

Hoofdstuk 7: Algemene versterkingstechniek

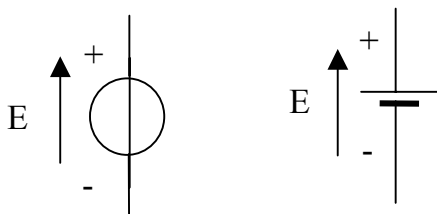
1: Spanningsbronnen en stroombronnen

We beginnen dit hoofdstuk met een aantal eigenschappen in verband met spanningsbronnen en stroombronnen te herhalen. Een opfrissing van deze eigenschappen verhoogt de verstaanbaarheid van dit vrij theoretische hoofdstuk.

1.1: Spanningsbronnen

Een ideale spanningsbron kan een bepaalde stroomsterkte leveren (tussen nul en een maximum) zonder dat de klemspanning van de bron zich wijzigt. Een gestabiliseerde voeding benadert dit geval.

Een ideale spanningsbron wordt (zoals u al weet) op verschillende manieren voorgesteld:

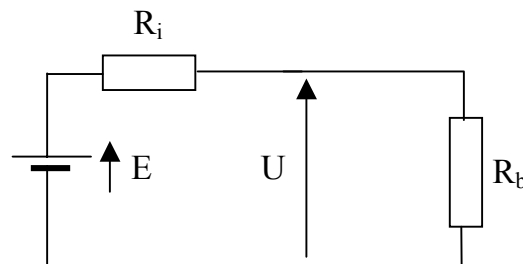


Figuur 7.1: Ideale spanningsbron

Een reële spanningsbron is te beschouwen als een serieschakeling van een ideale spanningsbron (generator met emk E) en een inwendige weerstand R_i . Indien deze reële spanningsbron belast wordt met een belastingsweerstand R_b , dan vloeit er een stroom $I = E / (R_i + R_b)$.

De klemspanning van de reële spanningsbron is $U = E - R_i I = E R_b / (R_b + R_i)$.

Naarmate R_b daalt, zal I stijgen zodat de klemspanning U daalt. Enkel indien $R_i = 0 \Omega$, dan is $U = E$ een constante.



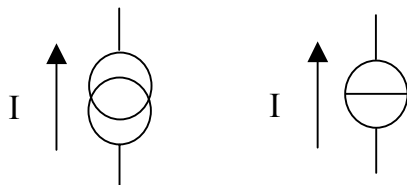
Figuur 7.2: Reële spanningsbron met belasting

Een ideale spanningsbron wordt benaderd indien $R_b \gg R_i$ want dan is U ongeveer gelijk aan E .

1.2: Stroombronnen

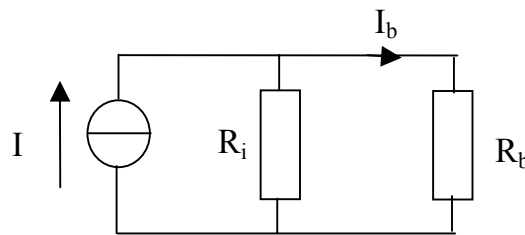
Een stroombron wordt bekomen indien $R_i \gg R_b$. In dit geval is de stroom I bijna onafhankelijk van de waarde R_b (uiteraard zolang R_b voldoende klein blijft).

Een ideale stroombron in een schema wordt voorgesteld zoals in Figuur 7.3.



Figuur 7.3: Ideale stroombron

Een reële stroombron is te beschouwen als een parallelschakeling van een ideale stroombron en een inwendige weerstand R_i . Indien deze reële stroombron belast wordt met een belastingsweerstand R_b dan vloeit er een stroom $I_b = I R_i / (R_b + R_i)$ door de belastingsweerstand.



Figuur 7.4: Reële stroombron met belastingsweerstand

Een ideale stroombron wordt benaderd indien $R_b \ll R_i$ want dan is I_b ongeveer gelijk aan I .

1.3: Maximale vermogenoverdracht

Stel dat de belastingsweerstand in Figuur 7.2 regelbaar is. Voor welke waarde van R_b wordt er een maximaal vermogen geleverd aan R_b ?

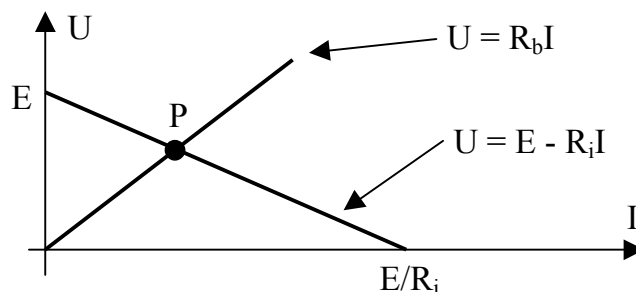
Voor een willekeurige R_b -waarde is het geleverde vermogen $P = U \cdot I = (E R_b / (R_i + R_b)) \cdot (E / (R_i + R_b)) = R_b (E / (R_i + R_b))^2$.

Dit vermogen welke de bron levert aan de belasting is maximaal indien $R_b = R_i$. Meer specifiek is dan $P = E^2 / 4R_i$. In dit geval zeggen we dat er aanpassing is tussen de bron en de belasting.

De eigenschap dat de spanningsbron een maximaal vermogen levert aan de belastingsweerstand indien $R_b = R_i$ geldt niet enkel bij gelijkstroom. Een gelijkaardige eigenschap kan ook bewezen worden bij wisselstroom. Inderdaad, stel dat de bron een inwendige impedantie $Z_i = a_i + jb_i$ heeft, dan is er een maximale vermogenoverdracht indien de belastingsimpedantie $Z_b = a_b + jb_b = a_i - jb_i$.

1.4: De belastingslijn van een reële spanningsbron

Indien we een niet-ideale (dus reële) spanningsbron belasten met een weestand R_b zoals weergegeven in Figuur 7.2, dan is de stroom I (en evenzeer de klemspanning U) afhankelijk van zowel E , R_i en R_b . Nu is het mogelijk dit grafisch voor te stellen. Het werkingspunt P is bepaald door het snijpunt van de belastingslijn $U = E - R_i I$ en de relatie $U = R_b I$.

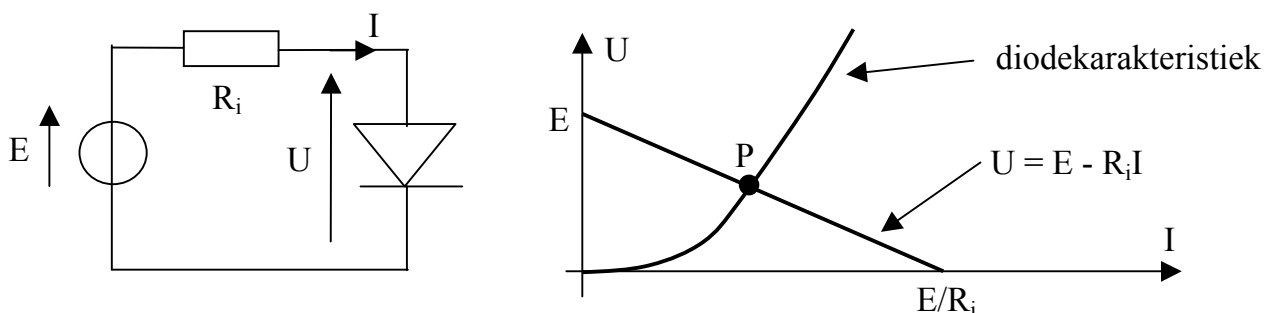


Figuur 7.5: Het gebruiken van een belastingslijn

Zoals op bovenstaande Figuur 7.5 duidelijk is, wordt de ligging van de belastingslijn bepaald door E en R_i . Bij wijzigende E schuift deze belastingslijn evenwijdig met zichzelf op. Bij een wijzigende R_i wijzigt de helling van deze belastingslijn.

De belastingsweerstand R_b bepaalt de helling van $U = R_b I$. Hoe groter R_b , hoe sterker deze helling.

Nu is het perfect mogelijk de aanpak van Figuur 7.5 uit te breiden tot belastingen die zich niet lineair gedragen. Vervang bij wijze van voorbeeld de lineaire belastingsweerstand R_b door een in doorlaat gepolariseerde diode D .



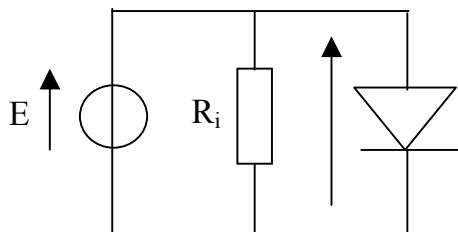
Figuur 7.6: Reële spanningsbron belast door een diode

Het werkpunt P is opnieuw het snijpunt tussen de belastingslijn en de stroomspannings-karakteristiek van de (in dit geval niet lineaire) belasting.

