

ELEKTRONISCHE BOUWSTENEN

Weerstanden, coördineren stroom en spanning

In tegenstelling tot akoestische muziekinstrumenten, die tonen met behulp van trillende snaren, luchtzuilen of resonantielichamen opwekken, moet elk HiFi apparaat het van de nodige elektronica hebben: elektronische bouwstenen versterken spanningen en vermogens, beïnvloeden de klank en zetten HF antennespanningen om.

Als meest voorkomende bouwsteen treffen we in elektronische schakelingen de weerstand aan. De fysicus Ohm heeft de wetmatigheid tussen spanning, stroom en weerstand geformuleerd:

$$R = \frac{U}{I}$$

waarbij R de afkorting is van weerstand, U van spanning en I van stroom. De maateenheid van weerstand heet Ohm, afgekort tot Ω . Gezien de relatie tussen stroom, spanning en weerstand, is 1Ω niet anders dan 1 V/A .

Hoewel de elektrotechniek weinig met loodgieterij te maken heeft, liggen vergelijkingen tussen stroom en water voor de hand. Zoals in vloeistoffen, die door nauwe openingen vloeien (= vloe weerstand) een drukvermindering in de sproeier ontstaat, veroorzaakt ook een door een weerstand vloeiende elektrische stroom een verminderde spanning tussen beide aansluitpunten.

Wie in een schakeling weerstanden toepast, moet niet alleen op de grootte van die weerstand letten, maar ook op andere eigenschappen van deze bouwsteen.

In de eerste plaats op de elektrische belastbaarheid. Waar spanning en stroom aanwezig zijn, wordt ook energie opgewekt. Deze is te berekenen volgens de formule

$$P = U \cdot I$$

of (met inachtnahme van de wet van Ohm)

$$P = I^2 \cdot R \text{ of } P = \frac{U^2}{R}$$

waarbij P als afkorting voor vermogen staat, aangeduid in de eenheid Watt (W). We weerstand verbruikt meer energie naarmate er meer stroom vloeit en de spanning hoger is. Een verdubbeling van de stroom wekt een viervoudig vermogen op, net als een verdubbeling van de spanning.

De "gebruikte" energie gaat niet in lucht op, maar wordt door de weerstand in warmte omgezet. Opdat het niet tot oververhitting komt, moet die warmte snel aan de omgeving worden afgegeven. Hoe groter het oppervlak van de weerstand, des te beter lukt dat. Vandaar dat geldt: de elektrische belastbaarheid van een weerstand hangt direct af van zijn afmetingen.

Wanneer de schakeling zware eisen aan de ruisvrijheid stelt - zoals dat met name bij MC element voorversterkers het geval is -

dan moet de ontwerper zorgen, dat hij zo ruisvrij mogelijke weerstanden kiest.

Extreem sterk vergroot ziet het weerstandsmateriaal eruit als een driedimensionaal raster (alle elektrisch geleidende materialen bezitten deze kristal raster structuur) met atomen of moleculen aan de hoeken. De in de weerstand vloeiende elektrische stroom bestaat uit zeer veel elementaire deeltjes van de elektronensoort, die hun weg door dat raster zoeken. In de zo ontstane drukte botsen veel elektronen tegen de rastermoleculen of tegen elkaar. Dat veroorzaakt heel geringe onregelmatigheden in de stroomvloed: zo ontstaat ruis.

Een extra belemmering is, dat de rastermoleculen trillen en daardoor meer ruimte nodig hebben dan wanneer ze op hun plaats zouden blijven. Hoe hoger de temperatuur stijgt, des te heviger trillen ze. Dit effect versterkt de ruis aanzienlijk en maakt tevens, dat de weerstandwaarde bij veel metalen met toenemende temperatuur oploopt.

Veel materialen, bijvoorbeeld halfgeleiders en transistoren, maken bij stijgende temperatuur extra elektronen vrij, die meedoen aan de stroomvloed. Daardoor daalt de weerstand bij toenemende temperatuur.

Al naar gelang wat domineert - de vermindering van de stroomvloed door moleculaire trillingen of het grotere aantal elektronen - heeft het betreffende materiaal een positieve (de weerstand neemt met de temperatuur toe) of een negatieve temperatuur coëfficiënt. De ruisspanning wordt altijd groter bij toenemende temperatuur.

Bij HiFi schakelingen speelt de temperatuurcoëfficiënt van gangbare weerstanden nauwelijks een rol. De afwijkingen van de ingebouwde weerstanden van de nominale waarde (tolerantie) zijn meestal groter dan de door de temperatuur bepaalde verandering.

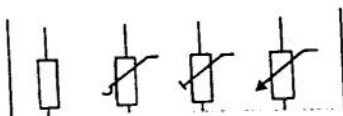
De bouwwijze van weerstanden varieert met hun gebruiksdoel. Voor vermogens boven de 20W gebruikte exemplaren bezitten vaak een aluminium behuizing met koelribben. Bij een wat geringere belastbaarheid (1-10W) is de weerstand vaak in cement gegoten. Beide types bestaan inwendig uit een draadwikkeling. We spreken van draadgewonden weerstanden. Ze dienen als belastingsweerstand om het niveau van wisselfilters in luidsprekers in te stellen; in versterker eindtrappen helpen ze om de ruststroom van de eindtransistoren in te stellen en constant te houden.

Gelaagde weerstanden zijn geringer belastbaar (0,1-3W). Ze bestaan uit een porseleinen lichaam, waarop een dunne metaal- of koolstoflaag is aangebracht. Daar over heen zit ter isolatie een laklaag. Door het afslijpen of afbranden (met laserlicht) van delen van de weerstandslaag probeert men heel nauwe toleranties te bereiken. Vanwege hun betrouwbaarheid, hun hogere belastbaarheid en bovenal vanwege de geringere ruis worden in de betere HiFi componenten bij voorkeur van deze - weliswaar duurdere - weerstanden toegepast.

Regelbare weerstanden (potentiometers) bestaan uit een weerstandsbaan met aansluitingen aan beide uiteinden. Over deze baan beweegt zich een sleepcontact, dat eveneens een soldeerverbinding heeft. Meestal is dat sleepcontact op een draaias bevestigd en loopt de weerstand cirkelvormig om die as. Als trim potentiometers maken deze onderdelen een nauwkeurige instelling binnen een schakelir

mogelijk.

Volume-, balans- en toonregeling van een versterker zijn niets anders dan potentiometers. Er worden zware eisen gesteld aan deze onderdelen omdat ze zo veel in gebruik zijn. De as is doorgaans van metaal en de weerstand is in metaal of kunststof ingekapseld om hem tegen stof en vuil te beschermen.



Symbolen voor weerstanden. a) eenvoudige weerstand, b) stapsgewijs regelbare weerstand, c) trimpotentiometer en d) potentiometer.

Om gelijktijdig beide kanalen van een stereo apparaat te kunnen bedienen, worden meerdere potentiometers achter elkaar op één as geplaatst. Om te zorgen, dat steeds voor beide kanalen de zelfde weerstandswaarde geldt, moet het verloop van beide weerstanden zo identiek mogelijk zijn om een zo goed mogelijke gelijkheid tussen de kanalen te garanderen.

In lineaire uitvoering dienen potentiometers als balans- en toonregeling. De weerstand neemt hier over de hele lengte van de baan lineair toe. Bij logaritmische potentiometers - gebruikelijk voor de volumeregeling - neemt de weerstand bovenproportioneel toe. Dat komt overeen met de werking van het menselijk oor, dat geluidsdrukverschillen logaritmisch in luidsterkteverschillen omzet: vertienvoudiging van de geluidsdruk komt slechts neer op de verdubbeling van de luidheid.

Ter herinnering

Een paar maat- en rekeneenheden, die in de elektronicawereld een grote rol spelen, verdienen nog even te worden herhaald:

femto (f)	= 10^{-15}
pico (p)	= 10^{-12}
nano (n)	= 10^{-9}
micro (μ)	= 10^{-6}
milli (m)	= 10^{-3}
centi (c)	= 10^{-2}
deci (d)	= 10^{-1}
deca (D)	= 10^1
hecto (h)	= 10^2
kilo (k)	= 10^3
mega (M)	= 10^6
giga (G)	= 10^9
tera (T)	= 10^{12}

Condensatoren: de voorraadkamers van de elektronica

Condensatoren komen - als we bij de analogie met de waterleiding blijven - overeen met emmers: emmers vol elektronen, een opslagplaats voor elektrische lading.

In zijn eenvoudigste vorm bestaat een condensator uit twee elektrisch geleidende vlakken, die door een isolator zijn gescheiden. Dit diëlectricum tussen de elektroden kan lucht, kunststof of keramiek zijn. Tengevolge van de isolatie kan bij aansluiting op

een gelijkspannings voedingsbron geen stroom door de condensator vloeien. Niettemin wordt de aan de minpool aangesloten elektrode (kathode) zich dankzij de door de batterij of accu geleverde elektronen negatief op. Aan de andere elektrode, de anode, onttrekt de accu een zelfde aantal elektronen, waardoor de anode een positieve lading krijgt.

De lading van de condensator blijft ook behouden als de accu wordt ontkoppeld. De accu werkt nu op zijn beurt als gelijkspannings bron. Een tussen anode en kathode aangesloten weerstand maakt de ontlading mogelijk.

De hoeveelheid ladingsdragers, die een condensator kan opslaan, hangt regelrecht af van het oppervlak van zijn elektrodes. Hoe groter dat is, des te groter is zijn capaciteit. Als maateenheid voor de capaciteit van een condensator dient de naar de Engelse natuurkundige Michael Faraday genoemde Farad.

1 Farad is het vermogen van een condensator om per Volt toegevoerde spanning 1 Coulomb lading op te nemen, dat zijn circa 6 trillioen (6^{18}) elektronen. Wanneer deze 16 trillioen elektronen binnen 1 seconde op een bepaalde plek van de stroomkring vloeien, dan bedraagt de stroomsterkte precies 1 Ampère. In formulevorm komt de eenheid Farad dus zo te stand:

$$1F = 1 \frac{A.s}{V}$$

Wanneer de condensator een luchtballon zou zijn, dan zou de analoge definitie van de capaciteit als volgt luiden: de normballon (1 Farad) bevat bij 1 Atm druk de hoeveelheid lucht, die in 1 seconde door een opening stroomt.

Wanneer een gelijkspanning op de condensator staat, dan stopt de elektronenstroom na het oplaadproces. Bij wisselspanning is dat anders; deze laadt en ontladt de condensator door zijn voortdurende wisseling van polariteit in het ritme van zijn frequentie.

Een voortdurende omkering van de lading van de condensator - dat is niets anders dan het vloeien van een wisselstroom. In tegenstelling tot bij gelijkstroom, waar de elektronen steeds in dezelfde richting bewegen, slingeren ze bij wisselstroom slechts heen en weer om een fictief rustpunt. Een condensator in de stroomkring staat dat toe. Hoe hoger de frequentie van de toegevoerde wisselspanning en hoe hoger de capaciteit, des te beter kan die wisselstroom vloeien.

