdrukt. Het kreeg vorm als een uit twee RC takken bestaande RC combinatie

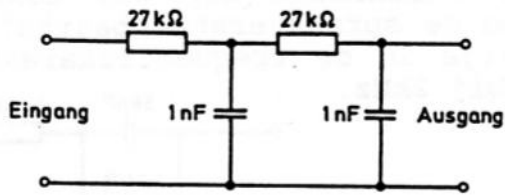


Fig. 29. Ruisfilter bestaande uit twee RC takken

Een voorbeeld van heel ongelukkig geconcipeerde ruis- en rumblefilters laat onderstaande afbeelding zien. Beide filters zetten niet allen te vroeg in, maar kappen ook niet steil genoeg af. In menige (oudere) versterker zijn ze helaas aan te treffen.

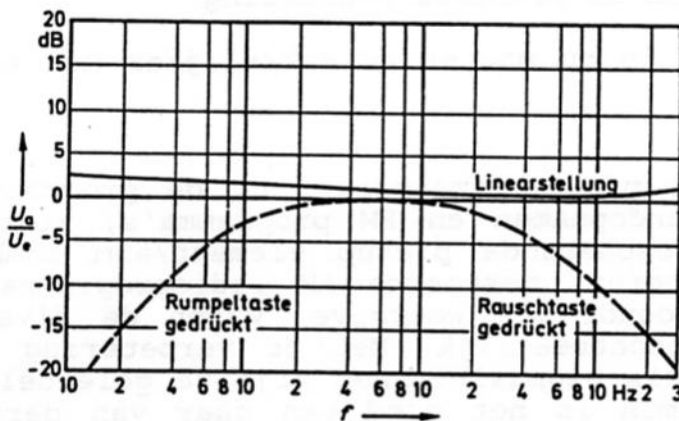


Fig. 30. Schoolvoorbeeld van filters, zoals deze niet moeten zijn

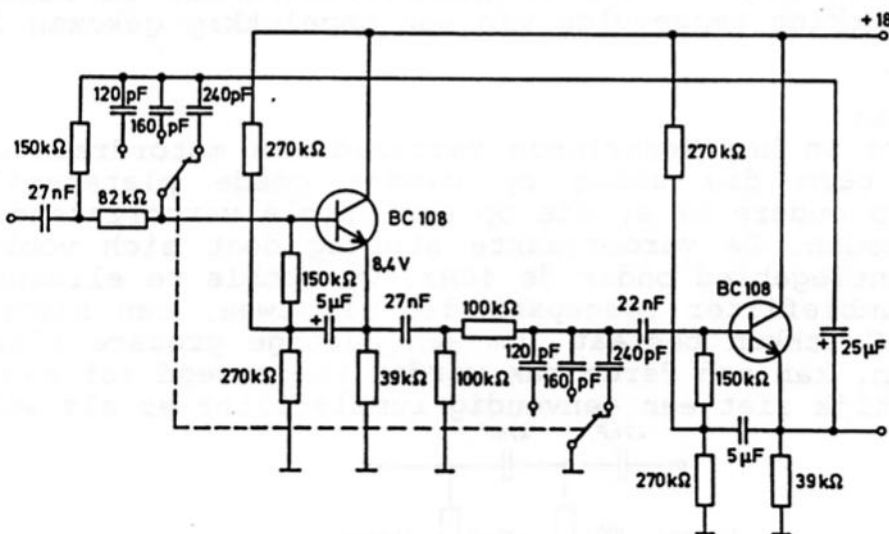


Fig. 31. Aktief ruis- en rumblefilter

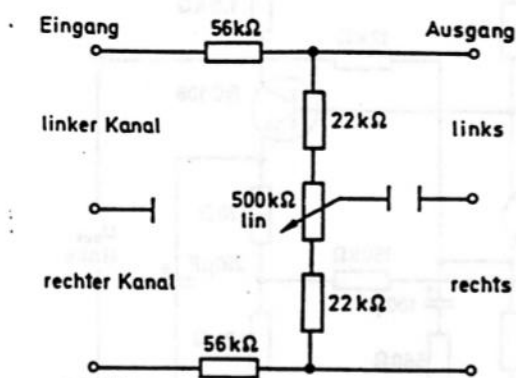


Fig. 32. Rumblefilter en ruisfilter met instelbare inzetfrequentie

Balansregeling

Om althans beide stereokanalen van een versterker elektronisch een even grote signaalspanning te laten leveren, is de volumeregeling meestal uitgevoerd in de vorm van een tandem potentiometer, twee potmeters op één as. Maar voor de finishing touch en om ook akoestische balansproblemen op te lossen heeft een balansknop zeker zin.

Uitgevoerd wordt zo'n regeling bijvoorbeeld zoals in onderstaand schema

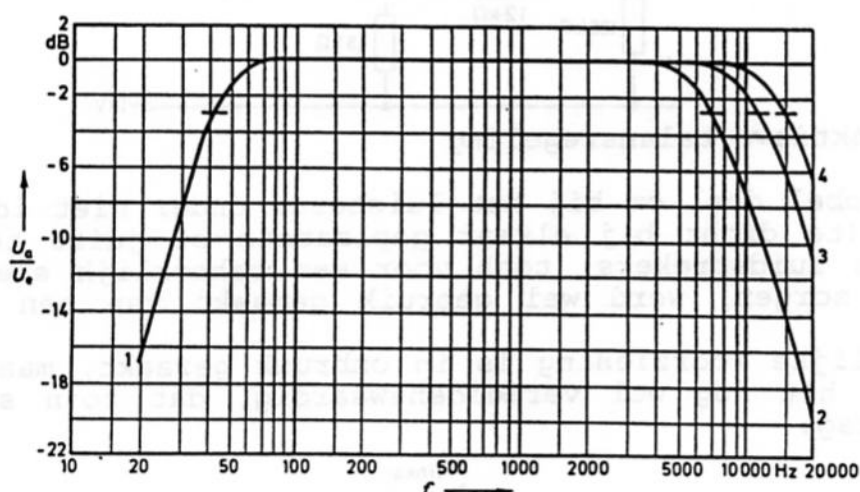


Fig. 32. Passieve balansregeling

Het gaat hierbij om een regelbare potentiometer, die tussen beide kanalen terwille van minimale vervorming in de tegenkoppelingslus is aangebracht en waarmee de signaalsterkte van die twee kanalen tegengesteld kan beïnvloeden. Het regelbereik is $\pm 6\text{dB}$.

