

# Analog System Design

## Eksamensforberedelse

Jonas Lind

14-08-2017

### 1 Effektforstærkerøvelse: DC

- Klasse AB 30W forstærker til  $8\Omega$  højttaler.
- Indgangssignalet har signalamplitude på 1V.

**Spændingsvinget** som er nødvendigt for at drive højttaleren ved 30W beregnes til 22V. Der skal være plads til to basis-emitter strækninger for udgangstrinnet, noget lignende til den øvrige elektronik og ripple i effektforsyningen og 10 percent på netspændingen så effektforsyningen bør placeres cirka 5V højere end kravet til  $V_O$  og det giver værdien til  $\pm 27V$ .

$$P_O = \frac{U_{RMS}^2}{R_L} \quad (1)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{P_O R_L} = \sqrt{30\text{ W} \cdot 8\Omega} = 15.5\text{ V} \quad (2)$$

$$U_{PEAK} = U_{RMS} \sqrt{2} = 22\text{ V} \quad (3)$$

**Strømsvinget** som er nødvendigt på forstærkerens udgang igennem de  $8\Omega$  findes til at være 3.65 A, ved en nominel modstandsværdi på  $6\Omega$ . Dette er gældende da højttalerens svingspole har en DC modstand  $R_{DC}$  på typisk 80 percent af den nominelle værdi.

$$I_{OPEAK} = \frac{U_{PEAK}}{R_L} = 3.65\text{ A} \quad (4)$$

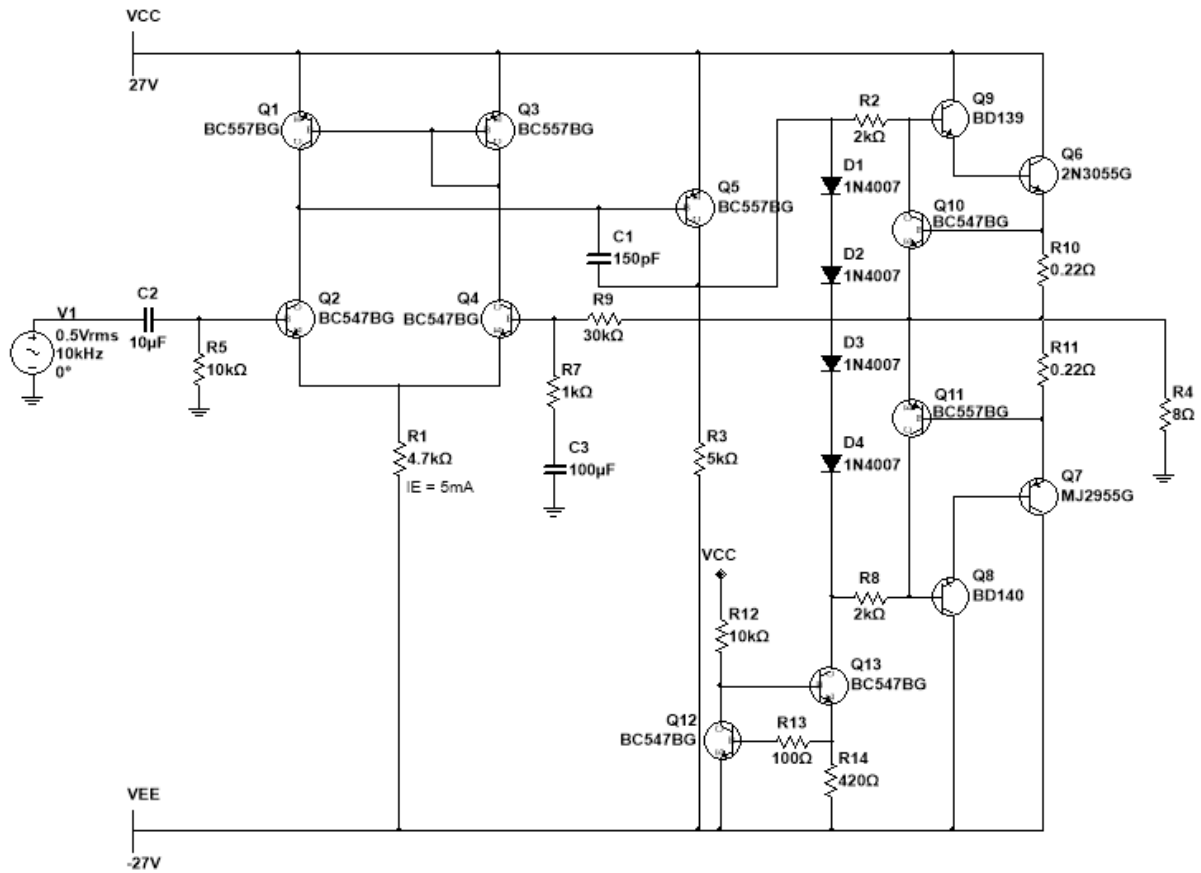
**Udgangstrinnet** benytter et darlington par af to emitter følgere (common collector) for at øge strømforstærkningen.

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = 100 \cdot 30 = 3000 \quad (5)$$

- Dette sænker de 3.65 A udganstrinnet skal levere til 1.22 mA.
- Således belaster udgangstrinnet VAS-trinnet minimalt.
- En  $2\text{ k}\Omega$  base-modstand begrænser basestrømmen til højest 1.45 mA.
- Modstanden er bestemt ved at se på fuldt udsving hvor højttaleren har 22V over sig og der er 3 gange 0.7V op til basen.

$$R = \frac{27\text{ V}(3 \cdot 0.7\text{ V} + 22\text{ V})}{1.22\text{ mA}} = 2.38\text{ k}\Omega \quad (6)$$

**Diode biasing** benyttes for at minimere crossover distortion. Fire dioder sættes i serie for at skabe et fast spændingsfald på 2.8 V mellem de to transistores baser.



Figur 1: Kredsløbsdiagram for effektforstærker klasse AB.

**Strømkilde** For at levere strømmen til dioderne anvendes en strømkilde istedet for en modstand, da der vil blive afsat for meget effekt i denne. Modstanden  $R_E$  ( $R_{14}$ ) styrer  $I_O$ .  $R_{12}$  sørger for at der løber en strøm i dioderne, der giver et konstant spændingsfald.

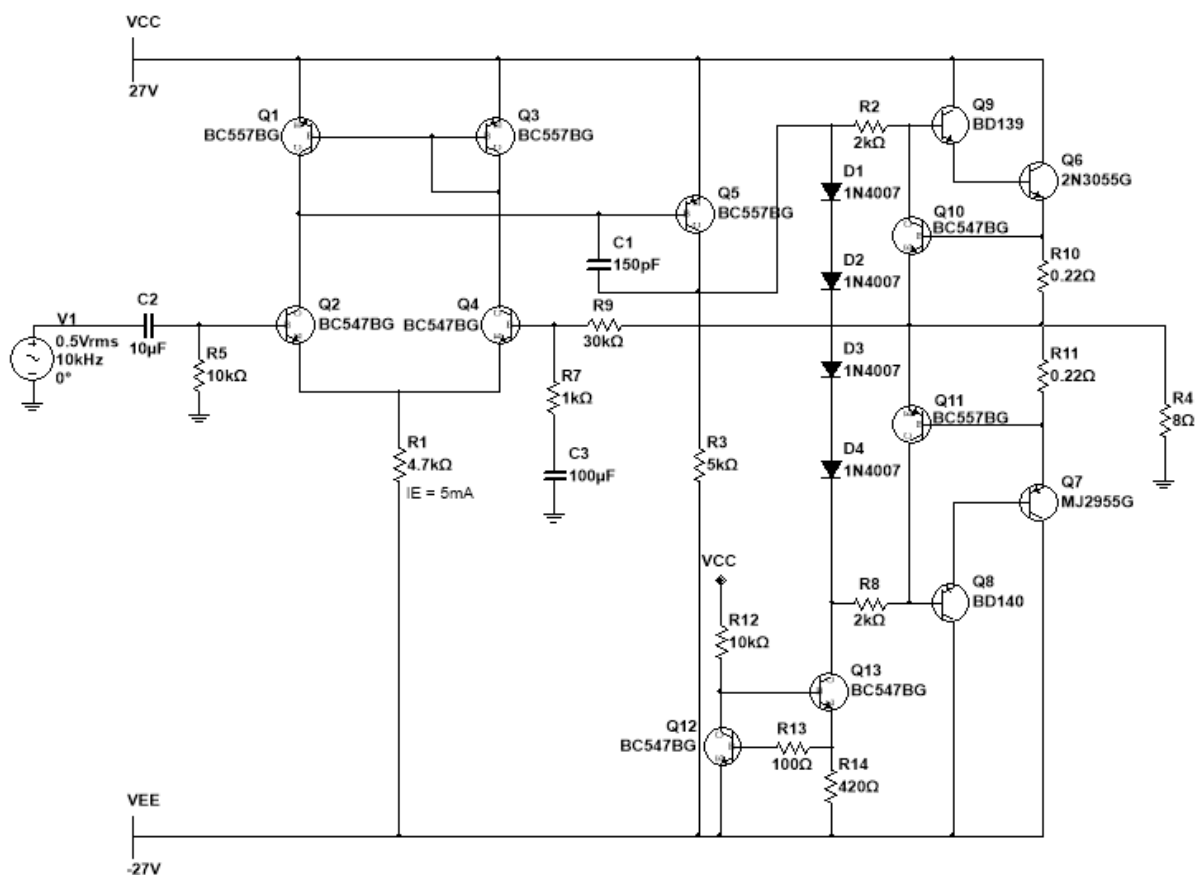
## 2 Effektforstærkerøvelse: AC

### 2.1 Forstærkning og stabilitet

- Der laves en dominerende pol for at sikre stabilitet ved at forstærkningen er sænket til under 1 når fasedrejet er 180°.
- Dette begrænser forstærkerens båndbredde.
- Slew rate begrænsning af kondensatoren  $C_C$  og strømmen  $I_E$ .
- Ved hurtig og stor udstyring bliver sinusen til en trekant pga den begrænsede hastighed.