Net als bij de weerstand kan ook voor een condensator de relatie tussen (wissel)stroom en spanning worden aangegeven. Zuiver rekenkundig is dus van een weerstand sprake. Bij deze weerstand, die frequentie-afhankelijk is, spreekt men echter van een blinde weerstand, van reactantie:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f.C}$$

waarin π de constante 3,14, f de frequentie en C de capaciteit is. Wanneer men het geheel beziet, geldt:

$$X_c = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{1}{A \cdot s}} = \frac{1}{\frac{1}{A \cdot s^2}} = \frac{A \cdot s^2}{1}$$

waaruit inderdaad de maateenheid van weerstand volgt.

Behalve de capaciteitswaarde, één der belangrijkste elektrische grootheden van de condensator - zijn er nog een paar andere voor HiFi doeleinden wezenlijke kenmerken voor deze bouwsteen.

De doorslagspanning van een condensator moet zo groot zijn, dat hij onder alle belastingsproeven niet tengevolge van overbelasting de geest geeft. Het vermogen om heel hoge spanningen te weerstaan wordt in eerste instantie door het diëlectricum bepaald.

Hoe dikker de isolatielaag tussen de elektrodes is, des te hogere spanning verdraagt de condensator. Ook het gebruikte materiaal speelt een grote rol. Kunststoffen, glimmer en speciale papier-soorten komen in aanmerking.

In filterschakelingen van tuners is alles schadelijk wat tot capaciteitsverandering leidt (bijvoorbeeld temperatuurfluctuaties of veroudering), want daardoor worden de afstemkringen verstemd. Op hun beurt hebben de selectiviteit, de gevoeligheid, de vervorming en dus de klank daaronder te leiden.

Belangrijk zijn een lage temperatuurcoëfficiënt van de capaciteitswaarde, een grote stabiliteit op lange termijn en een geringe vochtgevoeligheid. Het beste voldoen condensatoren met een kunststof diëlectricum - styroflex - deze voorwaarden. Ook veel keramische condensatoren zijn bijzonder geschikt.

De isolatiegraad van het diëlectricum kan weliswaar heel groot zijn, 100 goed is hij nooit. Elke condensator heeft daarom behalve de capaciteit nog een bepaalde doorlaat weerstand: de isolatieweerstand van het diëlectricum. Omdat deze net als elke andere weerstand de stroom, die door hem heen vloeit in warmte omzet, draagt deze de aanduiding verliesweerstand.

De relatie tussen verliesweerstand en reactantie heet verliesfactor. Uit deze twee kan de schijnweerstand, de impedantie worden berekend. Koppelcondensatoren moeten heel lage verliesfactoren hebben. Bij extreem hoge waarden gaat het klankbeeld vervlakken en treden hoorbare vervormingen op.



Symbolen voor condensatoren. a) vaste condensator, b) elco met poolaanduiding, c) trimmer en d) draaicondensator.

Door de veelheid aan bouwvormen staat voor elke toepassing het juiste condensatortype ter beschikking. Een bijzonder grote capaciteit binnen weinig ruimte bezitten elektrolytische condensatoren.

toren. De anode wordt hier gevormd door een aluminiumfolie, de kathode door een elektrisch geleidende vloeistof (elektrolyt). Al diëlectricum fungeert een oxydelaag op de anode.

Spanning mag slechts aan één pool van de elco worden gezet. Bij verkeerd polen vernietigt de spanning de oxydelaag. Dan vloeit een gelijkstroom, die de elektrolyt chemisch afbreekt en de condensator is kapot. In extreme gevallen kan zich daarbij gas ontwikkelen, dat tot ontploffing raakt.

Vanwege de grote capaciteit zorgen elco's in de netvoeding voor een krachtige en voortdurende stroomvoorziening. Vroeger werden in versterkers ook koppelcondensatoren tussen de uitgang en de luidsprekerklemmen toegepast. Ze dienden om de bij de toenmalige stroomvoorziening mogelijk optredende gelijkspanning aan de versterkeruitgang te blokkeren en de luidsprekers daarvoor te behoeden.

Heel geschikt voor filterschakelingen, toonregelingen en pick up correctie schakelingen zijn kunststof condensatoren. Kenmerkend voor deze soort zijn geringe verliezen en een geringe temperatuurafhankelijkheid van de capaciteit.

Kunststof condensatoren bevatten twee metaalfolies met daartussen een kunststoffolie als diëlectricum. Opgerold en voorzien van axiale draadaansluitingen komen deze condensatoren al naar gelang van de gebruikte kunststofsoort als MKS-, MKC-, MKH- of styroflex condensatoren in de handel. MKL condensatoren bestaan uit hetzelfde materiaal, maar zijn in sandwich vorm gebouwd.

Keramische condensatoren bestaan uit een met metaal bedekt keramisch plaatje of -buisje. Het keramiek speelt hier dezelfde rol als het diëlectricum. Dit type is heel geschikt voor hoogfrequente toepassingen en het blokkeren van hoogfrequente storingen in leidingen, die voor de toevoer van spanning dienen.

In oudere, analoge tuners vormde de draaicondensator een fraai onderdeel. Ze veranderen in de afstemkring de resonantiefrequentie van de bewuste kring. Met de rotor worden de draaibare platen min of meer tussen de tussenruimtes tussen de vaststaande platen bewogen. Daardoor verandert de capaciteit; lucht dient hier als diëlectricum.

Ook trimmers zijn uitgevoerd als miniatuur draaicondensator. Ze dienen om filters precies af te stemmen en ze zorgen in een tuner voor een rechte frequentiekarakteristiek. Met een kleine schroevendraaier kan de capaciteit worden ingesteld.

Lading, spanning, stroom

Zelfs de sterkste elektronenmicroscoop kan het binnenleven van een atoom niet onthullen. Maar gelukkig zijn er modellen, die natuurkundige en chemische processen verklaren. Eén daarvan - door Nils Bohr ontworpen - stelt de opbouw van het atoom voor als een mini zonnestelsel.

Elektrisch negatief geladen elektronen cirkelen rond een positieve kern. De elektrostatische aantrekkingskracht tussen de kern en de elektronen houdt de middelpuntvliedende kracht in balans en zorgt, dat ze uit de cirkelvormige baan vliegen. Deze kracht is in wezen dezelfde, die stofdeeltjes naar het oppervlak van een teveel gepoetste LP trekt en daarop vasthoudt.

Wanneer atomen tot grotere structuren worden aaneengesmeed - kristalrasters, moleculen en molecuulketens - dan komen bij kristalrasters van metalen n bij veel andere verbindingen elektronen vrij, die zich binnen die moleculaire structuur vrij kunnen bewegen.

De betreffende stoffen zijn elektrisch geleidend. Metalen bevatten opvallend veel vrije elektronen. Normaal gesproken zijn die elektronen als een elektronenwolk gelijkmatig verdeeld binnen dat metaal.

Door elektrische en magnetische velden kunnen de elektroden worden bewogen. Wanneer bijvoorbeeld een metaaldraad loodrecht op zijn lengte-as door een magneetveld wordt bewogen, dan treedt dit effect op. Aan de ene kant verzamelen zich elektronen en de draad wordt daar negatief geladen; aan de andere kant mankeren deze elektronen en wordt de polariteit positief. Tussen de draadeinden kan een elektrische spanning worden gemeten. De generator, die de stroom voor het stopcontact thuis levert, berust op dit principe.

Maar pas een geleidende verbinding van de positieve en negatieve klem van de generator of dynamo maakt zo'n stroom mogelijk. Daarbij treden aan de negatieve aansluiting elektronen uit, die door de leiding naar de positieve aansluiting vloeien. De negatieve ladingsdragers bewegen zich dus van de min- naar de pluspool. Deze bewegingsrichting heet de stroomrichting.

Vroeger nam men aan, dat de stroom per definitie van plus naar min vloeiende en hoewel dit dus eigenlijk fout is, hield men algemeen aan deze gedachte vast.

Spoelen: magnetische alleskunnners

Elke geleider waar stroom door vloeit is omgeven door een magnetisch veld, dat door die stroom wordt opgewekt. Het effect van dit elektromagnetische veld is echter bij normale kabels, die elektrische stroom van het stopcontact naar een audiocomponent brengen heel zwak. Alleen meettechnisch is het aantoonbaar.

Zolang bijvoorbeeld de verbindingskabels tussen versterker en luidsprekers niet te lang zijn, telt alleen hun ohmse weerstand. Invloeden door het magnetisch veld, dat die kabels omringt, merkt het geschoolde oor niet, zeker niet zolang de kabels niet langer dan vijf meter zijn.

Heel anders wordt het gedrag wanneer de leiding niet langer min of meer rechtlijnig verloopt, maar in spoelvorm is opgewikkeld. Ook nu ontstaat een magnetisch veld zodra er stroom door die leiding vloeit. Maar de magneetveldjes van de naburige individuele wikkelingen worden opgeteld en concentreren zich tot een wezenlijk veel krachtiger veld. In de elektro- en dus ook in de audioteknik wordt dankbaar gebruik gemaakt van de diverse werkingen van zulke magneetvelden.

Een permanente magneet oefent letterlijk aantrekkingskracht uit op stalen voorwerpen. Bij een spoel is dat niet anders. De kracht, die een spoel op stalen voorwerpen kan uitoefenen, hangt af van het aantal windingen en de stroomsterkte. Hoe groter het aantal windingen per lengte-eenheid (bijvoorbeeld 20 windingen per cm) en hoe sterker de stroom, des te krachtiger is het magnetisch veld.

Relais - de vermogensschakelaar in de elektrotechniek - maken

gebruik van dit principe. Hun taak bestaat erin, om door een kleine stroomstroom beïnvloed via contacten aanzienlijk grote stromen in- en uit te schakelen.



Symbolen voor spoelen. a) algemeen, b) spoel met ijzerkern, c) transformator en d) relais met contact.

In het binnenwerk van een relais bevindt zich een spoel met zeer veel windingen. Zodra daar een stroom van voldoende sterkte door vloeit, trekt hij een verend gelagerd weekijzeren plaatje - het anker - aan. Het anker beweegt richting spoel en bedient via een hefboomsysteem contactpunten, die zo elektrisch worden verbonden waarna de stroom kan vloeien. Zodra de door de spoel vloeiende stroom wordt onderbroken, verdwijnt ook het magnetisch veld. Een veertje trekt het anker terug naar zijn uitgangspositie en het contact wordt verbroken.

Vaak wordt een relais gebruikt om de verbinding tussen de versterkeruitgang en de luidsprekers te regelen. Op deze manier kan ook een beveiligings schakeling in de versterker de luidsprekers uitschakelen bij dreigend gevaar - op afstand bediend door een relais. Bijvoorbeeld bij het optreden van kortsluiting of gevaar voor gelijkspanning of clipping. Of gewoon als de versterker te warm wordt.

De spreekspoel is een bijzondere spoelvorm, die nader aan de orde komt bij het hoofdstuk over luidsprekers.

Andere toepassingen van spoelen in de audiowereld komen we uiteraard tegen bij elektromotoren in platenspelers en recorders, maar ook in draaispoelmeters zoals de oude VU meters van cassettedecks en signaalsterktemeters van tuners.