1.5: De belastingslijn van een reële stroombron

Teken zelf de belastingslijn van een reële stroombron. Stel dat deze reële stroombron belast is door een lineaire weerstand R_b , bepaal de ligging van het werkpunt. Hoe verandert de ligging van het werkpunt als R_b stijgt of daalt?

Stel dat de reële stroombron belast is door bijvoorbeeld een in doorlaatrichting geplaatste diode. Bepaal aan de hand van de belastingslijn en de diodekarakteristiek de ligging van het werkpunt P.



Figuur 7.7: Reële stroombron belast door een diode

2: De versterker

2.1: Inleiding

Indien we een microfoon rechtstreeks op een luidspreker aansluiten dan is het signaal van de microfoon te zwak opdat het een hoorbaar geluid zou geven in de luidspreker. De microfoon kan het vereiste vermogen niet leveren. Er is een versterker nodig die het signaal van de microfoon versterkt tot een gepaste waarde.

Het vermogen voor de luidspreker wordt nu geleverd door de voeding van de versterker. De voeding van de versterker kan gebeuren met batterijen of uit het elektriciteitsnet. De microfoon regelt via de versterker enkel de grootte van dit vermogen.

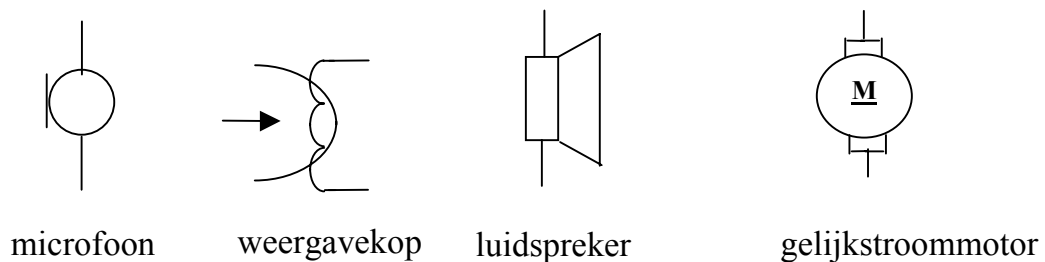
In plaats van een microfoon, kan hetingangssignaal ook afkomstig zijn van een andere opnemer. Enkele opnemers zijn:

- een weergavekop van een bandrecorder of cassetterecorder. Deze zet de magnetische fluxveranderingen om in een elektrische spanning.
- een thermokoppel. Deze zet een temperatuur om in een gelijkspanning.

De luidspreker vormt in bovenstaand voorbeeld de belasting van de versterker. Doch er zijn ook andere belastingen mogelijk:

- een kleine gelijkstroommotor.
- de ingang van een eindversterker.

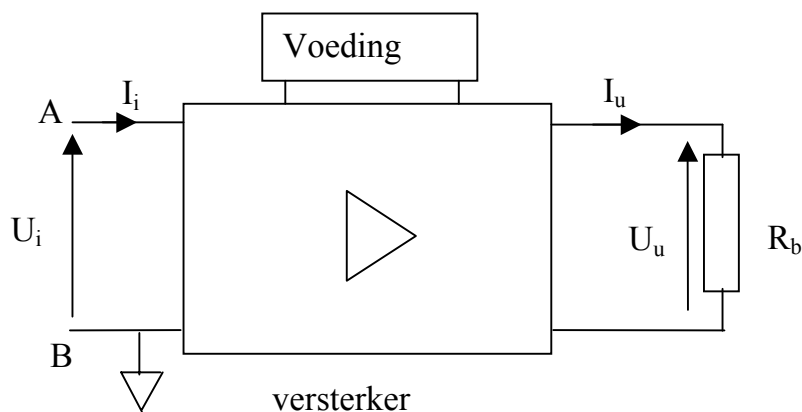
De bovenstaande opnemers en belastingen worden in een schema voorgesteld als:



Figuur 7.8: Opnemers en belastingen

2.2: Blokschema versterker

Iedere versterker kan symbolisch worden voorgesteld door een rechthoek met twee ingangsklemmen en twee uitgangsklemmen (vierpool). De versterker moet bovendien gevoed worden, doch deze voeding wordt veelal niet getekend.



Figuur 7.9: Blokschema van een versterker

Leggen we aan de ingangsklemmen A en B een spanning U_i (ingangssignaal), dan gaat er in de ingangskring een stroom I_i vloeien. Bij een goede versterker zal er nu op de uitgang een versterkt signaal U_u (met dezelfde frequentie) ontstaan. Hierdoor vloeit er door de belastingsweerstand R_b een stroom I_u .

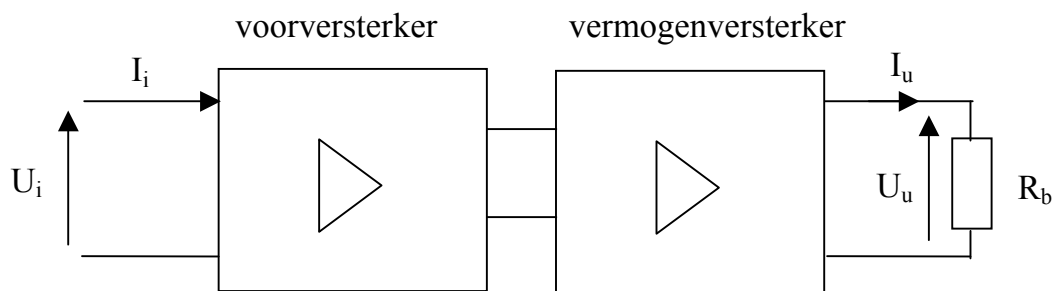
Het vermogen die aan de ingang toegevoerd wordt, noemen we P_i en het vermogen in de belasting R_b noemen we P_u . Dank zij het door de voeding toegevoegde vermogen, is het mogelijk dat $P_u > P_i$.

2.3: Soorten versterkers

Vaak worden versterkers onderverdeeld in een aantal subklassen. Zo kunnen we onderscheid maken tussen

- voorversterkers of versterkers voor kleine signalen
- vermogenversterkers.

Inderdaad, indien een zwak signaal U_i met een grote versterkingsfactor versterkt moet worden, plaatst men vaak twee versterkers na elkaar. De eerste versterker is een voorversterker, de tweede versterker is een vermogenversterker.



Figuur 7.10: Voorversterker en vermogenversterker in cascade

Versterkers kunnen ook ingedeeld worden volgens de te versterken frequentieband. Zo maken we onderscheid tussen

- breedbandversterkers
- smalbandversterkers.

In feite maakt de naamgeving al duidelijk wat het onderscheid is tussen een breedbandversterker en een smalbandversterker. Bij een breedbandversterker worden ingangssignalen binnen een groot frequentiegebied versterkt. Bij een smalbandversterker worden slechts signalen binnen een (zeer) beperkt frequentiegebied versterkt.

3: Algemene eigenschappen van een versterker

3.1: De versterking

Bij een versterker kan men spreken van de spanningsversterking, de stroomversterking en de vermogenversterking.

De spanningsversterking $A_u = U_u/U_i$ en is een dimensieloze grootheid. Vaak drukt men ook de versterking uit in dB (decibel). Meer specifiek, $N = 20 \log(U_u/U_i)$. Meer uitleg in verband met het gebruik van de decibel vindt u in Bijlage 5.

Indien bijvoorbeeld een ingangsspanning $U_i = 5 \text{ mV}$ een uitgangsspanning $U_u = 0,5 \text{ V}$ geeft, dan is de spanningsversterking gelijk aan 100 of 40 dB.

De stroomversterking $A_i = I_u/I_i$ en is een dimensieloze grootheid. Vaak drukt men ook de versterking uit in dB (decibel). Meer specifiek $N = 20 \log(I_u/I_i)$.

De vermogenversterking $A_p = P_u/P_i$ is een dimensieloze grootheid. Vaak drukt men ook de versterking uit in dB (decibel). Meer specifiek $N = 10 \log(P_u/P_i)$.

Het is duidelijk dat $A_p = A_u \cdot A_i$.

De signalen U_i en U_u (I_i en I_u) zijn gelijkspanningen (gelijkstromen) of effectieve waarden van wisselspanningen (wisselstromen).

