

Elektronica

Gilles Callebaut

1.1 Intrinsieke (zuivere) halfgeleiders

Een **halfgeleider** is een element met **4 valentie elektronen**. (Si en Ge)

Ze ordenen zich dus volgens een **kristalrooster**.

De **omgevingstemperatuur** zorgt ervoor dat de **atomen gaan trillen**.

Deze trillingen zorgen ervoor dat er een e^- (**geleidingselektron**) **loskomt** uit zijn covalente binding.

Waar het e^- oorspronkelijk zat blijft nu nog een **gat over**, die zich gedraagt als een positieve lading.

Soms komt een elektron in de buurt van een gat, wordt erdoor aangetrokken en verdwijnt in het gat. Dit noemt men **recombinatie**.

1.2 Extrinsic (verontreinigde) Halfgeleider

Om een aantal ladingsdragers te verhogen worden halfgeleiders verontreinigd met vreemde elementen.

VERONTREINIGEN MET 5-WAARDIGE ELEMENTEN (P OF AS)

Het 5^{de} elektron wordt **niet vastgehouden** in een covalente binding, wat men het **geleidingselektron** noemt.

Het 5-waardig atoom noemt men **donors**. De **plaats waar een donor gestationeerd zit is positief geladen**.

De **concentratie van vreemde elementen** bepaalt dus de **geleidbaarheid** van een extrinsieke halfgeleider.

Omdat we met donors zitten spreken we van **n-halfgeleiders** (elektronen afgeven).

Door **thermische generatie** worden in dergelijke halfgeleiders ook **elektron-gatparen** gegenereerd.

In een **n-materiaal** zijn de **gaten** de minderheidsladingsdragers (**mld**) en de **elektronen** de meerderheidsladingsdragers (**MLD**).

p = conc. bewegende pos. ladingen

$$\begin{cases} p = g^+ \\ n = N_d + e^- \end{cases}$$

n = conc. bewegende neg. ladingen met N_d (aantal donoren)

VERONTREINIGEN MET 3-WAARDIGE ELEMENTEN

Op de plaats waar die partner normaal zou zitten komt nu een gat voor.

Het 3-waardig atoom noemt men **acceptoren**. De **plaats waar een acceptor gestationeerd zit is negatief geladen**.

De concentratie van vreemde elementen bepaalt dus de geleidbaarheid van een extrinsieke halfgeleider.

Omdat we met acceptoren zitten spreken we van **p-halfgeleiders** (elektronen opnemen).

Door **thermische generatie** worden in dergelijke halfgeleiders ook **elektron-gatparen** gegenereerd.

In een **p-materiaal** zijn de **elektronen** de minderheidsladingsdragers (**mld**) en de **gaten** de meerderheidsladingsdragers (**MLD**).

p = conc. bewegende pos. ladingen met N_a (aantal acceptoren)

$$\begin{cases} p = g^+ + N_a \\ n = e^- \end{cases}$$

n = conc. bewegende neg. ladingen

1.3 Stromen in Halfgeleiders

DRIFTSTROMEN IN INTRINSIEKE HALFGELEIDERS

De **concentratie** aan **gaten** en **elektronen** zijn hier **dezelfde**.

Wanneer men tussen de uiteinden van het kristal een elektrische potentiaal verschil aanlegt dan ontstaat er een elektrostatisch veld en een (aangrijpende) kracht.

Onder invloed van deze kracht zullen de ladingsdragers een geordende beweging volgen met een gemiddelde driftsnelheid v_{dp} :

$$E = \frac{U}{L} \rightarrow F = e \frac{U}{L}$$

$$v_{dp} = \underbrace{\mu_p}_{\text{mobiliteit}} \cdot E$$

$$I_p = p \cdot A \cdot v_{dp} \rightarrow I_p = p \cdot A \cdot \mu_p \cdot e \cdot \frac{U}{L}$$

$$I = I_n + I_p = 2I_{n_i} = n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot e \cdot \frac{A}{L} \cdot U$$

$$R = \frac{L}{n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot e \cdot A}$$

Dus als de temp. stijgt dan stijgt n_i en dus de weerstand zal verlagen.

DRIFTSTROMEN IN EXCENTRIEKE HALFGELEIDERS

Idem zoals bij intrinsieke halfgeleiders enkel is daarbij $n \neq p$.

DIFFUSIESTROMEN IN HALFGELEIDERS

Wanneer in een materiaal een **conc.gradiënt** aanwezig is, dan zullen de **ladingsdrager gaan bewegen van hoge naar lage conc.**

Er ontstaan netto gatenbewegingen van het gebied met hoge conc. naar lage, met de daarbij horende **diffusiestroom**.

De grootte van de stroom is afhankelijk van de concentratiegradiënt en de temperatuur.

1.4 De PN junktie

DE JUNKTIEVORMING

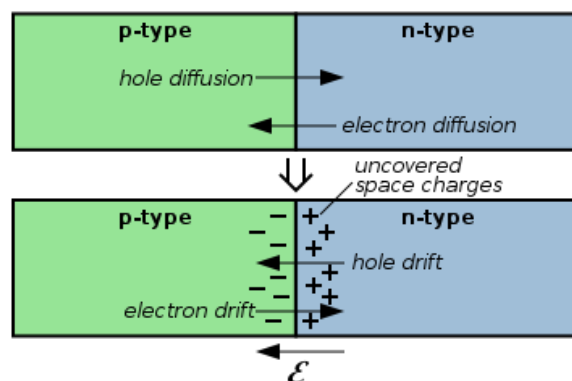
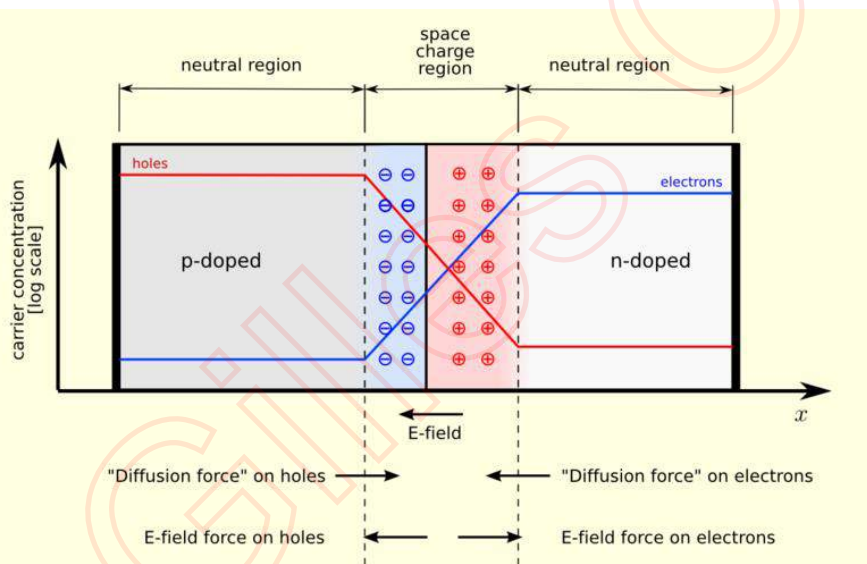
We voegen een n en p kristal bij elkaar.

Over de junktie ontstaat dus een **grote concentratiegradiënt** waardoor er een **diffusiestroom van gaten** zal ontstaan van het **p naar het n** gebied.

De **gaten** komen in het **n-gebied** terecht, daar zijn ze de mld en zullen door **recombinatie** snel verwijden.

Door dit diffusieverschijnsel zal het **p-gebied positieve ladingen verliezen** terwijl het **n-gebied geleidingselektronen** verliest.

Dit type transport blijft niet duren door het bestaan van ionen. Er ontstaat een **uitputtingslaag** (depletion layer)



De **netto-stroom** doorheen een ongepolariseerde junktie moet **nul** zijn. Daarom moeten de **diffusiestroom van MLD** en de **driftstroom van mld** elkaar **perfect compenseren** en dit bij elke temperatuur.

Temperatuur stijging zorgt voor stijging mld (driftsnelheid) waardoor de uitputtingslaag smaller wordt en zo de diffusiestroom ook kan stijgen.

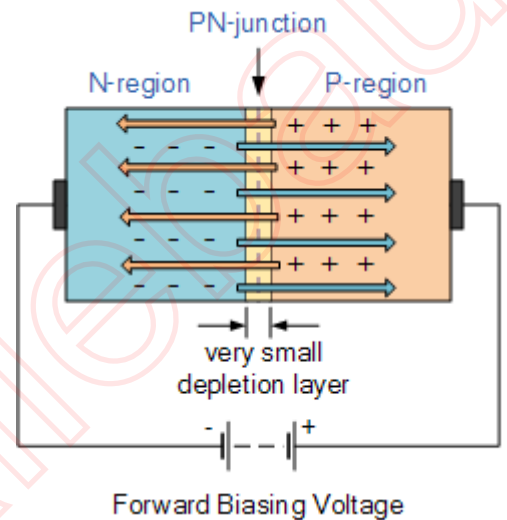
DE JUNKTIE GEPOLARISEERD IN DE DOORLAATZIN

De **positieve klem** van de spanningsbron wordt verbonden aan het **p-deel** van het kristal terwijl de **negatieve klem** aan het **n-deel** ligt.

De **positieve gaten** van het **p-gebied** zullen **afgestoten** worden door de bron terwijl **hetzelfde** gebeurt bij de **elektronen**.

De **MLD** zullen dus de neiging hebben om **dichter tot de junktie** te naderen. → **Verlagen junktie-barriere**.

De junktie-barriere kan zodanig verlagen dat **zeer veel MLD** er **over geraken** en de **difussiestromen** door de junktie **hoge waarden** bereiken.



DE JUNKTIE GEPOLARISEERD IN DE DOORLAATZIN

Nu wordt de spanningsbron anders gepolariseerd (**inverse polarisatie**).

De **gaten** in het **p-gebied** zullen nu **aangetrokken** worden door de **n-klem** van de bron, hetzelfde voor het n-gebied en de elektronen door de positieve klem van de bron.

De **MLD** zullen dus de neiging krijgen om zich **verder te verwijderen van de junktie**. → **Verhogen junktie-barriere**.

Deze is nu zodanig hoog dat er praktisch **geen MLD** erover **geraken**.

Op de mld heeft de polarisatie in de sperzin een versnellend effect.

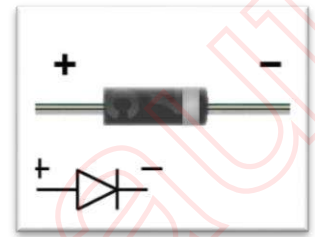
De sperstroom is praktisch onafhankelijk van de sperspanning, men spreekt dan van een verzadigingsstroom. Die zeer sterk temperatuur afhankelijk is door de mld.

2.1 De component

De diode is een belangrijke tweeklems passieve niet-lineaire component.

SCHEMATISCH SYMBOOL

De p-zijde noemen we de anode, de n-zijde de kathode.

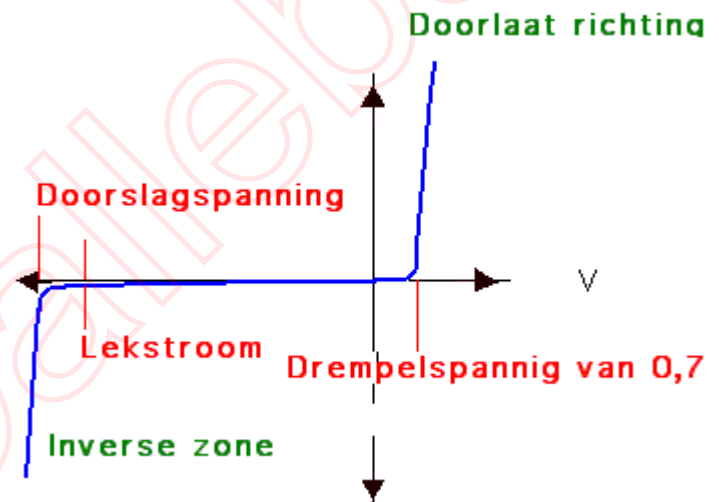


DE DIODE KARAKTERISTIEK

De diode is een niet-lineaire component omdat de stroom niet recht evenredig is met de spanning.

De diodestroom wordt berekend via:

$$I = \frac{U_B - U_D}{R}$$

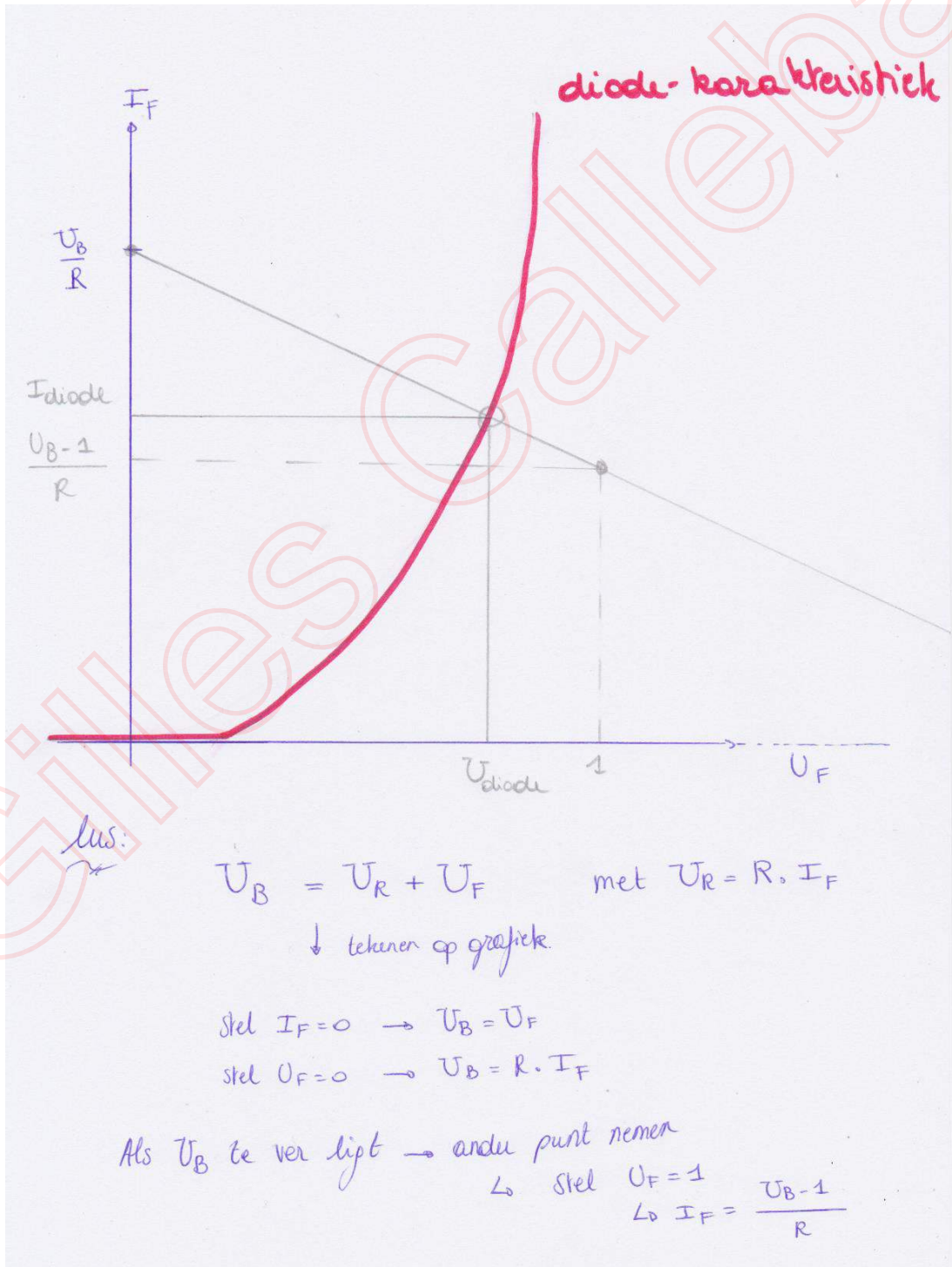


BENADERINGEN

- De ideale diode reageert als een intelligente schakelaar: hij sluit bij voorwaartse polarisatie en is open bij inversie polarisatie
- Als de spanning over de diode klein is speelt de drempelwaarde wel een rol. Als de bronspanning kleiner is dan de drempelspanning, of negatief dan is de schakelaar open.
- De inwendige weerstand van de diode speelt ook een rol. Want eens de drempelwaarde overschreden wordt, stijgt de stroom lineair met de spanning.