De omkering van het elektromotorische principe kennen we natuurlijk ook bij elektro-magnetische- en elektrodynamische pickup elementen en bij dynamische microfoons.

Transformatoren: universele spanningsomzetzters

De spanning opwekkende werking van het generatorprincipe berust slechts indirect op het bewegen van een spoel in een magnetisch veld. De eigenlijke oorzaak voor het ontstaan van spanning is het feit, dat tengevolge van de beweging het op de spoel inwerkende magnetisch veld verandert. een dergelijke verandering doet zich ook voor, wanneer inplaats van een permanente magneet een spoel wordt gebruikt.

Wanneer door deze spoel wisselstroom vloeit, dan verandert zijn magnetisch veld periodiek met de frequentie van die stroom. Aan de uiteinden van een tweede spoel, die zich in hetzelfde magnetische veld bevindt, ontstaat ook een spanning tengevolge van inductie. Opdat zo mogelijk het hele veld van de primaire spoel (of wikkeling) ook de secundaire spoel bereikt, leidt een "kern" de veldlijnen daarheen.

Zo'n kern bestaat uit magnetiseerbaar - ferromagnetisch - materiaal. Meestal uit weekijzer, dat een ring vormt. Daarop zijn de primaire en de secundaire spoelwikkeling aangebracht. Ook hier bestaan materialen, die het magnetische veld goed geleiden en andere die het blokkeren. Lucht is een slecht transportmiddel hier.

De afgegeven spanning hangt af van de verhouding tussen het aantal primaire en secundaire wikkelingen.

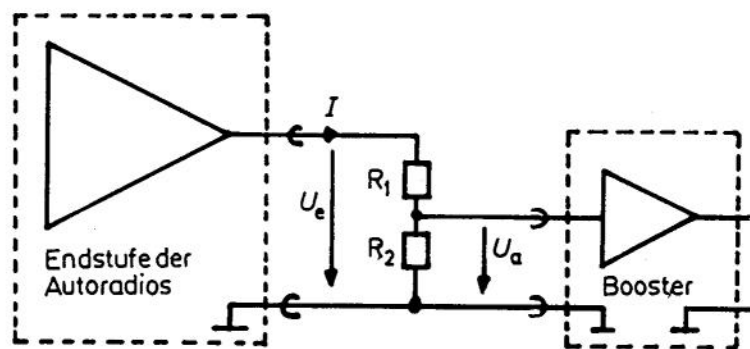
Transformatoren treffen we in de audiowereld vooral aan in de netvoedingen van versterkers, CD spelers, tuners, recorders e.d. en in sommige voor-versterkers, die een ingang voor een MC pickup element hebben.

Bij buizenversterkers worden de luidsprekeruitgangen vrijwel altijd aangeboden als aftakkingen van 4, 8 of 16Ω op een uitgangstransformator. Ook deze oefent enige invloed uit op de klank; de wikkelcapaciteit laat de hoogste tonen wat weker klinken.

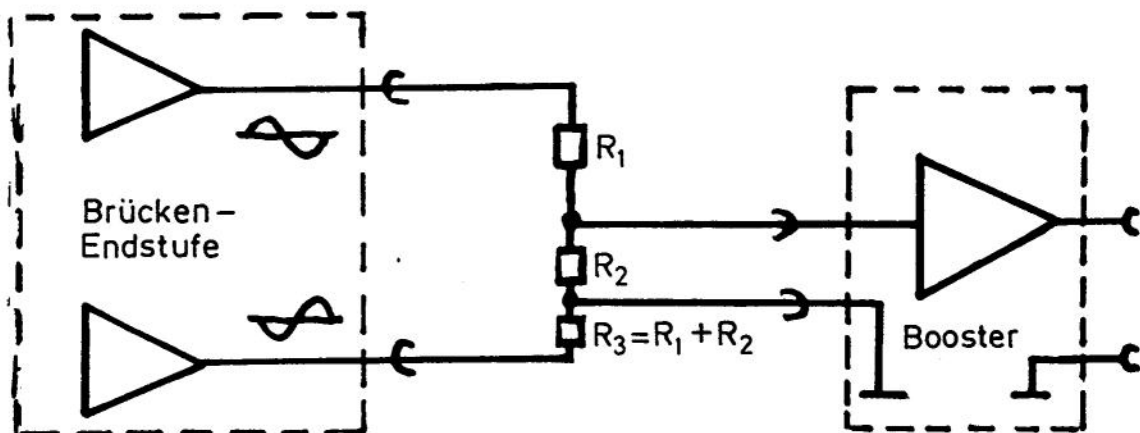
Niveau aanpassing met de spanningsdeler

Elektrische niveauverschillen kunnen o.a. worden overbrugd met een uit twee weerstanden bestaande spanningsdeler. De aanwezige ruisspanning wordt gelukkig mee verzwakt, zodat de heersende S/R waarde niet wordt aangetast.

Om eens een heel ander voorbeeld te kiezen: de tussen de uitgang van een autoradio en de ingang van zijn booster geschakelde spanningsdeler ziet er als volgt uit:



Een goedkope oplossing om niveauverschillen te overbruggen

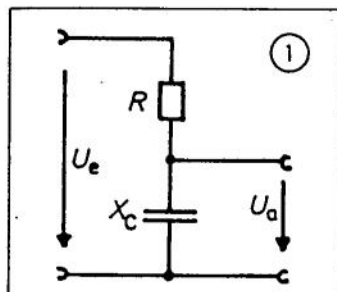


Een mooiere oplossing met een symmetrische spanningsdeler

High- en Low Pass filters

Weerstanden kunnen spanningen verzwakken en delen, stromen regelen en elektrische energie in warmte omzetten. In tegenstelling tot spoelen en condensatoren is hun werking frequentie-onafhankelijk. Daarom bezitten schakelingen, waarin uitsluitend weerstanden voorkomen steeds een lineair frequentieverloop.

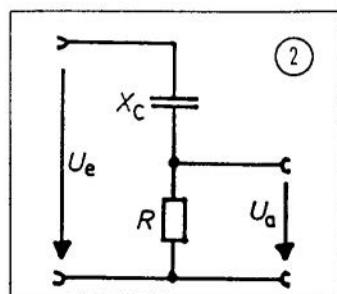
Om bepaalde frequentiegebieden te bekrachtigen of te verzwakken worden weerstanden gecombineerd met spoelen en condensatoren. Een schakeling, die lage frequenties doorlaat en hoge onderdrukt - een Low Pass filter - ziet er als volgt uit:



Low Pass filter

De weerstand R en de reactantie X_c van de condensator vormen een spanningsdeler met een frequentie-afhankelijke deilverhouding. Voor gelijkspanning en lage frequenties bezit de condensator een zeer hoge reactantie. De deilverhouding van de uit R en X_c gevormde spanningsdeler is daarom bij benadering gelijk aan 1. Dat wil zeggen, dat de uitgangsspanning U_a gelijk is aan de ingangsspanning U_e . Voor zeer hoge frequenties betekent de condensator vrijwel kortsluiting. De deilverhouding neemt heel lage waarden aan. Daarom spert de schakeling hoge frequentie-aandelen uit het ingangssignaal.

Het omgekeerde is het geval bij het High Pass filter. Voor zeer hoge frequenties heeft de condensator een geringe reactantie X_c en laat hij het ingangssignaal ongehinderd door. Naar de lage frequenties toe neemt de reactantie toe en gaat de schakeling blokkeren.



High Pass filter

High Pass filters kunnen we o.a. aantreffen in de pickup voorversterker als Subsonic Filter en Rumble Filter. Zij voorkomen, dat heel laagfrequente storingen, zoals de rumble van een platenspele of de resonantiefrequentie van de p.u. arm/element combinatie doc

de luidsprekers worden weergegeven.

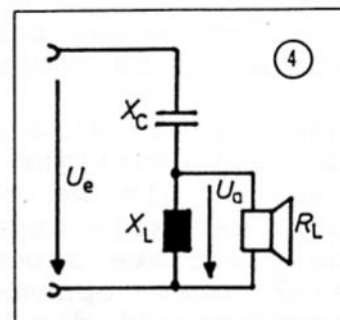
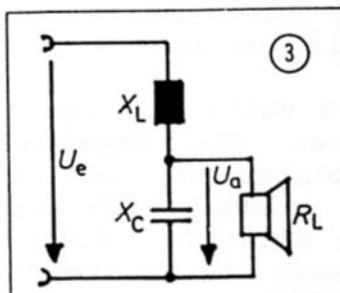
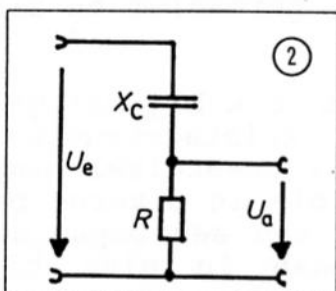
Een Low Pass filter aan de ingang van de versterker kan voorkomen, dat resten hoogfrequent signaal van krachtige MG zenders hun nadelige invloed uitoefenen binnen het audiobereik.

De laagste frequentie, die een High Pass zonder een te groot niveauverlies nog kan weergeven, heet de onderste grensfrequentie f_u . De hoogste frequentie, die een Low Pass doorlaat, heet f_o .

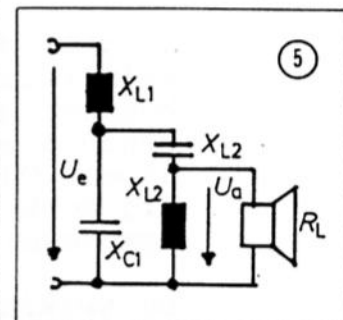
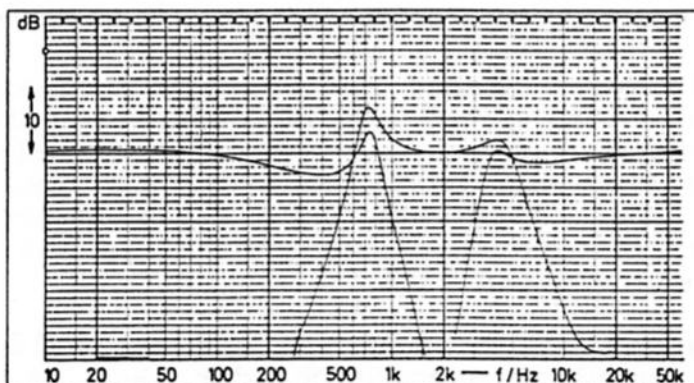
Beide waarden kunnen a.v. worden berekend:

$$\text{Voor Low Pass geldt } f_o = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}, \text{ voor High Pass } f_u = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Bij de bewuste grensfrequentie bedraagt de verzwakking ten opzichte van het doorgelaten frequentiegebied 3dB ofwel een factor 0,7. Dat wordt aangeduid met de term -3dB achter de waarde van de grens- of overgangsfrequentie.



Nog een paar filters: 2) een High Pass tegen rumble, 3) een Low Pass wisselfilter uit een luidspreker, 4) het High Pass filter dat de tweeter van een luidspreker beschermt tegen lage tonen en 5) een High- en Low Pass filter in serie voor de middentoonspeaker.