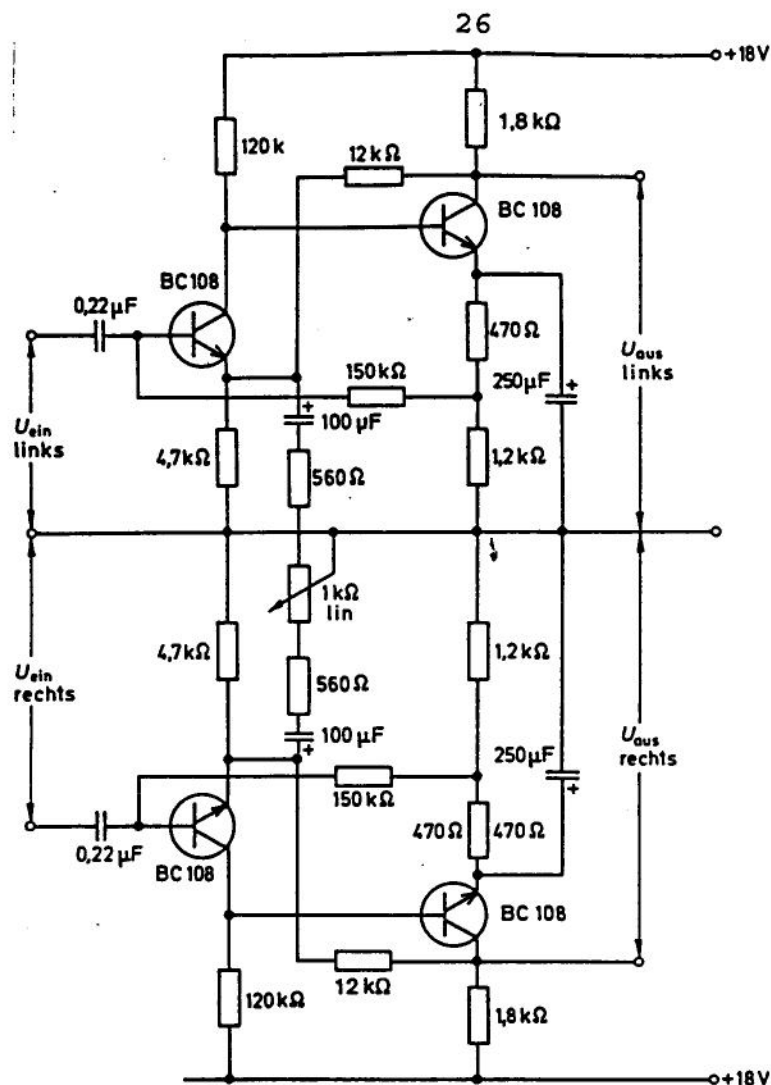


Fig. 33. Aktieve balansregeling

Met als nobel doel om bij het luisteren onder niet ideale omstandigheden (te dicht bij elkaar geplaatste of juist te ver uiteen geplaatste luidsprekers) toch voor een behoorlijk stereo geluidsbeeld te zorgen, werd wel gebruik gemaakt van een **basisbreedte** regeling.

Een dergelijke voorziening is in onbruik geraakt, maar als curiositeit is het nog wel vermeldenswaardig, dat zo'n schakeling er aldus uitzag:

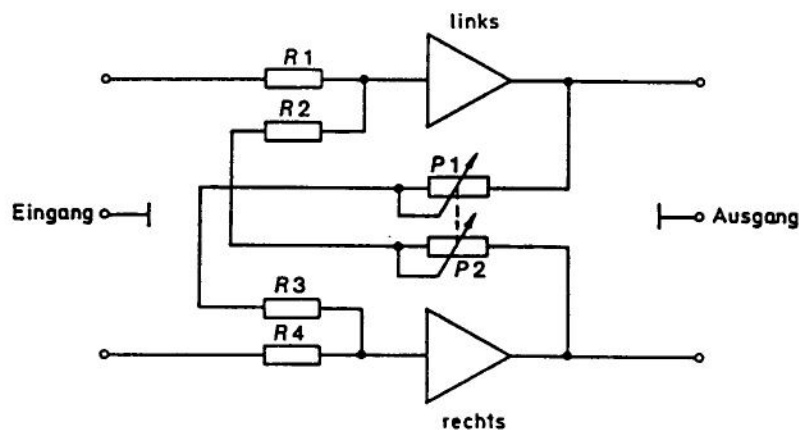


Fig. 34. Principe schakeling van een basisbreedte schakeling

Eindversterker

De eindversterker heeft als opgave het aangeboden signaal met een passend rendement zodanig te versterken, dat aan de uitgang de vereiste energie ter beschikking staat, waarmee de luidsprekers naar behoren hun werking kunnen hebben.

Elementaire voorwaarden hierbij zijn een lineair frequentieverloop en een minimum aan vervorming. Aan dergelijke kwalitatieve eisen is met de tegenwoordig ter beschikking staande techniek niet zo moeilijk te voldoen.

Het merendeel der gangbare transformatorloze eindversterkers werkt als complementaire in klasse B geschakelde eindtrappen of - als grotere eindvermogens worden gevraagd - als quasi-complementaire klasse A/B schakeling. Puristen vinden terecht lineair werkende klasse A versterking het mooist. Hun handicap was, dat ze aanvankelijk slechts tot 2x30W continu vermogen gingen.

Een ander kenmerk van de moderne versterkerconcepten is, dat de direct gekoppeld zijn en dus geen ingangs- en uitgangscapaciteiten meer bevatten. In het vakjargon is sprake van DC (wat zowel Direct Coupled als Direct Current betekent) en OCL (zonder uitgangscapacitor) techniek. Omdat een echte gelijkstroom versterker ook zonder koppelcapacitors in de tegenkoppellus werkt, is hij in principe (en heel gevaarlijk voor de luidsprekers) ook in staat om gelijkspannings signalen (0Hz) te versterken.