2.2 De diode als kringelement in elektrische netwerken:

Het gebruik van een niet-lineaire component



2.3 De diode als kringelement in elektrische netwerken:

Benaderende studie m.b.v. een model

We vervangen de diode door een inwendige spanningsbron (+ aan de pijl en – en de streep), inwendige weerstand (gegeven of te bepalen uit de karakteristiek) en een schakelaar.

Deze schakelaar is open wanneer de stroom negatief is of wanneer de drempelspanning gelijk of groter is dan de bronspanning.

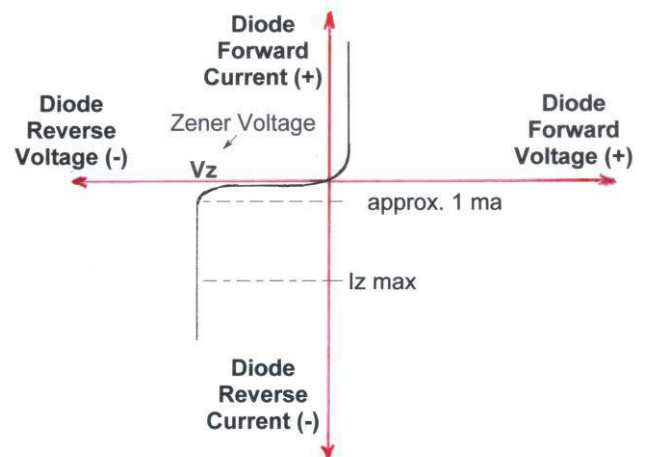
Als je na het uitrekenen een negatieve stroom hebt in een tak waar de diode zich bevindt dan moet je heel de schakeling herberekenen maar met een open schakelaar aan de diode.

2.4 Speciale diodes

DE ZENERDIODE

Een zenerddiode wordt geoptimaliseerd om in doorslag te werken.

- Voorwaardtse toestand: geleiding zoals een gewone Si-diode
- Inverse polarisatie: praktisch geen stroom door de diode
- Doorgeslagen toestand: de stroom zal zeer sterk toenemen, maar de spanning blijft constant.



OPTO-ELEKTRONISCHE COMPONENTEN

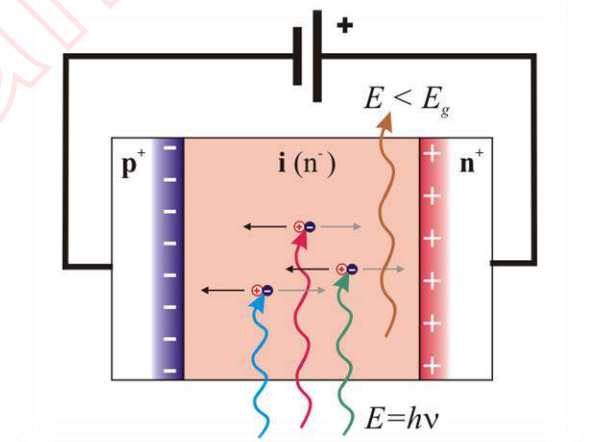
LED

Bij gewone diodes worden de recombinatie van gaten en elektronen omgezet in warmte, hier in licht.
LED's hebben het voordeel weinig spanning nodig te hebben, ze hebben een lange levensduur en kunnen snel aan en uit gezet worden.

DE FOTODIODE

Als er extra energietoevoer (licht) wordt gebruikt zullen er meer ladingen vrij maken.

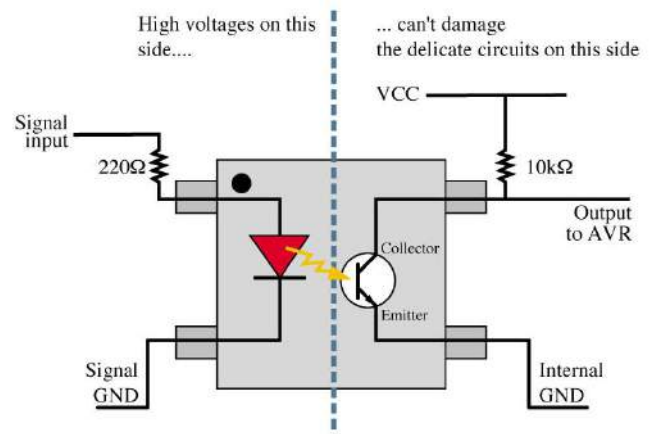
Hoe meer licht invalt, hoe groter de inverse stroom (door de mld).



DE OPTOCOUPLER

De optocoupler combineert een LED en een fotodiode in eenzelfde behuizing.

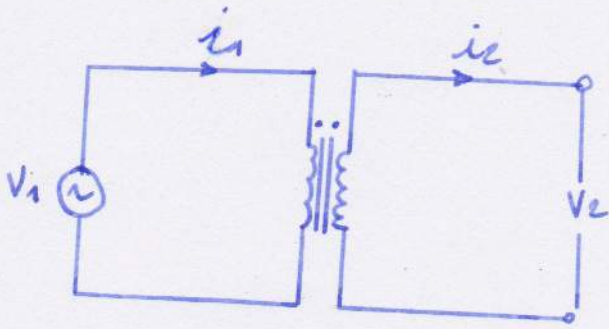
Het voordeel van deze combinatie is dat de ingang en de uitgang van elkaar gescheiden zijn.



Het gebruik van diodes in gelijkrichter schakelingen

Een voeding

De ingangstransformator

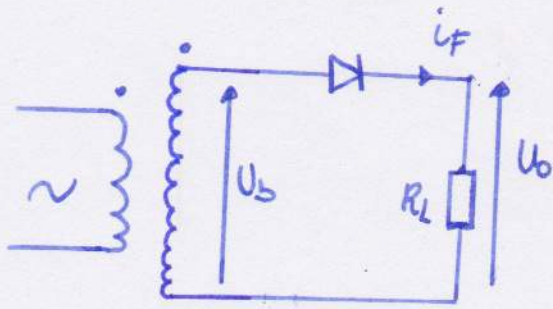


$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (\text{geen vermogen verlies})$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

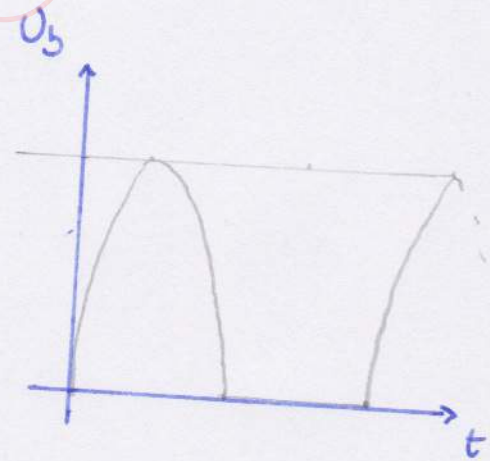
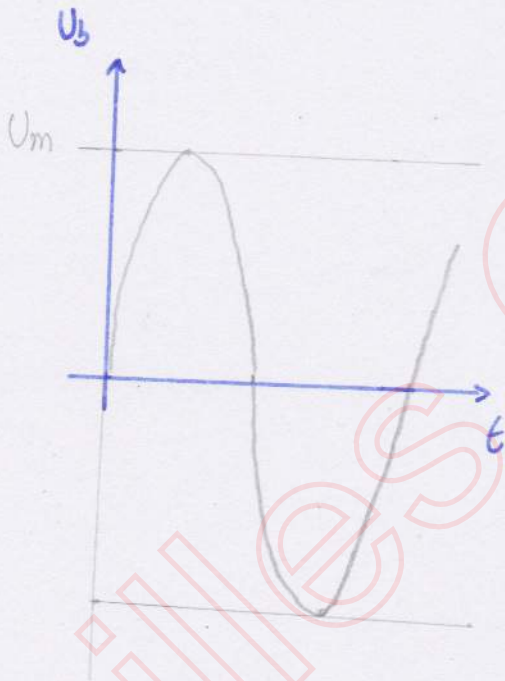
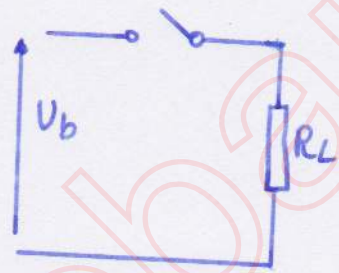
De halve golf gelijkrichter



$$U_D \ll U_m$$

$$\longrightarrow$$

$$R_D \ll R_L$$



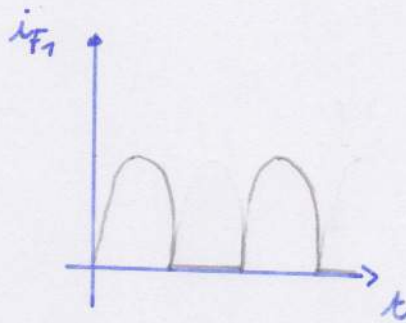
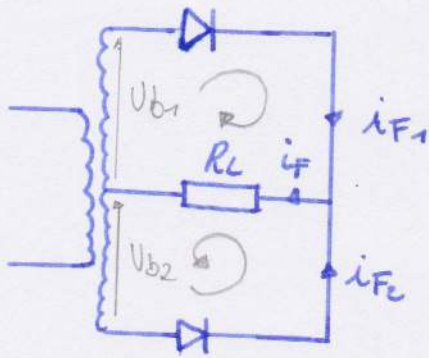
$$\begin{cases} i_F(t) = \frac{U_m}{R_L} \sin \omega t & [0, \frac{T}{2}] \\ i_F(t) = 0 & [\frac{T}{2}, T] \end{cases}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i_F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{U_m}{R_L} \sin \omega t dt$$

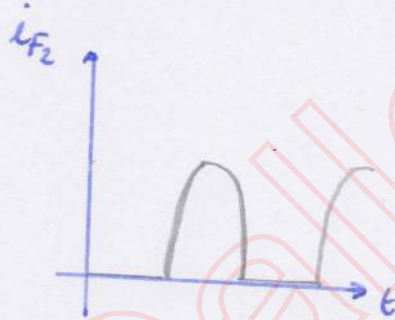
$$I_{dc} = \frac{U_m}{\pi \cdot R_L}$$

$$U_{dc} = \frac{U_m}{\pi}$$

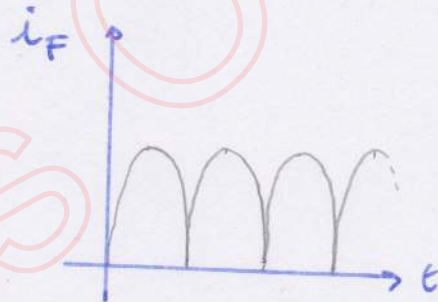
De dubbelalternantische - gelijkrichter (2 diodes)



$$\begin{cases} i_{F1} = I_m \sin \omega t & [0, T/2] \\ i_{F1} = 0 & [T/2, T] \end{cases}$$



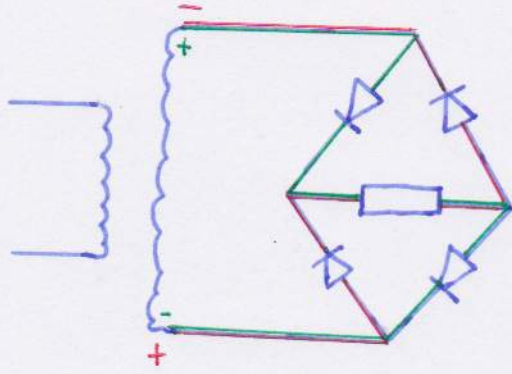
$$\begin{cases} i_{F2} = 0 \\ i_{F2} = -I_m \sin \omega t \end{cases}$$



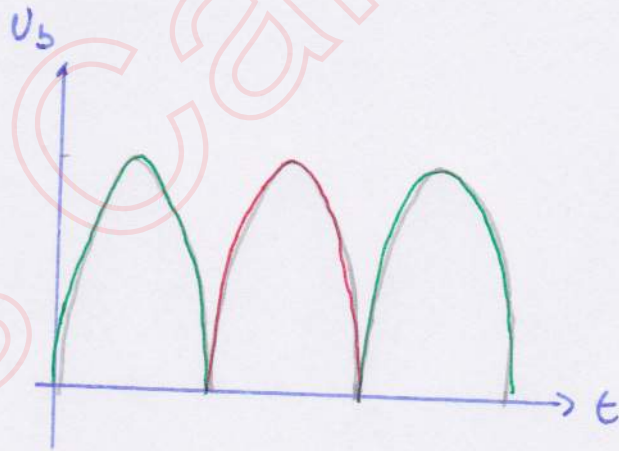
PIV = $2 U_m$

$I_{dc} = 2 \left(\frac{I_m}{\pi} \right)$

De dubbelalternantie - gelijkrichter (brug van Graetz)



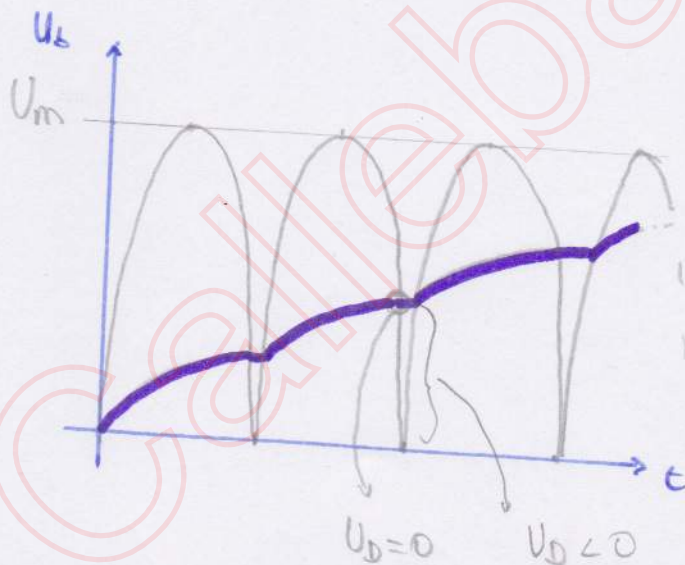
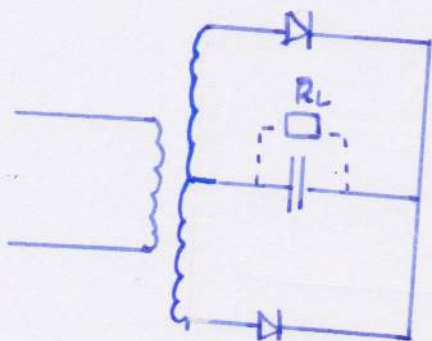
$$PIV = U_m$$



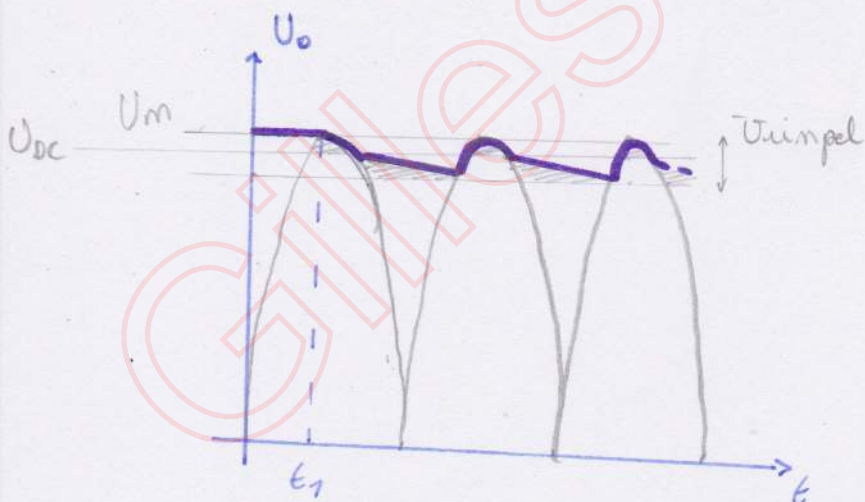
Eenvoudige filter

① Enkel met C

$$G(0) = 0$$



② R_L aansluiten



$$U_{DC} = U_m - \frac{1}{2} U_{\text{rimpel}}$$

$$\begin{aligned} \text{met } U_{\text{rimpel}} &= U_m - U_c(t_1) \\ &= U_m (1 - e^{-t_1/\tau}) \\ &\quad \downarrow e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots \\ &= U_m (1 - (1 - \frac{t_1}{\tau})) \end{aligned}$$

$$U_{DC} = U_m (1 - \frac{t_1}{2\tau})$$

$$t_1 \approx \frac{T}{2}$$

dubbel gelijkrichter:

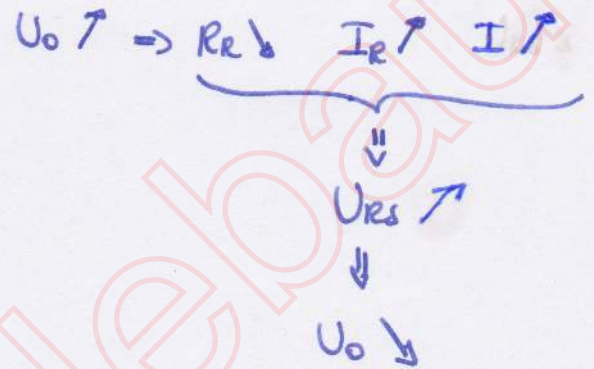
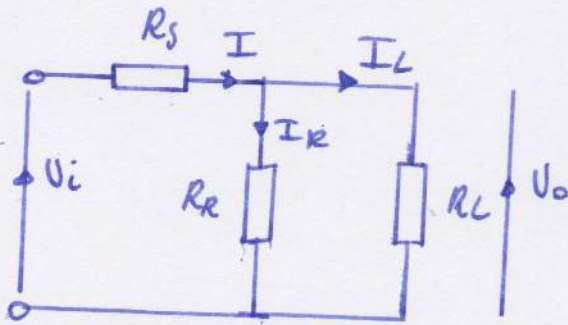
$$U_{DC} = U_m (1 - \frac{T}{4\tau})$$

halfgelykrichter:

$$U_{DC} = U_m (1 - \frac{T}{2\tau})$$

Spanningsstabilisatie

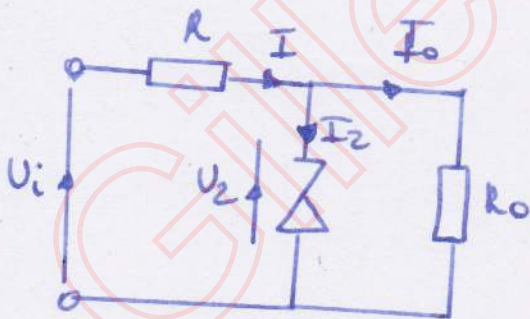
Shuntregulator



R_R verandert door:

U_o vergeleken met referentiespanning (zenerdiode)
 \rightarrow verschil \rightarrow na versterking $\rightarrow R_R$ wijzigen

Zenerdiode



$$R = \frac{U_i - U_Z}{I_Z + I_o}$$

$I_Z \gg$ knie stroom ($= I_{Z, \min}$)

$U_{i, \min}$ = minimale ingangsspanning

$I_{o, \max}$ = maximale belastingstroom

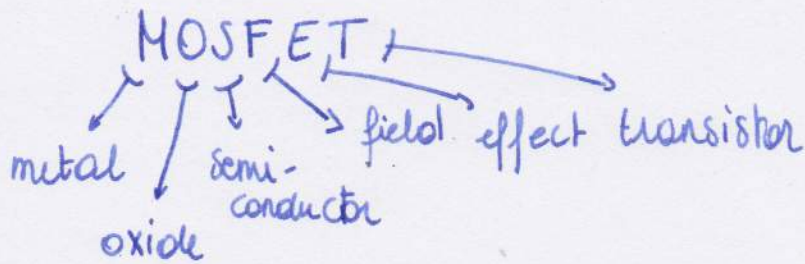
$$P_{\max}^* > \left(\frac{U_{i, \max} - U_Z}{R} - I_o \right) \cdot U_Z$$

$$\Rightarrow R < \frac{U_{i, \min} - U_Z}{I_{Z, \min} + I_{o, \max}}$$

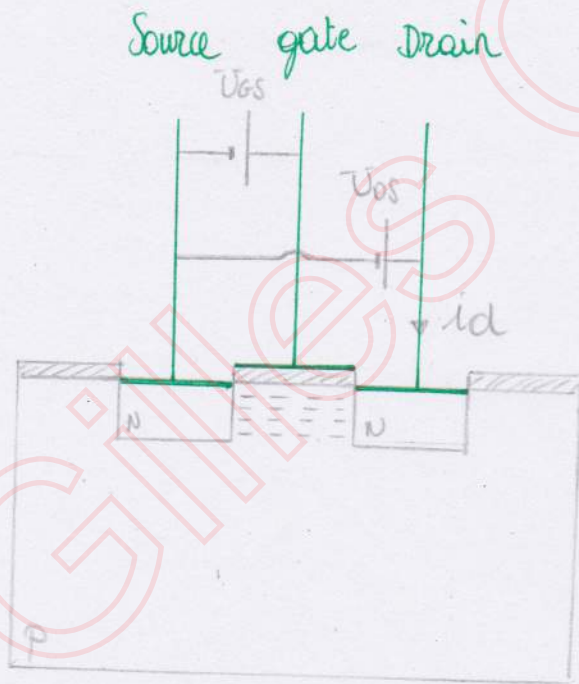
$$R > \frac{U_{i, \max} - U_Z}{I_{Z, \max} + I_{o, \min}}$$

* maximale vermogensdissipatie

H3: De MOSFET



N-kanaal, vermeerderingstype



$$U_{GS} > 0 \text{ en } U_{DS} = 0$$

e^- uit N-gebieden

↳ opvullen q^+ p-gebied

→ laag neg. ladingen

↳ n-kanaal

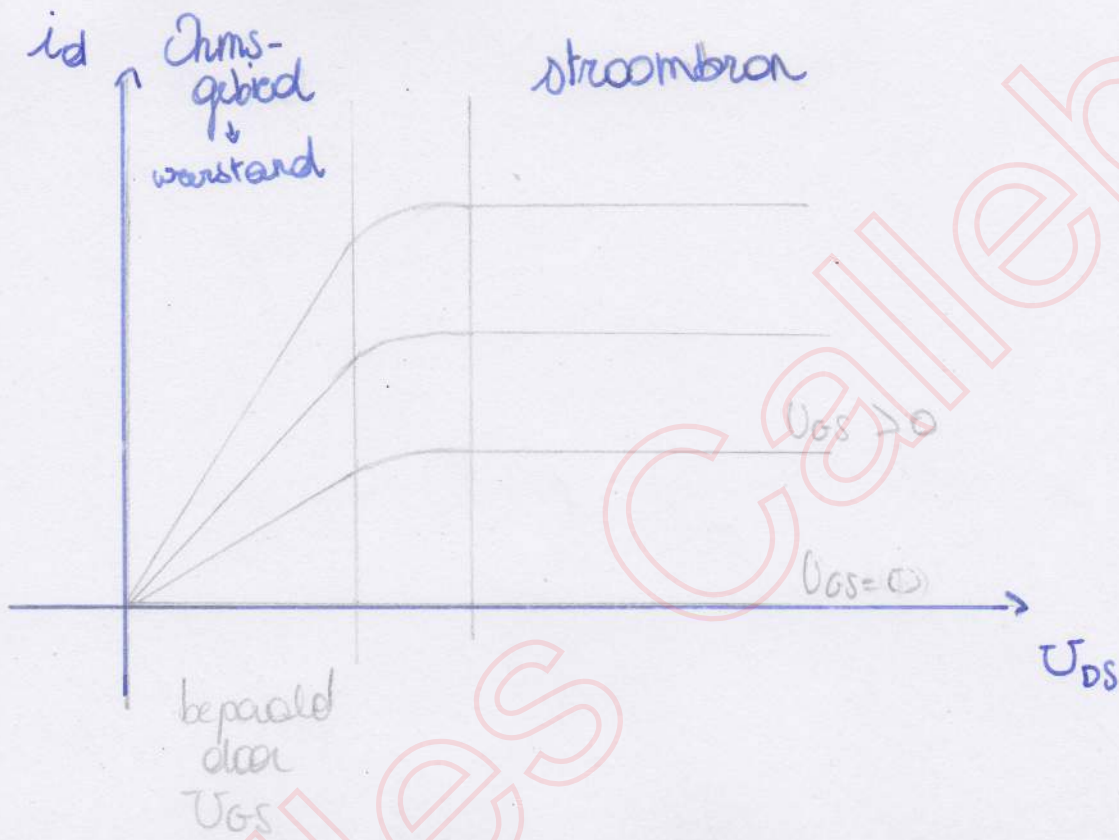
$$U_{DS} > 0$$

↳ stroom vloeien

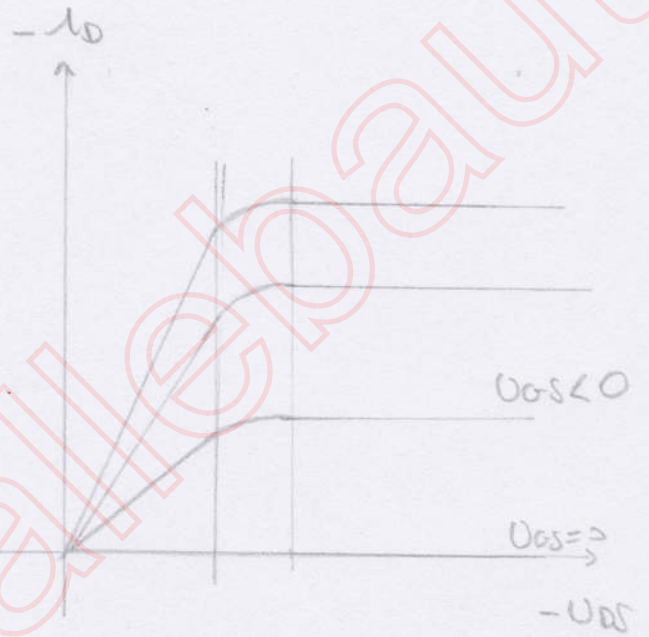
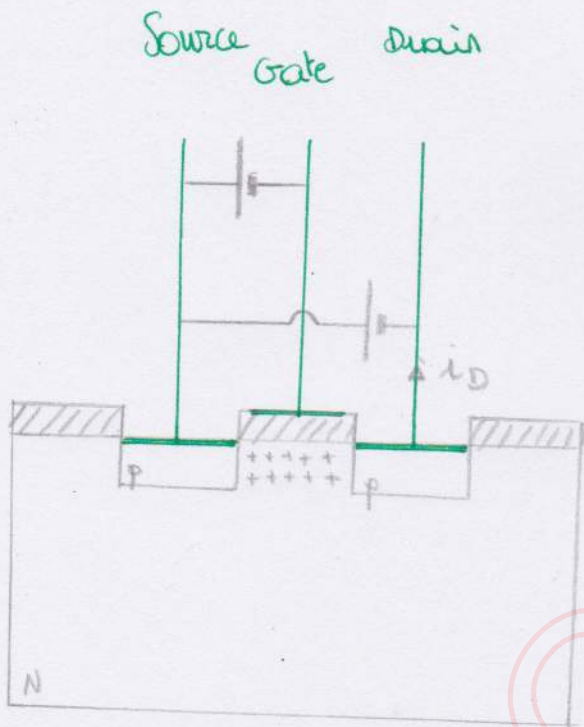
$$U_{DS} \uparrow \rightarrow U_{DS} \approx U_{GS}$$

↳ kanaal vernauwen

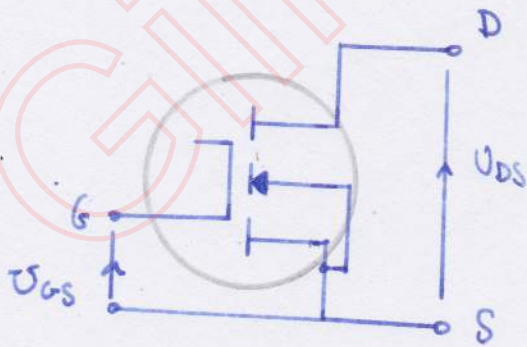




P- kanaal. vermeerderingstype



Schematisch symbool

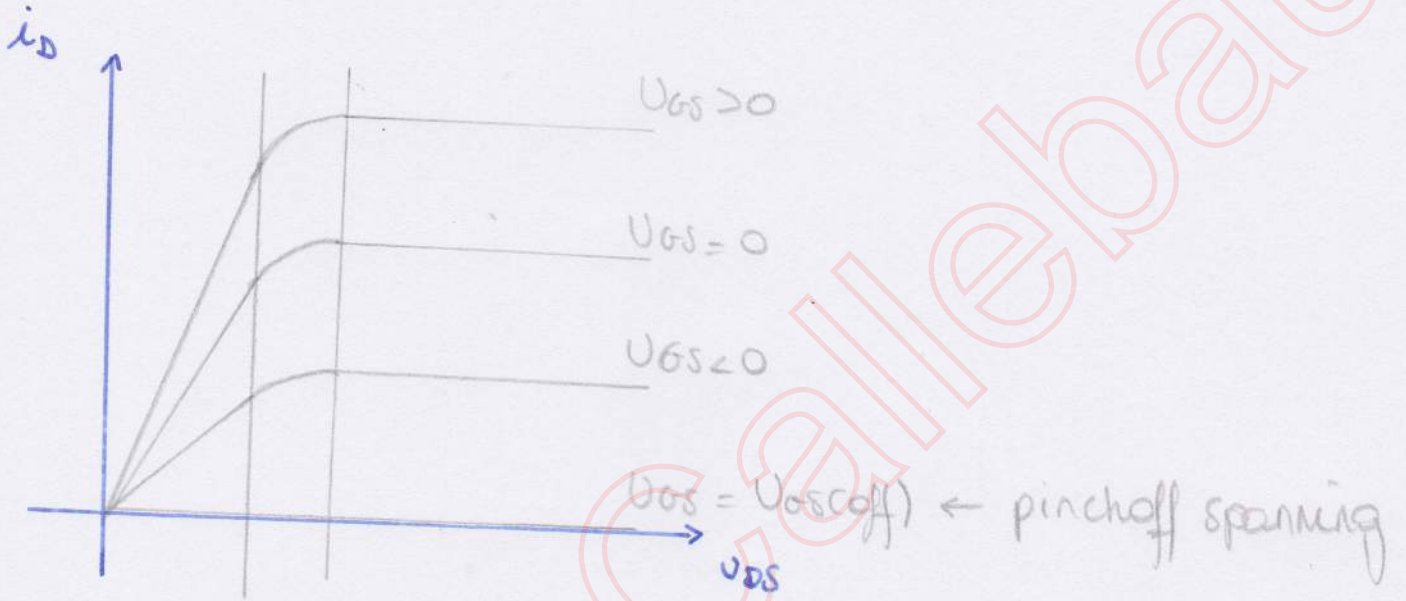


n- kanaal

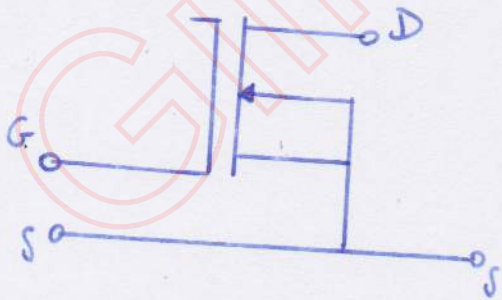
bij p- kanaal wijst de pijl weg.