De werking van een wisselfilter in een drieweg luidspreker laat de lineariteit van het frequentieverloop niet ongeschonden.

Het wisselfilter van een luidspreker

Wisselfilters van luidsprekers werken met een combinatie van spoelen en condensatoren. De reactantie X_L van de spoel vertoont tegenover de reactantie van de condensator X_C een tegengesteld gedrag. Hij wordt met toenemende frequentie groter. Samen met de condensator verhindert de spoel, dat hogere frequenties uit het audiosignaal de woofer bereiken.

Boven de grensfrequentie spert de spoel en de condensator "sluitkort". In het doorlaatbereik onder f_0 laat de spoel de spanning naar de woofer door en de condensator stoort met zijn oplopende reactantie niet.

Net omgekeerd werkt de omgekeerd geconstrueerde voorziening voor de hoge tonen.

Van de middentoonluidspreker (squawker) moeten zowel de lage als de hoge signaalfrequenties op afstand worden gehouden. Daarvoor zorgen een Low Pass (X_{L1}/X_{C1}) en een High Pass (X_{L2}/X_{C2}).

De grensfrequentie f_0 van de Low Pass ligt hierbij hoger dan de weergavegrens f_u van de High Pass. Zo kan de tussen f_u en f_0 liggende frequentieband ongehinderd aan de squawker worden doorgegeven. Alle andere aandelen worden geblokkeerd.

Activisten in de elektronica: diodes en transistoren

Behalve de metalen, die de elektrische stroom zeer goed geleiden en de bijna geen stroom doorlatende isolatoren kent men in de elektrotechniek nog een derde groep stoffen: de halfgeleiders. Tot deze groep behoren onder meer selenium, germanium en silicium. Momenteel is vooral silicium in zwang.

Net als bij alle andere vaste stoffen hebben ook bij halfgeleiders de afzonderlijke atomen een regelmatige kristalstructuur, een raster. Als we terugdenken aan het mini zonnestelsel model van Bohr met zijn negatief geladen elektronen, die in diverse banen om de positieve atoomkern cirkelen. Elke baan kan een bepaald aantal elektronen opnemen, maar de buitenste baan is niet bij alle stoffen volledig bezet.

Halfgeleider atomen bezitten in de buitenste baan vier elektronen. Omdat die baan echter plaats biedt aan acht, gebruiken de gulzige atomen een trucje; ze gaan in teamverband werken en klonteren zodanig samen, dat elk atoom drie andere als aangrenzende buurman heeft. De structuur van dergelijke atoomkwartetten herinnert aan een container vol tetraedervormige melkkartons.

Volgens dit model draagt elk deelnemend atoom twee elektronen uit zijn buitenste ring bij aan de onderlinge binding. Deze voor elk kwartet gemeenschappelijke elektronen cirkelen nu in een voortdurende wisseling van banen nu eens het ene, dan weer het andere atoom. Op deze manier bezit zo'n atoom op het ene moment kortstondig acht elektronen in de buitenbaan, op het andere - zagezegd als compensatie - slechts twee.

De werking van het binnenleven van een halfgeleider is in werkelijkheid natuurlijk gecompliceerder. Het is zelfs zo, dat niemand nog het naadje van de kous weet. Maar aan de hand van dit model is het wel mogelijk om de elektrische geleiding van halfgeleiders te verduidelijken.

Zolang zich de aan de binding deelnemende elektronen niet te ver van het atoomkwartet verwijderen, staan geen vrije ladingsdragers - die tenslotte de voorwaarde voor de elektrische geleiding zijn - ter beschikking. Onder inwerking van energie in de vorm van licht of warmte bevrijden zich afzonderlijke elektronen uit hun baan en staan klaar voor stroomtransport.

Op de plaatsen, waar ze oorspronkelijk waren gebonden, domineert nu de positieve lading van de daar aanwezige atoomkern. Deze plaatsten in het kristalraster worden gaten genoemd. In halfgeleiders nemen behalve de elektronen ook de gaten deel aan de stroomvloed.

Het hele proces is te vergelijken met het Halmaspel: wie een stuk van zijn plaats neemt, laat een gat achter. Maar hij vult een plaats vooraan. Het volgende stuk neemt bij de volgende zet de plaats van zijn voorganger in en laat zo verder naar achter weer een gat open. Bij vluchtige beschouwing lijkt het gat zich tegen de beweegrichting van de stukken in te bewegen.

Op dezelfde manier bewegen de elektronen overeenkomstig de modelvoorstelling onder invloed van het door een spanningsbron opgewekte elektronische veld zich van gat naar gat springend in de richting van de pluspool en lijken de gaten zich in tegengestelde richting te bewegen.

De vakterm voor het ontstaan van elektronen-gat paren luidt genereren (van lat. generi = ontstaan). Net zoals bij het Halmaspel het volgende stuk het gat, dat was opengefallen door zijn voorganger sluit, zo gebeurt het in de halfgeleider, dat een vrij elektron onderweg door een gat wordt aangetrokken en zich daarin nestelt. Dit verschijnsel wordt recombinatie genoemd (lat. recombinare = herenigen).

Generatie en recombinatie gebeuren puur toevallig op alle punten van het kristalraster. Hoe meer energie van buitenaf in de vorm van warmte of licht op het materiaal inwerkt, des te veelvuldiger speelt dit proces zich af. Omdat hierdoor het aantal voorhanden vrije ladingsdragers toeneemt, wordt als gevolg hiervan het elektrisch geleidend vermogen groter. Men spreekt van zelfgeleiding, omdat hij zonder medewerking van andere stoffen tot stand komt. Maar hij is bij halfgeleidermateriaal wel een factor honderd tot duizend geringer dan bij metalen.

Halfgeleiders kunnen op grond van hun in vergelijking met metalen relatief hoge weerstand weliswaar niet als stroomgeleiders worden gebruikt, dankzij hun vermogen om te genereren en recombineren kunnen ze wel worden toegepast als elektronische bouwstenen met bijzondere eigenschappen.

Gerichte vervuiling schept ladingsdragers: doteren

Het als basismateriaal doorgaans gebruikte zo zuiver mogelijke silicium wordt met een geringe hoeveelheid vreemde atomen - atomen van een ander element - verontreinigd. Dat heet doteren. Ook bij magneetbanden wordt dit wel gedaan, bijvoorbeeld met kobalt.

De vreemde atomen, waarmee de halfgeleider wordt gedoteerd, bezitten echter niet vier, doch drie of vijf atomen in de buiten-schil. Arsenicum, dat vaak als doteermateriaal wordt gebruikt, bezit er vijf. Bij de inbouw in het kristalraster worden er daarvan slechts vier gebruikt. Het vijfde elektron heeft geen eigen, vaste plaats in het halfgeleiderkristal. Het kan zich onder invloed van een van buiten af aangelegde spanning bewegen en zo tot de stroomvloed bijdragen. Vanwege de negatieve lading van de door het arsenicum meegebrachte elektronen, spreekt men van een N-dotering.

Bij het doteren met indium ontstaan daarentegen extra gaten. Dit element bezit slechts drie elektronen in de buitenste schil, zodat het na inbouw in het kristalraster een vreemd elektron, dat nu elders ontbreekt, opneemt. Vanwege de in de buurt van zo'n gat heersende positieve lading, hebben we het over P-dotering.

Door P-dotering van de ene helft van het halfgeleiderkristal en N-dotering in de andere ontstaat in het midden een overgangszone, waar de verschillende doteringen elkaar raken.

Uit het direct aan de overgang grenzende gebied van de N-zone dringen al zonder dat er van buitenaf een spanning inwerkt vrije elektronen in het P gebied binnen; ze bezetten de daar aanwezige gaten.

Men kan zich dat ongeveer zo voorstellen als wanneer op een Halmabord de opzetters een deel van het veld van de tegenstander dicht bezetten. Zoals ook dan de vijandelijke stukken bij gebrek aan open ruimtes niet meer vooruit kunnen oprukken, zo wordt de door de binnengedrongen elektronen opgewekte negatieve lading $\bar{c}$ elektronen van de zich verder van de overgang bevindende P zone door afstoting van de weg daarheen gebarricadeerd. Op dezelfde manier verhindert de bij gebrek aan recombinatiepartners in het N gebied voorhanden positieve overschotlading van de gaten, die positieve lading afstoot, het binnendringen van verdere gaten.

Wanneer men de pluspool van een batterij op de N-gedoteerde kant aansluit en de minpool op de andere, dan vloeit geen stroom: omdat ongelijknamige elektrische ladingen elkaar aantrekken, verhuizen de resterende vrije elektronen uit het N-gebied naar de pluspool van de batterij, de gaten uit het P-gebied naar de minpool. In het midden van het kristal - bij de P/N overgang - wordt daardoor het gebied, waar geen beweeglijke ladingsdragers voorhanden zijn, verbreed. Daardoor kan geen stroom vloeien.

Bij omgekeerd polen van de batterij stoot het elektrisch veld van de pluspool de gaten van de P-zone af, de minpool doet aan de N-kant hetzelfde met de daar aanwezige elektronen. Alle ladingsdragers bewegen zich dus in de richting van de P/N overgang, de sperlaag wordt smaller. Wanneer de aangelegde spanning de waarde van 0,6V overschrijdt, dan dringen elektronen het P-gebied binnen, aangedreven door het door de gelijkspanning opgewekte elektrisch veld. Bovendien gaan nu gaten naar het N-gebied. Recombinatie verschijnselen binnen beide soorten ladingsdragers, zodat er ruimte is voor de opschuivende groep.

De batterij levert volgende elektronen aan het N-gebied en ook zij bewegen zich richting P/N overgang. De in het P-gebied gegenereerde worden meteen afgetrokken. De daar voorhanden gaten gaan opnieuw naar de P/N overgang en de continu beweging van de ladingsdragers is identiek met de vloeiende stroom.

Elektronisch terugslagventiel: de halfgeleider diode

Diodes maken dankbaar gebruik van de eigenschappen van de P/N overgang. Overal daar, waar de stroom slechts in één richting mag vloeien, zorgen diodes daarvoor.

Vrijwel alle elektronische schakelingen werken met behulp van gelijkspanning. Om deze uit het lichtnet te winnen, zet allereers

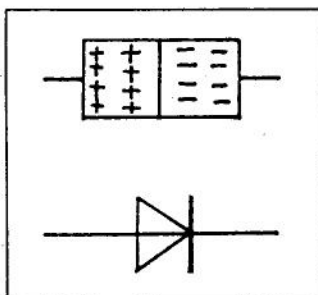
een transformator de netspanning van 230V om in passende secundaire spanning. In de HiFi wereld ligt die meestal tussen de 15 en 50V. De secundaire trafowikkeling is via een diode met de lading elco van de netvoeding verbonden. Om positieve gelijkspanningen op te wekken, is de kathode (de N-zone) verbonden met de elco en de anode (P-zone) met de secundaire trafo wikkeling.