**Det strømforstærkende trin** benytter en BJT transistors strømforstærkning for at forstærke differentialtrinnets udgangsstrøm. Denne strøm bliver ledet gennem en modstand,  $R_C$ , som laver det om til en strøm.

I en integreret forstærker benyttes ofte flere transistorer til at forøge den resulterende strømforstærkning mens en effektforstærker som oftest nøjes med en enkelt transistor da der ikke er behov for den ekstremt høje forstærkning ved DC.



Figur 2: Kredsløbsdiagram for effektforstærker klasse AB.

DC forstærkningen er således givet ved:

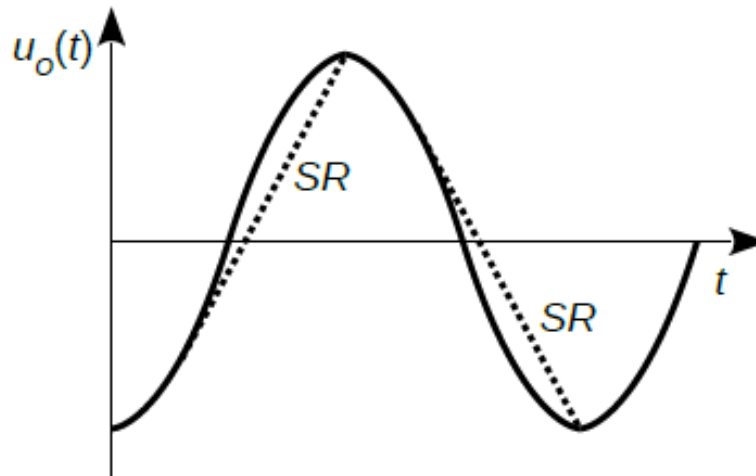
$$A_{DC} = g_m \beta R_C \quad (7)$$

Transkonduktansen  $g_m$  i differentialtrinnet T1 ... T4 beregnes til 0,1  
Kondensatoren  $C_C$  skaber en dominerende pol ved  $f_0$ , som sikrer stabilitet.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\beta R_C C_C} \quad (8)$$

Slew-raten (SR) begrænses af kondensatoren og strømmen  $I_E$ .

$$SR = \frac{I_E}{C_C} \quad (9)$$



Figur 3: Operationsforstærkerens slew rate.

Den dominerende pol giver stabilitet, men begrænser også hvor hurtigt udgangen kan flyttes. Hvis værdien forsøges overskredet bliver signalet forvrænget.

## 2.2 Transistor - AC model

## 2.3 Diode - AC model

### 3 Effektforstærkerøvelse: Effektafsættelse

Herunder regnes den totale effekt afsat i forstærkeren og ud fra den findes effekten afsat i udgangstrinnet.

Den tilførte effekt på 67 W ved 30 W afgivet i nominelt  $8\Omega$ .

$$I_{OPEAK} = 3.65 \text{ A} \quad (10)$$

$$I_{DC} = \frac{I_{OPEAK}}{\pi} = 1.16 \text{ A} \quad (11)$$

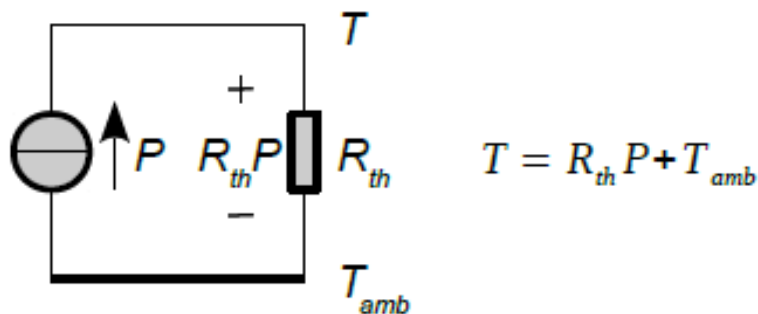
$$P_{CC} = U_{CC}(I_{PEAK} - I_{DC}) = 67.2 \text{ W} \quad (12)$$

Effekttabet i udgangstransistorerne T9 og T10 bliver 32 W samlet og derfor forventes et tab på 16 W i hver transistor.

$$P_O = \frac{U_{CC}U_O}{\pi R_L} = 31.2 \text{ W} \quad (13)$$

#### 3.1 Ohms lov analogi

En køleprofil beskrives normalt ved en termisk modstand og Ohms lov antages at gælde for det termiske system. Man siger at effektstrømmen  $P$  løber gennem den termiske modstand  $R_{th}$  og det danner et temperaturfald på  $R_{th}P$  som hæver temperaturen  $T$  over omgivelsestemperaturen  $T_{amb}$ . Den termiske modstand kaldes undertiden for køleprofils K-værdi og enheden er en stigning i temperatur per effekt.



Figur 4: Beregning af temperaturstigning ved en effektstrøm  $P$  i en termisk modstand.

#### 3.2 Termisk modstand

- Angiver evnen til at transportere og afsætte varme, f.eks. fra transistorens junction til dens overflade.
- Måles i  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- Jo højere værdi, jo varmere vil et komponent blive ved en given afsat effekt.

Klasse AB forstærkerens effekttransistor junction ønskes kølet til maksimalt  $100^{\circ}\text{C}$  Ifølge databladet for 2N3055 er junction to case  $= 1.52^{\circ}\text{C W}^{-1}$ .

$$T_j = (R_{th j-mb} + R_{th mb-hs} + R_{th hs})P + T_{amb} \quad (14)$$

$$R_{th hs} = \frac{T_j - T_{amb}}{P} - R_{th j-mb} - R_{th mb-hs} \quad (15)$$

$$R_{th hs} = \frac{100^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{11 \text{ W}} - 1.52^{\circ}\text{C W}^{-1} = 5.3^{\circ}\text{C W}^{-1} \quad (16)$$

Til effekttransistorerne blev der valgt en køleplade, som var rigeligt stor.

### 3.3 SOA

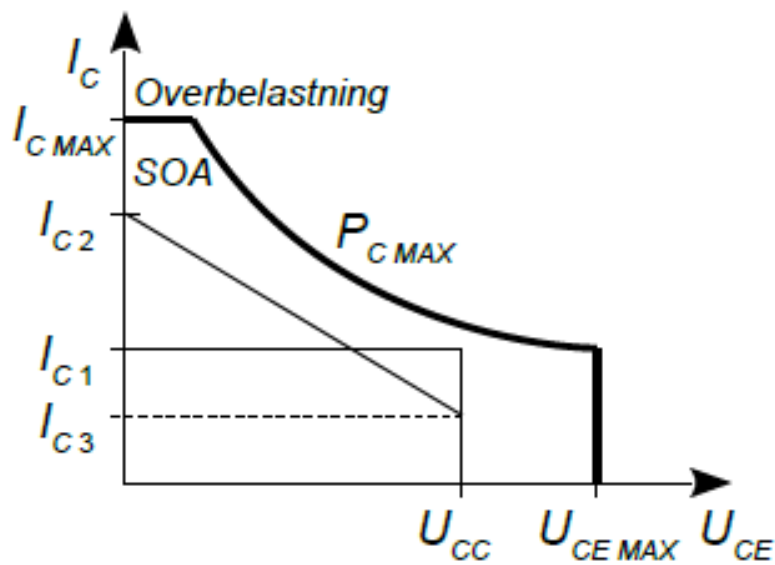
SOA er en betegnelse for safe-operating area. SOA findes ved at kombinere følgende tre begrænsninger:

- $I_{C,MAX}$
- $U_{CE,MAX}$
- $P_{MAX}$

$P_{MAX}$  giver skæringspunkterne for 2N3055:

$$I_C = \frac{P_{MAX}}{U_{CE}} = \frac{115 \text{ W}}{60 \text{ V}} = 1.9 \text{ A} \quad (17)$$

$$U_{CE} = \frac{P_{MAX}}{I_C} = \frac{115 \text{ W}}{15 \text{ A}} = 7.7 \text{ V} \quad (18)$$



Figur 5: Safe-operating area.

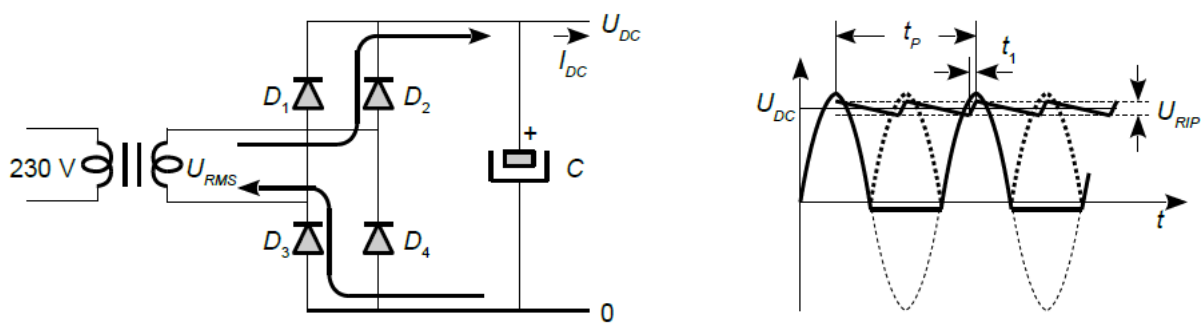
## 4 Effektforstærkerøvelse: Effektforsyning

### 4.1 Transformer

- En transformer kan regulere AC-spændinger (ikke DC!) op og ned.
- Lavere antal sekundær vindinger, giver en lavere udgangsspænding.
- Varmetab i spolerne  $\approx 5$  percent.