Het is wel een heel mooi concept, waarmee problemen rond fasefouten, stijgtijden en -snelheden fraai oplosbaar zijn. De verklaring is heel simpel: elke in de signaalweg voorkomende capacitor werkt als een Highpass filter en veroorzaakt behalve een zwakkere weergave van de lage tonen ook fasefouten.

Zoals we maar al te goed weten, omvat het begrip "vermogen" in de elektrotechniek de beide componenten "spanning" en "stroom", want vermogen is het produkt van spanning en stroom.

Het kernprobleem van iedere versterker is de stroom, die door de transistor vloeit. Dat probleem is op zijn grootst, wanneer er helemaal geen stroom door vloeit, want dan kan hij niet langer worden gecontroleerd. Daarom is het toegepaste stroomconcept maatgevend voor de kwaliteit van een eindversterker.

Classificatie

Versterkers worden naar hun schakeling, naar hun stroomconcept onderverdeeld in de klassen A, B, AB en C. Er is ook nog een klasse D: de digitale versterker.

Deze klassen baseren hun verschillen vooral op de constructief vastgelegde ruststromen, dat wil zeggen op de keus van het werkpunt van de transistor karakteristiek. Daarmee wordt tevens de mate van vervorming en rendement bepaald.

Klasse A

Ongeacht of door een programmabron een stuursignaal wordt geleverd, vloeit bij een klasse A versterker volop een constante stroom door de transistoren en de lastweerstand (in dit geval de luidsprekers). Wanneer door een op de versterkeringang aangesloten programmabron een stuursignaal wordt aangevoerd, wisselt de spanning aan de versterkeruitgang proportioneel mee, zodat een groot deel van de stroom aan de luidsprekers wordt geleverd. Omgekeerd wordt zonder signaalaanbod de voor het eindvermogen beschikbare energie in warmte omgezet. Dat is uitwendig voelbaar. Versterkers, die in klasse A zijn geschakeld veroorzaken geen (crossover) vervorming, minder overspraak, TIM vervorming, lage-

impedantie vervorming en geringe fase-intermodulatie, maar hebben ook het geringste rendement en het grootste stroomverbruik, waarbij de overtollige energieconsumptie (helaas) wordt omgezet in warmte. Lastige luidsprekers (met een hoge capacatieve last zoals electrostaten) vormen minder een probleem.

Als regel gaat het hier om High End-achtige, dure versterkers met heel hoge kwaliteit en geringe eindvermogens. Ze worden ingesteld op een hoge ruststroom, met als gevolg minimale vervorming. Dat gaat ten koste van het stroomverbruik. In wezen verschilt de opzet verder niet van klasse AB. De door de eindtransistoren vloeiende ruststroom is groter dan de maximaal aan de luidsprekers geleverde stroom. Deze transistoren werken derhalve niet bij toerbeurt, maar er vindt slechts een fluctuatie van de vloeiende ruststroom in het ritme van de signaalfrequentie plaats. Daardoor kan zoals gezegd geen crossover vervorming ontstaan.

Klasse A gebruik vergt vanwege de grote warmte ontwikkeling hoogbelastbare transistoren en grote koelribben en ventilatie openingen. Ook de netvoeding moet om voldoende stroom te kunnen leveren extra krachtig zijn.

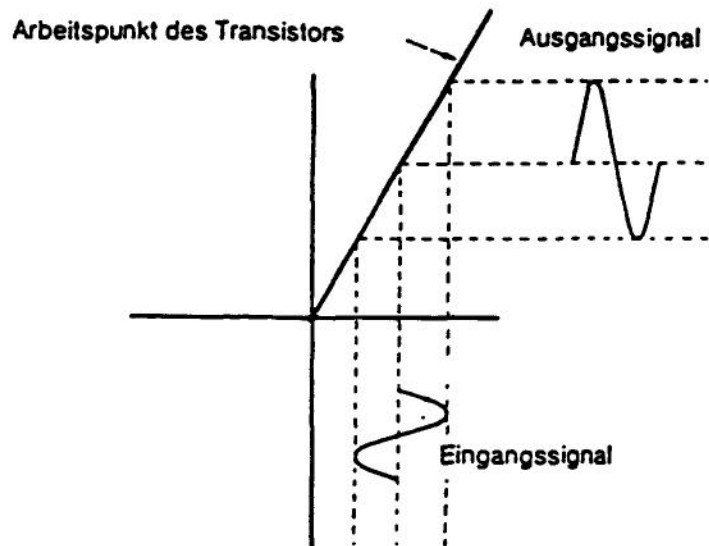


Fig. 35. Klasse A versterker

Klasse B

De meest voorkomende versterkerschakeling is klasse B, of preciezer gezegd AB. In klasse B heeft men in principe twee transistoren met tegengestelde polarisatie nodig, die onderling het werk verdelen. De ene transistor versterkt de positieve halve golfvorm, de andere de negatieve helft van het wisselspanning signaal.

Bij de nuldoorgang van de curve werkt geen van beide transistoren. Toch wordt de stroom daar niet onmiddellijk onderbroken, omdat de transistoren een deel van de energie opslaan en slechts geleidelijk vrijgeven.

De bewuste NPN en PNP transistoren zijn voor gelijkspanning in serie en voor wisselspanning parallel geschakeld; in een complementaire klasse B eindtrap is geen fase omkeertrap nodig. De transistoren zijn op het "afkniijppunt" ingesteld en in de ruststand vloeit er geen stroom door. Het nadeel is een hoge mate aan onvermijdelijke vervorming.