De positieve halve golf laadt over de in dit geval doorlaatbare diode de elco met positieve spanning, terwijl hij de negatieve halve golf blokkeert en zo het omladen van de elco voorkomt.

Bij de volgende positieve halve golfvorm completeert de diode dat deel van de lading, dat inmiddels door de aangesloten schakeling is verbruikt.

Ideaal zou wezen, wanneer de diode in de blokkeerstand de totale stroom zou tegenhouden. Maar tengevolge van minimale onvermijdelijke fabricagefoutjes en tengevolge van de altijd aanwezige eigen geleidings eigenschappen vloeit altijd een geringe sperstroom. Hij blijft bij conventionele diodes in de orde van grootte van slechts een paar miljardste ampère en stoort daardoor in het algemeen niet.

Eénrichting verkeer voor stroom en spanning: de diode



De diode in de vorm van twee symbolen. De bovenste figuur illustreert, hoe men een halfgeleider diode kan beschouwen. De linkerhelft heeft tengevolge van P-dotering een overschot aan positief geladen gaten, in de rechter helft domineren tengevolge van de N-dotering de negatieve elektronen.

Het symbool in de onderste figuur verradt min of meer de functie. Een diode werkt voor de elektrische stroom als het ventiel in een fietsband voor de lucht. Onder spanning gezet, laat hij bij juiste poling stroom in de pijlrichting vloeien. De pluspool van de spanningsbron moet daartoe links zijn aangesloten. Bij omgekeerde poling blokkeert de diode.

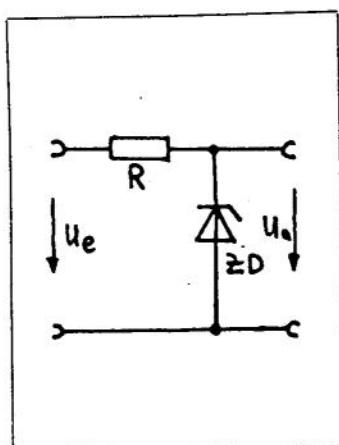
Elektronenlawine stabiliseert spanningen: Z-diodes

Wanneer de in de sperrichting aangelegde spanning toeneemt en een bepaalde grenswaarde overschrijdt (naar het type diode tussen de 70 en 1.000V), dan maken zich volgens afspraak plotseling zeer

veel elektronen los van hun binding, waardoor de sperstroom wordt verhoogd. Onderweg slaan ze bij hun botsingen met de rasteratome nog meer elektronen los, zodat het aantal vrije ladingsdragers als bij een lawine toeneemt. In het vakjargon is daarom ook sprake van een lawinedoorbraak.

Bij niet goed door een bijzondere dotering speciaal voor hun doel geschikt gemaakte diodes veroorzaakt zo'n lawinedoorbraak meestal een snelle dood tengevolge van oververhitting. Dat komt, omdat de aanvankelijk slechts nauw begrensde gebieden in het kristal in stukken breken. Tengevolge van het vermogen, dat daar als produkt van stroom en spanning net als bij een weerstand tot stand komt en in warmte wordt omgezet, ontwikkelt zich op die plekken een grote hitte. Men heeft het dan over "hot spots", tengevolge waarvan het kristal smelt.

Met behulp van een juiste dotering zorgen de fabrikanten voor een gelijkmatige spreiding van het lawine-effect over het hele kristal. Daardoor kunnen geen Hot Spots ontstaan. De diode wordt weliswaar warm tengevolge van de door hem omgezette energie, maar dat gebeurt gelijkmatig overal, zodat ook de warmte-ontwikkeling wordt gespreid. Wanneer de stroom dus niet al te grote waarden aanneemt, blijft dit zonder gevolg voor de levensduur. Dergelijke diodes met een beheerst lawinegedrag heten ter ere van de Engelse wetenschapper Zener Z-diodes. De spanning, waarbij het lawine-effect begint, kan door de mate van dotering fabrieksmatig worden bepaald.



Zo stabiliseert een Z-diode spanning. Zodra U_e groter is dan de doorbraakspanning U_a van de diode, laat deze de stroom I door en wel zoveel, dat de spanning over de weerstand R het verschil tussen U_e en U_a compenseert. Daardoor blijft U_a constant, ook als U_e verandert.

En Z-diode helpt om gelijkspanning te stabiliseren. Tot dat doel schakelen de elektronici een weerstand in serie met zo'n Z-diode. De diode zelf is dusdanig gepoold, dat de bedrijfspanning in de sperrichting wordt toegevoerd. Het geheel werkt als een emmer met een gat in de zijwand. Wanneer de emmer met water wordt gevuld, stijgt het waterpeil totdat het gat wordt bereikt. Het verder toegevoerde water loopt door het gat (als dat groot genoeg is) weg; het waterpeil blijft constant.

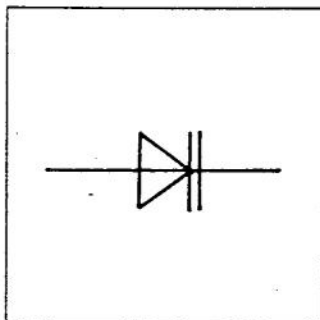
Datzelfde gebeurt met de spanning op de Z-diode. Zodra de ingangsspanning van de stabilisator-schakeling de doorbraakspanning heeft bereikt. De nu vloeiende stroom zorgt, dat de voorweerstand elke verdere verhoging van de ingangsspanning opvangt en neutraliseert.

Afstemhulp voor tuners: varicaps

De door de P/N overgang gescheiden helften van het halfgeleider kristal van een diode kunnen ook als platen van een condensator worden beschouwd. Bij een in de sperrichting aangebrachte spanning laat de overgangszone geen stroom door. Hij funktioneert als diëlectricum tussen de condensatorplaten.

Hoe hoger de sperspanning stijgt, des te breder wordt de overgangszone. Net zoals bij een condensator een vergroting van de platen een verkleining van de capaciteit veroorzaakt, wordt de capaciteit van de diode kleiner tengevolge van een verbreding van de sperzone. Dit effect treedt in mindere of meerdere mate bij alle halfgeleider diodes op.

Elektronici bestempelen de op bijzonder krachtige capaciteitsfluctuaties gerichte diodes kortweg als varicaps. Als symbool wordt zo'n varicap als volgt aangeduid:



Overal daar, waar een stuurspanning capaciteiten moet beïnvloeden, komen varicaps voor in de schakeling. Bijzonder graag worden dergelijke diodes in analoge tunerschakelingen toegepast in de AFC schakeling (Automatic Frequency Control ofwel scherpafstemming, een voorziening, die voorkomt, dat bij FM ontvangst de zender bv. tengevolge van thermodrift "wegloopt"). Maar ook om bij de keus van voorgeprogrammeerde zenders de fijnafstemming van de oscillatorkring te bewerkstelligen.

Transistoren: de actiefsten in de elektronica

Bij al hun onderlinge verschillen qua functie hebben alle totnutoe behandelde bouwstenen één ding gemeen: ze bezitten slechts twee aansluitingen. De kenndata van deze onderdelen worden bepaald door de relatie tussen de aangelegde spanning en de vloeiende stroom.

Voor een weerstand maakt het niets uit, of hij gelijk- of wisselspanning moet verwerken. De stroomsterkte hangt uitsluitend van de weerstandswaarde af. Frequentie-afhankelijk vormt de spoel met zijn reactantie min of meer een weerstand voor de stroom. Hoe lager de frequentie en hoe lager de inductiviteit, des te groter

de stroom.

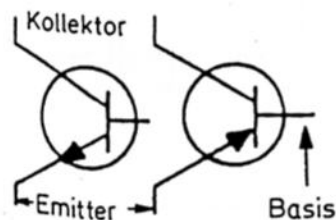
Ook de condensator gedraagt zich frequentie-afhankelijk. Hij geleidt beter naarmate de waarden van frequentie en capaciteit hoger zijn.

Diode tenslotte zijn op het punt van polariteit heel kieskeurig. Ze laten de stroom in slechts één richting door.

Actieve elektronische bouwstenen kunnen in tegenstelling tot de tot hier beschreven passieve soortgenoten hun vermogen om stroom te geleiden veranderen. De tegenwoordig nog steeds meest gangbare vertegenwoordiger van deze actieve soort is de transistor. Het gaat om een samentrekking van twee woorden: to transfer (overbrengen) en resistor (weerstand).

Deze driepotige stroomversterkers werken als een relais. Gevoed met een gering stuurvermogen aan de ingang, kunnen ze aan de uitgang grote stromen en spanningen schakelen.

Maar terwijl het relais slechts twee toestanden kent - aan of uit - komen bij de transistor ook tussenstadia voor. De tussen de hoofdaansluitingen collector en emitter vloeiende stroom is altijd een bepaalde factor groter dan de via de derde aansluiting - de basis - vloeiende stroom.



Het komt aan op de emitterpijl: bij een NPN transistor wijst hij van de basis af, bij een PNP type naar de basis toe.

Een eenvoudige transistor ziet er als volgt uit: tussen twee N-gedoteerde einden van een siliciumstaafje ligt een P-gedoteerd gebiedje. Zo ontstaat een opeenvolgende NPN zone, waarvan de werking door het samenspel van P/N overgangen wordt bepaald.

Wanneer een positieve spanning op de P-aansluiting (de basis van de transistor) staat ten opzichte van de N-aansluiting, dan laat de zich daartussen bevindende P/N overgang net als bij een gewone diode vanaf een bepaalde grensspanning stroom vloeien. Uit het N-gebied dringen dan elektronen uit de P-gedoteerde basiszone binnen. Het N-gebied, dat ladingsdragers uitzendt, noemen we emitter (lat. emittere = uitzenden).

De vanuit de emitter in de basiszone gekomen elektronen recombineren met de daar aanwezige gaten en maken zo plaats voor en steed verder binnenstromende elektronen. Nieuwe gaten ontstaan door

emigratie van negatieve ladingsdragers uit de basis richting pluspool van de batterij.

Zodra op de andere N-aansluiting van de transistor een hogere positieve spanning staat, recombineren niet alle door de emitter uitgezonden ladingsdragers in de heel smalle basiszone. Het krachtiger elektrische collector basisveld (lat. colligere = verzamelen) trekt heel veel van die basis af.

De factor, die het verschil vormt tussen collector- en basisstroom heet de stroomversterking van de bewuste transistor. Hoe groter de basisstroom, des te meer van de uit de emitter komende ladingsdragers emigreren uit de basiszone naar de collector. De basistroom stuurt dus de aanzienlijk grotere collectorstroom.

Behalve de opbouw met de volgorde NPN van de lagen, bestaan er ook transistoren, die in spiegelbeeld - als PNP type - zijn gemaakt. De emitter levert dan inplaats van elektronen gaten - dus positieve ladingsdragers - in de aan negatieve spanning liggende basis. Ook de collector is bij een PNP transistor tegenover de emitter negatief gepoold om de positieve ladingsdragers uit de basis te kunnen opvangen.

Zowel bij de NPN- als bij de PNP transistor hebben beide polariteiten deel aan de stroomvloed van de ladingsdragers. In de N-gebieden verzorgen de elektronen het stroomtransport, in de P-gebieden zijn dat de gaten. Men heeft het over bipolaire transistoren wanneer men het over PNP- of NPN types heeft.