Het meten van de spanningsversterking gebeurt als volgt:

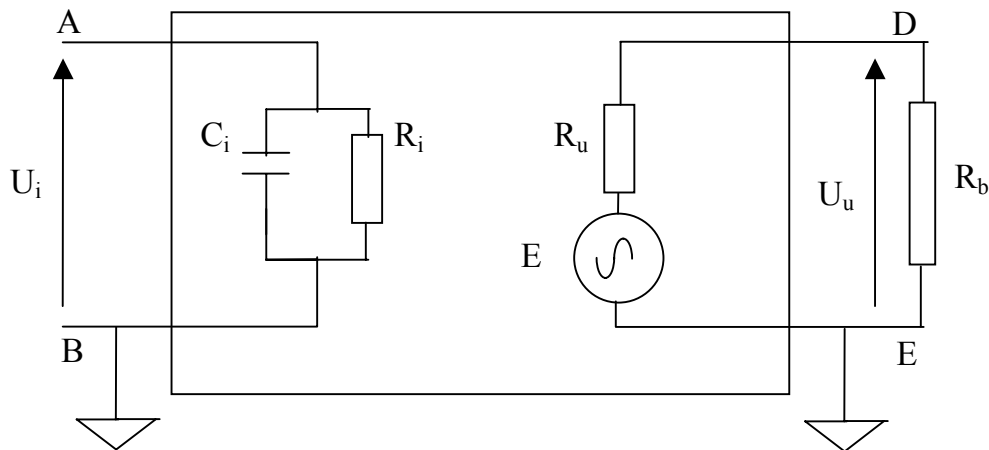
We leggen een signaal U_i aan (in het geval van wisselspanning is dit 1000 Hz) en we meten U_u en U_i . Vervolgens berekenen we de verhouding $A_u = U_u/U_i$. Hierbij moeten de signalen U_u en U_i voldoende groot zijn, maar anderzijds mag er ook weer geen vervorming ontstaan doordat ze te groot zijn.

Soms worden echter zowel U_u als U_i rechtstreeks gemeten in dB. In dit laatste geval geldt dan dat $A_u \text{ (dB)} = U_u \text{ (dB)} - U_i \text{ (dB)}$.

3.2: De ingangsimpedantie

Een ander belangrijk kenmerk van een versterker is de ingangsweerstand (ingangsimpedantie). Inderdaad, de stroom I_i ondervindt aan de ingang van de versterker een impedantie, ingangsimpedantie Z_i genoemd. Deze Z_i bestaat uit de ingangsweerstand R_i en de ingangscapaciteit C_i . In laagfrequente toepassingen is C_i meestal te verwaarlozen. In Figuur 7.11 ziet u hoe een versterker zich gedraagt en wat de betekenis is van R_i en C_i .

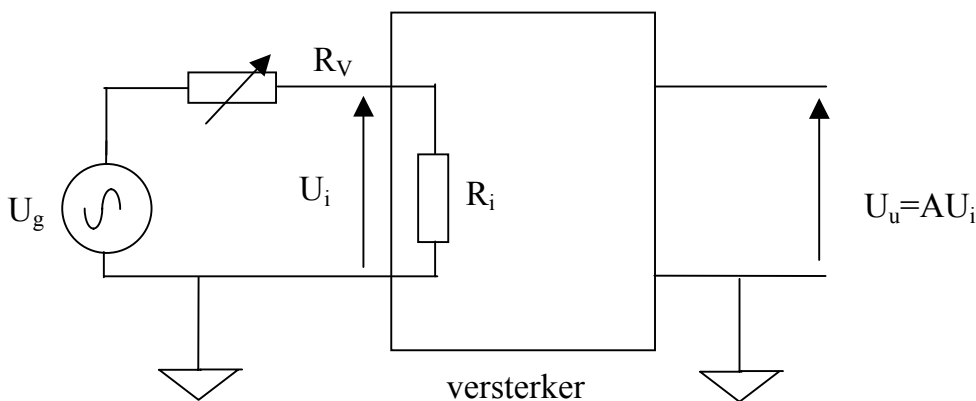
Meestal kunnen we stellen: hoe hoger R_i , hoe beter. Zo zijn onder meer 100 k Ω en 1 M Ω praktische waarden.



Figuur 7.11: In- en uitgangsweerstand bij een versterker

Hoe gaan we nu te werk om de ingangsweerstand R_i te meten?

We leggen een sinusvormig signaal U_g van 1 kHz aan en we meten U_u . We schakelen nu een weerstand R_V in de ingangskring die we zo regelen dat de uitgangsspanning gedaald is tot $U_u/2$. In dit geval is de spanning over R_V gelijk aan de ingangsspanning U_i . Dit betekent dat $R_V = R_i$. De weerstand R_V kunnen we dan nauwkeurig meten zodat we de weerstand R_i eveneens nauwkeurig kennen.



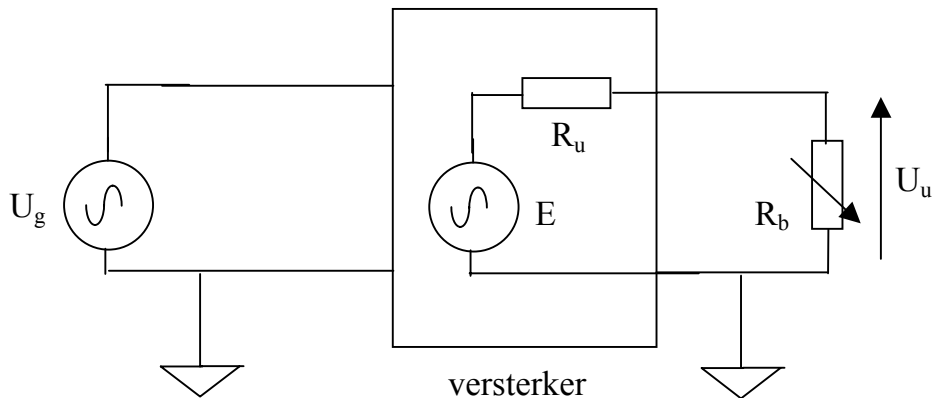
Figuur 7.12: Bepalen ingangsweerstand bij een versterker

3.3: De uitgangsimpedantie

Iedere versterkeruitgang kunnen we beschouwen als een spanningsbron met een emk E en met een inwendige weerstand. Deze inwendige weerstand is de uitgangsweerstand R_u . De uitgangscapaciteit is meestal te verwaarlozen ten opzichte van de uitgangsweerstand. Meestal moet R_u zo laag mogelijk zijn.

Hoe gaan we nu te werk om de uitgangsweerstand R_u te meten?

Eerst meten we E . E is de uitgangsspanning zonder belasting op de uitgang. Vervolgens regelen we de belasting R_b tot de uitgangsspanning tot de helft gedaald is ($E/2$). In dit geval is $R_u = R_b$. We kunnen de weerstand R_b nauwkeurig meten zodat we de weerstand R_u eveneens nauwkeurig kennen.



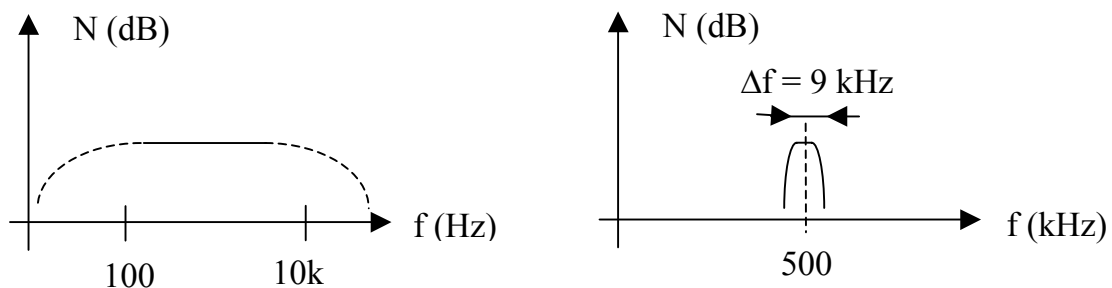
Figuur 7.13: Bepalen uitgangsweerstand bij een versterker

3.4: De frequentiekarakteristiek

Een ander belangrijk kenmerk van een versterker is de frequentiekarakteristiek. Deze frequentiekarakteristiek geeft de versterking in dB bij verschillende frequenties.

Zoals reeds eerder vermeld, onderscheiden we:

- breedbandversterkers, bijvoorbeeld audio-, video-, meet- en operationele versterkers. Deze versterkers hebben een constante versterking over een vrij uitgestrekt frequentiegebied.
- selectieve of smalbandversterkers. Deze versterkers komen vooral voor in de HF-techniek.



Figuur 7.14: Frequentiekarakteristieken van breedbandversterker en smalbandversterker

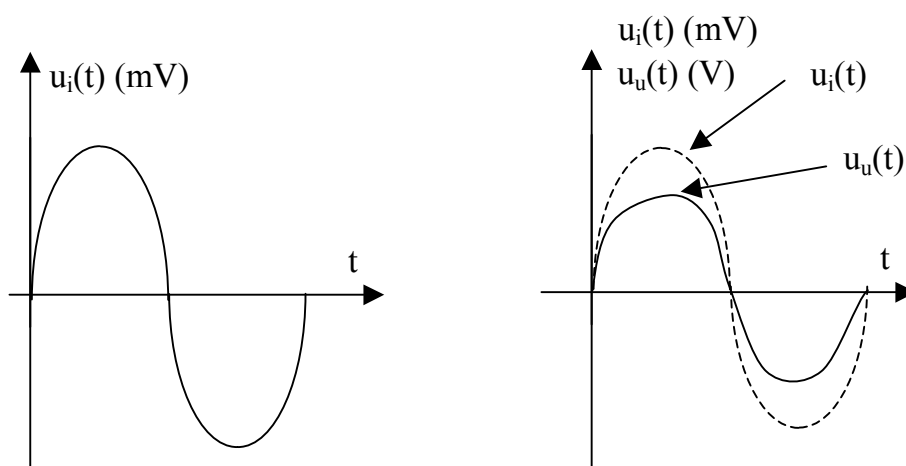
Bovenstaande Figuur 7.14 illustreert dit onderscheid tussen een breedbandversterker en een smalbandversterker.