N-kanaal mosfet, uitputtingstype

→ al n-kanaal aanwezig (zonder U_{GS})

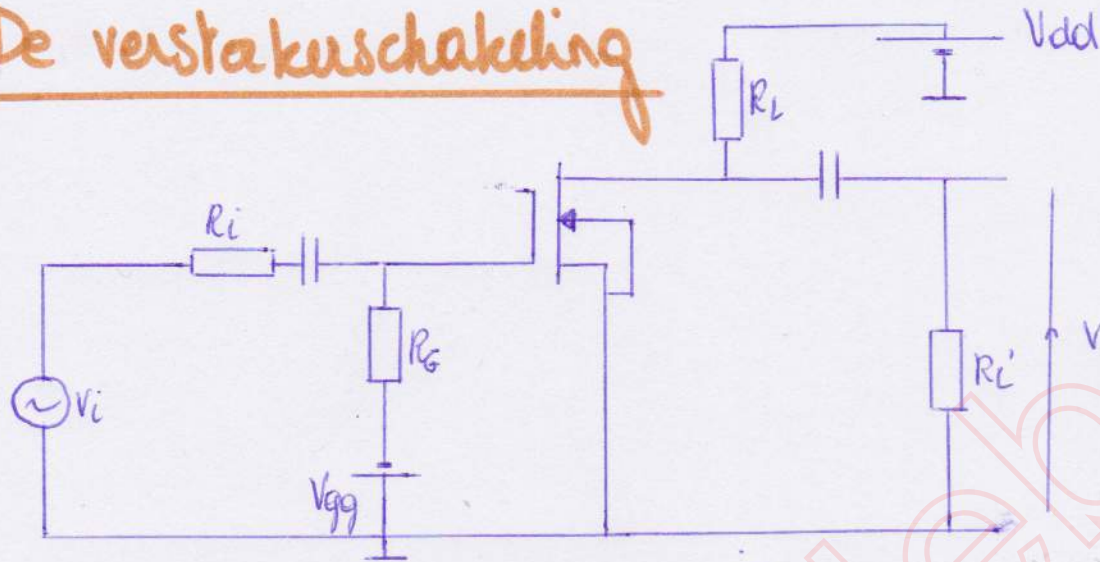


Schematisch symbool

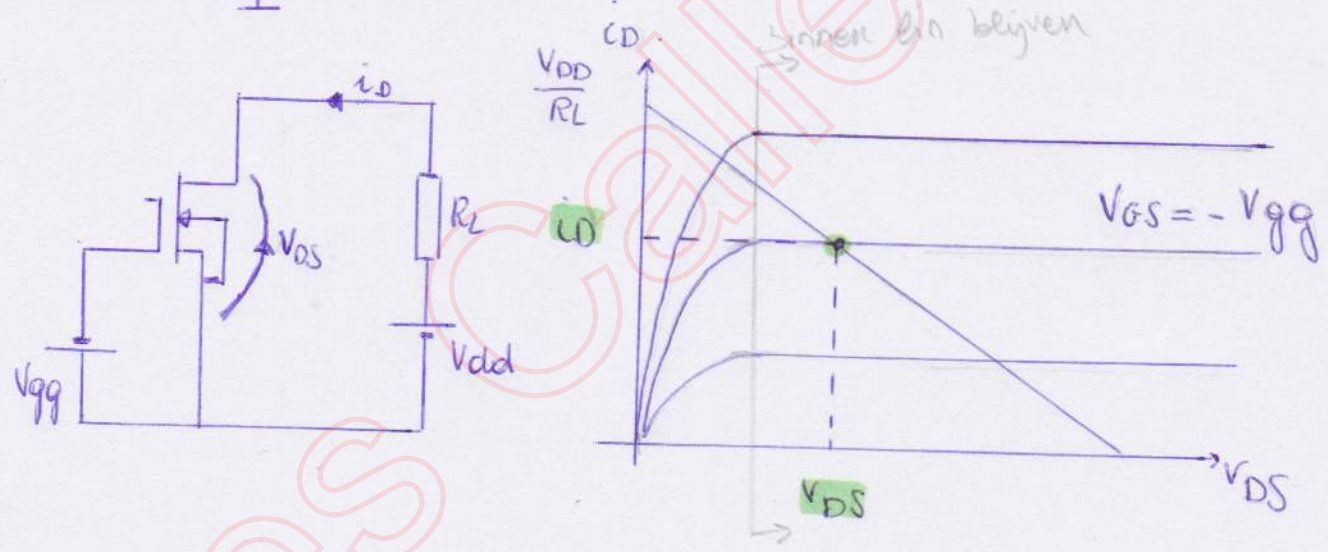


n-kanaal

De versterkerschakeling

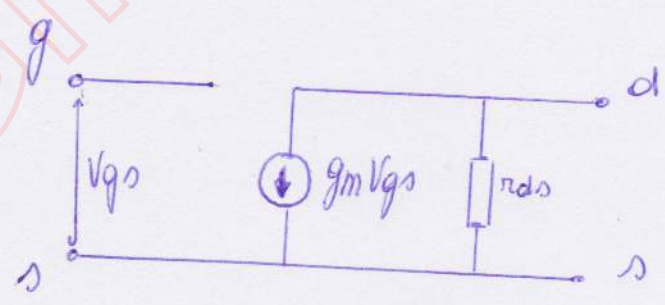


DC

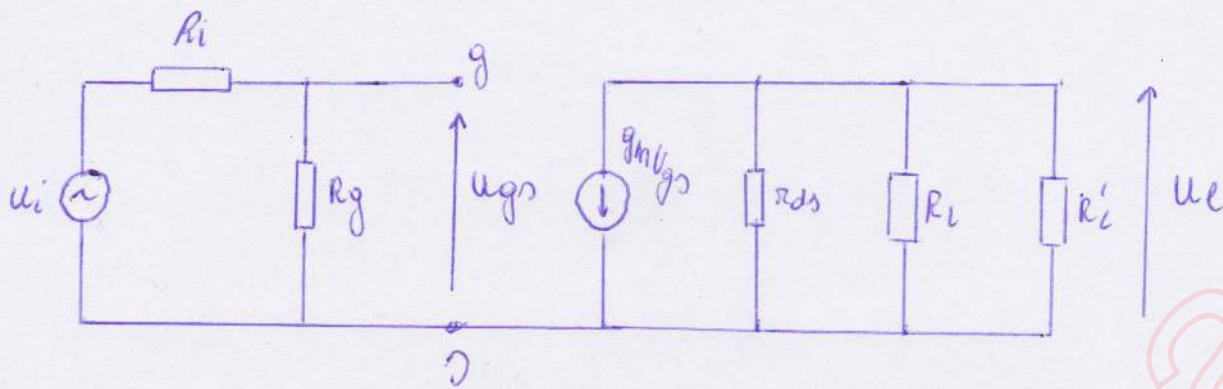


AC

transconductantie : $g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta U_{GS}}$



we zoeken $A_v = \frac{u_L}{u_i}$



$$u_e = -g_m u_{gs} [r_{ds} \parallel R_L \parallel R'_L]$$

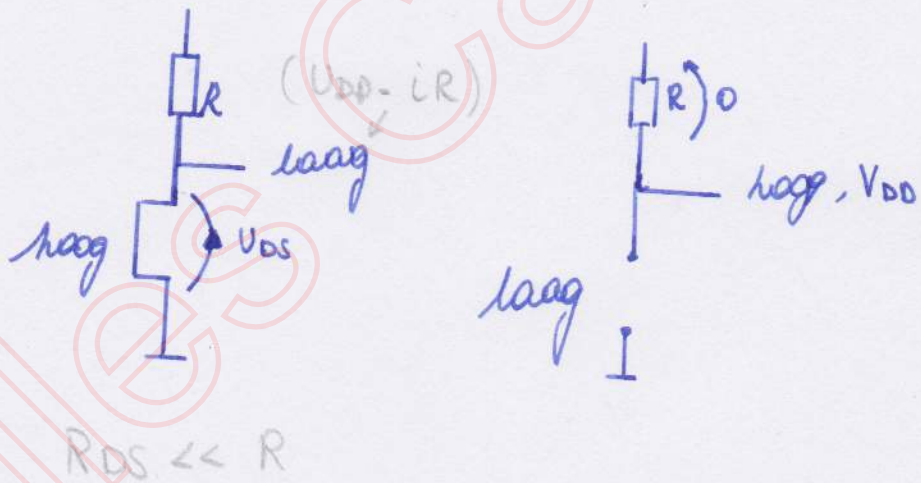
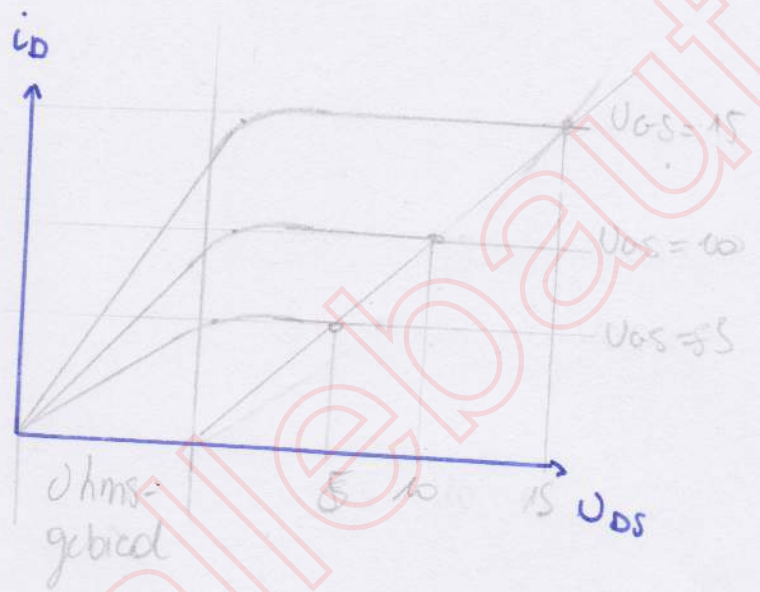
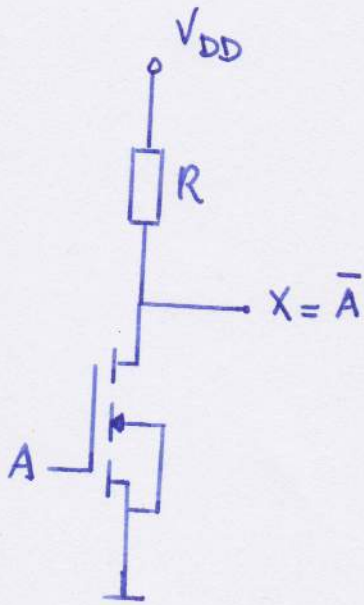
$$u_{gs} = u_i \frac{R_g}{R_g + R_i}$$

$$A_v = \frac{u_e}{u_i} = -g_m [r_{ds} \parallel R_L \parallel R'_L] \frac{R_g}{R_g + R_i}$$

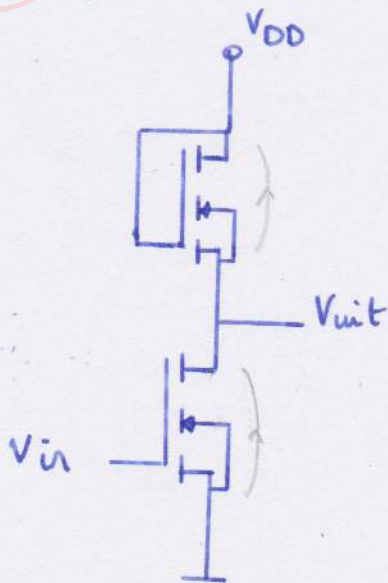
fase verschuiving

($U_{gg} \rightarrow \text{pos} \rightarrow n\text{-kanaal mosfet}$)

NMOS inverter



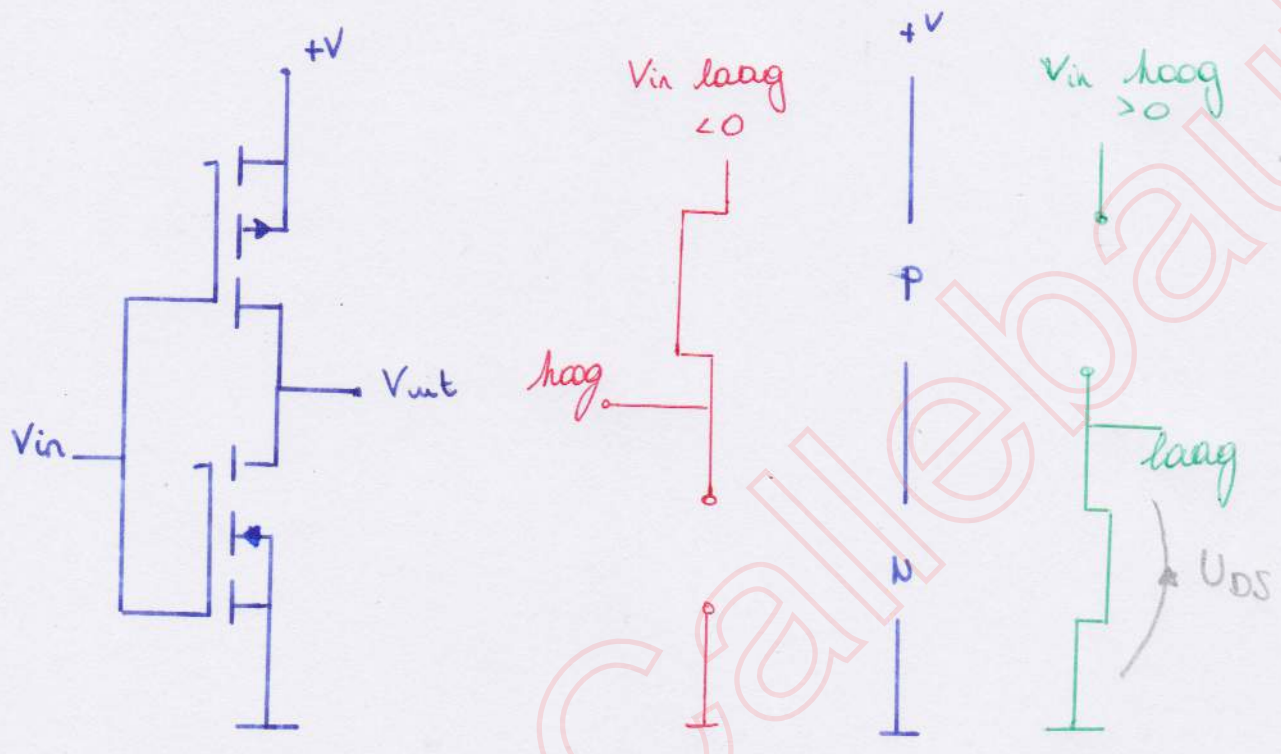
R vervangen door een mosfet:



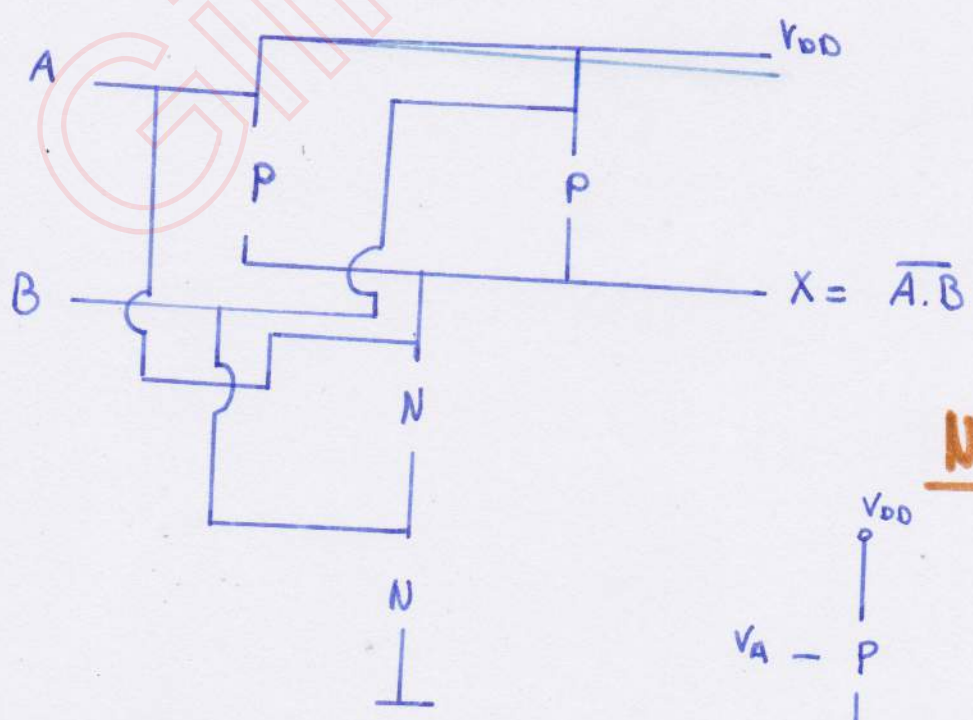
PMOS



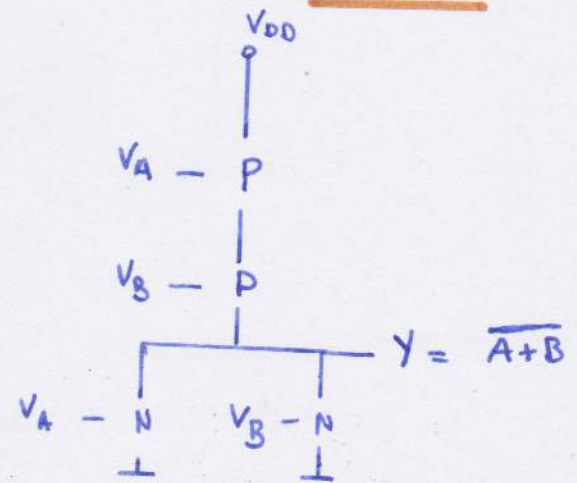
CMOS inverter



NAND

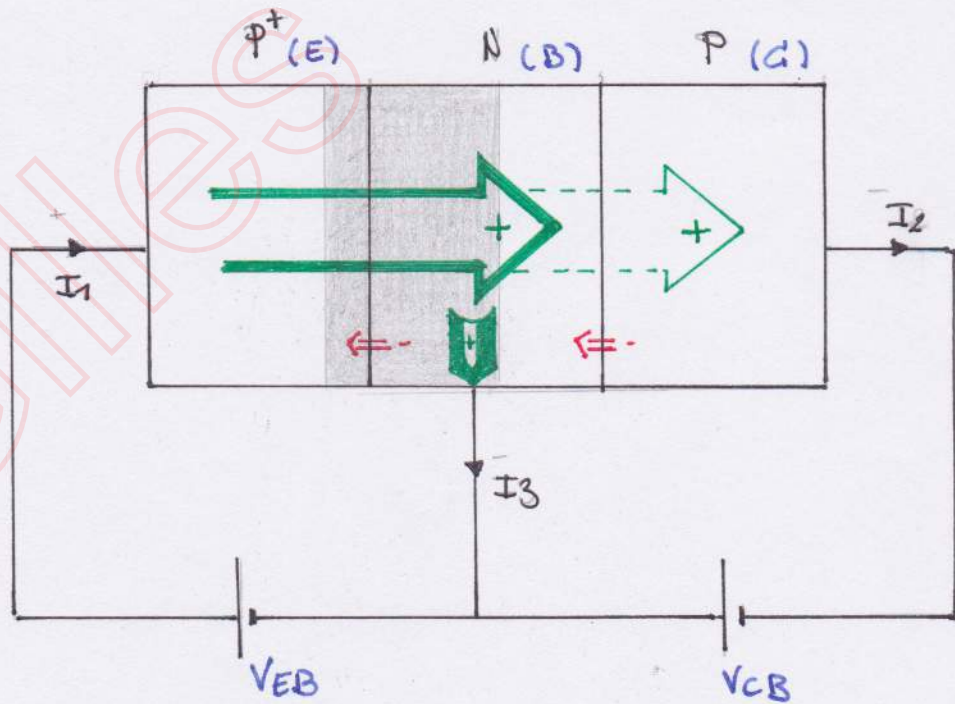
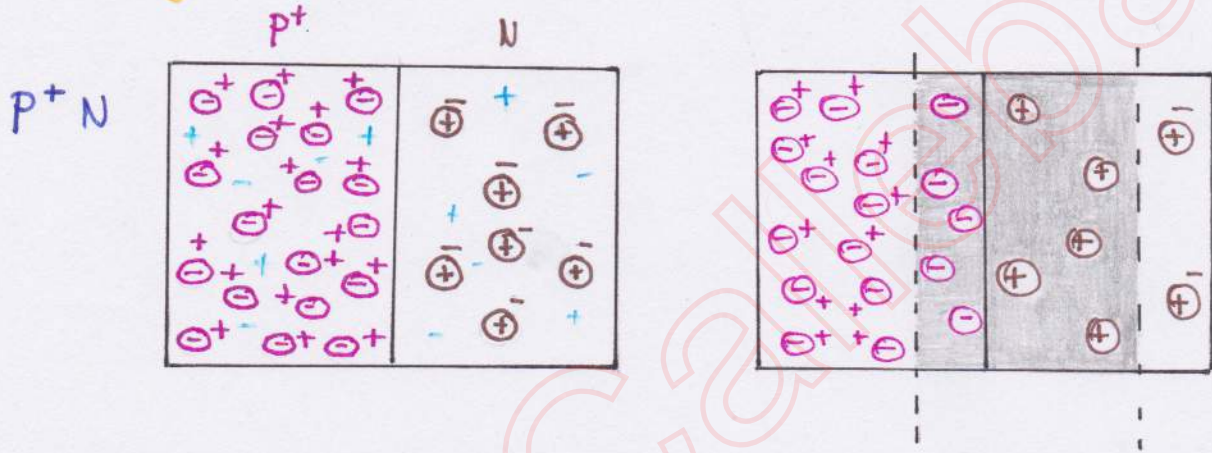


NOR



H3 De bipolaire transistor

De asymmetrische PNP-transistor



$P^+ \rightarrow$ Emitter

$N \rightarrow$ Basis

$P \rightarrow$ collector

$I_1 \rightarrow I_E$

$I_3 \rightarrow I_B$

$I_2 \rightarrow I_C$

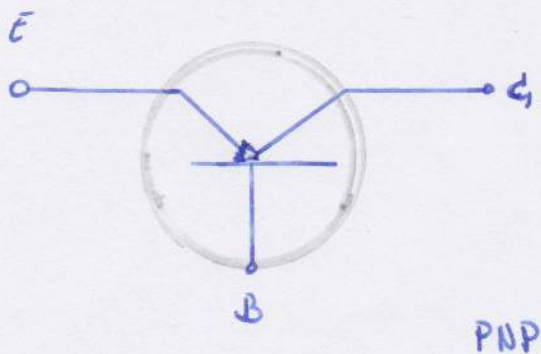
$$\begin{cases} I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \\ I_B = (1-\alpha) I_E - I_{CB0} \\ I_E = I_C + I_B \end{cases}$$

enkel NP
↑
↓
mcd

Voorwaarden:

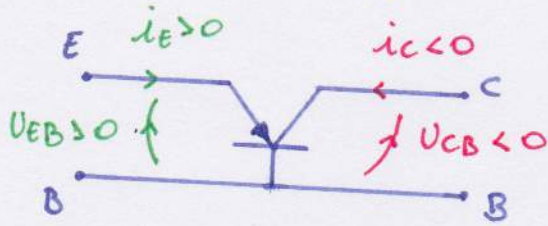
- ladingsdragers ^{conc.} in C_1 -gebied \rightarrow laag \rightarrow hoge doorslagspanning
- ladingdragers conc. in B -gebied \rightarrow groot t.o.v. C_1
 \downarrow
basisbreedte die weinig verandert met de opzetting over C_1
- ladingdr. conc. in E -gebied \rightarrow groot t.o.v. B
 \hookrightarrow goede injectie-eff.
- basisbreedte \rightarrow klein in vergelijking met de diffusielengte \rightarrow vol met id B
 \rightarrow hoog transport rendement
- B : met goed bewegen \uparrow
- $E \rightarrow$ doorlaat
- $C_1 \rightarrow$ sperzin

Symbool

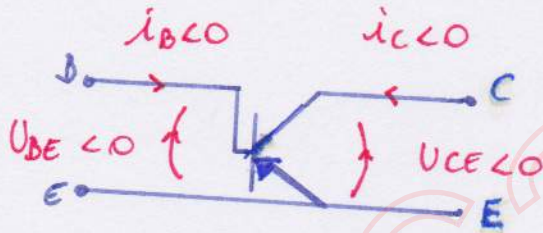


Versterker Schaltungen

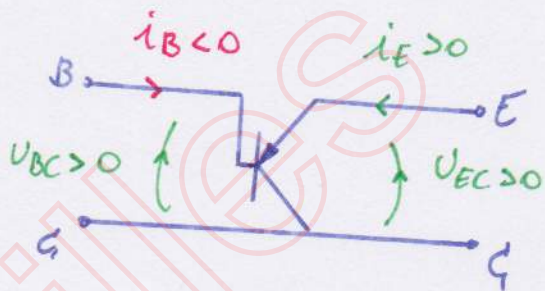
GBS



GES



GCS



PNP :

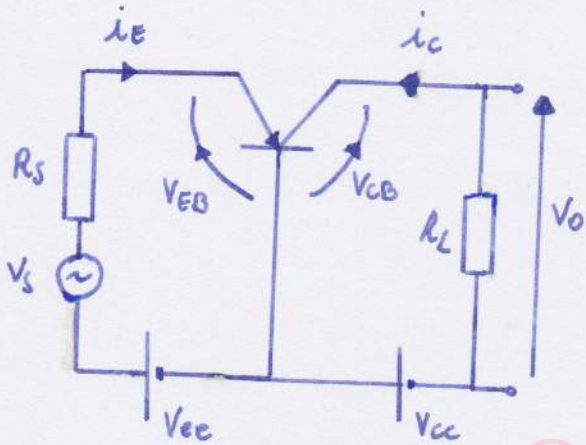
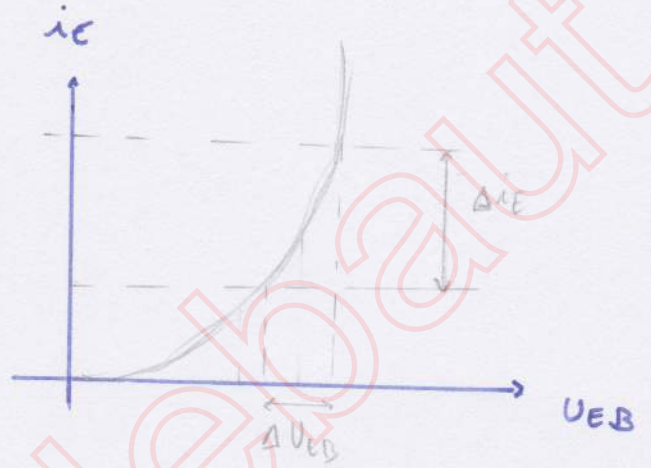
EB voorw !

Bc invers !

GBS

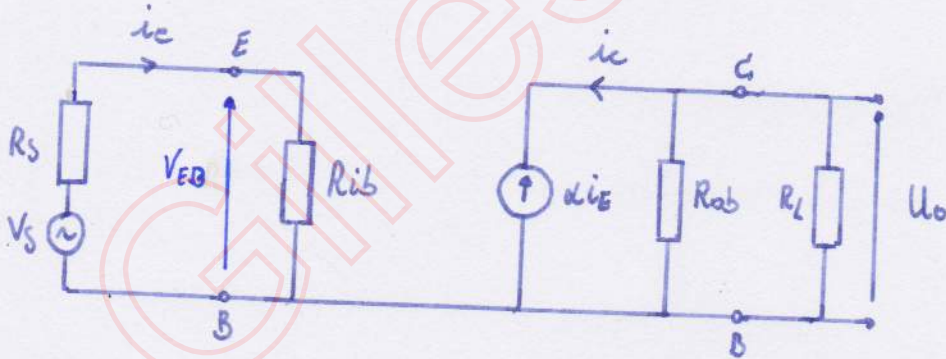
PNP: $-i_c = \alpha i_E + I_{CBO}$

$\rightarrow \alpha = - \frac{\Delta i_c}{\Delta i_E}$



kleine $\Delta U_{EB} \Rightarrow \Delta i_E \uparrow \Rightarrow \Delta i_c \uparrow$
 α \downarrow große R_L
 $V_O \uparrow$

spannungsverstärkung



$R_{ib} \ll R_S$
 $R_{ob} \gg R_L$

$U_o = \alpha \cdot i_E \cdot (R_{ob} // R_L) \rightarrow U_o \approx \alpha i_E \cdot R_L$

$i_c = \frac{U_{eb}}{R_{ib}}$

$\Rightarrow U_o = \alpha \cdot \frac{U_{eb}}{R_{ib}} \cdot R_L$ $\alpha \approx 1$

$U_o = \frac{R_L}{R_{ib}} \cdot U_{eb}$

GES

$$-i_c = \alpha \cdot i_e + I_{CBO}$$

$$\begin{cases} i_c + i_B + i_e = 0 \end{cases}$$

$$i_c = \alpha (i_B + i_c) - I_{CBO}$$

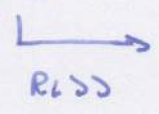
$$i_c = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_B - \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \quad \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \Rightarrow i_c = \beta i_B - \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

stat. T. gfh.

$\downarrow \beta \gg 1$

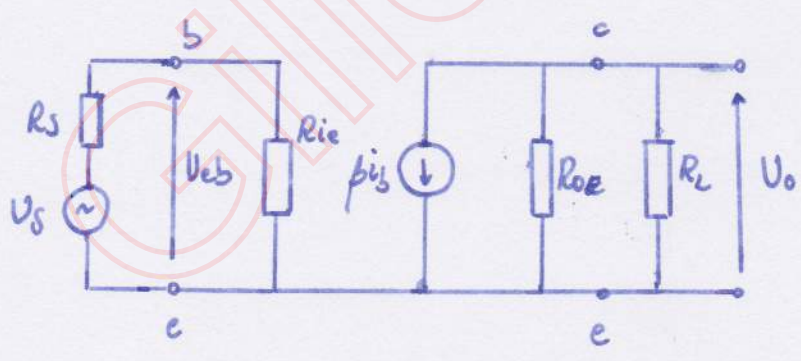
stroomversterking

klein $\Delta U_{BE} \Rightarrow \Delta i_B \uparrow \Rightarrow \uparrow \Delta i_C$



$\Delta U_o \uparrow$

\hookrightarrow spanningsversterking



$R_{ie} \ll R_{oC} \gg R_L$

$$U_o \approx -\beta i_B R_L$$

$$i_B = \frac{U_{be}}{R_{ie}}$$

$$\Rightarrow U_o = -\beta \frac{R_L}{R_{ie}} U_{be}$$

GCS

$$-i_b = (1-\alpha) i_c - I_{CBO}$$

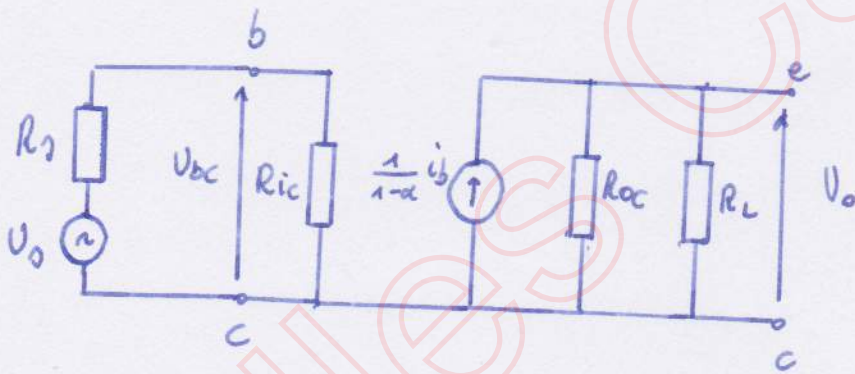
$$\hookrightarrow i_c = -\frac{i_b}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

$$\hookrightarrow i_c = -(\beta+1) i_b + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

$\rightarrow |i_c| > |i_b|$

$$\beta+1 = -\frac{\Delta i_E}{\Delta i_B}$$

\hookrightarrow stroomversterking



$R_{ic} \gg$

$R_{oc} \gg$ maar $< R_{ic}$

$$U_o = \frac{1}{1-\alpha} i_b \cdot R_L \text{ (met } R_L \ll R_{oc} \text{)}$$

$$i_b = \frac{U_s}{R_{ic} + R_s} = \frac{U_{bc}}{R_{ic}}$$

$$\hookrightarrow U_o = (1+\beta) \frac{U_{bc}}{R_{ic}} \cdot R_L$$

$$\hookrightarrow U_o < U_{bc}$$

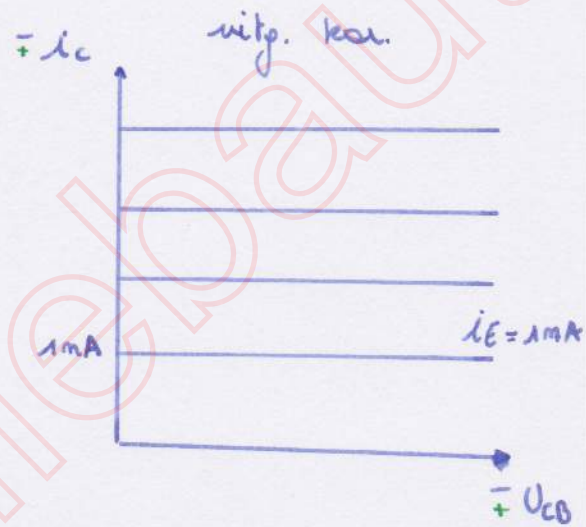
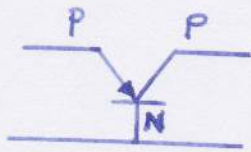
Karakteristieken

GBS

PNP NPN

ingang: i_E ; V_{EB}

uitgang: i_C , V_{CB}



Be-junctie v.w. gepol.