Omgekeerd gaat ook: inverse werking

Vanwege de symmetrische opbouw van de lagen kunnen bij bipolaire transistoren de collector- en emitter aansluiting in de schakeling theoretisch worden verwisseld. Een op deze manier omgekeerd ingebouwde transistor verricht in de praktijk echter zijn taak maar gedeeltelijk.

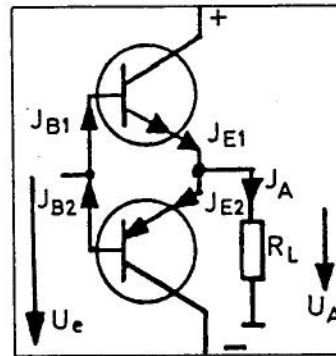
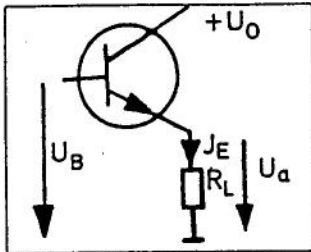
De oorzaak hiervan is, dat met het oog op de optimalisatie van de transistoreigenschappen de collector en de emitter verschillend van vorm zijn. De collector heeft meestal een groter oppervlak, zodat hij zoveel mogelijk ladingsdragers van de basis kan opvangen. Dat veroorzaakt een grote stroomversterking en maakt de constructie ondanks de symmetrische volgorde van de lagen asymmetrisch.

Bij gebruik van omgekeerde emitter- en collectoraansluitingen wordt de stroomversterking geringer. Maar ook een andere kern-grootte verandert: de maximale spanning, die tussen collector en emitter mag optreden zonder dat een transistor net als een diode tengevolge van de doorbraak van de sperlaag de geest geeft, is geringer dan bij gebruik met correct gepoolde aansluitingen.

Maar een andere transistor eigenschap ondergaat bij invers gebruik een mooie verbetering. In de situatie, waarbij volledige sturing optreedt - dus bij de maximale collectorstroom - is het collector-emitter traject van de "normaal" gebruikte transistor niet zoiets als kortsluiting, doch blijft er nog een restspanning over. Deze is net als bij de diode nodig om überhaupt stroom te laten vloeien. Deze restspanning ligt bij een transistor in de orde van grootte van ca. 0,2V. Wisselt men emitter en collector om, dan wordt deze restspanning drastisch verlaagd tot waarden onder de 10mV.

Op deze manier gebruikte transistoren schakelen met een even laag
restspanning als mechanische contacten. Maar ze verrichten hi
taak beduidend sneller en nauwkeuriger.

Transistoren in actie: gebruikelijke versterker eindtrappen



Een transistor en een weerstand: Complementaire NPN/PNP opzet
een simpele Klasse A voorverster- voor een eindtrap
ker

De basis-emitter-doorlaatspanning van een transistor bedraagt van nature net als bij de diode circa 0,6V. Zodra de spanning U^B aan de basis groter wordt dan deze grenswaarde, vloeit de basisstroom in de transistor. Op zijn beurt stuurt deze basisstroom de emitterstroom I_E . In bovenstaande schakeling volgt nu boven de ingangsspanning van 0,6V de uitgangsspanning van de emitter de ingang.

De emitterstroom I_E , die de transistor door de afsluitweerstand R_L stuurt is daarbij een factor B - de stroomversterking - groter dan de basisstroom I_B . Om de emitterstroom te kunnen leveren, moet de transistor deze voor het grootste deel uit de op de collector aangesloten spanningsbron U_0 halen. Het nut van deze schakeling bestaat daarin, dat de spanningsbron, die de ingangsspanning levert, slechts in geringe mate door de basisstroom wordt belast. Intussen levert de transistor aan zijn uitgang grote stromen aan de afsluitweerstand R_L .

Wanneer de uitgangsspanning U_A niet slechts positieve, maar ook negatieve waarden moet aannemen, dan hoeft de schakeling niet eens fundamenteel worden gewijzigd. Het is voldoende om de transistor van positieve en de weerstand van negatieve spanning te voorzien. Dan kan de uitgangsspanning ook positieve en negatieve waarden aannemen.

Deze zogenaamde simpele klasse A versterker - menige voorversterker werkt volgens dit principe - heeft slechts één nadeel: hij kan weliswaar grote positieve uitgangsstromen leveren, maar wanneer de transistor zich "vlot" openstelt, worden negatieve stromen (die uit de afsluitweerstand naar de versterker komen) door de emitterweerstand begrensd. Maakt men de stroom geringer, dan weegt dat gebrek minder zwaar, maar dan moet wel een heel hoge ruststroom van deze schakeling op de koop toe worden genomen.

Dat is ook de reden, waarom HiFi eindtrappen als regel als comple

mentaire versterkers met NPN en PNP transistoren worden uitgevoerd. Is U_E positief, dan geleidt de basis-emitter-diode van de bovenste NPN transistor in onderstaande schakeling; de stroom I_{B1} veroorzaakt nu de aanzienlijk grotere emitterstroom I_{E1} . Deze vloeit via de over de uitgang aangesloten afsluitweerstand - in het geval van een versterker eindtrap dus de luidspreker. Neemt U_E negatieve waarden aan, dan blokkeert de NPN transistor en neemt de onderste PNP dito met zijn stroom I_{E2} de taak over om de stroom I_A door de afsluitweerstand te leveren. Zo kan deze schakeling positieve zowel als negatieve halve golven van de ingangsspanning aan de luidspreker doorgeven.

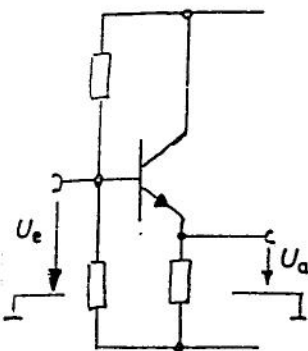
Het voordeel van deze schakeling is, dat telkens de inactieve tak van de stroomverzorging blokkeert en dat zo dus geen nodeloze ruststromen vloeien. In de geschetste primitieve vorm treden wel en dat deel van het ingangssignaal, waarin de ingangsspanning U_E tussen $+0,6$ en $-0,6V$ fluctueert, aanzienlijke vervormingen van de uitgangsspanning op. Deze blijft namelijk zo lang op $0V$, totdat de ingangsspanning de drempelwaarde van $0,6V$ naar plus of min in beide richtingen overschrijdt. Pas dan gaat één van beide transistoren stroom geleiden.

Omdat die vervorming steeds dan ontstaat, als de ene transistor de verdere signaalverwerking van de andere overneemt, spreken we van overnamevervorming en omdat hij ook optreedt rond de nuldoorgang van de spanning wordt ook de Engelse term Crossover Distortion gehanteerd. Wanneer de technici dit euvel niet met slimme schakelingen weten te elimineren, dan klinkt zo'n versterker vooral bij zachte muziekweergave rauw en hees.

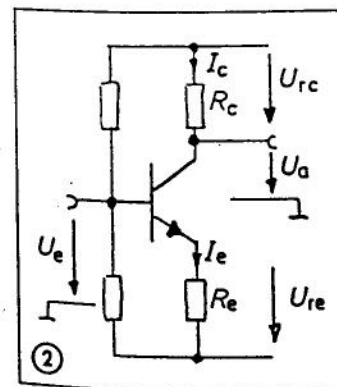
Hoe transistoren wisselspanning versterken

Eerder bleek, hoe in een klasse A versterker de emittervolger, waarin de uitgangsspanning de ingangsspanning volgt, de stroom wordt versterkt. De waarde van de wisselspanning aan de uitgang is echter hetzelfde als die van de ingang.

Om spanningen te versterken gebruikt men een andere basisschakeling. De transistor krijgt nu niet alleen in de emitterkring een weerstand, maar ook in de collectorkring.



Versterkt alleen de stroom
In- en uitgangsspanning van de
emittervolger zijn even groot



Versterkt de spanning
De collectorweerstand zet
stroom in spanning om

Staat in deze basisschakeling een wisselspanning U_e ter beschikking, dan staat dezelfde spanning - weliswaar 0,6V verschoven ook aan de emitterweerstand R_e ter beschikking:

$$U_{re} = U_e$$

Dat functioneert net zo als bij de emittervolger. De emitterstroom I_e en de collectorstroom I_c vertonen weinig verschil:

$$I_e = I_c + I_b$$

Omdat I_c tengevolge van de grote stroomversterking van de transistor aanzienlijk groter is dan I_b , kan I_b worden verwaarloosd.

$$I_e \approx I_c$$

Vloeit door de emitterweerstand de wisselstroom

$$I_e = \frac{U_{re}}{R_e}$$

dan moet deze ook door de collectorweerstand R_c vloeien. Daar ontstaat dan de wisselspanning

$$U_{rc} = I_c \cdot R_c$$

Omdat I_c overeenkomt met de emitterstroom I_e kan ook worden goteerd:

$$U_{rc} = \frac{U_{re}}{R_e} \cdot R_c$$

De wisselspanning U_{re} is echter gelijk aan de ingangsspanning U_e :

$$U_{rc} = \frac{U_e}{R_e} \cdot R_c$$

De versterking V van een schakeling is gedefinieerd als het quotiënt van de uitgangsspanning en de ingangsspanning. In het geval van een transistorversterker derhalve:

$$V = \frac{U_{rc}}{U_e} = \frac{R_c}{R_e}$$

Door de keuze van de verhouding tussen R_e en R_c kan de ontwerper zo de versterking van een transistortrap bepalen.

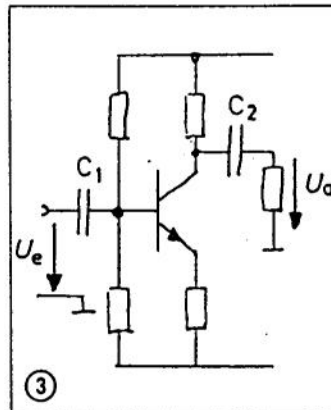
Bezien vanuit het referentiepunt (de massa) treedt tussen ingang en uitgang van de schakeling niet alleen een versterkingseffect op, maar ook fase-omkering. De som van U_{re} en U_a moet steeds gelijk zijn aan de batterijspanning U_{bat} . Wanneer de spanning U_{rc} groter wordt, wordt de waarde van U_a kleiner. En wordt U_{rc} kleiner, dan neemt U_a met dezelfde waarde toe. De uitgangsspanning U_a van de versterker schakeling is daarom in relatie tot de fase invert t.o.v. de ingangsspanning. Daarom luidt de versterkingsformule

correct:

$$V = \frac{U_a}{U_e} = \frac{-R_c}{R_e}$$

Zowel bij de emittervolger als bij de ééntraps transistorversterker bestaat tussen de uitgang en de ingang een verschil op het punt van de op het wisselspanningssignaal gesuperponeerde gelijkspanning. Om dit potentiaalverschil te elimineren, moeten in beide schakelingen koppelcondensatoren worden gebruikt om de ongewenste gelijkspanning strikt van de signaal wisselspanning te scheiden. De condensatoren C_1 en C_2 vormen samen met de ingangsweerstanden en de afsluitweerstand een High Pass. Om ook heel lage frequenties door te laten, moeten de koppelcondensatoren hoge capaciteitswaarden bezitten.