Om de frequentiekaracteristiek op te nemen, leggen we een sinusvormig signaal U_i aan. We meten U_i en U_u in dB. Hieruit bepalen we N in dB. Dit doen we bij verschillende frequenties.

3.5: De amplitudevervorming

Een ander kenmerk is de amplitudevervorming D . Bij een versterker moet het uitgangssignaal niet alleen groter zijn dan het ingangssignaal, het moet ook precies dezelfde vorm hebben. Dit betekent dat de amplitudevervorming zo klein mogelijk moet zijn. De vervorming of distortie kan gemeten worden met een vervormings- of distortiemeter.

Figuur 7.15 illustreert een versterker die een grote versterkingsfactor heeft wanneer het ingangssignaal klein is. Naarmate de ingangsamplitude toeneemt, daalt de versterkingsfactor.



Figuur 7.15: Uitgangssignaal met vervorming

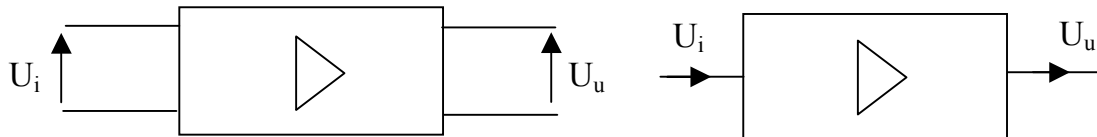
3.6: De faseverschuiving

De faseverschuiving tussen U_u en U_i moet meestal voor alle frequenties dezelfde zijn. Veelal zal deze 0° of 180° zijn. De faseverschuiving kan gemeten worden door U_i en U_u samen zichtbaar te maken op een dubbelkanaaloscilloscoop.

4: Terugkoppeling

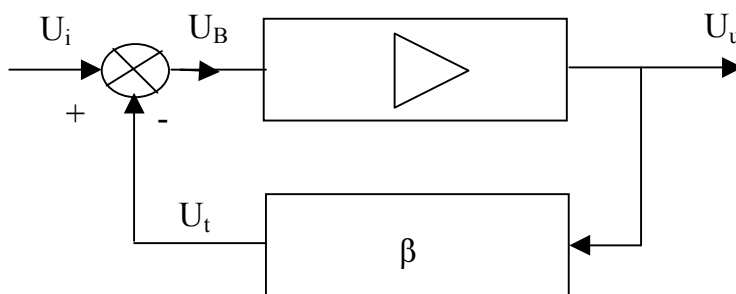
Onder terugkoppeling verstaat men het terugvoeren van een uitgangssignaal naar de ingang van de versterker. Zoals we later zullen aanhalen, moet er onderscheid gemaakt worden tussen een tegenkoppeling en een meekoppeling.

Een versterker kunnen we steeds voorstellen door een rechthoek met driehoek zoals in Figuur 7.9 en Figuur 7.16 weergegeven is. Daar de massaleiding zowel bij de uitgang als bij de ingang voorkomt, wordt ze in het blokschema meestal niet getekend.



Figuur 7.16: Versterker

In de onderstaande figuur hebben we niet enkel een versterker met bijvoorbeeld een versterkingsfactor A , maar de uitgang wordt teruggekoppeld.



Figuur 7.17: Teruggekoppelde versterker

Het is mogelijk dat de uitgangsspanning U_u rechtstreeks teruggekoppeld wordt of dat ze via een netwerk (blok β) teruggekoppeld wordt. In Figuur 7.17 gebeurt de terugkoppeling via een netwerk.

We berekenen nu de totale versterking $A' = U_u/U_i$ van het teruggekoppelde netwerk.

We weten dat $U_B = U_i - U_t$ waarbij $U_t = \beta U_u$ en $U_u = A U_B$.

Dit impliceert dat $U_B = U_i - \beta A U_B$ zodat $U_B (1 + \beta A) = U_i$.

Aangezien $U_u = A U_B$ bekommen we dat $U_u (1 + \beta A)/A = U_i$.

We kunnen bijgevolg besluiten dat $U_u/U_i = A/(1 + \beta A) = A'$.

4.1: Soorten terugkoppelingen

Is het teruggevoerde signaal U_t evenredig met de uitgangsspanning U_u , dan spreken we van spanningsterugkoppeling.

Is het teruggevoerde signaal evenredig met de uitgangsstroom I_u , dan spreken we van stroomterugkoppeling.

De formules welke we daarnet afgeleid hebben zijn algemeen geldig en gelden zowel bij spanningsterugkoppeling als bij stroomterugkoppeling.

Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen geval waarbij βA reëel is en het geval waarbij βA niet reëel is. Bekijken we eerst het geval waarbij βA reëel is.

4.2: Terugkoppeling met reële βA

Een tegenkoppeling wordt bekomen indien βA positief is, dus indien $1 + \beta A$ groter is dan 1. Dit betekent dan ook dat $A' < A$, dus de versterking met terugkoppeling is kleiner dan de versterking zonder terugkoppeling (tegenkoppeling).

Indien $\beta A \gg 1$, dan is $A' \cong 1/\beta$. Dit betekent dat de totale versterkingsfactor bij benadering onafhankelijk is van A en dus enkel afhankelijk is van de terugkoppeling. Dit heeft het voordeel dat de vervorming die eventueel afkomstig is van de versterker A door de tegenkoppeling verminderd zal worden.

Een meekoppeling wordt bekomen indien $0 < 1 + \beta A < 1$ wat betekent dat $-1 < \beta A < 0$. Dit impliceert dat $A' > A$, dus de versterking met terugkoppeling is groter dan de versterking zonder terugkoppeling (meekoppeling).

Op het eerste gezicht lijkt die $A' > A$ een voordeel, doch er zijn ook nadelen aan verbonden. Zo is er meer kans op vervorming, de frequentiekarakteristiek wordt slechter en er is meer gevaar voor storingen.

Indien $\beta A = -1$, dan is A' oneindig groot wat betekent dat zelfs een oneindig klein ingangssignaal een uitgangssignaal geeft. De schakeling brengt zelfs een signaal voort zonder expliciet aangelegd ingangssignaal. We zeggen dat de schakeling oscilleert. Dit fenomeen is meestal ongewenst, doch het is precies het werkingsprincipe van oscillatoren. Inderdaad, een oscillatie die al aanwezig is wordt in stand gehouden.

Het geval waarbij $\beta A < -1$, is net zoals het geval waarbij $\beta A = -1$ relevant bij het begrijpen van oscillatoren. Een teruggekoppelde versterker met $\beta A < -1$ (zie Figuur 7.17) fungeert als een oscillator die aanloopt. Dank zij de aan de ingang aanwezige ruis loopt de oscillator aan en is er een uitgangssignaal wiens amplitude steeds groter wordt.

Meer uitleg over het aanlopen en de algemene regimewerking van oscillatoren vindt u in het laatste hoofdstuk van deze cursus.

Een meekoppeling kan eenvoudig worden veranderd in een tegenkoppeling en omgekeerd. Het volstaat de fase van het teruggekoppelde signaal om te keren.

4.3: Terugkoppeling met niet reële βA

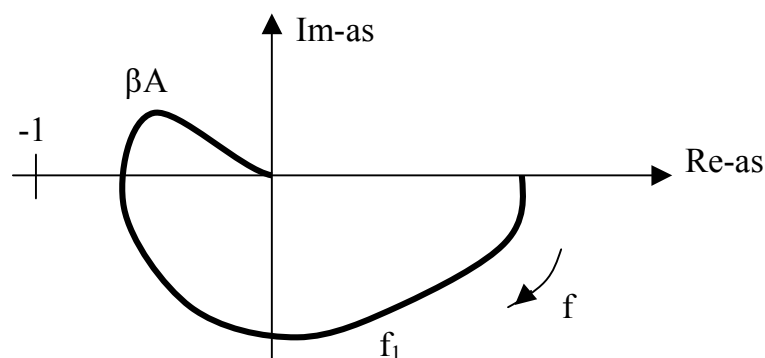
Na het onderscheid te hebben uitgelegd tussen een tegenkoppeling en een meekoppeling, waarbij βA reëel is, bekijken we nu het geval waarbij βA niet reëel is.