↓ diode kar.

↓ veranderingen collector

Bc-junctie

↳ invers gepol.

↓ uitputtingslag ↑

↳ kleine invloed

$$-i_C = \alpha i_E + I_{CBO}$$

$|V_{CB}| \uparrow$
 \Rightarrow eff. breedte basis ↓

↳ $\alpha \uparrow$

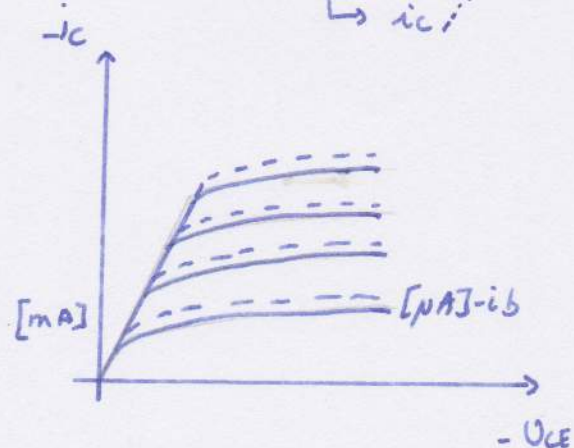
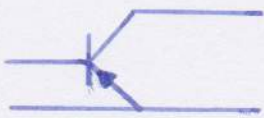
↳ Early-effect.

↓ lichtjes stijgen $V_{CB} \uparrow$
 \downarrow
 $\downarrow i_C$

GES

ingang: i_B ; V_{BE}

uitgang: i_C ; V_{CE}



↳ kar. v.w. gepol.
 emitter junctie

$i_B \Rightarrow$ fractie

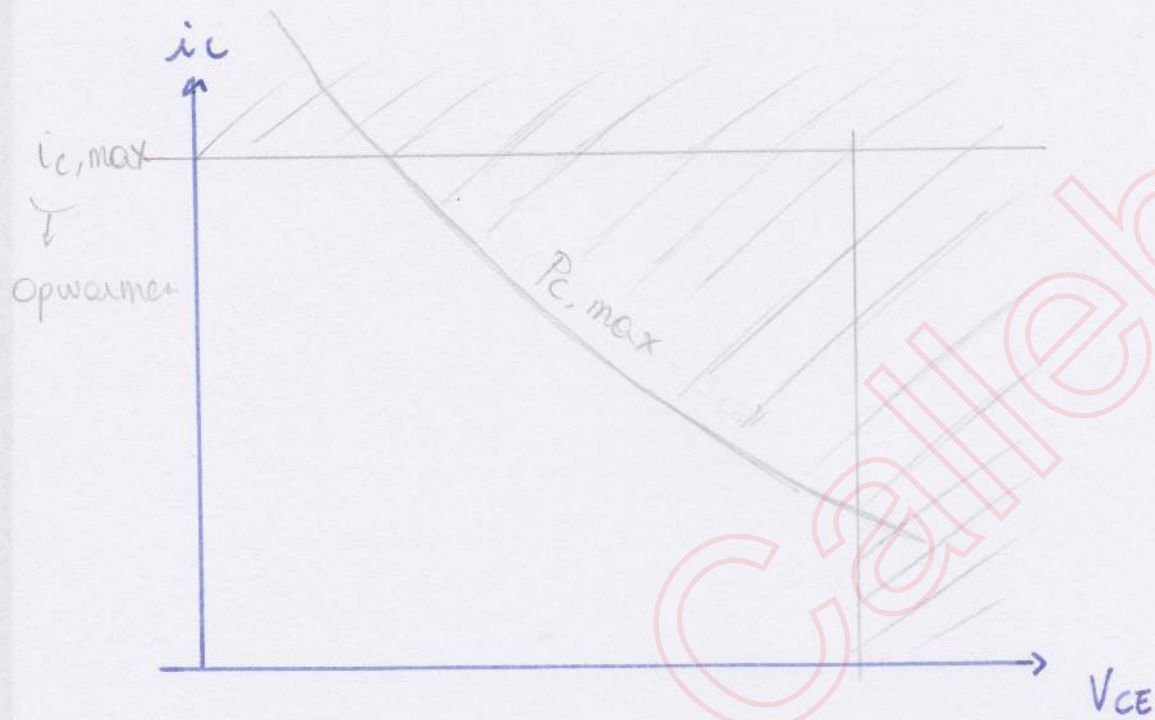
$$-i_B = (1 - \alpha) i_E$$

$$-i_C = \beta (-i_B) + I_{CEO}$$

↓ Temp. afh.

↳ $\beta \uparrow \uparrow$

Grens-werkingsomstandigheden



gedissipeerd vermogen

$$P_c = I_{c0} \cdot V_{CE}$$

el. energie

warmte

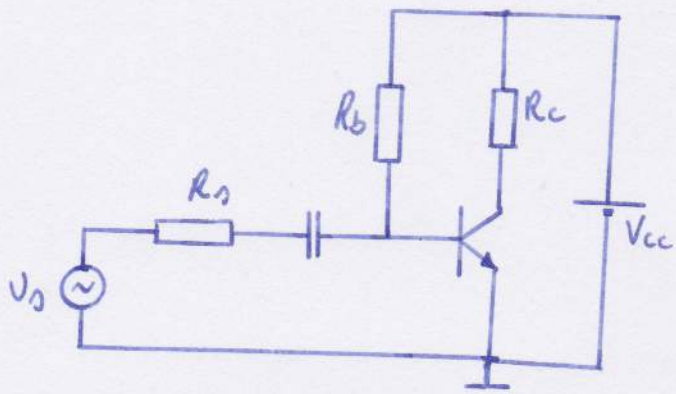
BV_{CEO}

doorstroomspanning

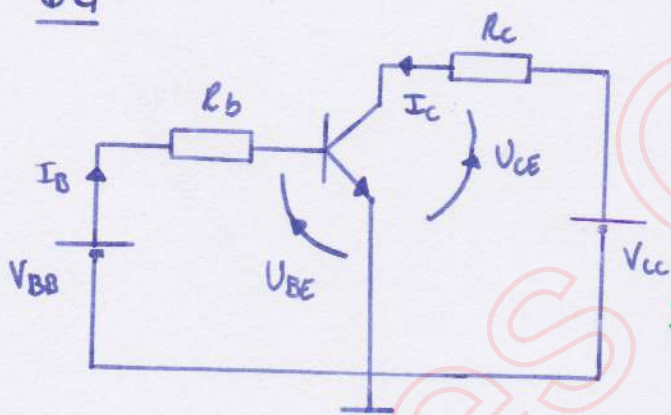
invers gep.

kapot smelten

Versterkerschakeling

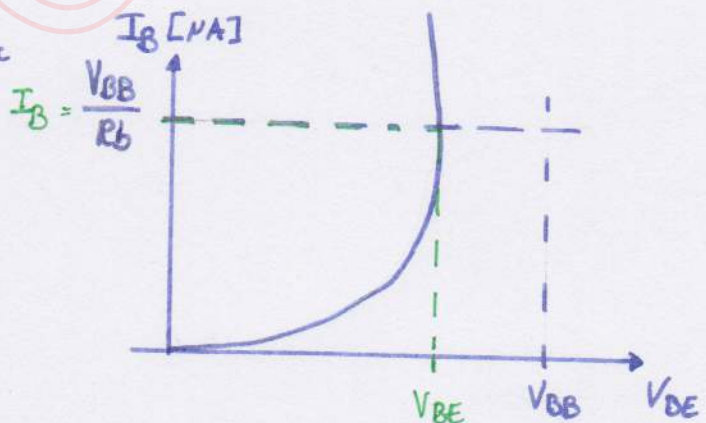


DC



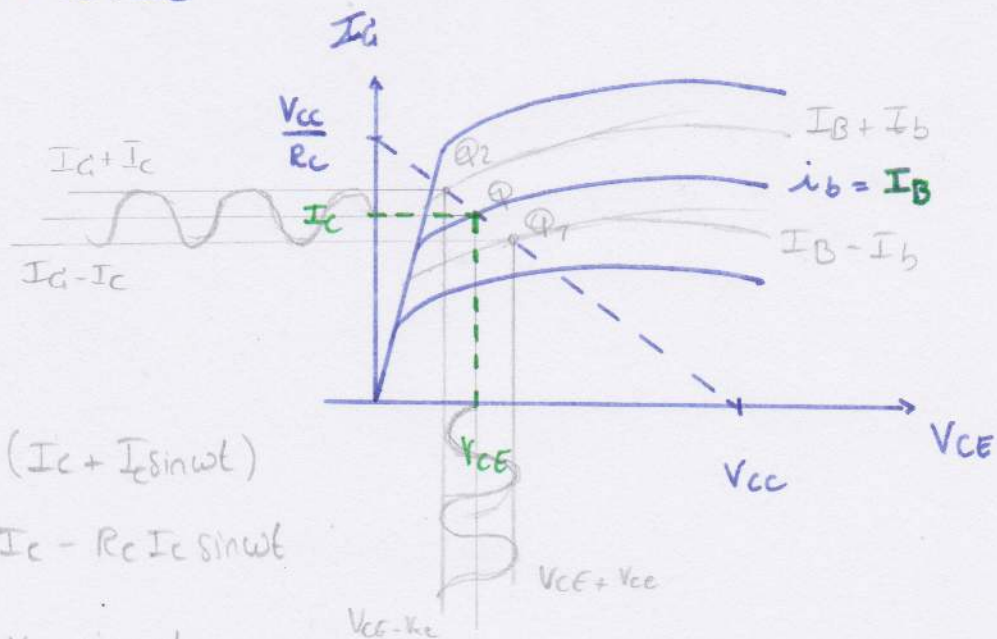
ingang

$$V_{BB} = V_{BE} + R_b I_B$$



uitgang

$$V_{CE} = V_{CC} - R_c \cdot I_C$$



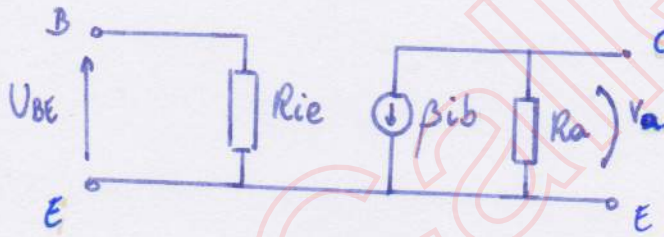
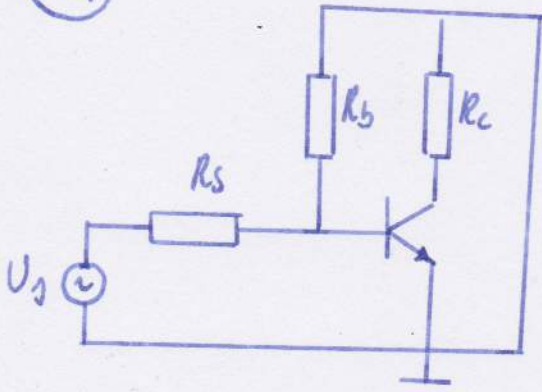
AC + DC

$$V_{CE} = V_{CC} - R_c (I_C + I_C \sin \omega t)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_c I_C - R_c I_C \sin \omega t$$

$$V_{CE} = V_{CE} - V_{ce} \sin \omega t$$

AC

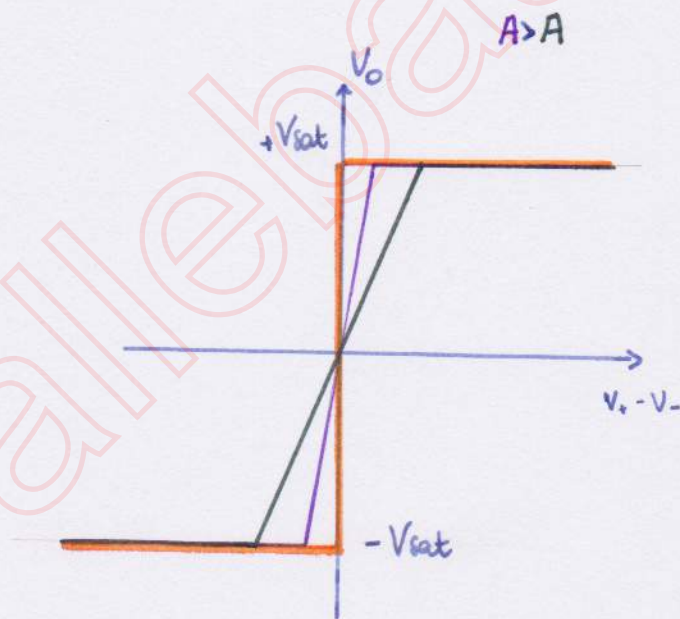
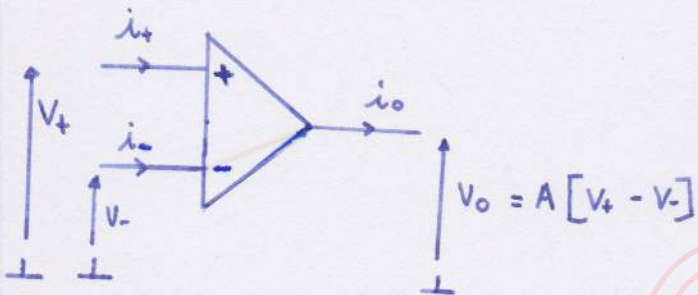


$$\begin{cases} V_a \approx -\beta \cdot i_b \cdot R_c \\ i_b = \frac{U_{be}}{R_{ie}} \end{cases}$$