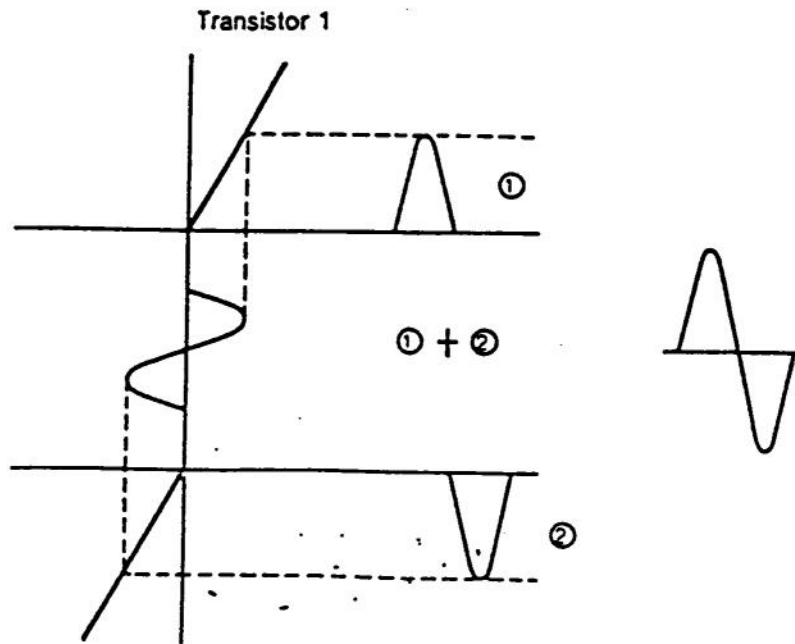


Fig. 36. Klasse B versterker

Door de vertraagde blokkade van deze halfgeleiders kan wel schakel- of overnamevervorming ontstaan, die als regel onder de Engelse naam **Crossoververvorming** bekend is. Als tegenmaatregel werden door verschillende fabrikanten diverse versterkerconcepten ontwikkeld, die door het leven gaan onder benamingen als "Super-A", "New-Class-A", "Class AA" of "Non Switching" en "Current Dumping". Gemeen hebben ze, dat ze alle min of meer effectief crossover vervorming voorkomen. De moderne transistoren schakelen extreem snel om van de geleidende naar de geblokkeerde toestand en omgekeerd, zodat crossover vervorming tegenwoordig eigenlijk zelden meer voorkomt.

Wel is het enigszins misleidend wanneer een in principe als Klasse B ontworpen versterker ineens als Klasse A type aanduidt. Zinvoller zou het zijn om van een "Quasi-A-versterker" te spreken.

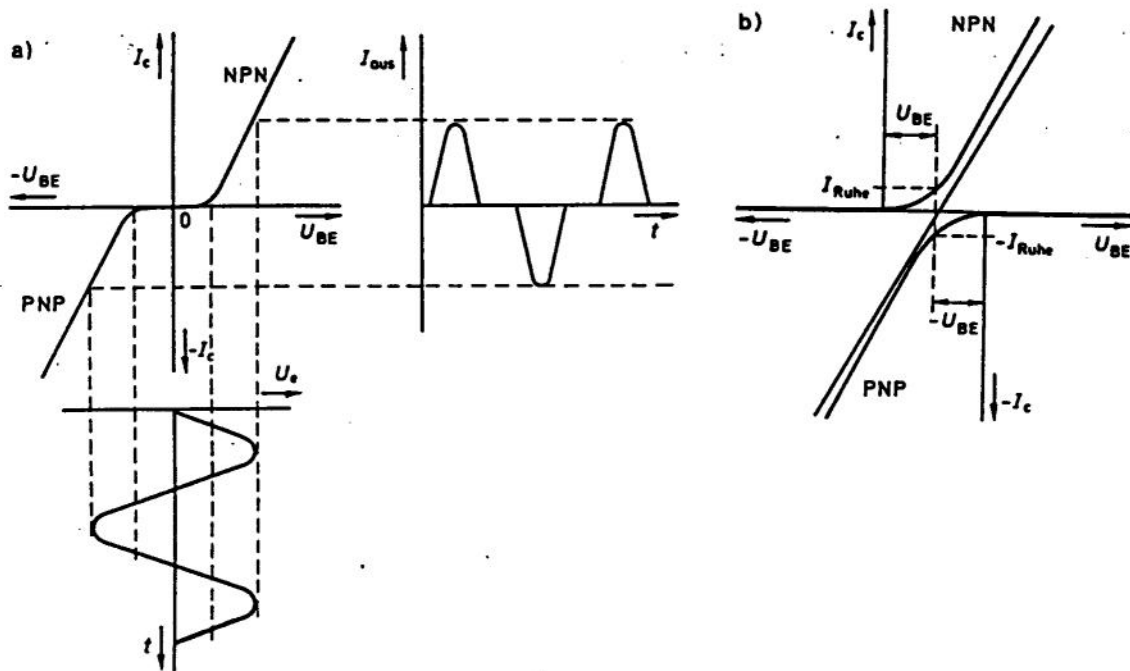


Fig. 37. Nog eens het ontstaan van crossoververvorming a); door optelling van de afzonderlijke karakteristieken en de ruststroom instelling ontstaat een rechte karakteristiek