Indien in de terugkoppelkring of in de versterker condensatoren of spoelen voorkomen, dan zal βA een complex getal zijn waarvan de waarde afhankelijk is van de frequentie. In het Nyquistdiagramma van Figuur 7.18 is de waarde van βA uitgetekend in functie van de frequentie f . Voor een frequentie $f = 0$ is βA een reëel getal zodat de kromme start op de reële as. De kromme is getekend voor stijgende frequenties en komt uiteindelijk in de oorsprong terecht want voor realistische terugkoppelkringen gaat βA naar nul toe als de frequentie naar oneindig toe gaat.

Indien dit Nyquistdiagramma door het punt -1 gaat of het punt -1 omsluit, zal de versterker oscilleren. Dit laatste is het stabiliteitscriterium van Nyquist.

Indien het Nyquistdiagramma niet door het punt -1 gaat en het punt -1 niet omsluit (zoals het voorbeeld van Figuur 7.18 getekend is), dan betekent dit dat de terugkoppelkring twee belangrijke eigenschappen heeft:

- 1) Indien er geen ingangssignaal aangelegd wordt, dan zal het uitgangssignaal naar nul toe evolueren.
- 2) Indien de terugkoppelkring is rust is m.a.w. er is geen uitgangssignaal en er wordt startende vanuit deze positie een ingangssignaal aangelegd met een begrensde amplitude, dan zal ook het uitgangssignaal begrensd zijn.



Figuur 7.18: Het Nyquistdiagramma

Merk tenslotte op dat door terugkoppeling de versterking van de versterker zelf niet verandert. Het is U_B , m.a.w. het signaal dat aan de ingang van de versterker komt, dat door de terugkoppeling verandert.

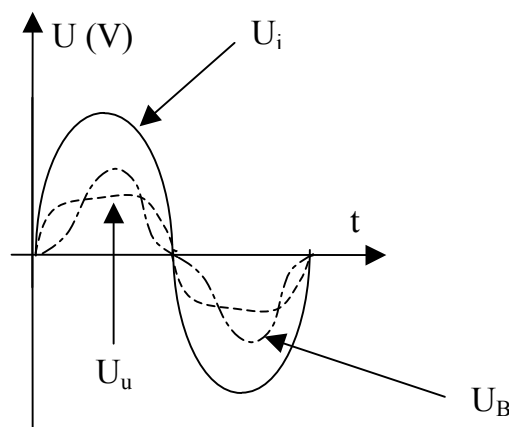
4.4: Invloed van de tegenkoppeling

Het plaatsen van een tegenkoppeling heeft meerdere doelstellingen.

Een eerste doelstelling is er voor zorgen dat A' weinig varieert bij een relatief grote verandering van A ($A' \cong 1/\beta$). Inderdaad, stel bijvoorbeeld dat $A = 1000$ en $\beta = 0,01$. Dit geeft aanleiding tot een $A' = 91$. Indien nu A daalt tot 500, dan wordt $A' = 83$. Dit betekent dat een daling van A van 50 % de totale versterkingsfactor A' slechts 8,7 % doet dalen. Dus dank zij de tegenkoppeling is de (totale) versterkingsfactor veel meer constant.

Een tweede doelstelling is het verminderen van de amplitudevervorming. Passen we een sinusvormig signaal U_i op de ingang toe, dan zal de versterker dit signaal versterken. Veelal veroorzaakt de versterker echter een zekere vervorming. Ten gevolge van deze vervorming is het uitgangssignaal niet meer sinusvormig.

In Figuur 7.15 in Paragraaf 3.5 is het ingangssignaal en het uitgangssignaal getekend (voor U_i en U_u is een verschillende schaal gebruikt) van een versterker die niet voorzien is van een extra terugkoppeling. De versterker gedraagt zich precies alsof de versterking groot is wanneer het signaal nog klein is (rondom 0) en anderzijds alsof de versterking kleiner wordt naarmate de amplitude toeneemt.



Figuur 7.19: Uitgangssignaal met vervorming

Zonder terugkoppeling in rekening te brengen zorgt een sinusvormige U_i (in volle lijn getekend in Figuur 7.19) voor een afgeplatte en vervormde U_u (in streeplijn getekend in Figuur 7.19). Koppelen we nu dit vervormde signaal $U_t = \beta U_u$ terug, dan krijgen we

aan de ingang van de versterker het verschil tussen U_i en U_t . Dit signaal $U_B = U_i - U_t$ is ook vervormd. Het signaal U_B is in punt-streep-lijn getekend in Figuur 7.19.

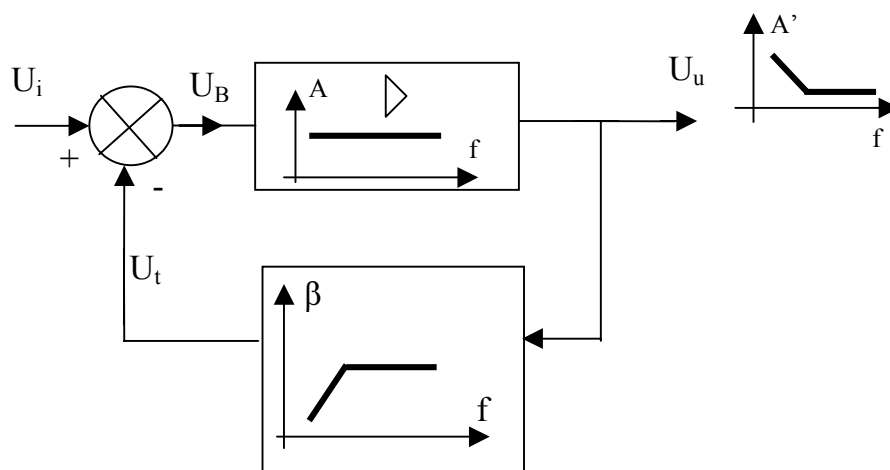
De vervorming van U_B is zodanig dat het signaal in het begin zeer klein is (rondom 0) wanneer de versterking groot is. Het signaal neemt meer dan sinusvormig toe wat daar de kleinere versterking grotendeels compenseert. Dit alles resulteert in een uitgangsspanning die beter een sinus benadert en die dus minder vervormd is.

Er zij wel opgemerkt dat enkel de vervorming in de versterker zelf door deze terugkoppeling vermindert. Passen we aan de ingang een vervormd signaal U_i toe, dan zal deze vervorming door de tegenkoppeling niet verminderen.

Een derde doelstelling is het lineariseren van de frequentiecarakteristiek. Indien βA voldoende groot is, dan is $A' = A/(1 + \beta A)$ zodat bij benadering $A' = 1/\beta$. De wijzigingen in de grootte van A ten gevolge van diens frequentieafhankelijkheid zijn veel minder zichtbaar in A' . De frequentiecarakteristiek van A' is dus veel vlakker dan deze van A .

Een vierde doelstelling kan het beïnvloeden van de frequentiecarakteristiek zijn. Men kan door enkel in te werken op de tegenkoppelkring aan de frequentiecarakteristiek van de volledige schakeling een ander verloop geven. Indien de frequentiecarakteristiek van A lineair is, dan is het verloop van het geheel (A') precies het omgekeerde van dat van β (dit wel met de veronderstelling dat $\beta A \gg 1$).

Dit laatste betekent (bij wijze van voorbeeld) meer concreet dat A' integrerend is indien β differentiërend is of dat A' differentiërend is indien β integrerend is.



Figuur 7.20: Frequentieafhankelijke tegenkoppeling

In Figuur 7.20 is β erg laag voor lage frequenties. β stijgt bij stijgende frequentie. Vanaf een zekere frequentie blijft β constant. We nemen steeds aan dat $\beta A \gg 1$ zodat

$A' \cong 1/\beta$. Voor lage frequenties is A' hoog doch bij stijgende frequentie daalt A' . Vanaf een zekere frequentie blijft A' constant.

Een vijfde doelstelling van een tegenkoppeling is het beïnvloeden van de ingangsweerstand en de uitgangsweerstand van de teruggekoppelde versterker. Aangezien dit flink wat uitleg vereist, behandelen we dit in een afzonderlijke paragraaf.

5: Ingangsweerstand en uitgangsweerstand

In de huidige paragraaf zullen we nagaan hoe de ingangsweerstand en de uitgangsweerstand van een versterker beïnvloed wordt door het bijplaatsen van een tegenkoppeling. Hierbij zullen we onderscheid maken tussen spanningstegenkoppeling en stroomtegenkoppeling. We zullen ook onderscheid maken tussen een terugkoppeling in serie met het ingangssignaal en een terugkoppeling in parallel met het ingangssignaal.

5.1: Spanningstegenkoppeling in serie met het ingangssignaal

Op de onderstaande schakeling in Figuur 7.21 is een spanningstegenkoppeling in serie met het signaal U_B weergegeven.