### 4.2 Ensretning udglatning

- Full bridge brokoblingen ensretter de positive og negative halvbølger.
- Der er to diode-spændingsfald, som sænker spændingen  $\approx -1.4$  V.
- Kondensatoren  $C_{filter}$  udglatter den ensrettede spænding.
- Der vil være ripple,  $U_{RIP}$ , som øges ved større  $I_O$ .
- $U_{RIP}$  sænkes ved større kondensator.
- Elektrolyt-kondensator benyttes.



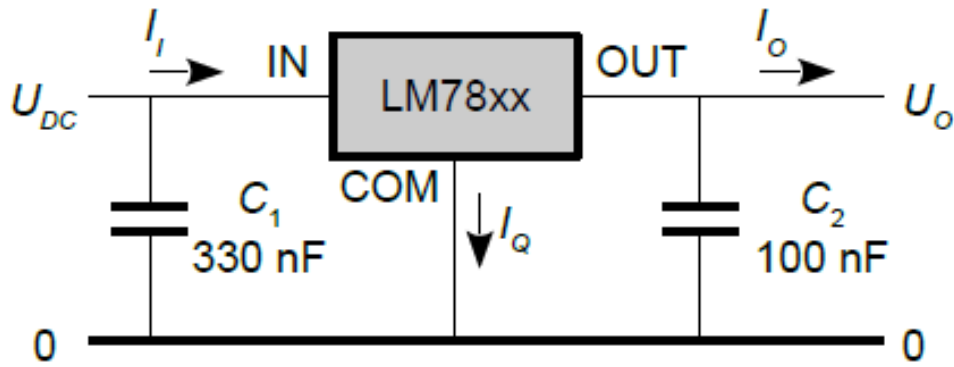
Figur 6: AC fra transformeren ensrettet af brokoblingen.

$$t_p = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 20 \text{ ms} \quad (19)$$

$$C_{Filter} = \frac{I_{DC} t_p}{2 U_{RIP}} \quad (20)$$

### 4.3 Serie regulator

- Lineær spændingsregulator, som afsætter overskydende spænding som varme.
- Input kondensatoren sikrer stabilitet, hvis dens forsyning er langt fra input.
- Output kondensatoren giver også stabilitet og evnen til hurtigt at levere strøm.
- Reguleres internt ud fra en bandgap spændingsreference,  $V_{ref}$ .



Figur 7: En serieregulator der nedsætter spændingen fra en ustabil effektforsyning til en stabil og kortslutningssikker forsyningslinje. De viste kondensatorer er krævet af hensyn til stabilitet.

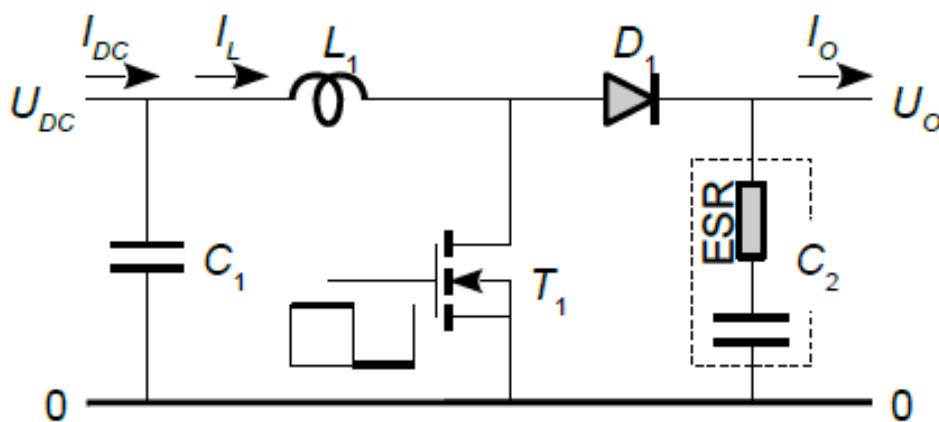
#### 4.4 DC-DC konverter

DC konverteren benytter en spole til at optage energi fra indgangen i et kort tidsrum hvorefter energien overføres til udgangen i det efterfølgende tidsrum. Den proces gentages i en evindelighed styret af en transistor og en diode der arbejder som kontakter. Transistoren kan være bipolar eller feltereffekt.

- Kan regulere DC spændinger op og ned mere effektivt end lineære regulatorer.
- Har en virkningsgrad på over 90 percent.
- Der er højfrekvent switching støj på udgangen, hvilket kan være uønsket.

##### Opkonvertering

- Et PWM signal med en frekvens  $> 100$  kHz styrer MOSFET'en.
- Når MOSFET'en er tændt løber der en strøm igennem spolen, som oplades. C2 aflades.
- Når MOSFET'en er slukket aflades spolen, som skaber en spænding i serie med  $U_{DC}$ , som lader C2 op igennem dioden.
- Dioden sørger for at kondensatoren ikke aflades tilbage igennem MOSFET'en.
- Gøres det hurtigt nok vil  $U_O$  altid holdes over  $U_{DC}$ .

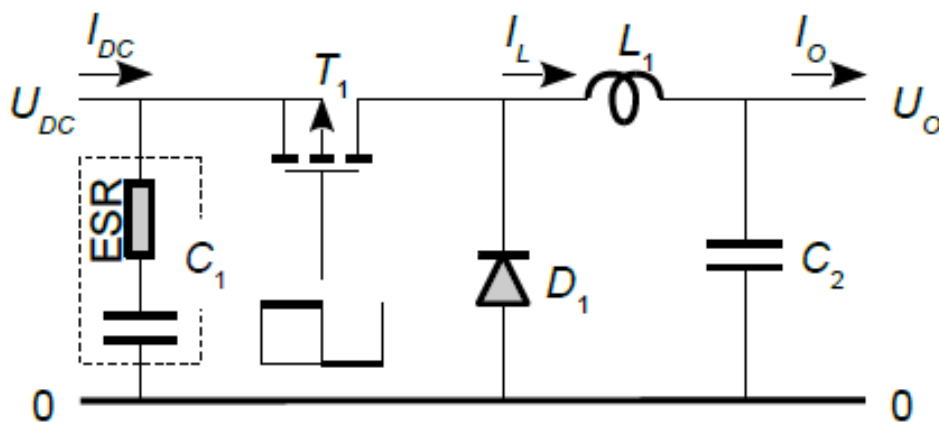


Figur 8: Opkonvertering.



## Nedkonvertering

- Ved nedkonvertering er der byttet rundt på MOSFET, diode og spole.
- Først når MOSFETen er slukket løber der ingen strøm i kredsløbet.
- Når MOSFETen tændes begynder strømmen langsomt at stige i spolen, det skaber et modsatrettet spændingsfald. Dette gør at  $U_O < U_{DC}$ .
- Imens strømmen stiger i spolen opbygger den et magnetisk felt.
- Når MOSFETen slukkes vil spolen blive ved med at levere strøm, som opretholder udgangsspændingen.

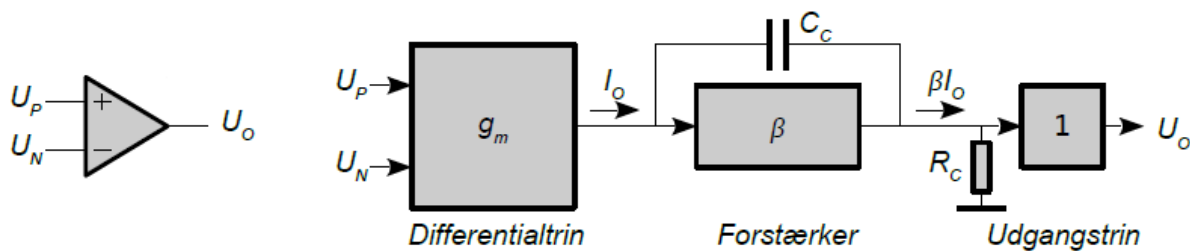


Figur 9: Nedkonvertering.

$$C_{Filter} = \frac{I_{DC} t_p}{2U_{RIP}} \quad (21)$$

## 5 Operationsforstærkeren

En OpAmp kan beskrives ved et differentielt indgangstrin der omsætter en spænding til en strøm ved transkonduktansen  $g_m$  og en strømforstærker  $\beta$  der danner en spænding over  $R_C$ .