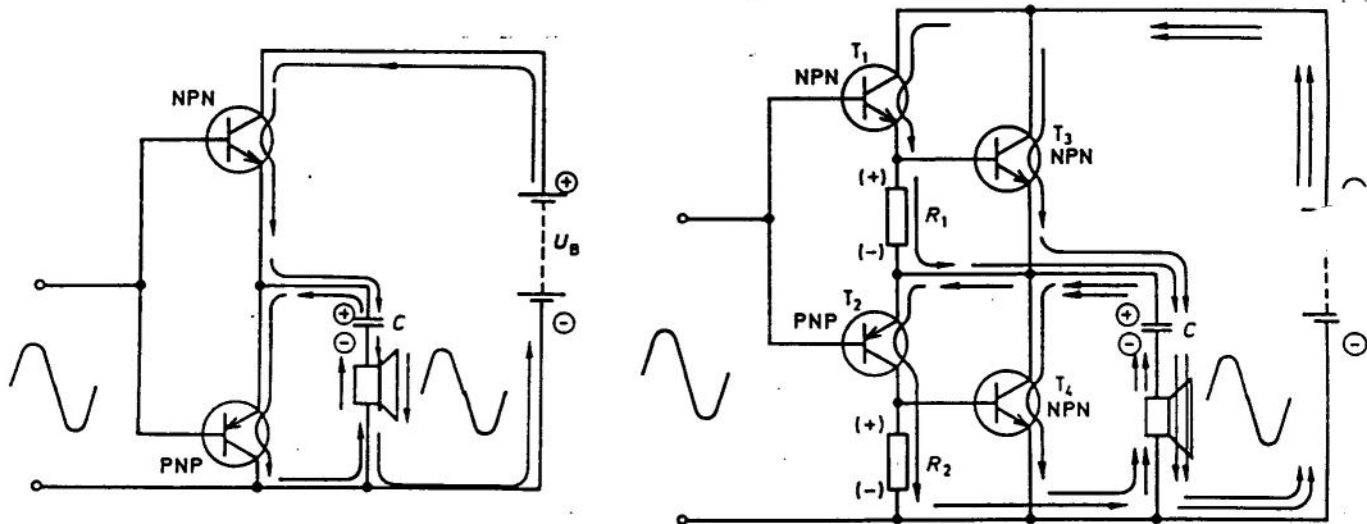


Fig. 38. Principeschakeling van een complementaire (links) en een quasi complementaire eindtrap (rechts)

Klasse AB

De transistorinstelling is hier zodanig, dat een kleine ruststroom vloeit. Dit bij wijze van optimaal compromis tussen geringe vervorming en groot vermogen.

Bij weer andere versterkerconcepten wordt de voorspanning continu afhankelijk van het momentaan nodige eindvermogen verandert. Dit betekent, dat de versterker bij gering vermogen werkelijk in

klasse A werkt en bij hoger vermogen al naar gelang het concept continu of ineens in klasse B bedrijf overgaat. Het voordeel van deze oplossing is, dat bij kleine signaalspanningen (dus zachte muziek, waar vervorming het snelst hoorbaar wordt) minimale vervorming optreedt, terwijl anderzijds de hele dynamiek reserve voor forse impulspieken in de muziek ter beschikking staat.

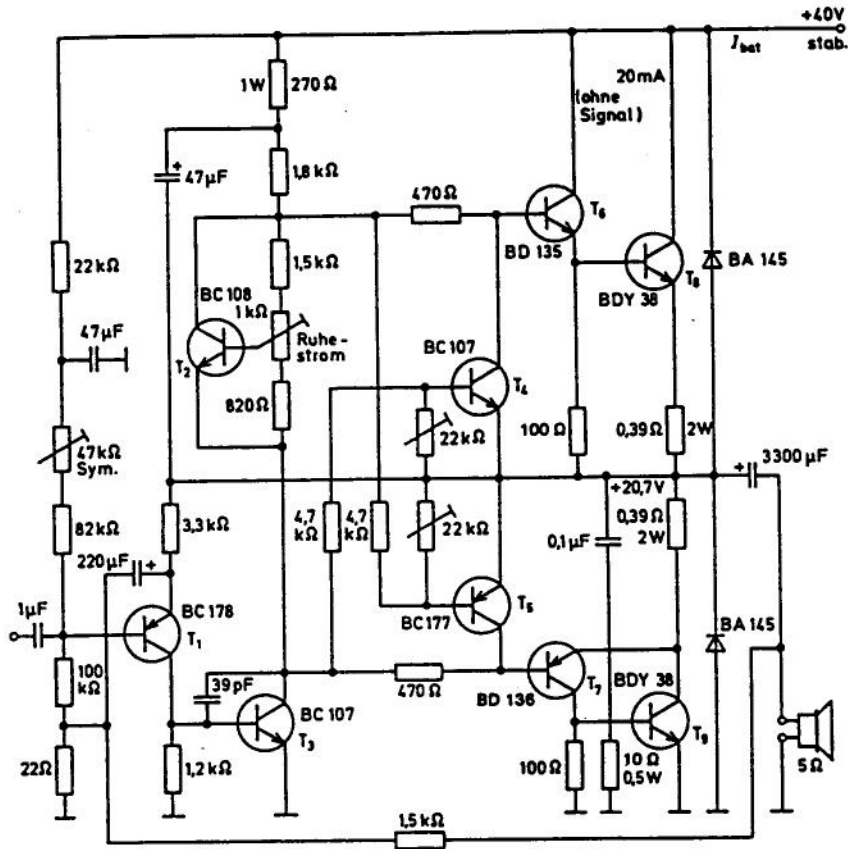


Fig. 39. Quasi-complementaire schakeling van een 2x20W versterker

Buizen en transistoren

Elektronische versterking begon in 1906 toen de uitvinder Lee de Forest ontdekte, dat een klein elektrisch signaal op het rooster van zijn primitieve triode (de eerste radiobuis en in principe een gloeilamp met twee extra elektrodes) een veel grotere stroom opwekte.

Grappig genoeg heet zo'n buis in het Engels valve ofwel klep, ventiel. De analogie met de waterleiding en de loodgieterswereld ligt voor de hand: elektrische spanning, die wordt vergeleken met waterdruk, terwijl de stroom zijn equivalent vindt in de doorstroom van het water.

De radiobuis is een spanningsgestuurd hulpmiddel. Met andere woorden: een verandering van de ingangsspanning levert een dienovereenkomstige, maar grotere verandering in de stroom door de buis van anode naar kathode op.

Buizenversterkers bevatten voor verschillende functies ook verschillende types buizen. Qua opzet zijn ze meestal eenvoudiger dan

transistor versterkers. Omdat ze een relatief hoge uitgangsimpedantie hebben ($>800\Omega$), kunnen laagohmige luidsprekers alleen via een uitgangstransformator worden.

De bipolaire transistor daarentegen zet een verandering van de ingangsstroom om in een verandering van de uitgangsstroom. Maar het resultaat is ongeveer hetzelfde als bij de radiobuis. Ook hier zorgt een gegeven ingangsspanning voor een hogere uitgangsspanning. Alleen vergen transistoren een grotere ingangsstroom dan buizen omdat hun ingangsimpedantie veel geringer is. Die stroombehoefte kan met schakeltechnieken worden begrensd, maar blijft een fundamenteel verschil.

Een ander verschil is, dat transistoren een veel grotere versterking mogelijk maken dan buizen. Ze hebben een hogere versterkingsfactor (E: Gain). Daarvan wordt weer het nodige opgeofferd met schakelingen als de negatieve tegenkoppeling.