Bestuderen we eerst de invloed van de spanningstegenkoppeling op de ingangsweerstand.

Zonder tegenkoppeling (dus met $R_2 = 0 \Omega$) is $U_B = U_i$. De ingangsweerstand van de totale schakeling $R_{i \text{ tot}} = R_i$. Hierbij is R_i de ingangsweerstand van enkel de spanningsversterker.

Indien er een tegenkoppeling aanwezig is zoals weergegeven in Figuur 7.21 (met R_1 en R_2 verschillend van nul), dan geldt dat $U_B = U_i - U_t < U_i$. Hierbij is $U_t = \beta U_u$ waarbij $\beta = R_2/(R_1 + R_2)$. Dit laatste wel in de veronderstelling dat R_i voldoende groot is zodat er bijna geen stroom door R_i vloeit, want slechts dan is de stroom die door R_1 en R_2 vloeit zo goed als gelijk. In dit geval geldt effectief dat $U_t = U_u R_2/(R_1 + R_2)$.

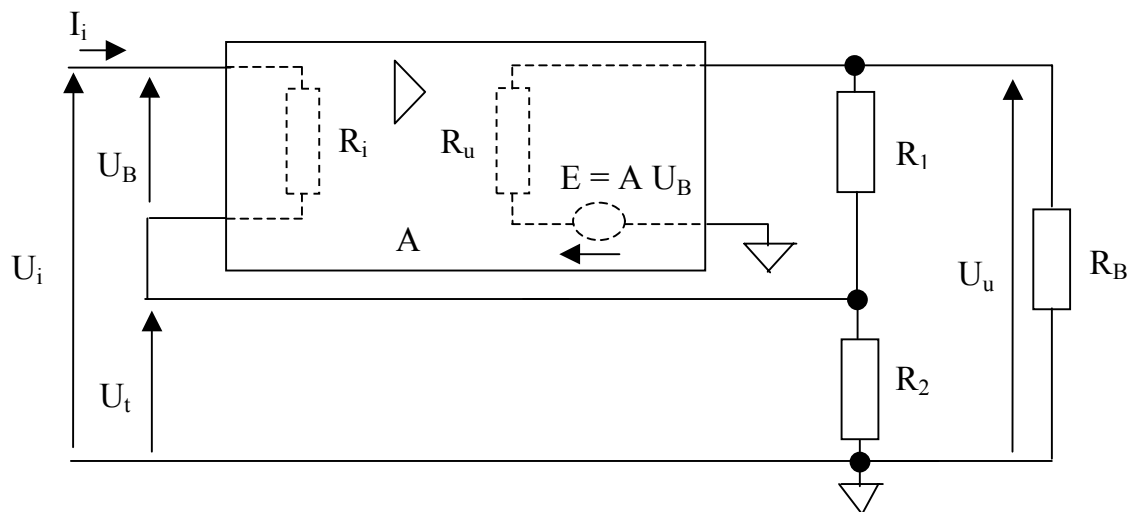
We gaan er ook van uit dat ofwel R_u voldoende klein is of dat de opgenomen stroom voldoende klein is zodat de spanningsval over R_u te verwaarlozen is. In dit laatste geval is inderdaad $U_u = A U_B$.

Betreffende de ingangsweerstand $R_{i \text{ tot}}$ geldt dat:

$$R_{i \text{ tot}} = U_i/I_i = (U_B + U_t)/I_i = (U_B + \beta A U_B)/I_i = (1 + \beta A) (U_B/I_i).$$

Aangezien $U_B/I_i = R_i$, bekomen we dat

$$R_{i \text{ tot}} = R_i (1 + \beta A).$$



Figuur 7.21: Spanningstegenkoppeling in serie met hetingangssignaal

Aangezien dus $R_{i \text{ tot}} = R_i (1 + \beta A)$ is ten gevolge van de serietegenkoppeling de ingangsweerstand een factor $(1 + \beta A)$ hoger (want $\beta A > 0$).

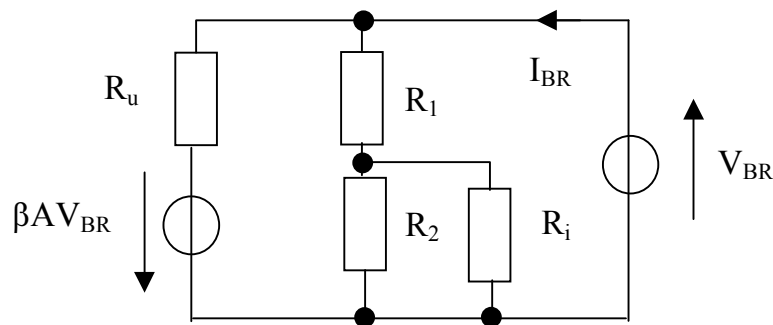
Bestuderen we nu de invloed van de spanningstegenkoppeling op de uitgangsweerstand.

Indien we R_B verkleinen, zal de uitgangsstroom I_u stijgen en zal dus ook $U_u = E - R_u I_u$ dalen. Daardoor zal U_t dalen, wat een stijging van U_B impliceert. De stijging van U_B is er voor verantwoordelijk dat ook $U_u = A U_B$ terug stijgt. Dit alles betekent dat de daling van de uitgangsspanning U_u sterk verminderd wordt.

Een verandering van R_B heeft nu weinig invloed op U_u en dit kan alleen als $R_{u \text{ tot}}$ klein is. Dit betekent dus dat de spanningstegenkoppeling de uitgangsweerstand R_u kleiner maakt. De uitgang benadert meer de ideale spanningsbron.

Het lager worden van R_u zullen we nu bewijzen. In overeenstemming met de eerdere notaties, noemen de uitgangsweerstand van de teruggekoppelde versterker $R_{u \text{ tot}}$ en de uitgangsweerstand van de niet teruggekoppelde versterker noemen we R_u .

We bepalen de totale uitgangsweerstand $R_{u \text{ tot}}$ door de belastingsweerstand R_B te vervangen door een ideale spanningsbron met waarde V_{BR} . De onafhankelijke bronnen die aanwezig zijn worden nul gesteld. Hier betekent dit dat de ingangsspanning U_i nul gesteld wordt. Dit leidt tot de onderstaande Figuur 7.22.

Figuur 7.22: Bepalen $R_{u \text{ tot}}$

Teneinde het rekenwerk te vereenvoudigen gaan we er van uit dat R_i voldoende groot is waardoor de stroom welke erdoor vloeit verwaarloosbaar klein is. Dit betekent dat R_i gerust weggelaten kan worden in Figuur 7.22.

De spanningsbron $\beta A V_{BR}$ is de emk E uit Figuur 7.21.

Via de superpositiemethode bepalen we de stroom I_{BR} . Hierbij gaan we er van uit dat de weerstanden R_1 en R_2 voldoende groot zijn ten opzichte van R_u zodat hun invloed verwaarloosd kan worden. Dit betekent dat $I_{BR} = ((1 + \beta A) V_{BR}) / R_u$.

Op die manier bekommen we dat $R_{u \text{ tot}} = V_{BR} / I_{BR} = R_u / (1 + \beta A)$. Dit betekent dat zoals verwacht $R_{u \text{ tot}} < R_u$.

5.2: Cijfervoorbeeld

We geven hier een cijfervoorbeeld die de resultaten van een spanningstegenkoppeling in serie met het ingangssignaal illustreert.

Gegeven is een versterker met een versterkingsfactor $A = 1000$. De versterker heeft een ingangsweerstand $R_i = 20 \text{ k}\Omega$ en een uitgangsweerstand $R_u = 10 \text{ }\Omega$. De weerstanden $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ en $R_2 = 100 \text{ }\Omega$ zijn geschakeld zoals weergegeven in Figuur 7.21.

Gevraagd is de grootte van de totale versterkingsfactor A' , de totale ingangsweerstand $R_{i \text{ tot}}$ en de totale uitgangsweerstand $R_{u \text{ tot}}$.

Oplossing:

De terugkoppelfactor $\beta = R_2 / (R_1 + R_2) \cong 0.01$.

De rondgaande versterking is $\beta A = 10$. Dit betekent dat de totale versterkingsfactor met terugkoppeling gelijk is aan $A' = A / (1 + \beta A) = 91$.

De ingangsweerstand $R_{i \text{ tot}} = R_i(1 + \beta A) = 220 \text{ k}\Omega$.

De uitgangsweerstand $R_{u \text{ tot}} = R_u/(1 + \beta A) = 0,91 \text{ }\Omega$.

We kunnen besluiten dat de versterking gedaald is van 1000 tot 91. De ingangsweerstand is sterk toegenomen van $20 \text{ k}\Omega$ tot $220 \text{ k}\Omega$. De uitgangsweerstand van de schakeling is gedaald van $10 \text{ }\Omega$ tot $0,91\Omega$.