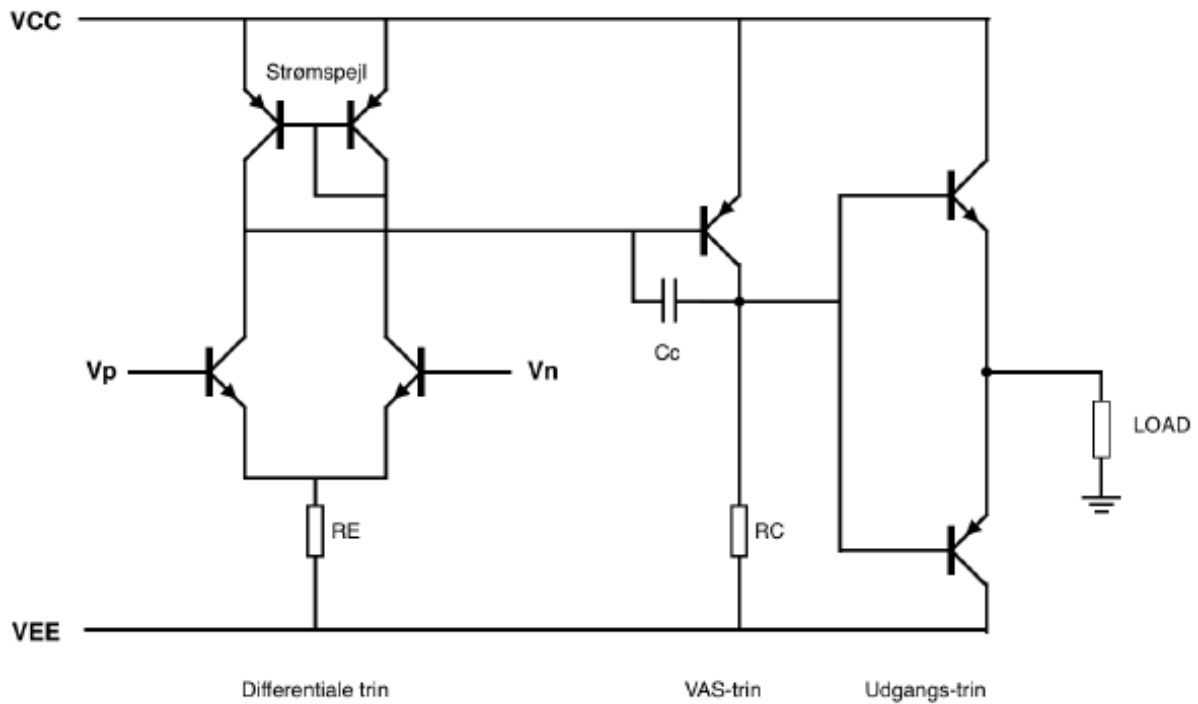


Figur 10: En OpAmp består af et differentielt indgangstrin og en strømforstærker.

- Forstærker forskellen mellem de to indgange,  $U_P$  og  $U_N$ .
- Differential-trinnet laver spændingsforskellen om til en strøm  $I_O$ .
- VAS-trinnet forstærker strømmen med  $\beta$ , som laves til en spænding med  $R_C$ .
- Udgangstrinnet er en unity gain buffer, så udgangen af VAS-trinnet ikke belastes af eksternt load.
- Kondensatoren  $C_C$  skaber en dominerende pol, der gør OpAmpen stabil.
- DC gain:  $A_{DC} = g_m \beta R_C$
- AC gain:  $A_{OL} = \frac{g_m}{\omega C_C}$

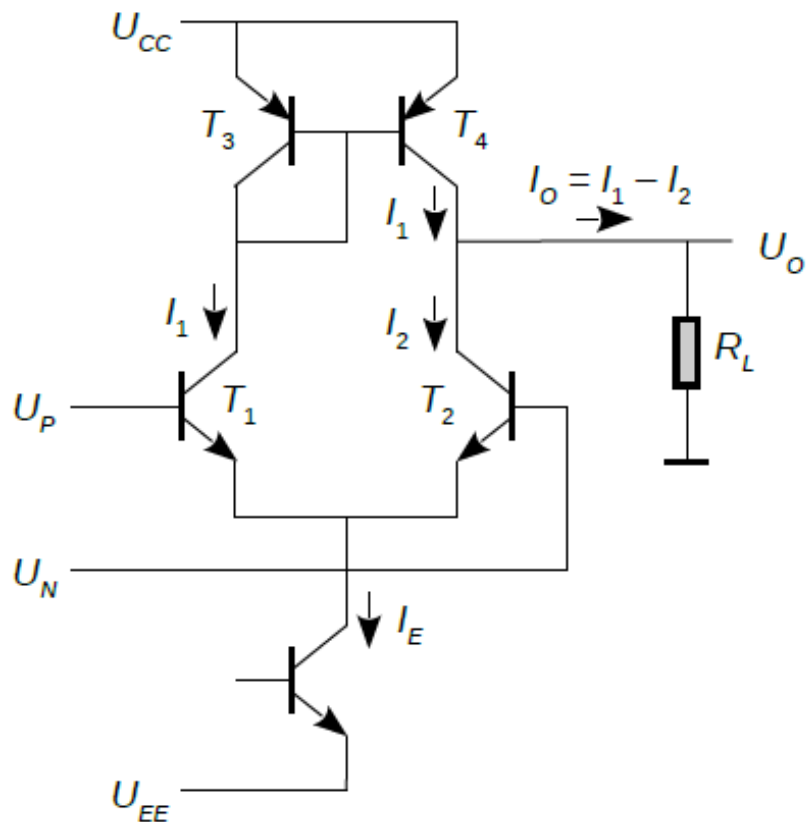
## 5.1 Opbygning og DC forhold

- Trin 1 Spænding til strøm en transkonduktans blok.
- Trin 2 Forstærker strøm og omsætter til spænding - en transresistans forstærker, også kaldet VAS (Voltage Application Stage).
- Trin 3 Kommer ved effektforstærkeren. Omsætter fra mA niveau til A niveau.



Figur 11: Generelt OpAmp kredsløb.

**Differentialtrinnet** benytter to BJT med fælles emitter, en såkaldt differentielkobling. En strømkilde driver en fast strøm  $I_E$  i den fælles emitter. De to transistorer tvinges derfor til at dele strømmen mellem sig. De to transistorer T3 og T4 udgør et strømspejl hvor strømmen i T1 kopieres over til T4.



Figur 12: Differentialtrin med strømspejl.

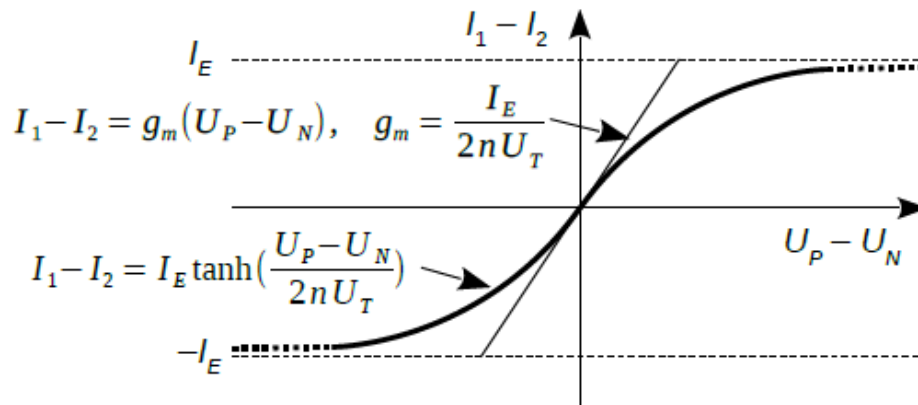
Strømdelingen styres af en spændingsdifferent  $U_P U_N$  mellem de to indgange ved basis. Hvis spændingsdifferenten er nul deles strømmen ligeligt med 50 % til hver transistor. Hæves spændingsdifferenten vil T1 trække mere strøm og T2 må så nøjes med en mindre strøm da  $I_E$  er konstant. På grund af strømspejlet ved T3 og T4 vil differenten mellem  $I_1$  og  $I_2$  give en strøm  $I_O$  i udgangen.

Ved stor positiv spændingsdifferent vil T1 lede 100 procent strømmen og T2 får 0 procent. Der er derfor en øvre grænse for den strøm der kan løbe i udgangen. Det er ikke muligt at få en udgangsstrøm  $I_O$  på mere end  $I_E$  uanset spændingsdifferenten.