De ingangs- versus uitgangs karakteristieken van buizen en bipolaire transistoren zijn dus verschillend. Transistoren volgen een exponentiële ingangs/uitgangs wet en wekken hogere, oneven harmonischen op, terwijl buizen een eenvoudiger fractionele (dus 2e orde) wetmatigheid volgen.

Daarnaast kennen we de FET (Field Effect Transistor) en zijn broertje IGFET (Insulated Gate) en de MOSFET (Metal Oxyd Silicon). Ze worden graag omschreven als "halfgeleider buizen" omdat het hier ook om spanningsgestuurde hulpmiddelen gaat. Hun spanningsversterking is als regel gering en ze vertonen net als buizen eerder een kwadratisch ingangs/uitgangsgedrag met hoofdzakelijk lagere orde harmonischen. MOSFETS hebben het verdere voordeel dat ze thermisch stabiel, sneller en robuster zijn dan bipolaire soortgenoten.

Bij topklasse eindversterkers wordt derhalve veelal gebruik gemaakt van MOSFET transistoren, omdat deze heel lineair zijn en minder vervorming veroorzaken dan gangbare transistoren. Ook in de pickup voorversterker vinden ze een plaatsje terwille van een betere S/R verhouding en geringere vervorming.

De stroomversterking van een transistor blijft niet over het hele uitsturingstraject constant. Het effect van de vermenigvuldiging van ladingsdragers verloopt beter bij hogere spanningen. Daarom neemt de stroomversterking van klasse B versterkers licht toe bij toenemende collector-emitter spanning.

Maar vanwege de niet helemaal constante stroomversterking treden bij de uitsturing van transistoren met wisselspanning niet-lineaire vervormingen op, die evenredig met de amplitude groter worden.

Het nut van tegenkoppeling

Wanneer geen maatregelen worden getroffen om het verband tussen het in- en uitgangssignaal te lineariseren of constant te maken, kunnen de vervormingen dusdanig groot worden, dat ze het muziekgehoor ernstig in de weg staan.

De ingewikkeldste linearisatie manier bestaat eruit de afzonderlijke transistoren van de opeenvolgende versterkertrappen zodanig te selecteren, dat ze precies in spiegelbeeld vervormen en zo elkaars fouten compenseren. Een typische High End oplossing

Een eenvoudiger bestrijdingsmethode van harmonische- en IM vervorming heet tegenkoppeling. Daarmee wordt een kunstgreep aangeduid, waarmee de versterker eindweegs zichzelf corrigeert.

Dat wekt als volgt: de versterker ontvangt behalve het audiosignaal dat hij moet versterken nog een deel van zijn eigen, in het verdere verloop vervormde uitgangssignaal. Dit spanningsaandeel

wordt gecombineerd met het na de versterking in tegenfase gebrachte verloop van deingangsspanning, die daardoor in spiegelbeeld wordt voorvervormd. Het uitgangssignaal is daardoor niet geheel, doch redelijk vervormingsvrij, afhankelijk van de mate van tegenkoppeling.

Anders gedefinieerd: tegenkoppeling behelst het in tegenfase terugvoeren van de uitgangsspanning naar de versterkeringang om vervorming te bestrijden.

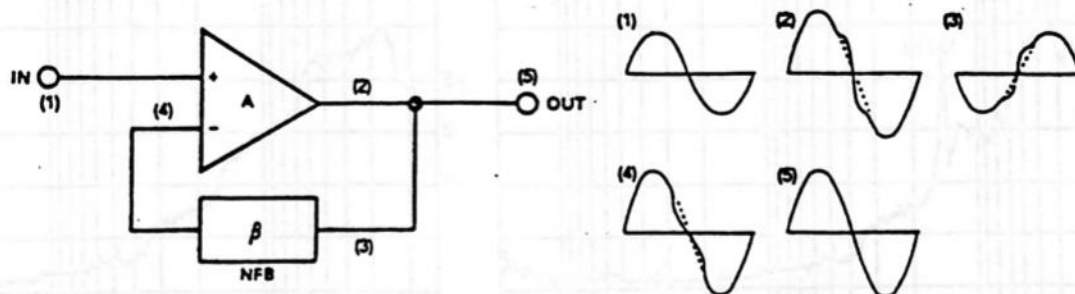


Fig. 40. Golfvormen van de signalen bij tegenkoppeling. 1) golfvorm van hetingangssignaal, 2) golfvorm van het uitgangssignaal zonder tegenkoppeling, 3) 180° fasegedraaid tegenkoppelingssignaal, 4) golfvorm van het ingangs- plus tegenkoppelingssignaal en 5) golfvorm van het uitgangssignaal na tegenkoppeling

De netvoeding

De netvoeding vormt een belangrijke factor, die kwaliteitsbepalend is voor een eindtrap. Die netvoeding is namelijk de eigenlijke energiebron van een versterker. In het ideale geval zou hij een impedantie van 0Ω moeten hebben, omdat dan - simpel uitgedrukt - geen hinderpaal bestaat tussen de versterkerschakelingen en zijn energiebron.

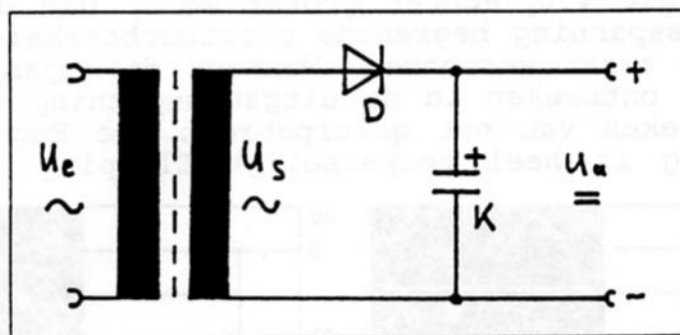


Fig. 41. Eenvoudige netvoeding. De diode D laat slechts gedurende de positieve halve golfvorm van de secundaire wisselspanning U_s stroom in de richting van de condensator K vloeien. De elco neemt lading op, zodat tussen zijn aansluitingen de gelijkspanning U_a - de uitgangsspanning van de netvoeding - ontstaat

Alle constructeurs van versterkers hebben ernaar gestreefd om de impedantie van de netvoeding zo laag mogelijk te houden. Dat houdt het gebruik van dikke bedrading en overgedimensioneerde condensatoren in om de elektrische energie op te wekken en op te slaan, zodat ook grote dynamieksprongen met voldoende stroomreserve kunnen worden verwerkt. De netvoeding heeft een met een watertoren vergelijkbare functie.