5.3: Stroomtegenkoppeling in serie met het ingangssignaal

Op de onderstaande schakeling in Figuur 7.23 is een stroomtegenkoppeling in serie met het signaal U_B weergegeven.

Bestuderen we eerst de invloed van de stroomtegenkoppeling op de ingangsweerstand.

Indien we er van uit gaan dat R_i voldoende groot is, dan is $I_u \cong U_u/(R_B + R_2)$. De spanning $U_t = \beta U_u$ waarbij $\beta = R_2/(R_B + R_2)$. Ten gevolge van de tegenkoppeling is $U_B = U_i - U_t < U_i$.

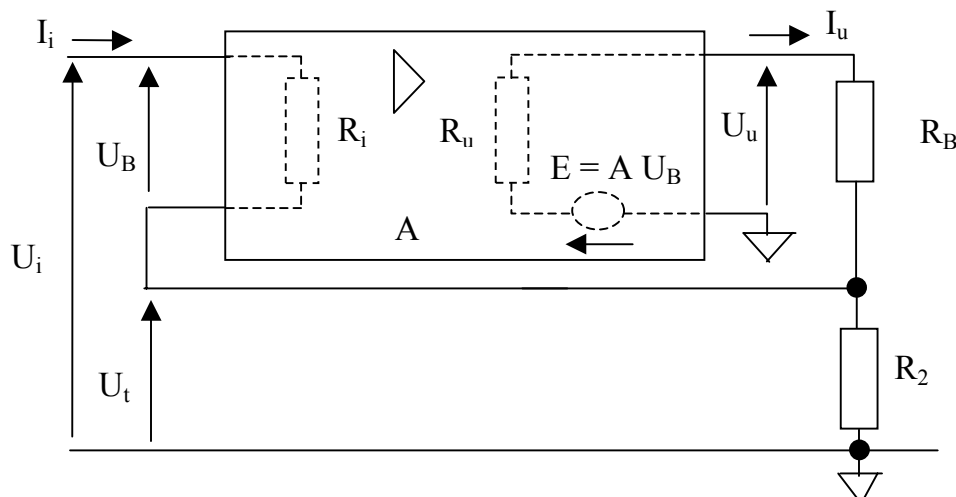
We gaan er ook van uit dat R_u voldoende klein is of dat de opgenomen stroom voldoende klein is zodat de spanningsval over R_u te verwaarlozen is. In dit laatste geval is inderdaad $U_u = A U_B$.

Betreffende de ingangsweerstand $R_{i \text{ tot}}$ geldt dat:

$$R_{i \text{ tot}} = U_i/I_i = (U_B + U_t)/I_i = (U_B + \beta A U_B)/I_i = (1 + \beta A) (U_B/I_i).$$

Aangezien $U_B/I_i = R_i$, bekomen we dat

$$R_{i \text{ tot}} = R_i (1 + \beta A).$$



Figuur 7.23: Stroomtegenkoppeling in serie met het ingangssignaal

Aangezien $R_{i\text{ tot}} = R_i (1 + \beta A)$, is ten gevolge van de serietegenkoppeling de ingangsweerstand een factor $(1 + \beta A)$ hoger (want $\beta A > 0$).

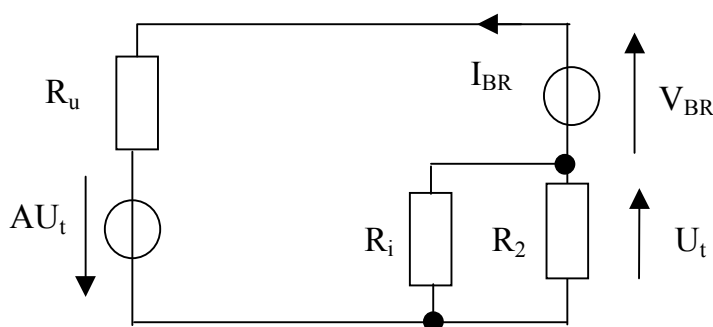
Bestuderen we nu de invloed van de stroomtegenkoppeling op de uitgangsweerstand.

Indien we R_B verkleinen, dan zal I_u stijgen. We gaan ervan uit dat R_i voldoende groot is zodat de stromen door R_B en R_2 erg weinig verschillen. Hieruit volgt dan dat de spanning $U_t = R_2 I_u = U_u R_2 / (R_2 + R_B)$ stijgt. Dit impliceert dat $U_B = U_i - U_t$ daalt. Mits verwaarlozing van R_u , daalt $U_u = A U_B$. Dit impliceert een daling van I_u die de originele stijging ten dele compenseert.

Dit alles betekent dat I_u niet zo sterk stijgt als zonder tegenkoppeling. Een verandering van R_B heeft hier maar weinig invloed op I_u en dat kan alleen indien de uitgangsweerstand R_u groter is dan zonder tegenkoppeling.

In feite betekent dit laatste dat de uitgang van de versterker zich meer als een stroombron en minder als een spanningsbron gedraagt ten gevolge van deze stroomtegenkoppeling van Figuur 7.23.

We bepalen de totale uitgangsweerstand $R_{u\text{ tot}}$ door de belastingsweerstand R_B te vervangen door een ideale spanningsbron met waarde V_{BR} . De onafhankelijke bronnen die aanwezig zijn worden nul gesteld. Hier betekent dit dat deingangsspanning U_i nul gesteld wordt. Dit leidt tot de onderstaande Figuur 7.24.



Figuur 7.24: Bepalen $R_{u\text{ tot}}$

Teneinde het rekenwerk te vereenvoudigen gaan we er van uit dat R_i voldoende groot is waardoor de stroom welke er door vloeit verwaarloosbaar klein is. Dit betekent dat R_i gerust weggelaten kan worden in Figuur 7.24.

De spanningsbron $\beta A U_t$ is de emk E uit Figuur 7.23.

Via de spanningswet van Kirchoff bepalen we de stroom I_{BR} . Hierbij houden we er rekening mee dat $U_t = -R_2 I_{BR}$. Dit betekent dat $I_{BR} = V_{BR}/(R_u + (A + 1)R_2)$.

Op die manier bekomen we dat $R_{u\text{ tot}} = V_{BR}/I_{BR} = R_u + (A + 1)R_2$. Dit betekent dat zoals verwacht $R_{u\text{ tot}} > R_u$.

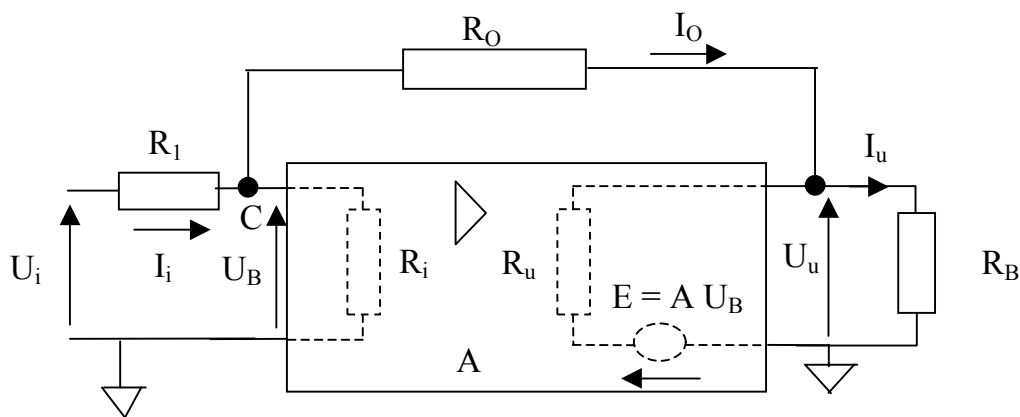
5.4: Spanningstegenkoppeling in parallel met het ingangssignaal

Op de onderstaande schakeling in Figuur 7.25 is een spanningstegenkoppeling in parallel met het ingangssignaal U_B weergegeven.

De versterker zelf heeft een versterkingsfactor A . De versterkingsfactor van de tegengekoppelde versterker noemen we A' . Hoe groot deze A' is, zullen we later afleiden.

Het is belangrijk op te merken dat in een schakeling zoals in Figuur 7.25 de versterkingsfactor A negatief is. Inderdaad, enkel met $A < 0$ is er een tegenkoppeling en geen meekoppeling.

Stel dat (bij een positieve A) om één of andere reden de uitgangsspanning U_u stijgt, dan impliceert dat een stijging van U_B welke omwille van de positieve A de spanning U_u verder doet stijgen. Dit betekent dat uiteindelijk de uitgangsspanning vastloopt op de voedingsspanning. Dit laatste moet uiteraard vermeden worden zodat een $A < 0$ effectief vereist is.



Figuur 7.25: Spanningstegenkoppeling in parallel met de ingang

Bestuderen we eerst de invloed van de spanningstegenkoppeling op de ingangsweerstand.