$$I_o = g_m(U_P - U_N) \quad (22)$$

$$U_T = \frac{kT}{q_0} \approx 26 \text{ mV} \quad (23)$$

$$g_m = \frac{I_E}{2nU_T} \quad (24)$$



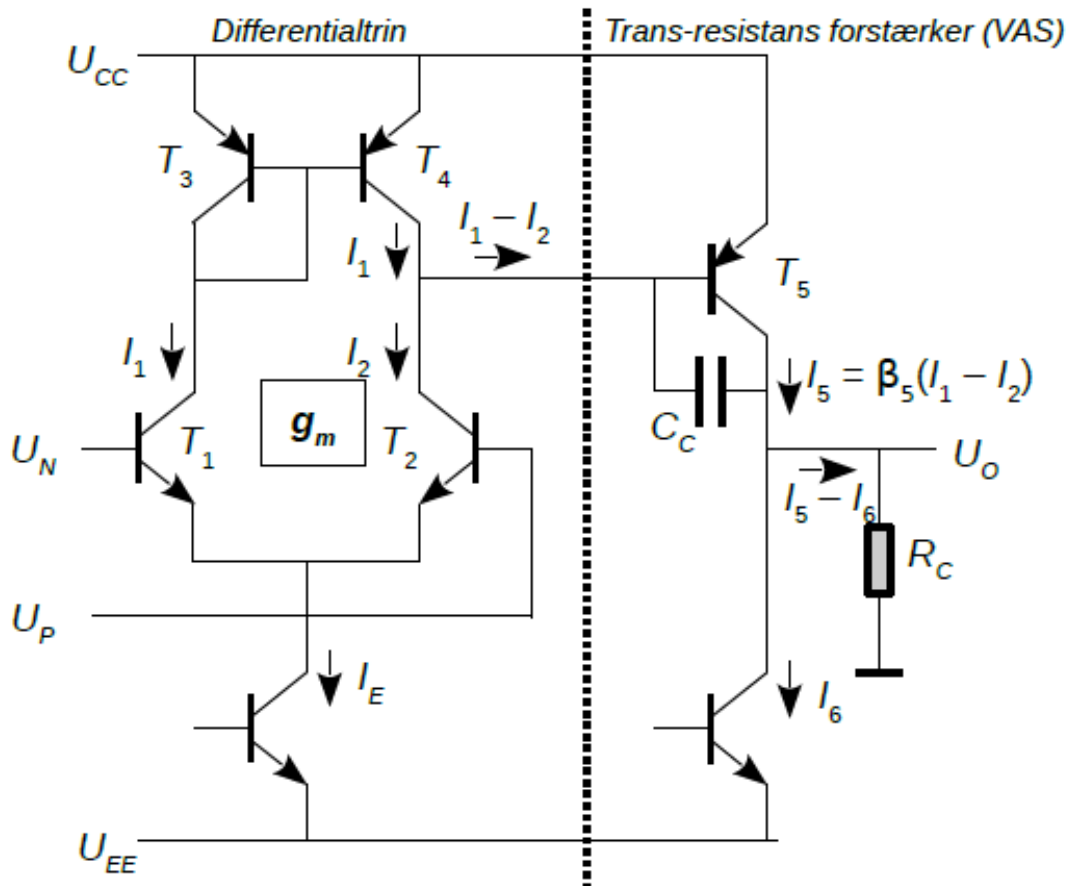
Figur 13: Differentialtrinnets emitterstrøm.

Der er et næsten retlinet forløb for en spændingsdifferens nær ved nul og at stor spændingsdifferens giver et mætningsforløb for strømdifferensen  $I_1 - I_2$  hvor der optræder en begrænsning til den fælles strøm i emitter.

$I_E$  er arbejdsstrømmen, en emitterstrøm. Typisk  $100\ \mu\text{A}$  i operationsforstærker og  $5\ \text{mA}$  i effektforstærker.

**Det strømforstærkende trin** benytter en BJT transistors strømforstærkning for at forstærke differentialtrinnets udgangsstrøm. Denne strøm bliver ledet gennem en modstand,  $R_C$ , som laver det om til en strøm.

I en integreret forstærker benyttes ofte flere transistorer til at forøge den resulterende strømforstærkning mens en effektforstærker som oftest nøjes med en enkelt transistor da der ikke er behov for den ekstremt høje forstærkning ved DC.



Figur 14: Trans-resistans forstærker (VAS).

DC forstærkningen er således givet ved:

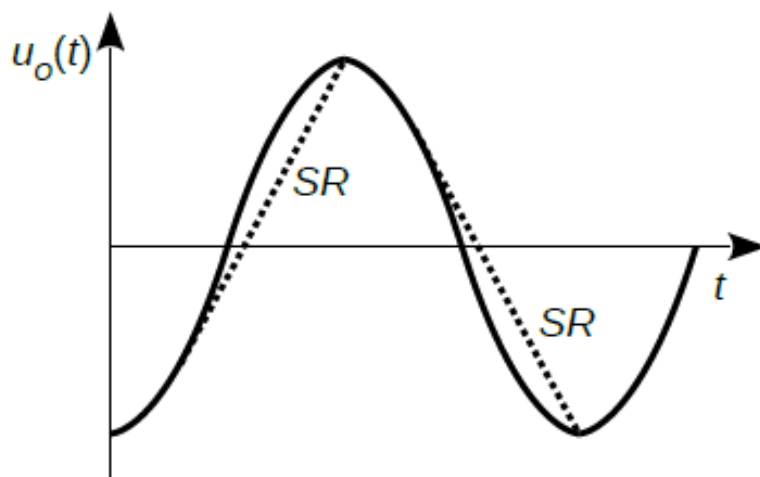
$$A_{DC} = g_m \beta R_C \quad (25)$$

Kondensatoren  $C_C$  skaber en dominerende pol ved  $f_0$ , som sikrer stabilitet.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\beta R_C C_C} \quad (26)$$

Slew-raten (SR) begrænses af kondensatoren og strømmen  $I_E$ .

$$SR = \frac{I_E}{C_C} \quad (27)$$



Figur 15: Operationsforstærkerens slew rate.

Den dominerende pol giver stabilitet, men begrænser også hvor hurtigt udgangen kan flyttes. Hvis værdien forsøges overskredet bliver signalet forvrænget.

#### Lave frekvenser

$$U_O = g_m \beta R_C (U_P - U_N) \quad (28)$$

#### Høje frekvenser

$$U_O = \frac{g_m}{j\omega C_C} (U_P - U_N) \quad (29)$$

## 5.2 AC forhold og stabilitet

- En operationsforstærker har mindst to poler.
- En tilbagekoblet operationsforstærker skal have en dominerende pol for stabilitet.
- Ved tilbagekobling giver det en overføringsfunktion af mindst andet orden og det kan give problemer med stabilitet.
- For at gardere sig kan man vælge den dominerende pol  $f_0$  så lavt at systemet bliver ubetinget stabilt.
- Miller transformation udføres for at finde modstande og kapaciteter, der resulterer i poler.

Polen mellem differentialtrinnet T1 til T4 og VAS-trinnet T5 bliver normalt ofret ved at inkludere  $C_C$  der sænker polens frekvens så den udgør operationsforstærkerens dominerende pol. Polens frekvens er som regel lavere end 1 kHz.

Der er en fordel ved valget idet kapaciteten  $C_{\mu}$  fra kollektor til basis ved T5 bliver stort set uden betydning. Det er væsentligt fordi operationsforstærkerens egenskaber ved høje frekvenser defineres af netop denne kapacitet. Det betyder at kondensatoren er aktiv i hele frekvensområdet den dominerende pol. Transistorens kapacitet  $C_{\mu}$  er spændingsafhængig og vil derfor introducere harmonisk forvrængning, men ved at parallelkoble  $C_{\mu}$  med en stabil kapacitet  $C_C$  kan forvrængningen sænkes.

Den hastighed udgangen kan flyttes med, altså slew raten, begrænses af strømmen  $I_E$  og kapaciteten  $C_C$  som beskrevet tidligere. Et design af en operationsforstærker bliver derfor et kompromis mellem at opnå en hurtig forstærker, altså en stor slew rate, og stabilitet, altså en lav værdi af GBP.

**Udgangstrinnet** fra operationsforstærkeren benytter oftest to eller flere transistorer koblet som emitterfølger. Trinnet opgave er at kunne levere (eller optage) en stor strøm til (fra) belastningen  $R_L$  samt at isolere det relativt høje impedansniveau ved kollektor af T5 fra belastningens varierende værdi. Modstanden  $R_C$  er faktor i udtrykket for åben-sløjfe forstærkningen  $A_{OL}$  og ønskes derfor til en høj værdi. Det giver så til gengæld en pol ved udgangen af forstærkertrinnet.

## 5.3 Offset-fejl og støj

## 6 Dioden

Diodens egenskab er PN overgangen der kun tillader en elektrisk strøm at løbe i én retning. I modsatte retning løber en ubetydelig strøm indtil spændingen over dioden bliver så stor at PN overgangen bryder sammen og strømmen vokser hurtigt.

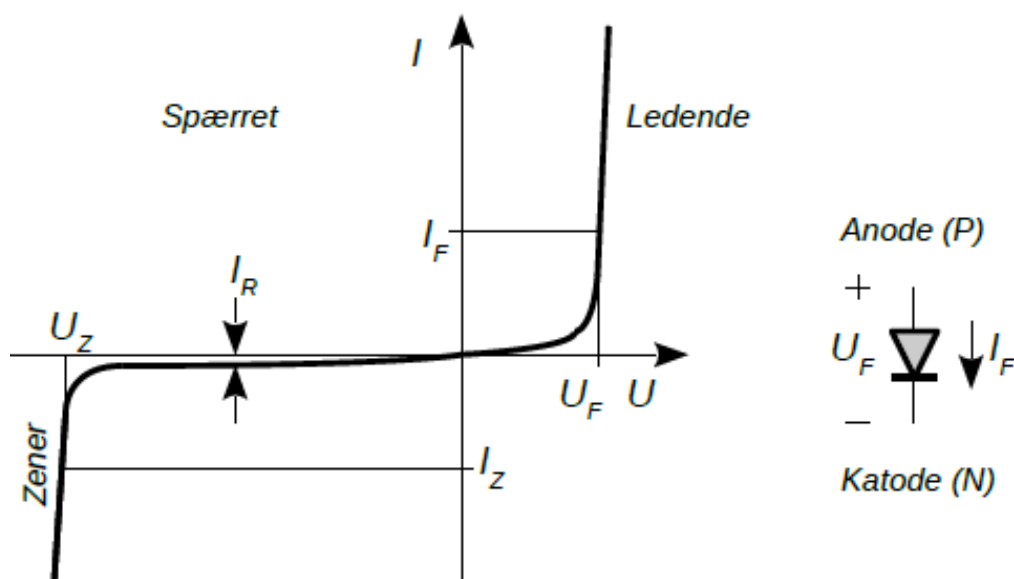
- Dioden er afbrudt når anodens spænding er lavere end katodens spænding.
- Dioden repræsenteres af en spændingsforskel på 0,7 V når anodens spænding er højere end katoden og der løber en strøm.
- I det ledende område er strømmen en eksponentiel funktion af diodens spænding.

$$I_F = I_s \exp\left(\frac{U_F}{nU_T}\right) \quad (30)$$

- I det spærrende område er strømmen meget lille, men varierer nu eksponentielt med temperaturen.

$$I_R = I_{R0} 2^{(T-T_0)/\Delta T} \quad (31)$$

- I zener området vil diodens strøm vokse voldsomt når spændingen over dioden overskrider en grænse hvorved PN overgangen bryder sammen.
- Relationen er eksponentiel og strømmen vokser en dekade ved en ændring af spændingen over dioden på cirka 60 mV for  $n = 1$ . Relationen vil almindeligvis holde over et område på seks dekader fra 10 nA til 10 mA for småsignaldioder.