H4 : De Opamp

De ideale opamp

↳ operationele versterker



Praktisch

$$A \approx 10^5 - 10^6$$

$$Z_i \approx 1\text{M}\Omega$$

$$Z_o \approx 10\Omega$$



theoretisch

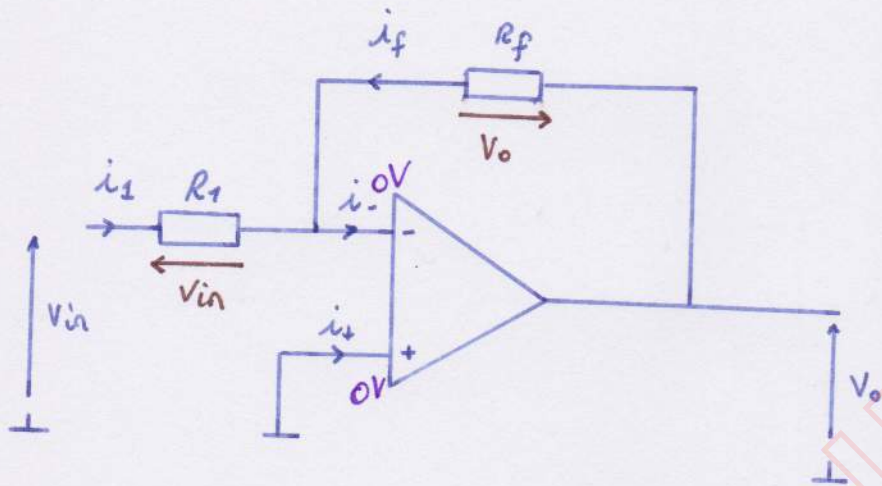
$$A = \infty \rightarrow V_o \text{ tussen } \pm V_{sat}$$

$$\rightarrow V_+ = V_-$$

$$Z_i = \infty \rightarrow i_+ = i_- = 0$$

$$Z_o = 0 \rightarrow V_o \text{ onafh. van stroom } i_o$$

De inverterende versterker



$$V_+ = V_-$$

$$V_+ = 0 \rightarrow V_- = 0$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$i_f = -i_1$$

$$\frac{V_o}{R_f} = -\frac{V_{in}}{R_1}$$

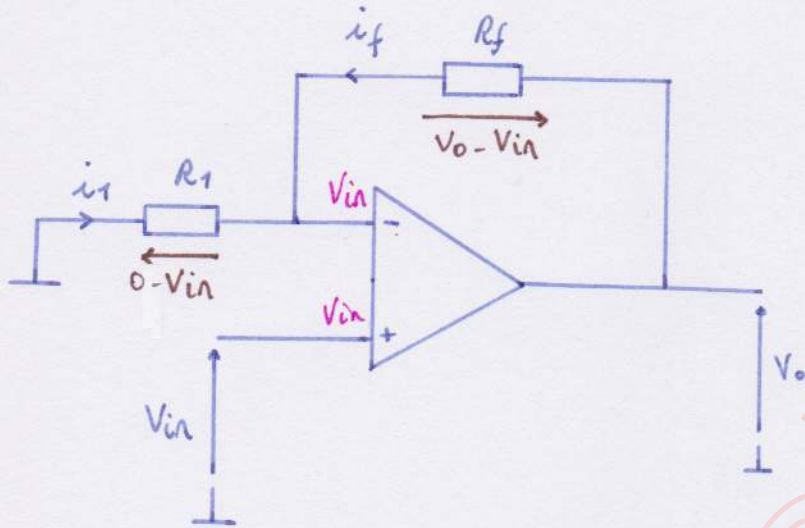
$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_{in}$$

tegenfase

Versterken: $R_f > R_1$

Verzwakken: $R_f < R_1$

De niet-inverterende versterker



$$V_+ = V_- \rightarrow V_+ = V_{in} = V_-$$

$$i_1 = -i_f$$

$$-\frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_o - V_{in}}{R_f}$$

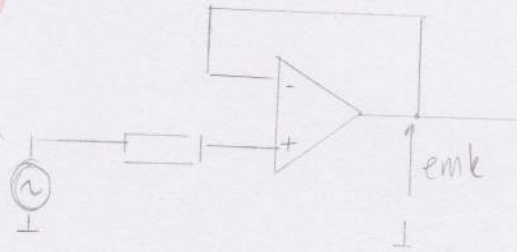
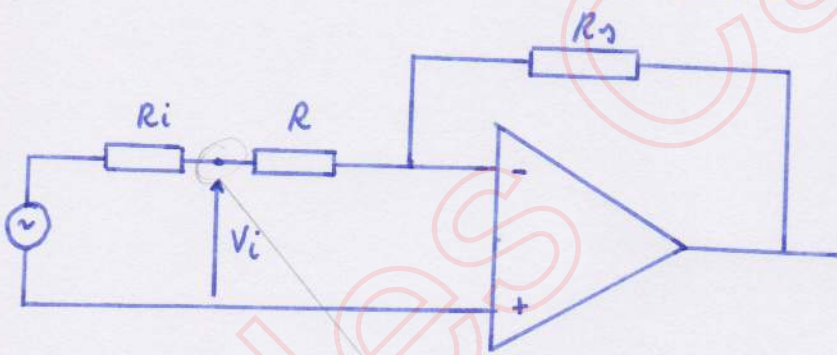
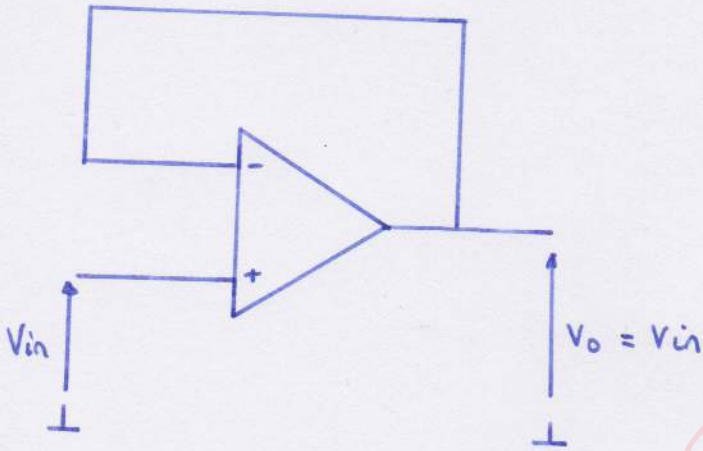
$$\frac{R_f}{R_1} V_{in} = V_o - V_{in}$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_{in}$$

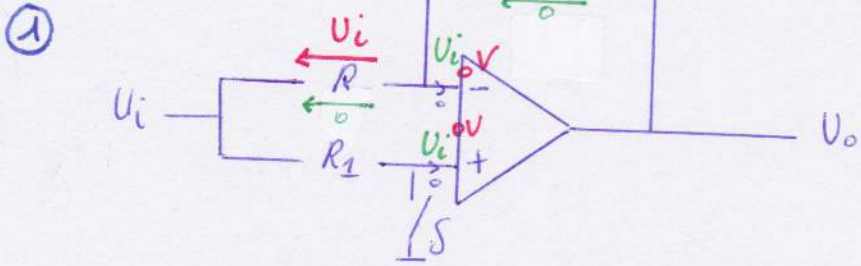
→ niet-inverteerd

→ enkel versterken

Spanningsvolger

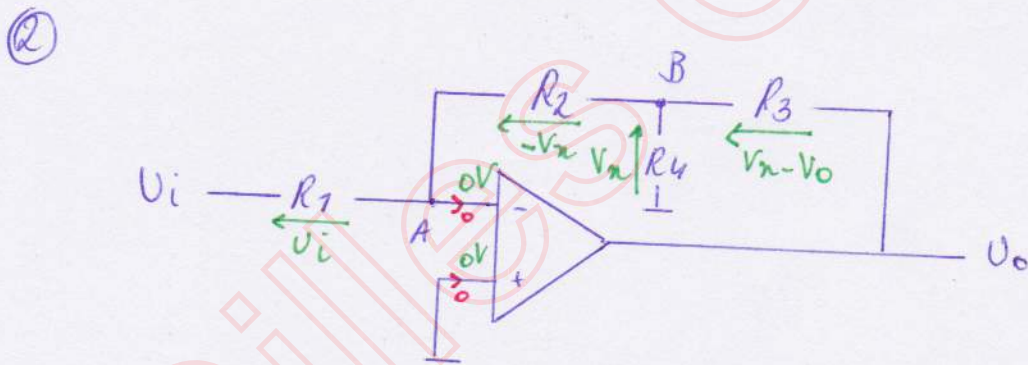


Lösungen



S open $\rightarrow U_i = U_o$

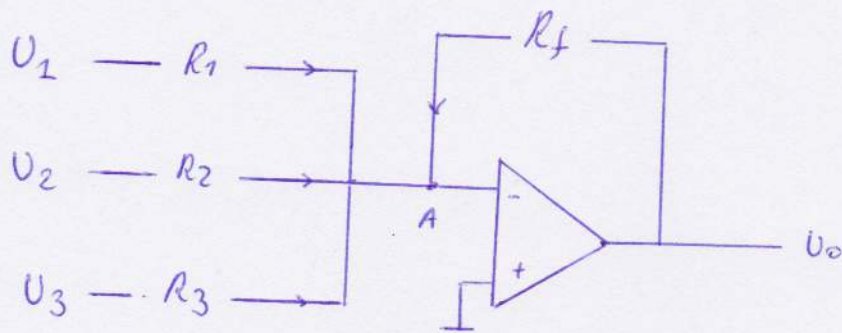
S to $\rightarrow \frac{U_i}{R} = \frac{-U_o}{R} \rightarrow U_i = -U_o$



A) $\frac{U_i}{R_1} = \frac{-V_n}{R_2}$

B) $-\frac{V_n}{R_2} = \frac{V_n}{R_4} + \frac{V_n - U_o}{R_3}$

De somversterker



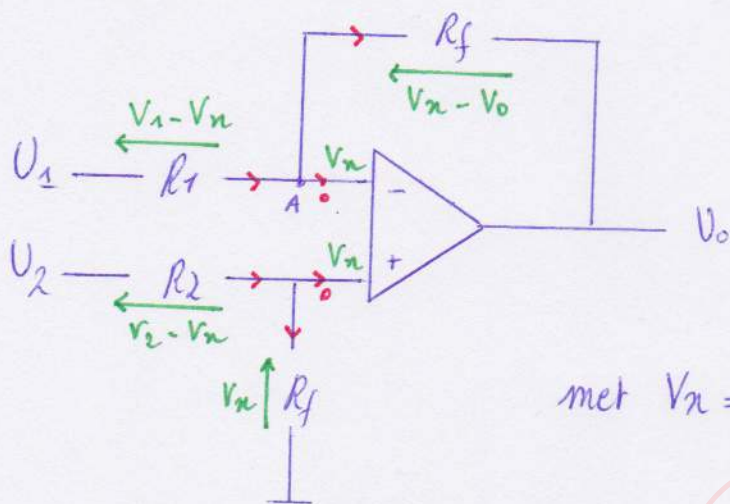
$$A) \quad i_1 + i_2 + i_3 = -i_f$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_o}{R_f} \rightarrow V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

$$\rightarrow \frac{R_f}{R} = \frac{1}{n} \rightarrow V_o = -\frac{1}{n} (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

gemiddelde

De verschilversterker



met $V_n = \frac{R_f}{R_f + R_2} V_2$ (spanningsdeeler)

$$A) \quad \frac{V_1 - V_n}{R_1} = \frac{V_n - V_0}{R_f}$$

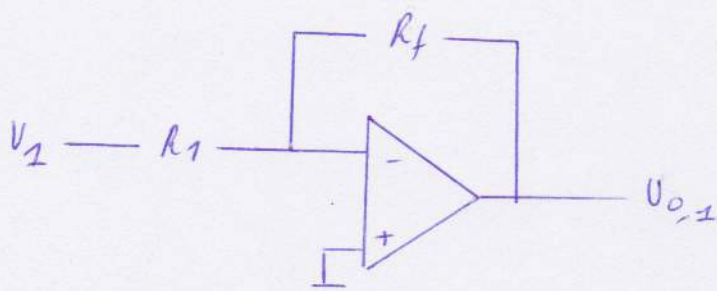
$$(V_1 - V_n) \frac{R_f}{R_1} = V_n - V_0 \rightarrow V_0 = -V_1 \frac{R_f}{R_1} + V_n \frac{R_f}{R_1} + V_n$$

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_n - V_1 \left(\frac{R_f}{R_1}\right)$$

$$V_0 = \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_f}{R_f + R_2}\right) V_2 - V_1 \left(\frac{R_f}{R_1}\right)$$

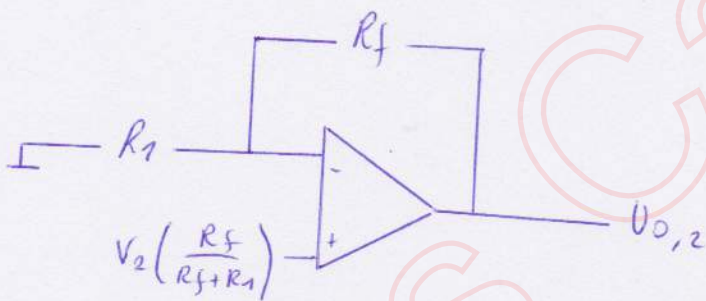
$$V_0 = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) (V_2 - V_1)$$

Superpositiv



$$\rightarrow U_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1$$

↳ invertierbare Verstärker



$$\rightarrow U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \cdot V_{in}$$

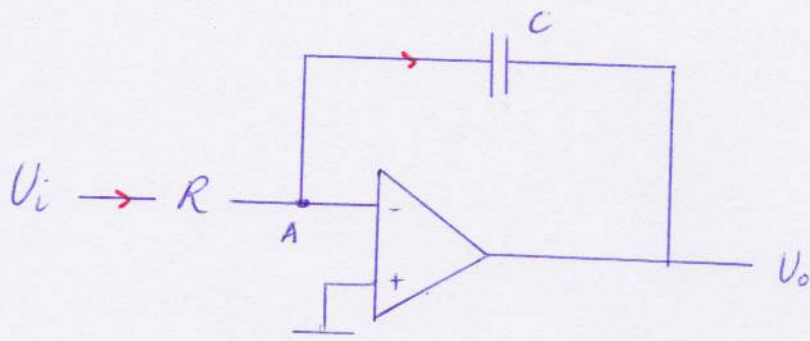
↳ nF. invert

$$U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_f}{R_f + R_1}\right) V_2$$

$$U_o = \frac{R_f}{R_1} V_2$$

$$\Rightarrow U_o = \frac{R_f}{R_1} (V_2 - V_1)$$

De integratorschakeling



$$A) \quad i_R(t) = i_C(t)$$

$$\frac{V_i}{R} = -C \frac{dV_o}{dt}$$

$$\rightarrow V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt$$

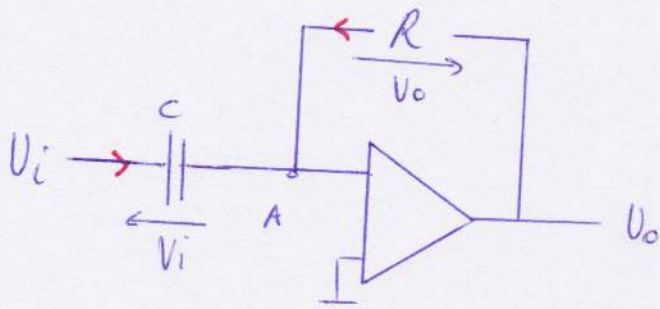
via impedanties

$$\bar{V}_o = -\frac{\bar{Z}_c}{R} \bar{V}_i \rightarrow \bar{V}_o = -\left(\frac{1}{RC} \bar{V}_i\right) \cdot \frac{1}{j\omega}$$

) $1/j\omega \leftarrow$ integreren

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt$$

De differentiatorschakeling



$$A) \quad i_c(t) = -i_R(t)$$

$$C \frac{dV_i}{dt} = -\frac{V_o}{R}$$

$$\rightarrow \boxed{V_o = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}}$$

via impedanties

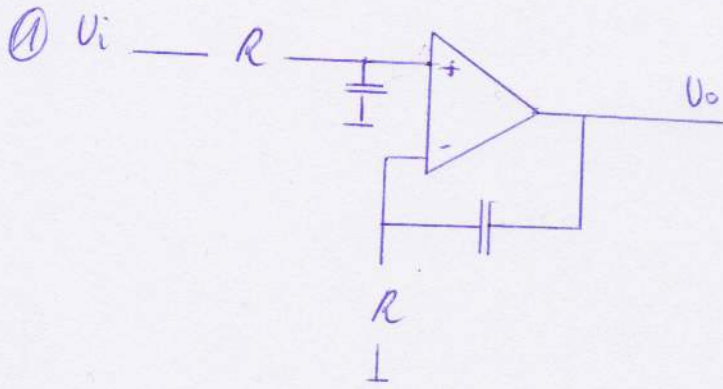
$$\frac{Z_c}{\bar{V}_i} = -\frac{R}{\bar{V}_o}$$

$$\rightarrow \bar{V}_o = -(RC \bar{V}_i) j\omega$$

} $\cdot j\omega \rightarrow$ afleiden

$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i}{dt}$$

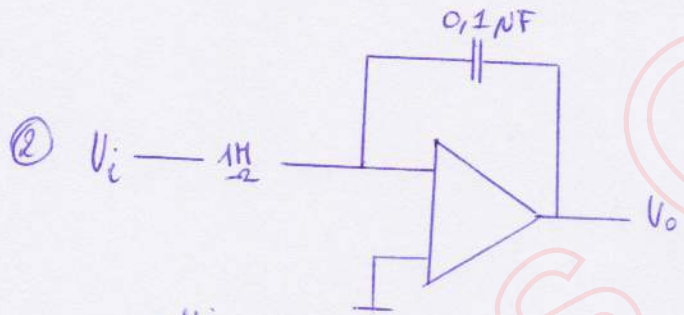
Lösungen



$$\bar{V}_+ = \frac{\bar{Z}_c}{R + \bar{Z}_c} \bar{V}_i$$

$$\bar{V}_- = \frac{R}{R + \bar{Z}_c} \bar{V}_o$$

$$\rightarrow \bar{Z}_c \bar{V}_i = R \bar{V}_o \rightarrow \bar{V}_o = \frac{1}{RC} \frac{\bar{V}_i}{j\omega} \rightarrow V_o(t) = \frac{1}{RC} \int V_i dt$$