Frequentie-afhankelijke faseverschuivingen zijn helaas meestal niet geheel te vermijden. Al naar de kwaliteit van de gebruikte transistoren kunnen bovendien niet-lineaire vervormingen (harmonische en IM) optreden.



Deze schakeling blokkeert gelijkspanning, maar laat wisselspanning ongehinderd door.

Hoe differentieelversterkers functioneren

Een in de HiFi techniek sterk vertegenwoordigde schakeling, die wissel- en gelijkspanning in gelijke mate versterkt, is de differentieelversterker.

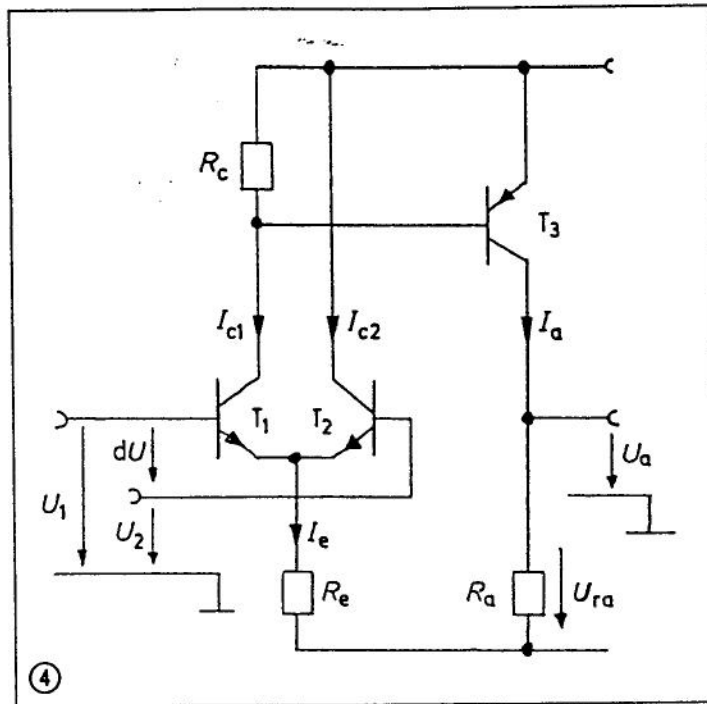
De fundamentele schakeling van zo'n versterker bevat drie transistoren: T_1 , T_2 en T_3 . In de rustsituatie ($U_1 = U_2$) is het verschil dU gelijk aan nul. De collectorstromen I_{c1} en I_{c2} zijn gelijk. Ze vloeien, ietsje vergroot door de respectievelijke basisstroom, als emitterstroom door de gemeenschappelijke emitterweerstand R_e .

De spanning aan de weerstand R_c stuurt de PNP transistor T_3 ; diens collectorstroom I_a wekt aan de weerstand R_a de spanning U_{ra} op. Bij de juiste dimensionering van R_c en R_a is U_{ra} net zo groot, dat hij de negatieve bedrijfsspanning U compenseert en de uitgangsspanning U_a precies 0V bedraagt.

Wanneer U_1 groter wordt, dan ontstaat bij de constante spanning U_2 een positieve verschilspanning dU . De basis emitterspanning van T_1

is groter dan die van T_2 . Daarom loopt I_{c1} op en daalt I_{c2} met dezelfde waarde.

De gestegen spanning aan R_c stuurt T_3 verder. I_a wordt groter en de uitgangsspanning U_a wordt positief. Datzelfde gaat op in het omgekeerde geval - $U_2 < U_1$.



Reageert niet op de absolute grootte van de spanningen U_1 en U_2 , maar alleen op het verschil tussen beide: de differentieelversterker.

Omdat het effect van de differentieelversterking zowel bij gelijk- als bij wisselspanning werkt, hebben de volgens dit principe werkende versterkers geen koppelcondensatoren nodig. Tussen de ingang en de uitgang van deze schakeling treedt geen gelijkspanningssprong op tenzij de ingangs wisselspanning nog een gelijkspannings aandeel bevat. Dat versterkt de differentieelversterker natuurlijk mee.

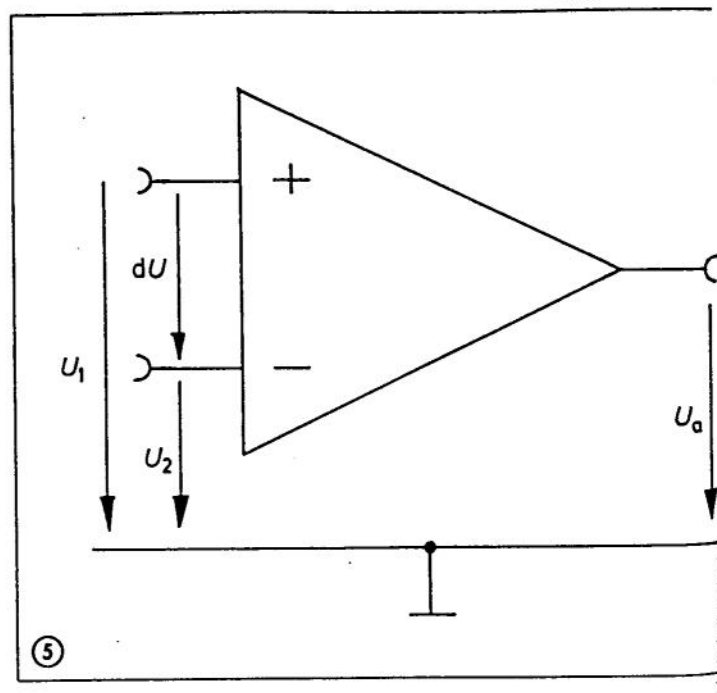
De OpAmp als universele bouwsteen

Differentieelversterkers zijn in de vorm van geïntegreerde schakelingen op de markt. Ze bevatten naast de eigenlijke versterker nog hulpschakelingen, die ervoor zorgen, dat de versterker bij kortsluiting aan de uitgang niet wordt opgeblazen en dat ook te hoge ingangsspanningen de versterker geen schade berokkenen.

Uiterlijk gezien komt het functioneren van deze IC's precies overeen met de hier beschreven differentieelversterker. Wordt de spanning aan een ingang positief ten opzichte van de andere, dan wordt ook de uitgangsspanning positief.

Om niet altijd het gecompliceerde binnenleven van een differen-

tieelversterker te hoeven afbeelden, is daarvoor het volgende, eenvoudige symbool bedacht



Simpel symbool voor een opamp. Het plusteken markeert de niet-geïnverteerde ingang, de min de geïnverteerde dito.

De driehoek geeft de versterkende werking aan. De geïnverteerde ingang is met het minteken, de niet-geïnverteerde met het plusteken gemarkeerd. De naam van dit moois luidt in goed Engels Operational Amplifier of kortweg opamp. De naam heeft als achtergrond het feit, dat dergelijke schakelingen in analoog rekentuig werden gebruikt om mathematische handelingen met spanningen uit te voeren.

Geïntegreerde Opamps kunnen ondanks hun complexe binnenleven makkelijk worden gebruikt. Ze maken het mogelijk om allerlei versterkertaken makkelijk te vervullen. Menigeen zweert daarbij puristisch op een discrete (uit afzonderlijke delen bestaande) opbouw. Op die manier is het makkelijker om met wat modificaties de klank te optimaliseren. Veranderingen in het binnenwerk van opamps zijn echter onmogelijk.

Hoe opamps signalen versterken

De differentieelversterking V_o van een opamp is te berekenen uit de verhouding van de uitgangsspanning en de verschilspanning aan de ingang:

$$V_o = \frac{U_a}{dU} \text{ of: } U_a = V_o \cdot dU$$

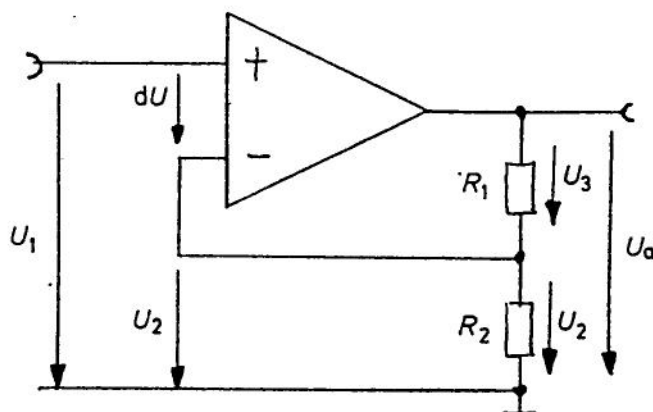
De versterkingsfactor V_o ligt bij geïntegreerde opamps in de orde

van grootte van 100.000 tot ver over de 1.000.000. Voor het gebruik in HiFi versterkers zijn factoren tussen de 10 en 100 gewenst. Daarom reduceren de ontwerpers de versterking van opamps met behulp van tegenkoppeling.

De niet-inverterende opamp ontvangt het signaal aan de niet-inverterende ingang. De tegenkoppeling loopt van de uitgang via een spanningsdeler naar de geïnverteerde ingang.

Is de ingangsspanning U_1 positief, dan stijgt de uitgangsspanning U_a . Zolang de via de spanningsdelers R_1 en R_2 naar de geïnverteerde ingang teruggekoppelde spanning U_2 kleiner is dan U_1 , ontstaat een positieve verschilspanning dU in de opamp.

Deze spanning wordt met de factor V_o versterkt en de uitgangsspanning neemt verder toe. Omdat V_o zeer groot is, is een gering verschil dU voldoende om heel hoge uitgangsspanningen te bereiken.



Belangrijker dan de opamp: de weerstanden R_1 en R_2 bepalen de versterking. Hoe groter de waarde van R_1 en hoe kleiner die van R_2 , des te hoger is de uitgangsspanning.

Bij volledig werkende opamps is aan de uitgang daarom dU bij benadering 0, zodat ongeveer geldt:

$$U_1 = U_2$$

U_2 is via de spanningsdeler formule te berekenen:

$$U_2 = U_a \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Dit ingevoerd in de eerste formule geeft

$$U_1 = U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 + R_2$$

en omgevormd:

$$\frac{U_a}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

De versterking van de hele schakeling (niet te verwarren met de differentieelversterking V_o !) is dan:

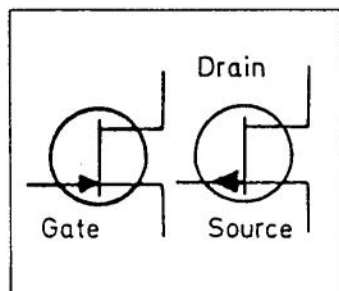
$$V = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Door de juiste keuze van de weerstandswaarden kan elke gewenste versterkingsfactor worden gekozen.