Om het optreden van brom zoveel mogelijk tegen te gaan, wordt vaak gebruik gemaakt van ringkern transformatoren. Een goede elektromagnetische afscherming helpt ook natuurlijk.

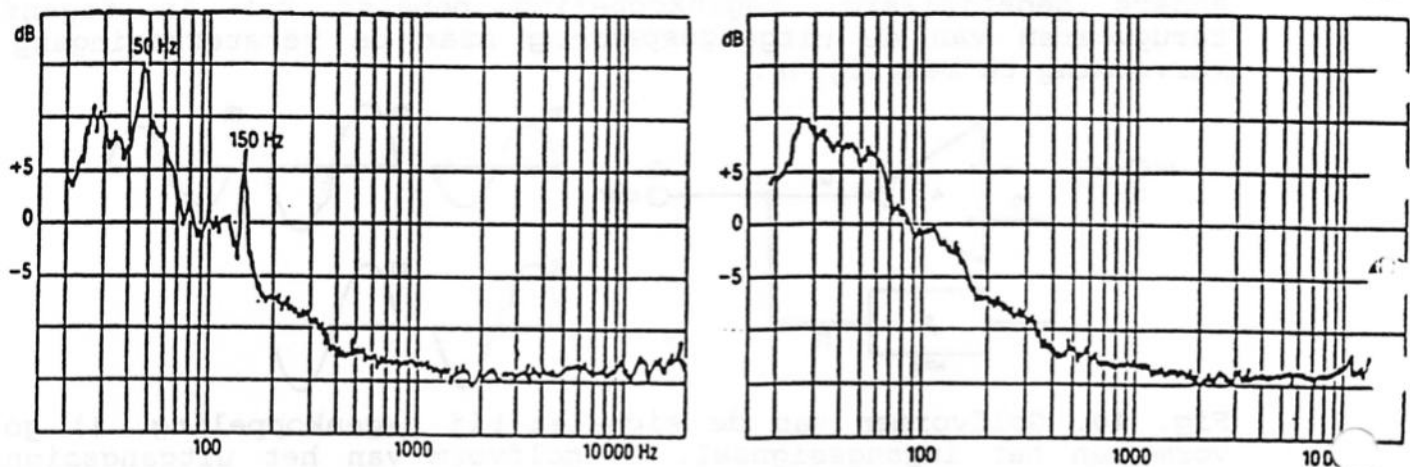


Fig. 42. Vergelijking van het S/R patroon tussen het strooiveld van een conventionele versterker (links) en eentje met een ringkern trafo (rechts)

Clipping: een dramatische vervorming

De uitgangsspanning van een versterker U_a volgt uit de spanningsversterkingsfactor V en de ingangsspanning U_e volgens de formule

$$U_a = V \cdot U_e$$

Zodra het product $V \cdot U_e$ echter groter wordt dan de door de hoogte van de bedrijfsspanning begrensde uitstuurbaarheid van de versterker, gaat deze zwaar vervormen. Wanneer de ingangsspanning sinusvormig is, dan ontbreken in de uitgangsspanning de bovenste en/of de onderste pieken van het golofpatroon. De Engelse benaming van deze vervorming is heel toepasselijk Clipping (snoeien, afknippen).

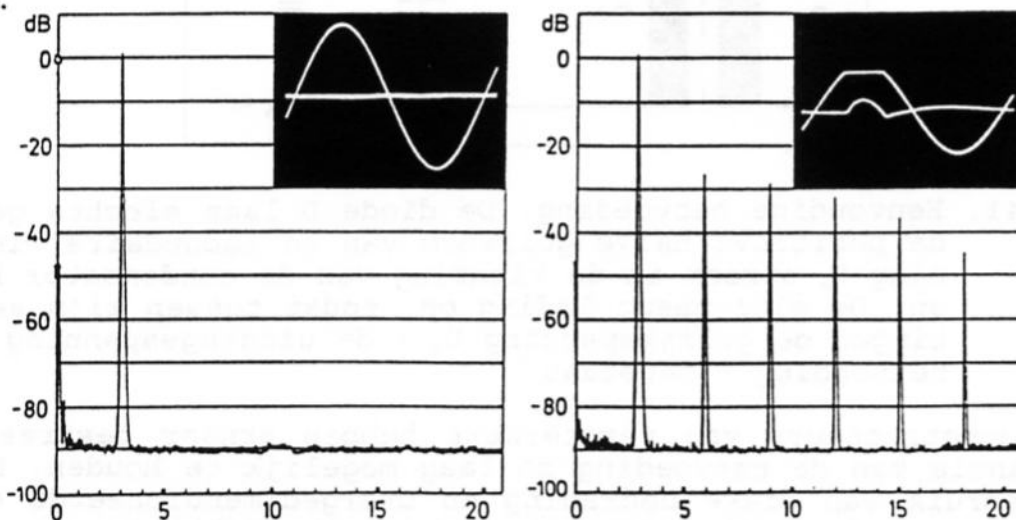


Fig. 43. Een spectrumanalyse van de uitgangsspanning van een versterker verradt harmonischen. Op de horizontale frequentie-as zijn de amplitudes van de afzonderlijke, in het uitgangssignaal

aanwezige tonen zichtbaar. De scoopbeelden tonen het tijdsverloop van de spanning en de vervorming (dikkere middenlijn) (links, met de weergave van een zuivere sinus). Rechts dezelfde toon, maar nu sterk vervormd tengevolge van clipping.

Het vergeten zusje van het frequentieverloop: het faseverloop

Zoals elders werd aangetoond, is menige elektronische schakeling frequentie-afhankelijk. De reactans relaties van spoelen en condensatoren onder elkaar of in relatie tot de in de schakeling opgenomen weerstanden bepalen het frequentieverloop van High-, Low- en Bandpass filters.