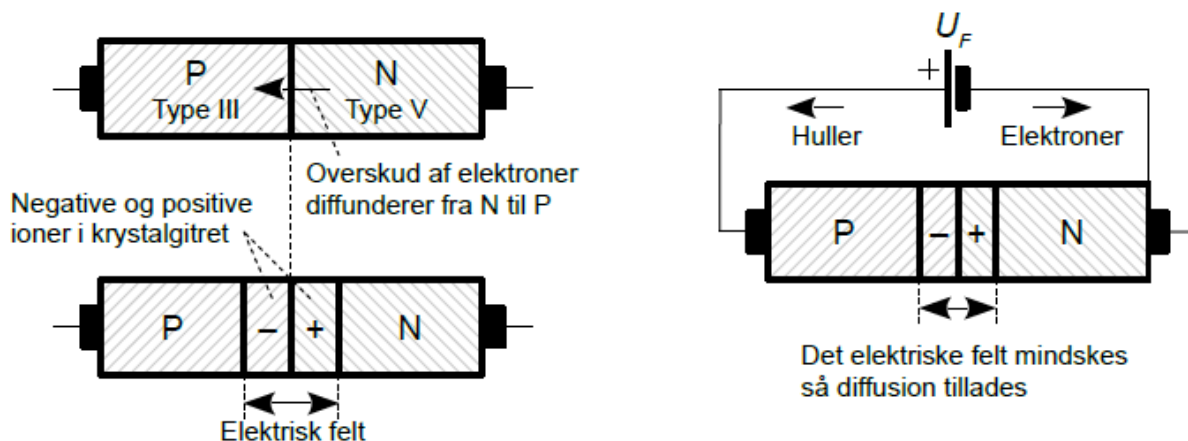
Figur 16: Diodens karakteristisk  $I(U)$ .

### 6.1 PN overgangen

Dioden består af et P-lag og et N-lag, med henholdsvis et underskud og et overskud af elektroner.

- Diodens N halvleder har et overskud af frie elektroner.
- Diodens P halvleder har et overskud af flytbare huller.
- Diffusionen af elektroner danner et elektrisk felt som modvirker diffusionen. Elektronerne fra N-laget diffunderer mod P-laget.
- En ekstern spændingskilde kan ændre på det elektriske felt og derved styre strømmen i dioden.





Figur 17: PN overgangen.

Hvis der påtrykkes en ekstern spænding med plus ved P og minus ved N vil det tilføre frie elektroner til N halvlederen som mindsker det elektriske felt. Derved kan elektroner diffundere gennem PN overgangen og rekombinere med hullerne i P halvlederen. **Der løber en elektrisk strøm i dioden.**

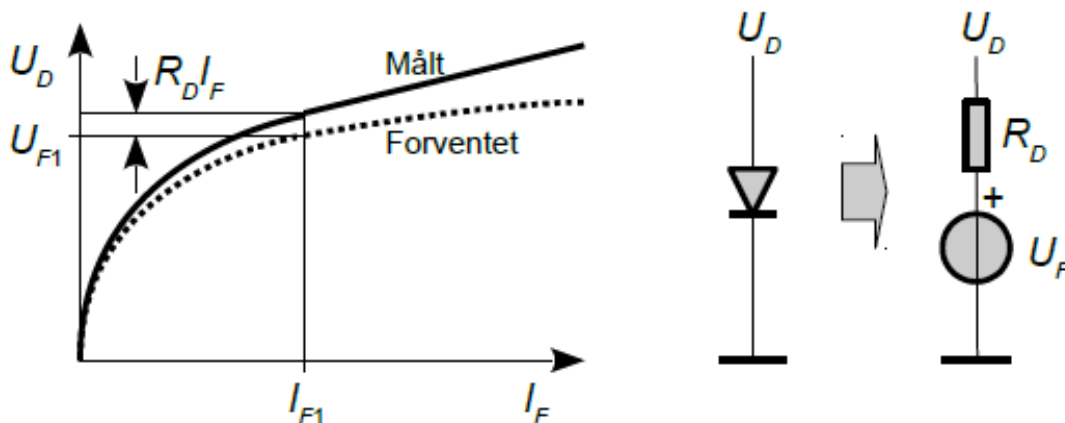
Hvis det eksterne batteri vendes om vil det elektriske felt øges og blokere for en strøm. **Dioden spærrer.**

## 6.2 Modeller - AC/DC

**DC modellen** for dioden har en DC modstandsværdi,  $R_D$ , som resulterer i et større målt spændingsfald,  $U_D$ , i lederetningen ved en given strøm  $I_F$ .

$$U_D = U_F + R_D I_F \quad (32)$$

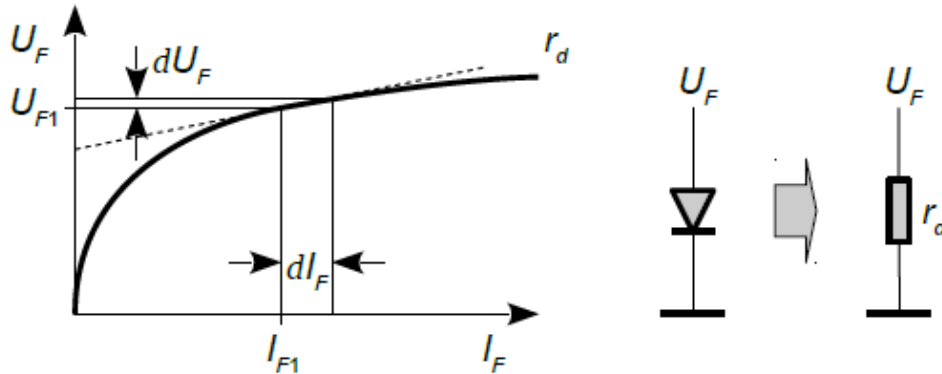
- Seriemodstanden skyldes ledningsevnen af halvlederens materiale.
- Modstanden  $R_D$  er ikke en konstant værdi.



Figur 18: Diodens seriemodstand ved DC.

**AC modellen** for dioden hvor seriemodstanden er ubetydelig, kan dioden ses som en strømstyret modstand. Modstanden falder ved højere strømme.

$$r_D = \frac{U_T}{I_F} \quad (33)$$

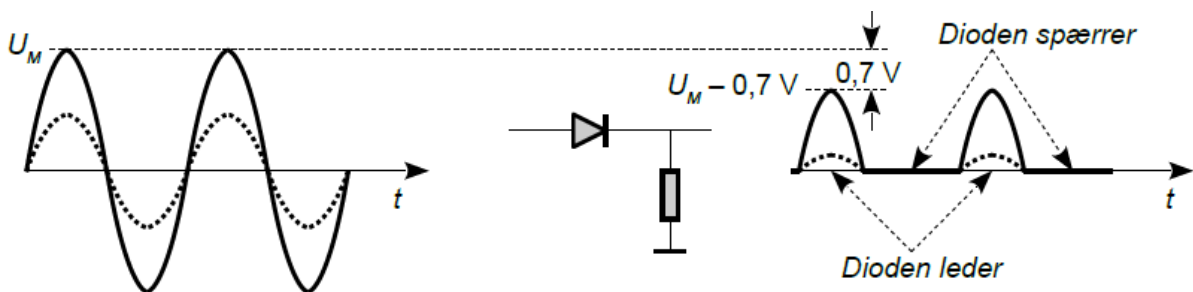


Figur 19: Diodens seriemodstand ved AC.

### 6.3 Anvendelser

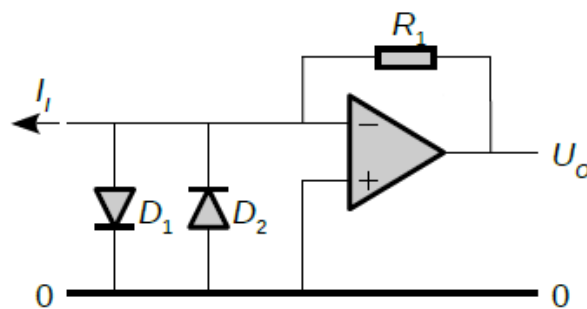
**Ensretning** Halvbølge ensretning af et vekselssignal giver en pulserende jævnstrøm.

- Hvis indgangssignalet er positivt vil udgangen følge med indgangssignalet i den positive halvperiode dog med en forskel på cirka 0,7 V.
- Hvis indgangssignalet er negativt vil dioden spærre da der kun kan løbe strøm i diodens lederetning.



Figur 20: Halvbølge ensretning af et vekselssignal.