Omdat bij de niet-geïnverteerde opamp de ingangsspanning op de hoogohmige basisaansluiting van de ingangstransistor staat, wordt de signaalbron nauwelijks belast. Daarom is deze schakeling heel geschikt voor hoogohmige versterkeringen.

Gekanaliseerde stroom: Veldeffect transistoren (FET's)

Veldeffect transistoren - afgekort tot FET van Field Effect Transistor - kunnen net als NPN en PNP transistoren worden toegepast. Inplaats van de collector en de emitter vinden we bij een FET de Drain (afvoer) en de Source (bron). Deze beide aansluitingen zijn onderling door het "kanaal" verbonden, net zoals de Middellandse Zee en de Rode Zee door het Suez kanaal. Dat kanaal bestaat uit halfgeleider materiaal, dat hetzij volledig P-gedoteerd of volledig N-gedoteerd is. Omdat de stroomvloed door het kanaal slechts uit ladingsdragers van de eigen polariteit bestaat - gaten bij het P-kanaal type en elektronen bij het N-kanaal type - heten FET transistoren ook wel unipolaire transistoren (lat unus = één).



Geeft de polariteit aan: bij de N-kanaal sperlaag FET wijst de pijl richting Source, bij het P-kanaal type de andere kant uit.

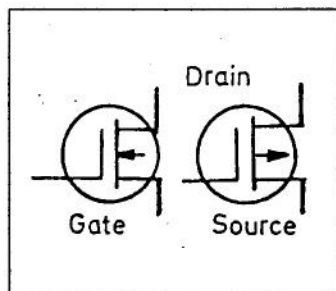
De naam veldeffect transistor beschrijft de manier van functioneren van deze bouwsteen. Een isolatielaag scheidt de kanaal- van de stuuraansluiting: de Gate (poort). De tussen Gate en Source heersende spanning beïnvloedt het geleidend vermogen van het kanaal, dat wil zeggen de tussen Drain en Source effectieve

weerstand.

Ontvangt de Gate bij de N-kanaal FET een negatieve spanning ten opzichte van de Source, dan drukt het tussen kanaal en Gate ontstaande elektrische veld de als beweeglijke ladingdragers in dat kanaal aanwezige elektronen weg van de Gate elektrode. Daardoor wordt de voor de stroomvloed ter beschikking staande kanaaldoorsnee geringer.

Net zoals een geknikte waterslang weerstand biedt aan het doorstromende water, zodat er nog slechts wat druppels uit de slang komen, loopt de elektrische weerstand van het kanaal bij de FET op en de Drain/Source stroom wordt geringer. Vanaf een bepaalde Gate spanning vloeit ondanks een hoge spanning tussen Drain en Source praktisch geen stroom meer door het kanaal, net zoals bij die geknikte slang. Het begrip "afknijpspanning" is dan ook geen toeval.

Al naar gelang de manier waarop de isolatie tussen Gate en kanaal tot stand komt, wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten FET. Bij de sperlaag FET zorgt een zich tussen Gate en kanaal bevindende P/N overgang, die in de sperrichting is gepoold, voor de noodzakelijke isolatie. MOS-FET's (Metal Oxyde Semiconductor) benutten inplaats van de P/N overgang een dunne laag geoxydeerd metaal, die ook goed isoleert.



Bij een MOS-FET is geen geleidende verbinding tussen Gate en kanaal.

Kanaalwerkers: Vermogens FET's

Wanneer in krachtige versterker eindtrappen krachtige stromen bij tegelijk korte stijgtijden van de eindtransistoren worden gevraagd, dan reageren veel bipolaire types te traag op de stuursignalen aan de basis. Tengevolge daarvan neemt de vervorming naar de hogere frequenties en grotere vermogens meer dan gewenst toe.

Een ander nadeel van bipolaire transistors is de temperatuurafhankelijkheid van de basis-emitter doorlaatspanning. De waarde daarvan zakt omgekeerd evenredig met de temperatuur.

Wanneer de basis voorspanning constant wordt gehouden, wordt de ruststroom van een transistorschakeling groter bij verwarming. Heel kritisch is die verhoging van de ruststroom bij versterker eindtrappen. De verhoogde ruststroom verhit de transistoren nog verder, waardoor de basis-emitterspanning zakt enzovoorts in een

kringloop. Het opslingereffect van de ruststroom voert al gauw tot het verbranden van de eindtransistoren, tenzij handige schakeltrucs worden toegepast om het effect van de temperatuur-afhankelijke basis-emitter spanning te niet te doen.

FET's gedragen zich omgekeerd bij verwarming. Bij vermogens MOS-FET transistoren in de versterkeruitgang zakt de ruststroom bij stijgende temperatuur. Zo voorkomen ze zelf binnen zekere grenzen overbelasting tengevolge van (te) hoge ruststromen.

Ook de snelheid, waarmee FET's de door de Gate spanning gegeven stuurbevelen uitvoert, heeft niet te leiden onder hoge kanaalstromen. Enig minpunt: zelfs in het gunstigste geval ligt de kanaalweerstand bij een volledig doorgeschakelde FET altijd nog in de orde van grootte van 20 tot 50 ohm - wat voor de van eindtransistoren vereiste stroomsterktes van 10A en meer een veel te hoge waarde is.

Slimme ontwikkelaars van halfgeleiders vonden wel een handige uitweg: ze schakelden wel 1.000 individuele transistoren parallel tot een soort supertransistor. Dankzij deze truc bereikten ze kanaalweerstand van slechts een paar m Ω . Wel hebben vermogens FET's tengevolge van de vele parallel liggende afzonderlijke Gates ook heel hoge ingangscapaciteiten. Maar gehoormatig hebben ze alle voordelen aan hun kant.

Klein, mini, micro, LSI

Nadat de elektronici gewend waren aan transistoren, werden de schakelingsconcepten steeds gedurfter en ingewikkelder. Om de intussen van hun buizen bevrijde versterkers ruimtebesparend en goedkoop te kunnen bouwen, stapten veel fabrikanten over van de in het buizentijdperk gangbare losse bedrading van de chassis op voorgedrukte schakelingen - prints. Daarbij worden de elektronische bouwstenen in desbetreffende gaatjes van een isolerende printplaat gestoken. Daarop worden ze vervolgens op de op één of beide kanten aanwezige dunne verbindende koperlaag gesoldeerd.

Deze koperstrips werden eerst in de print geëtst; ze vormen de verbindingen tussen de diverse onderdeken. Soms worden wel zestien van die lagen tot een multiprint in sandwichvorm verwerkt. Dat is de vorm, waarin we nu elektronische schakelingen aantreffen.

In de loop van verdere miniaturisatie ontstonden de hybride schakelingen. Hier dient een dun keramisch plaatje als drager; de geleidestrips zijn daarop aangebracht. De onderdelen, die hun diensten bewijzen in zo'n hybride schakeling, hebben geen aansluitdraden meer, maar alleen gemetaliseerde uiteinden, waarmee ze direct op de print worden gesoldeerd. Weerstand zijn in dergelijke schakelingen niet meer als afzonderlijk onderdeel te vinden. Daar, waar een weerstand in de schakeling thuishoort, gebruikt men voor de geleidende strip inplaats van koper een pasta, die na een korte droogperiode hard wordt.

De weerstandswaarde hiervan wordt bepaald door de mengverhouding, de lengte en de breedte van de pastabaan. Als geringe toleranties moeten worden aangehouden, kan op maat met een laserstraal een deel van de pasta worden weggebrand. Men spreekt van Lasertrimmen.

Ook de hybride techniek veroorlooft slechts een begrensde pakingsdichtheid. Per vierkante centimeter kunnen slechts vijf

bijzonder klein geconstrueerde speciale transistoren worden ondergebracht. Meer lukt niet bij massafabricage. Maar mede onder invloed van de ruimtevaart en militaire toepassingen probeerde men verder te miniaturiseren.

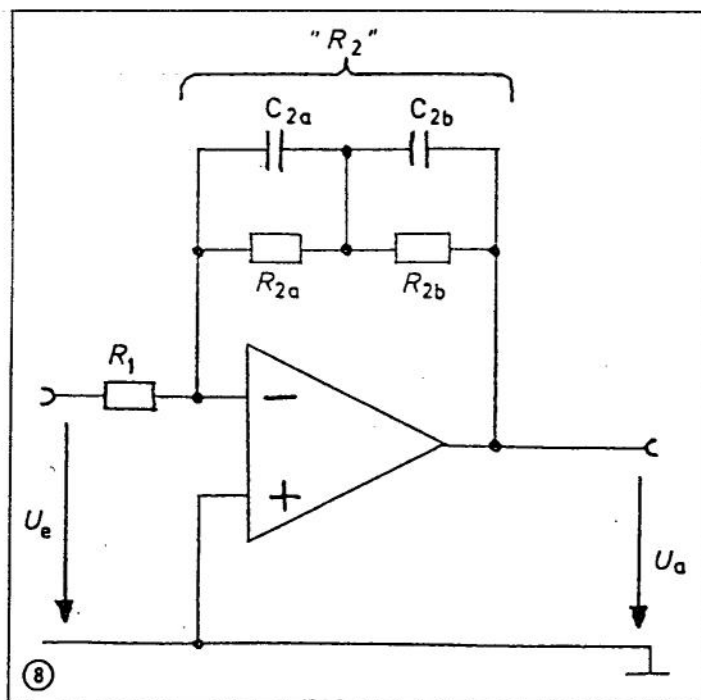
Begin jaren zestig lukte het om in plaats van één transistor meerdere "torren" met hun bijbehorende bedrading binnen één en hetzelfde halfgeleider kristal onder te brengen. Dergelijke kristallen heten Chips. Zodra de fabrikanten de van fouten gevrijwaarde fabricage van chips konden garanderen, overspoelde een vloed van dergelijke geïntegreerde onderdelen de markt. De kleine alleskunnners met hun enorme aantal pootjes vonden uiteraard ook onmiddellijk ingang in de HiFi.

In versterkers zorgen dergelijke IC's (voor Integrated Circuits) voor de juiste RIAA correctie en versterking van de signalen van het pickup element. Andere fungeren als elektronische potentiometers in plaats van de oude volume- en balansregeling. IC's hebben ook veel bijgedragen aan het bedieningsgemak.

De CD speler was ondenkbaar zonder IC's. Microcomputers, geheugen, correctie- en stuurvoorzieningen helpen om de nul/één bevelen, die de laser uit de CD leest van fouten te ontdoen en naar het juiste stereokanaal te leiden. Aansluitend fabriceren D/A omzetters uit de digitale spanningstrapjes weer het oorspronkelijke analoge muzieksignaal.

In IC bouwstenen zijn vaak wel 50.000 transistoren op één enkele chip ondergebracht, die niet groter is dan 5x7mm. Een dergelijke schakeling zou in conventionele vorm het formaat van 1m² hebben!

De aan het Engelse taalgebied ontleende vakterm voor hooggeïntegreerde schakelingen luidt "Large Scale Integration", afgekort tot LSI. De vergrotende trap hiervan met nog meer gebundelde schakelingen heet VSLI (Very Large Scale Integration).



Laatste voorbeeld: zo ziet de RIAA LP correctie er uit