De frequentie-afhankelijke verzwakking van spanningen, zoals bijvoorbeeld de krachtige verzwakking van de hoge tonen door een ruisfilter, is ook door het oor makkelijk waarneembaar.

Maar een andere werking van het frequentieverloop beïnvloedende schakelingen is het gehoor minder vertrouwd: deze veroorzaakt tijdverschuiving tussen het in- en uitgangssignaal. Het gaat om faseverschuiving.

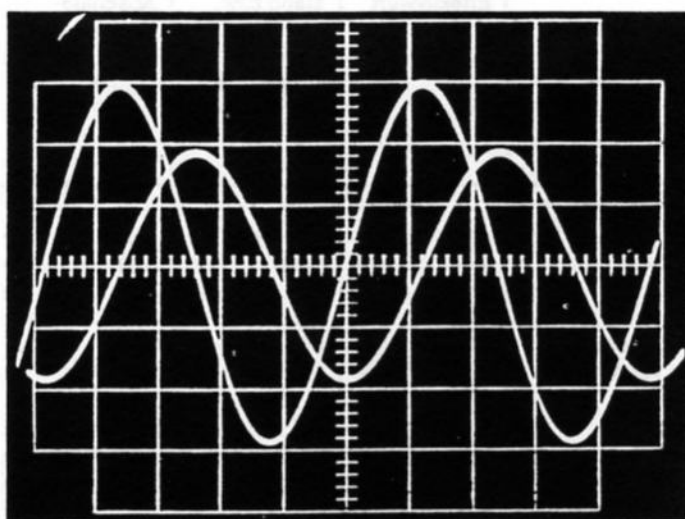


Fig. 44. Faseverschuiving, die bij een Lowpass filter optreedt. Het scoopbeeld geeft de ingangsspanning (grote amplitude), die verzwakt en vertraagd (kleinere amplitude) aan de uitgang verschijnt

Wanneer een wisselspanning op een RC Lowpass stuit, dan laadt en ontlad de condensator zich in het ritme van zijn frequentie over de voorgeschakelde weerstand.

Net zoals het vullen van een gieter met water door een tuinslang tijd vergt, duurt het even totdat de door de weerstand vloeiende stroom de condensator heeft geladen.

Bij lage frequenties gebeurt dit evenwel zonder dat een merkbare faseverschuiving tussen in- en uitgangsspanning is vast te stellen. Wel moet er altijd een klein verschil tussen de ingangsspanning en de spanning van de condensator bestaan. Anders kan helemaal geen spanning door de weerstand vloeien. Het laad/ontlaad proces vaneen condensator verloopt bij lage frequenties snel genoeg, zodat de spanning - die van de opgenomen lading afhangt - de ingangsspanning goed kan volgen.

Hoe hoger de frequentie van de ingangsspanning wordt, des te minder tijd blijft er voor deze cyclus. Omdat de voorgeschakelde weerstand de laadstroom begrenst, kan de condensator niet meer snel genoeg worden geladen: zijn spanning kan nu de ingangsspan-

ning niet langer exact genoeg volgen. In de tijd gezien treedt dus vertraging op.

Niet alleen Lowpass filters, maar alle frequentie-veranderende schakelingen, waaraan spoelen en condensatoren te pas komen, veroorzaken faseverschuivingen. Vandaar, dat ze bijvoorbeeld bij pickup elementen en luidsprekers het grootst zijn.

Tabelle 6/1 Signalquellen						
Signalquelle	Urspannung, Effektivwert	Quellwider- stand bzw. Kapazität oder Induktivität	Soll- Abschluß- widerstand der Signalquelle	Ver- stärker- Nenn- Eing.- Span. i. Betr. Effektiv- wert	von Signal- quelle max. abgebbare Spannung, Effektivwert	Frequenz- Bereich für ± 3 dB höchst- zulässige Abweichung
Mikrofon						
Kohle	100 mV	30 ... 500 Ω	500 Ω	500 mV	25 V	200 ... 4000 Hz
Seignette-Kristall	2 mV	1000 pF	500 k Ω	5 mV	250 mV	100 ... 7000 Hz
Magnetisch	0,5 mV	300 mH	10 k Ω	1 mV	50 mV	100 ... 7000 Hz
Tauchspule	0,15 mV	200 Ω	1 k Ω	0,5 mV	25 mV	30 ... 12000 Hz
Bändchen mit Transformator	0,1 mV	200 Ω	1 k Ω	0,3 mV	15 mV	30 ... 14000 Hz
Kondensator mit Vorstufe	1,5 mV	200 Ω	1 k Ω	5 mV	75 mV	30 ... 16000 Hz
Tonabnehmer						
Dynamisch	1,3 ... 8 mV	2 ... 15 Ω	50 ... 5000 Ω	1 mV	4 ... 25 mV	30 ... 12000 Hz
Magnetisch	10 ... 20 mV	16 Ω ... 3 k Ω	30 ... 100 k Ω	8 mV	30 ... 60 mV	30 ... 12000 Hz
Keramisch	0,4 ... 1 V	0,4 ... 1 nF	1 ... 2 M Ω	250 mV	1,8 ... 2,5 V	30 ... 10000 Hz
Seignette-Kristall	0,8 ... 1,6 V	0,6 ... 1,2 nF	0,5 ... 1 M Ω	500 mV	2,5 ... 3 V	30 ... 10000 Hz
Magnettonköpfe						
Heimgerät	1 ... 2 V	10 ... 30 k Ω	500 k Ω	500 mV	2 V	40 ... 10000 Hz
Studiogerät	1,5 V	< 200 Ω	> 200 Ω	1 V	3 V	30 ... 16000 Hz
Rundfunkempfänger						
Diodenausgang	5 ... 50 mV	beliebig	50 k Ω 250 pF	5 mV	150 mV	30 ... 16000 Hz

Einschlägige Normen:

Kraftverstärker DIN 45560,

Vorverstärker DIN 45565,

Leistungsverstärker DIN 45566.

Fig. 45. Een wat verouderde tabel met kerngegevens van diverse signaalbronnen in relatie tot de versterker