**Beskyttelseskredsløb** Dioden kan beskytte en følsom indgang imod overspænding.

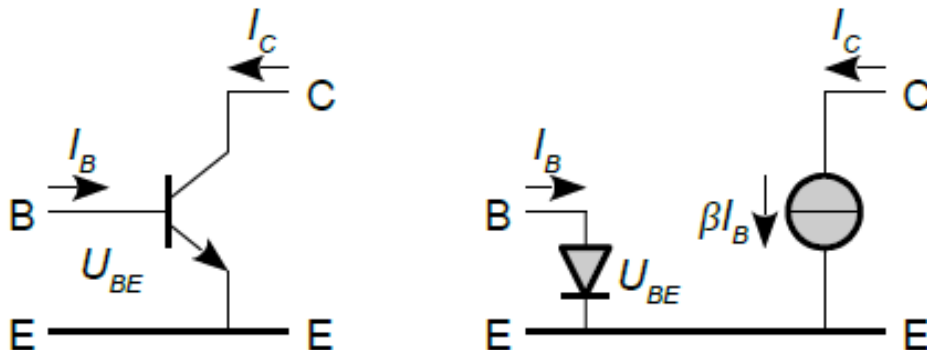


Figur 21: Beskytning af en følsom indgang imod overspænding.

## 7 Transistoren: DC

### 7.1 DC model

Der er to modeller for hvordan transistorens kollektorstrøm styres.



Figur 22: Transistorens strøm er styret af base-emitter spændingen eller basisstrømmen.

#### DC model 1 Spændingsstyret

- Spændingen over transistorens base-emitter junction,  $U_{BE}$ , styrer kollektorstrømmen  $I_C$ .
- Basisstrømmen er  $\beta$  gange mindre end kollektorstrømmen.

$$I_C = I_S \exp \frac{U_{BE}}{nU_T} \quad (34)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (35)$$

#### DC model 2 Strømstyret

- Basisstrømmen  $I_B$  styrer kollektorstrømmen  $I_C$ .
- Strømførstærkningen  $\beta$  er typisk mellem 100 og 1000 for småsignal transistorer.
- Effektransistorer forstærker 10 til 100 gange.

$$I_C = I_B \beta \quad (36)$$

$$U_{BE} = nU_T \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (37)$$

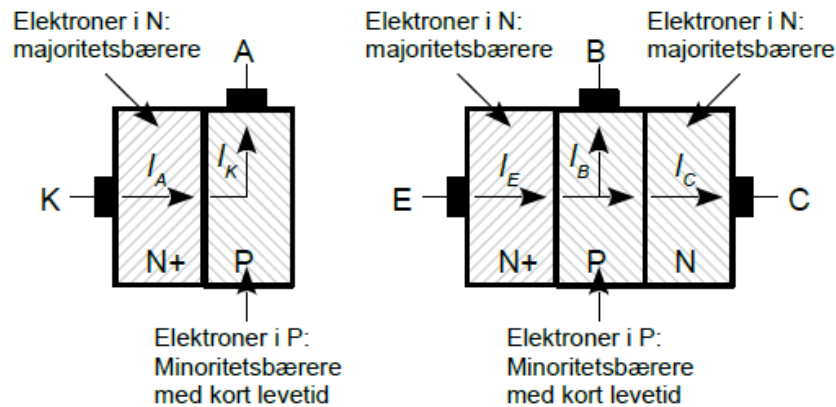
### 7.2 Forskellige typer (BJT, FET)

**BJT** er en bipolar transistor som fremstilles ud fra en diode ved at tilføje endnu et lag halvleder.

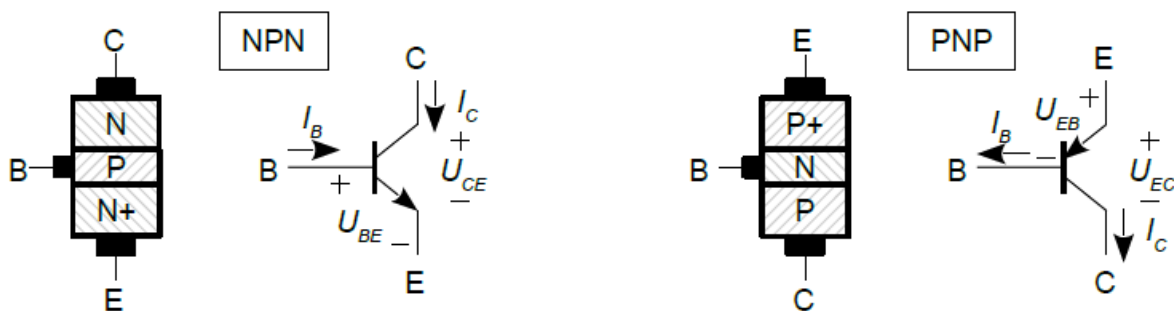
- Der er to måder PN overgangene kan arrangeres på: NPN og PNP.
- De er komplementære transistorer.
- Meget ens, men lidt større diode spændingsfald ved en PNP.

Ved NPN tilføres et ekstra N lag mod diodens anode hvorved elektronerne kan løbe videre i ledningsbåndet til det nye N lag der kaldes for kollektor.

Hvis bredden af P laget er væsentlig mindre end rekombinationslængden vil hovedparten af elektronerne fortsætte fra emitter til kollektor. De elektroner der rekombinerer i basis laget udgør transistorens basisstrøm.



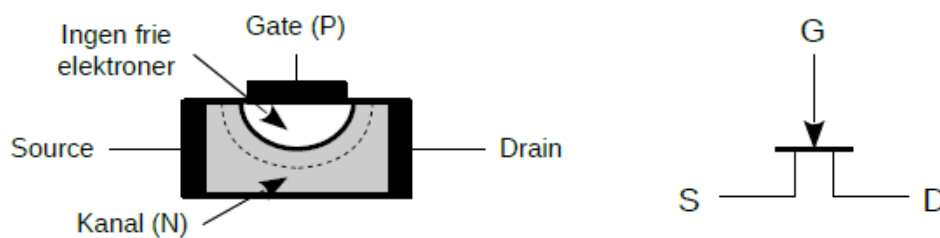
Figur 23: En NPN opbygning med emitter (N+), basis (P) og kollektor (N).



Figur 24: NPN og PNP transistor.

**JFET** er en betegnelse for junction field effect transistor. Den har tre elektroder der benævnes *gate* for styreelektroden, *source* for strømkilden og *drain* for opsamling af elektronerne. Styreelektroden gate er forbundet til kanalen mellem drain og source via en spærrende diode. Med en negativ spænding på gate i forhold til source vil det elektriske felt frastøde elektroner i nærheden af dioden. Modstanden af kanalen er givet ved antallet af frie elektroner. Hvis kanalen indsnævres ved det elektriske felt fra gate vil der være færre elektroner og derved en højere modstandsværdi mellem source og drain.

- Transistoren er åben uden spænding på gate  $V_{GS} = 0$ . Kaldes Depletion mode.
- En negativ gate-source spænding vil begynde at begrænse drain-strømmen  $I_D$  (modsat for en P kanal JFET).
- Transistoren er helt spærende ved den negative pinch off spænding:  $V_P$ .

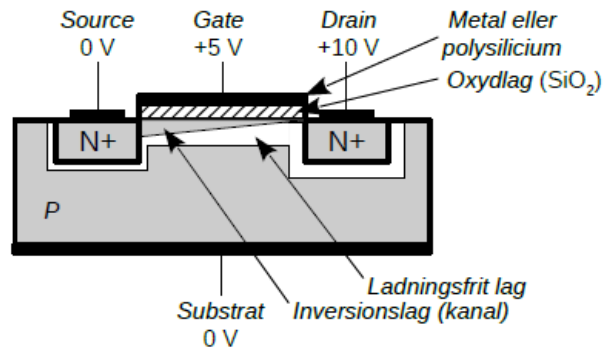


Figur 25: JFET transistor.

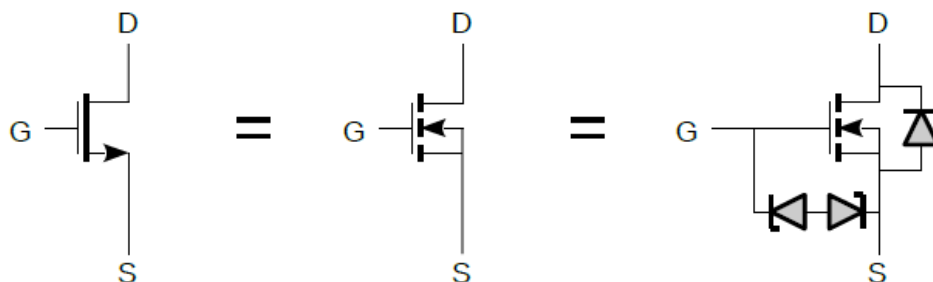
Kanalen mellem source og drain er i mange tilfælde symmetrisk og de to elektroder kan da ombyttes. Hvis det ikke er tilfældet tegnes pilen nærmest ved source.

**MOSFET** er betegnelsen for en metal-oxide silicon field-effect transistor. Gate-elektroden er opbygget som et metallag med et tyndt lag siliciumoxyd som isolator mellem gate og kanal.

- Mosfetten spærrer for strøm når gate-spændingen  $V_{GS} < V_{GS(th)}$ . Kaldes Enhancement mode.
- Der kan løbe strøm i drain når gaten lades op (det tager tid, som en kondensator).
- Gate kapaciteten begrænser hvor hurtigt den kan tænde/slukke.



Figur 26: MOSFET transistor opbygning.

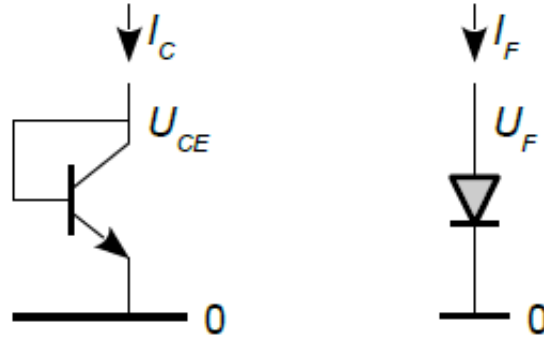


Figur 27: MOSFET transistor symbol.