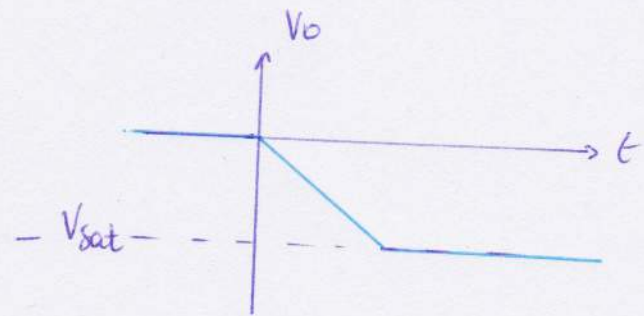
? $V_o(3ms)$
? $V_o(\infty)$



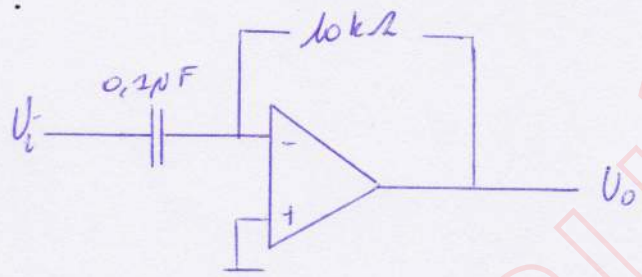
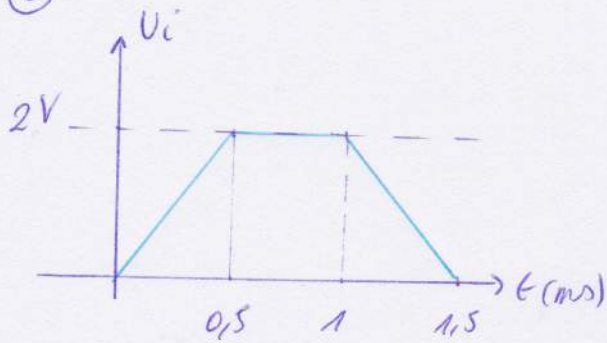
theorie: $-\frac{1}{RC} \int V_i dt = V_o$

$$\rightarrow V_o = -10 \cdot t \rightarrow V_o(3ms) = -30mV$$

$$\rightarrow V_o(\infty) = -V_{sat}$$

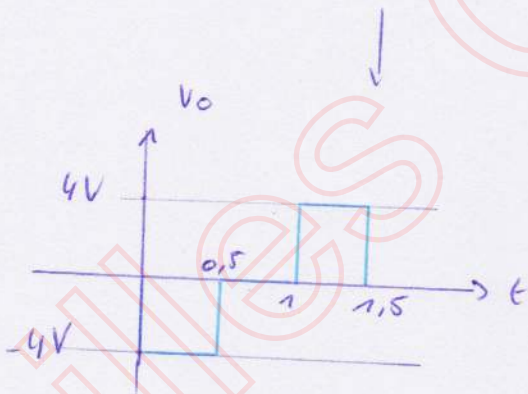


③

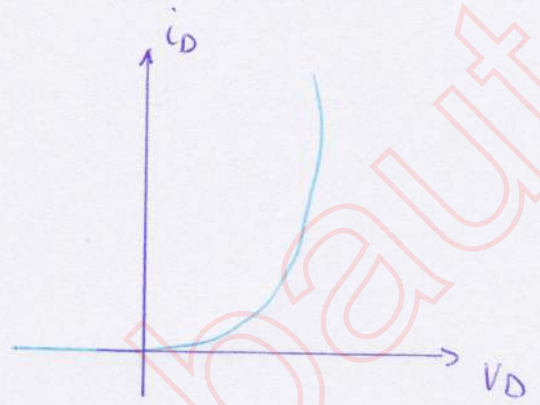
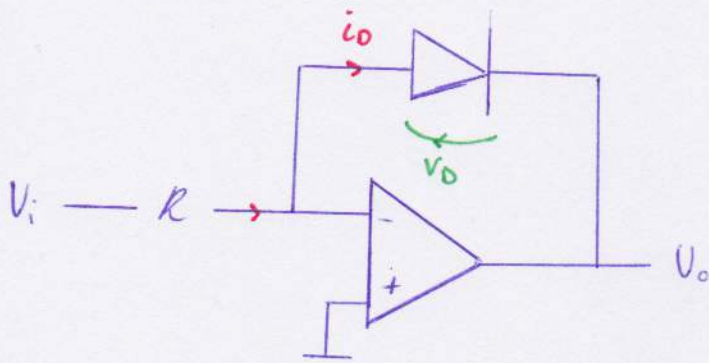


Theoretically: $U_o = -RC \frac{dU_i}{dt}$

$$U_o = -10^{-3} \frac{dU_i}{dt}$$



Niet - lineair versterker



$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

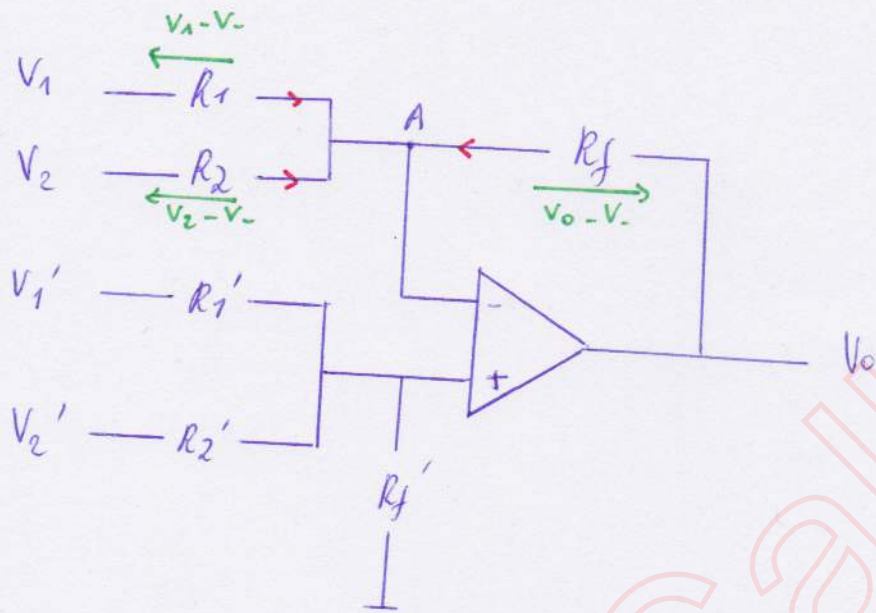
inverse saturatiestoorn
(V_{OCO})

$$i_R = i_D$$

$$\rightarrow \frac{V_i}{R} = I_S e^{v_D/V_T} \quad v_D = -V_o \quad \rightarrow \quad \frac{V_i}{R} = I_S e^{-V_o/V_T}$$

$$\rightarrow \boxed{V_o = -V_T \ln\left(\frac{V_i}{R I_S}\right)}$$

De optel-af trek schakeling



$$A) \quad \frac{V_1 - V_-}{R_1} + \frac{V_2 - V_-}{R_2} + \frac{V_0 - V_-}{R_f} = 0$$

$$\hookrightarrow V_0 = - \frac{R_f}{R_1} V_1 - \frac{R_f}{R_2} V_2 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2} \right) V_-$$

V_+) superpositie

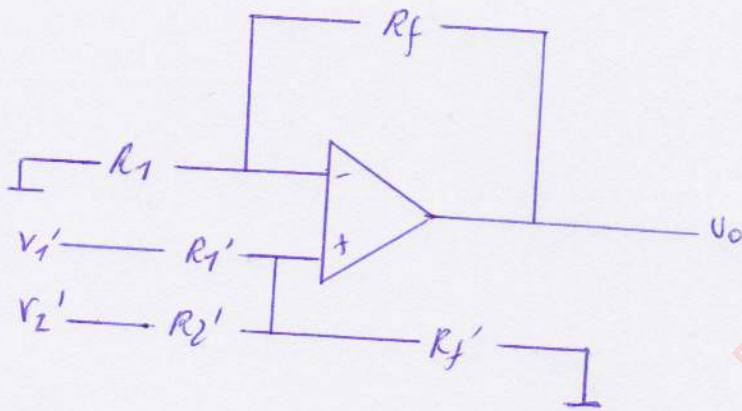
$$V_+ = \frac{\left(\frac{R_2' \cdot R_f'}{R_2' + R_f'} \right)}{R_1' + \left(\frac{R_2' \cdot R_f'}{R_2' + R_f'} \right)} V_1' + \frac{\left(\frac{R_1' \cdot R_f'}{R_1' + R_f'} \right)}{R_2' + \left(\frac{R_1' \cdot R_f'}{R_1' + R_f'} \right)} V_2'$$

$$VW: \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2} = \frac{R_f'}{R_1'} + \frac{R_f'}{R_2'}$$

↳ balansvoorwaarde

$$\rightarrow V_0 = - \frac{R_f}{R_1} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f'}{R_1'} v_1' + \frac{R_f'}{R_2'} v_2'$$

De niet-inverterende optelschakeling



→ er geldt: $V_o = V_1' + V_2'$

op VW: $R_f' = R_1' = R_2'$

\propto

$$R_f = 2R_1$$

→ algemener:

$$V_o = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

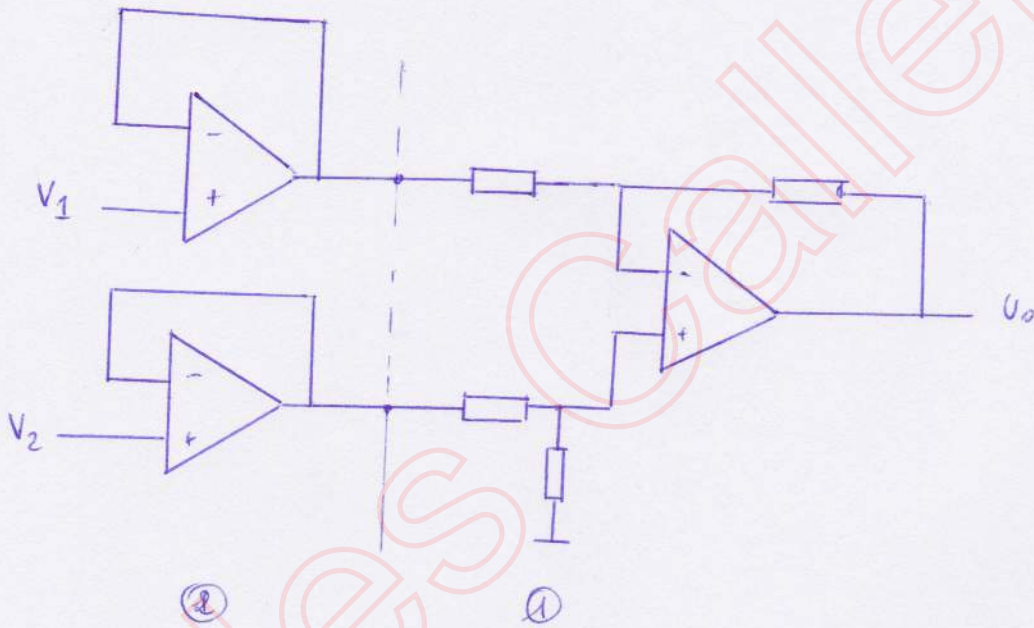
$$\text{als } \rightarrow R_1' = R_2' = \dots = R_n' = R_f'$$

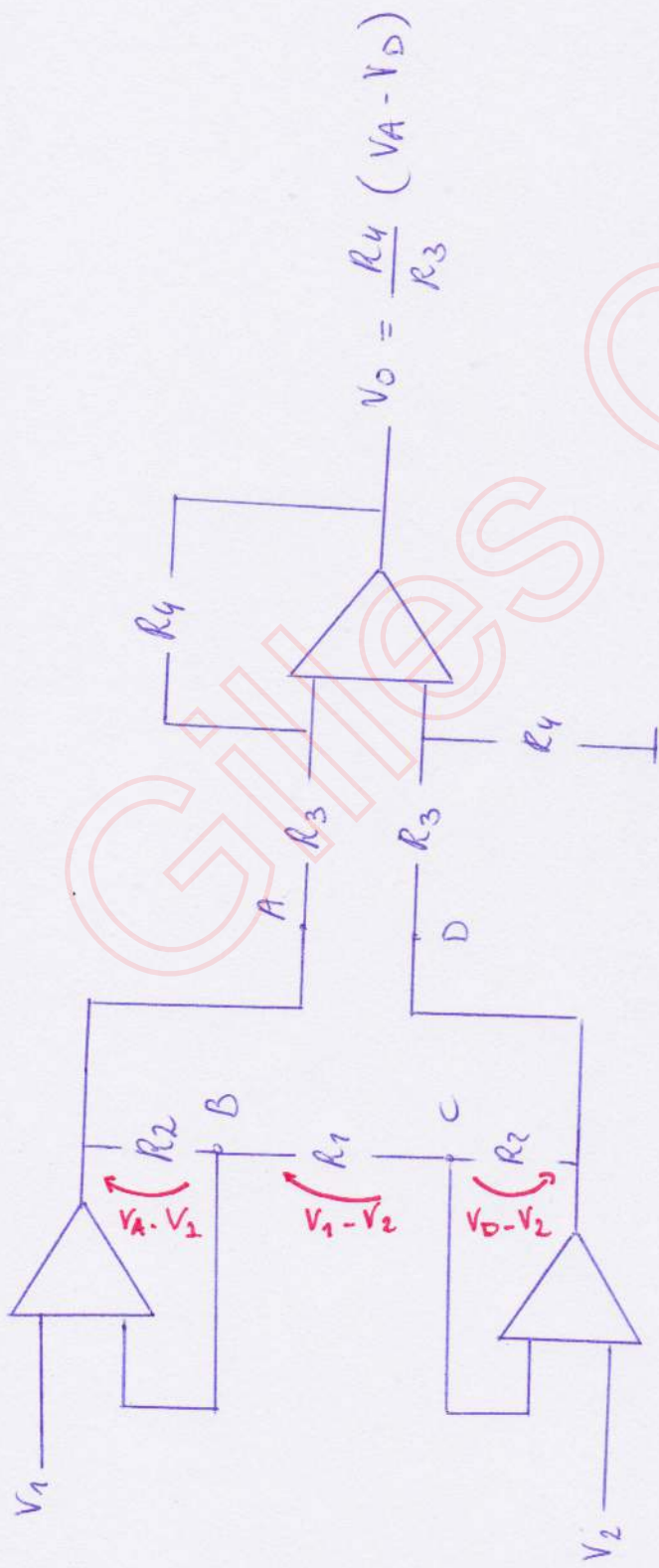
$$\rightarrow R_f = nR_1$$

Instrumentatieversterker

- ① uitgang: versterker van verschilspanningen
- ② π t belaste bron

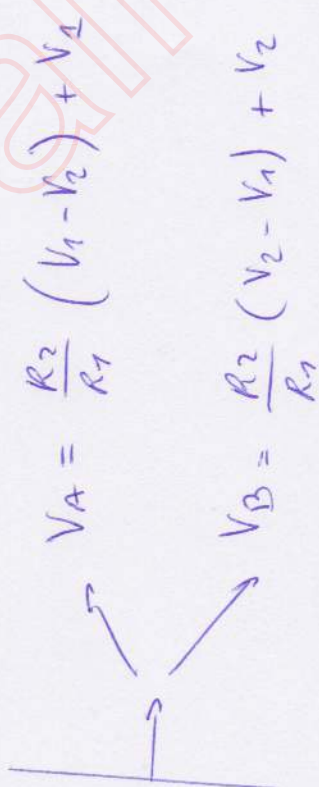
Basisschakeling:





B) $\frac{V_A - V_1}{R_2} = \frac{V_1 - V_2}{R_1}$

C) $\frac{V_D - V_2}{R_2} = - \frac{V_1 - V_2}{R_1}$



$$\Rightarrow V_0 = \frac{R_4}{R_3} \left(2 \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) (V_2 - V_1)$$