Teneinde de ingangsweerstand van de totale schakeling te kunnen berekenen, zoeken we eerst de waarde van de stroom I_i . De stroom $I_i = (U_i - U_B)/R_1$. Indien R_u voldoende klein is, dan is $U_u = A U_B$. We weten verder ook dat $U_u = A' U_i$.

Indien we al die uitdrukkingen combineren, bekommen we dat:

$$I_i = (U_i - U_B)/R_1 = (U_i - (U_u/A))/R_1 = (U_i - (A'U_i/A))/R_1 = (1 - A'/A)U_i/R_1.$$

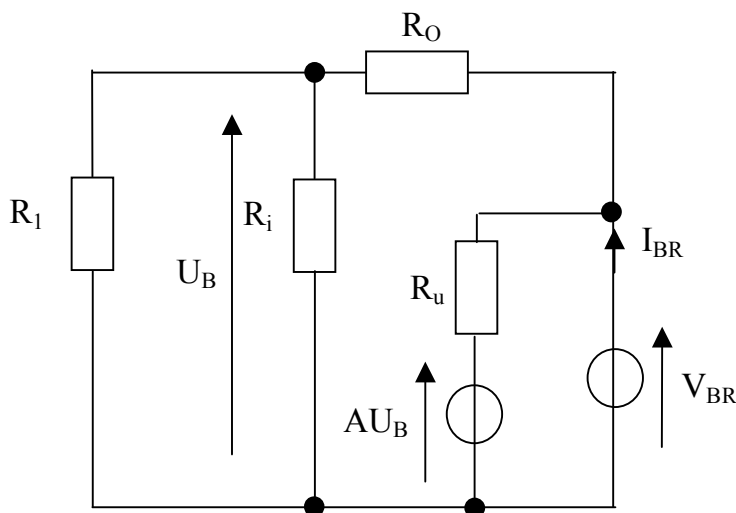
Dit betekent dat de ingangsweerstand van de totale schakeling:

$$R_{i \text{ tot}} = U_i/I_i = R_1/(1 - A'/A).$$

Nu is zowel A als A' negatief zodat A'/A positief is. Zoals later aangetoond zal worden, is meestal $A' \ll A$ zodat $R_{i \text{ tot}}$ net iets groter is dan R_1 . Aangezien in realiteit meestal geldt dat $A'/A \ll 1$ is $R_{i \text{ tot}} \cong R_1$.

Naast de totale ingangsweerstand $R_{i \text{ tot}}$ zijn we ook hier geïnteresseerd in de totale uitgangsweerstand $R_{u \text{ tot}}$.

Het bepalen van de $R_{u \text{ tot}}$ gebeurt door de belastingsweerstand R_B te vervangen door een ideale spanningsbron met waarde V_{BR} . De onafhankelijke bronnen die aanwezig zijn worden nul gesteld. Hier betekent dit dat de ingangsspanning U_i nul gesteld wordt.



Figuur 7.26: Bepalen $R_{u \text{ tot}}$

In de praktijk is meestal $R_i \gg R_1$ zodat $U_B = R_1 V_{BR} / (R_1 + R_O)$. Aangezien meestal zowel R_1 als R_O flink groter zijn dan R_u is de stroom door R_O te verwaarlozen ten opzichte van de stroom door R_u . Bij benadering vloeit dus de stroom I_{BR} door R_u .

Steunende op de spanningswet van Kirchhoff geldt dat $V_{BR} = R_u I_{BR} + A U_B$. Aangezien ook geldt dat $U_B = R_1 V_{BR} / (R_1 + R_O) = \beta V_{BR}$, bekommen we dat nu $R_{u \text{ tot}} = V_{BR} / I_{BR} = R_u / (1 - \beta A)$ waarbij $\beta = R_1 / (R_1 + R_O)$. Hou wel rekening met de onderstelling dat $A < 0$.

De spanningstegenkoppeling zorgt voor een $R_{u\text{ tot}} = R_u (1 - \beta A) < R_u$. De spanningstegenkoppeling zorgt er voor dat de uitgangsspanning minder varieert indien de belasting (en dus I_u) verandert. De uitgang van de versterker zal de ideale spanningsbron beter benaderen. Bemerkt dat een gelijkaardige conclusie getrokken kon worden bij de spanningstegenkoppeling van Paragraaf 5.1.

Nu we al het effect van de spanningstegenkoppeling kennen op de ingangsweerstand en de uitgangsweerstand, willen we weten wat zijn invloed is op de totale versterkingsfactor A' .

Indien $|A'| \ll |A|$, volgt uit de eerder afgeleide formules dat $R_{i\text{ tot}} \cong R_1$. De spanning U_B wordt dan te verwaarlozen klein en de stroom die in de versterker zelf vloeit wordt ook erg klein. Dit betekent dat het punt C in Figuur 7.25 schijnbaar op massapotentiaal ligt. De stroom I_O is ongeveer gelijk aan I_i . Steunende op de spanningswet van Kirchhoff is $U_u = -R_O I_O$.

De versterking van het geheel wordt dan

$$A' = U_u / U_i = - (I_O R_O) / (I_i R_1) = - R_O / R_1.$$

Uit deze formule volgt duidelijk dat niet enkel $A < 0$, maar dat ook $A' < 0$.

De resultaten bekomen in de huidige paragraaf zijn van groot belang bij de terugkoppeling van een operationele versterker, een opamp. Inderdaad, bij een dergelijke opamp is $A < 0$ en is $|A|$ groot zodat ook geldt dat $|A'| \ll |A|$.

Voor een verdere bespreking van opampschakelingen, verwijzen we echter naar de cursus elektronica die in het tweede semester van de tweede kandidatuur gedoceerd wordt.

5.5: Cijfervoorbeeld

Gegeven is een versterker met een versterkingsfactor $A = -1000$. De versterker heeft een ingangsweerstand $R_i = 200\text{ k}\Omega$ en een uitgangsweerstand $R_u = 10\text{ }\Omega$. De weerstanden $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ en $R_O = 1\text{ M}\Omega$ zijn geschakeld zoals weergegeven in Figuur 7.25.

Gevraagd is de grootte van de totale versterkingsfactor A' , de totale ingangsweerstand $R_{i\text{ tot}}$ en de totale uitgangsweerstand $R_{u\text{ tot}}$.

Oplossing:

De terugkoppelfactor $\beta = R_1 / (R_O + R_1) \cong 0.01$.

De totale versterkingsfactor met terugkoppeling is gelijk aan $A' = -R_O/R_1 = -100$.

De ingangsweerstand $R_{i\text{ tot}} = R_1/(1 - (A'/A)) = 11\text{ k}\Omega$.

De uitgangsweerstand $R_{u\text{ tot}} = R_u/(1 - \beta A) = 0,91\text{ }\Omega$.

We kunnen besluiten dat de versterking (in absolute waarde) gedaald is van 1000 tot 100. De ingangsweerstand is sterk gedaald van 200 k Ω tot 11 k Ω ten gevolge van de tegenkoppeling in parallel. Ten gevolge van diezelfde spanningstegenkoppeling is de uitgangsweerstand van de schakeling is gedaald van 10 Ω tot 0,91 Ω .

5.6: Stroomtegenkoppeling in parallel met het ingangssignaal

Aangezien deze schakeling erg weinig voorkomt, gaan we er hier niet verder op in.

5.7: Samenvatting van de resultaten

Bij het bekijken van de resultaten in Paragraaf 5.1, Paragraaf 5.3, Paragraaf 5.4 en Paragraaf 5.6 blijkt dat een spanningstegenkoppeling zorgt voor een daling van de uitgangsweerstand $R_{u\text{ tot}}$. Een stroomtegenkoppeling zorgt voor een stijging van $R_{u\text{ tot}}$.

Een spanningstegenkoppeling zorgt er voor dat de uitgang van de versterker zich meer als een spanningsbron zal gedragen. Een stroomtegenkoppeling zorgt er voor dat de uitgang van de versterker zich meer als een stroombron zal gedragen.

Een tegenkoppeling in serie zorgt er voor dat de ingangsweerstand $R_{i\text{ tot}}$ stijgt en een tegenkoppeling in parallel zorgt er voor dat de ingangsweerstand daalt.

Deze resultaten zijn samengevat in de onderstaande tabel.

	Tegenkoppeling in serie: $R_{i\text{ tot}}$ stijgt	Tegenkoppeling in parallel: $R_{i\text{ tot}}$ daalt
Spanningstegenkoppeling: $R_{u\text{ tot}}$ daalt	$R_{i\text{ tot}}$ stijgt $R_{u\text{ tot}}$ daalt	$R_{i\text{ tot}}$ daalt $R_{u\text{ tot}}$ daalt
Stroomtegenkoppeling: $R_{u\text{ tot}}$ stijgt	$R_{i\text{ tot}}$ stijgt $R_{u\text{ tot}}$ stijgt	$R_{i\text{ tot}}$ daalt $R_{u\text{ tot}}$ stijgt