### 7.3 Anvendelser

**Diodekobling** En diode-koblet transistor opfører sig fuldstændig som en diode.

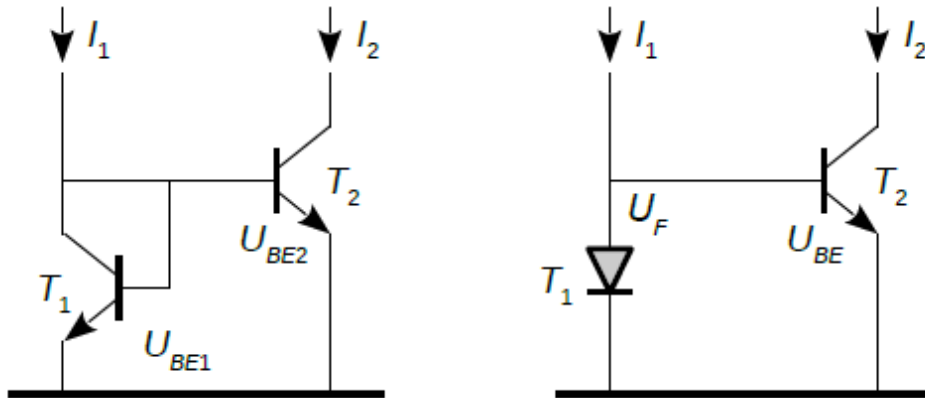
- Ved at korslutte basis og kollektor bliver transistoren en diode.
- Hyppigt brugt i IC design.
- Anvendes i strømspejlet.



Figur 28: Transistoren kan benyttes som diode.

**Strømspejl** En strøm  $I_1$  i transistor  $T_1$  vil give en tilsvarende strøm  $I_2$  i transistor  $T_2$  så det er muligt at bruge strømmen i ét kredsløb til at styre en strøm i et andet.

- Strømmen  $I_1$  vil føre til en tilsvarende strøm  $I_2$ .
- Der løber en lille basis-strøm, som i praksis vil føre til en fejl i  $I_2$ .



Figur 29: Strømspejl.

$$U_F = nU_T \ln \left( \frac{I_S}{I_1} \right) \quad (38)$$

$$U_{BE} = U_F \quad (39)$$

$$I_2 = I_S \exp \left( \frac{U_{BE}}{nU_T} \right) \quad (40)$$

$$I_2 = I_S \exp \left( \frac{nU_T \ln \left( \frac{I_S}{I_1} \right)}{nU_T} \right) \quad (41)$$

## 8 Transistoren: AC

### 8.1 AC model

DC-arbejdspunktet angives med  $I_B$ ,  $I_C$  og  $U_{BE}$ .

AC-værdierne angives med  $i_B$ ,  $i_C$  og  $u_{BE}$ .

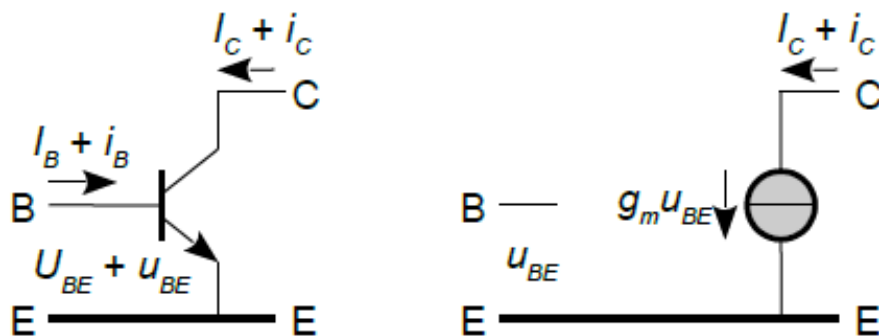
**Linearitet** kan for en transistor opnås ved at holde signalniveauet lavt. Arbejdspunktet må ikke komme tæt på  $I_C = 0mA$  og må kun svinge få mV omkring dette arbejds punkt.

$$I_C = g_m u_{BE} \quad (42)$$

$$i_C = I_S \exp \frac{u_{BE}}{nU_T} \quad (43)$$

Strømmen i kollektor  $i_C$  varierer proportionalt med  $u_{BE}$  ved svagt signal.

$$i_C = \frac{I_C}{nU_T} u_{BE} \quad (44)$$



Figur 30: Simple AC model.

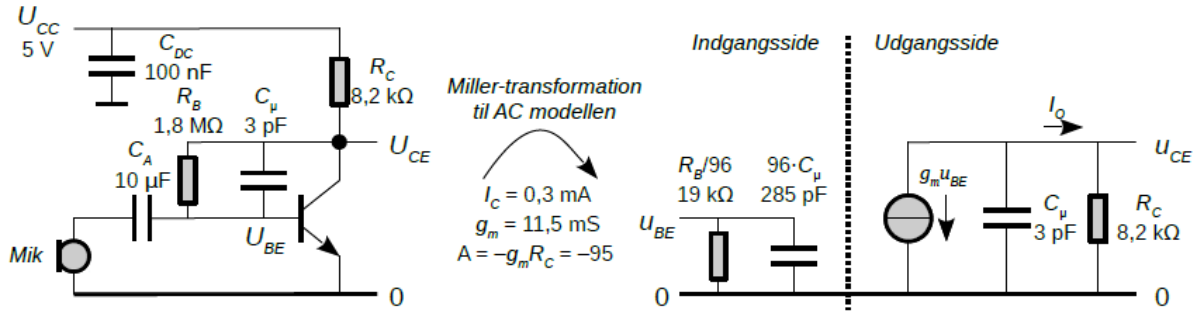
DC arbejds punkt  $I_C$  giver fundamentet for AC modellens vigtigste parameter: transkonduktansen.

**Transkonduktansen** er proportionaliteten mellem småsignals-kollektorstrømmen  $i_C$  som funktion af spændingen  $u_{BE}$ . Den beskriver ledningsevnen i siemens (S).

For at finde et arbejds punkt hvor det er muligt at lave denne småsignals overførelse, laves en DC analyse hvor  $I_C$  og  $U_{BE}$  bestemmes. Ud fra disse kan transkonduktansen findes som:

$$g_m = \frac{I_C}{U_T} \quad (45)$$

**Miller transformationen** Transistoren har en intern kapacitet  $C_u$  i den spærrende diode i kollektor-basis og den begrænser den opnåelige båndbredde. Ved et eksempel med en mikrofon forstærker vises Miller transformationen. Først oversættes kredsløbet til en AC model:



Figur 31: Mikrofonforstærker med kapaciteten  $C_\mu$  indtegnet.

Fra AC modellen ovenfor ses det at forstærkningen må være

$$A = \frac{u_{CE}}{u_{BE}} \quad (46)$$

$u_{CE}$  må for dette kredsløb være spændingsfaldet over  $R_C$  da strømmen løber væk fra  $I_o$ .

$$u_{CE} = -g_m u_{BE} R_C \quad (47)$$

Dette indsættes i udtrykket for forstærkningen

$$A = \frac{-g_m u_{BE} R_C}{u_{BE}} \quad (48)$$

På billedet nedenfor er en mikrofon forstærker Miller transformeret

Først findes transkonduktansen for kredsløbet  $I_C$  vælges til 2 mA i DC analysen:

$$g_m = \frac{I_C}{u_T} = \frac{2 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 0.08 \text{ S} \quad (49)$$

Dernæst findes forstærkningen i kredsløbet:

$$A = -g_m R_C = g_m 1.25 \text{ k}\Omega = -95 \quad (50)$$

Herefter findes indgangs impedansen af kredsløbet: Hvis modstanden  $R_B$  skal have samme strøm gennem sig når den er sat til 0V må den ændres i værdi, da der over den er et spændingsfald på  $u_{CE} - u_{BE}$  hvilket ikke er lig  $u_{BE} - 0V$ . Det nye spændingsfald er 1-A gange mindre og får at få den samme strøm må  $R_B$  ændres til

$$R_B = \frac{R_{BM}}{1 - A} \quad (51)$$

$$R_I = R_{BM} = \frac{270 \text{ k}\Omega}{1 - (-95)} = 2.8 \text{ k}\Omega \quad (52)$$

Næst findes udgangsimpedansen: Da  $R_B$  set fra indgangens synspunkt har en meget lav spænding (A gange mindre ind på udgangen) på indgangen, kan dette ses som 0V og i dette tilfælde er  $u_{CE} - u_{BE} = u_{CE} - 0V$ , derfor skal modstanden ikke ændres ved Miller transformationen, heller ikke  $R_C$ .

## 8.2 Koblingstyper og deres egenskaber

(forstærkning, ind- og udgangsimpedans)

## 8.3 Støj og forvrængning

- Forstærkeren er ikke støjfri.
- Termisk støj fra modstandene  $e_{nR}$ .
  - Signalkildens modstand  $R_G$ .
  - Basismodstanden  $r_x$ .



- Haglstøj fra strømmene i basis og kollektor.
  - Basis  $i_{nB}$
  - Kollektor  $i_{nC}$

Transistorens forvrængning kan holdes til 1 % THD (total harmonic distortion) ved at indgangssignalet varierer med mindre end 1mA. Dette skyldes transistorens eksponentielle karakteristik.