

LAB 5: Transistorer

Mål

Registrere transistorkarakteristikker, fortsette treningen i bruk av kretssimulator og måle på en forsterker.

Om oppgavene

Oppgave 1

- Måle kollektorstrømmen I_C som funksjon av spenningen V_{CE} (kollektor – emitter) for 3 forskjellige basestrømmer.

Oppgave 2

Forsterkerkobling – simulering med PSpice:

- Tegne og simulere en transistorforsterker med felles emitter.
- Bestemme transistorens arbeidspunkt.
- Måle forsterkerens spenningsforsteking med og uten emitterkondensator.

Oppgave 3

- Forsterkerkopling – Målinger på en reell forsterker.

Det være lurt å se over forelesningsnotatene for bipolare transistorer og kapittel 19-21 i læreboken.

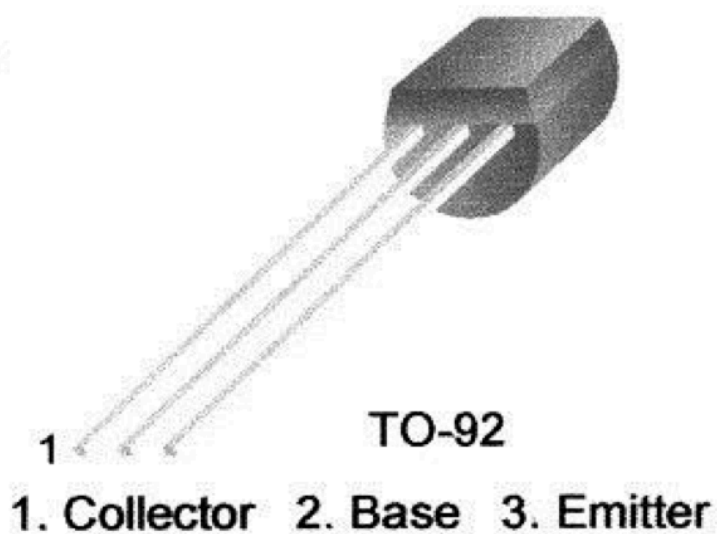
Introduksjon til oppgave 1: Transistor karakteristikk til BC-547

Transistoren som skal brukes i oppgavene er en n-p-n silisium transistorer av type BC547. Tilkoplingene til base, emitter og kollektor er vist i fig. 1. Transistoren er tegnet, etter vanlig praksis, sett fra undersiden. Alle målinger utføres med voltmeter (DVM).

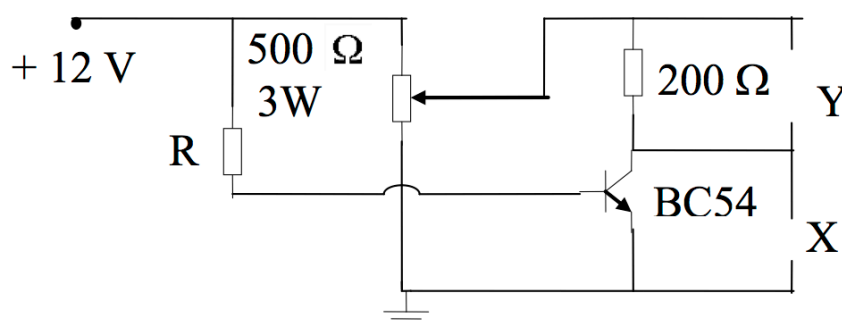
Karakteristikker for transistorer finner man i fabrikantens datablad.

Noen viktige data for BC-547:	
Maksimal spenning kollektor emitter V_{CE}	50 V
Maksimal spenning base emitter V_{BE}	5 V
Maksimal kollektorstrøm I_C	100 mA
Maksimal effekt ($V_{CE} \times I_C$)	500 mW

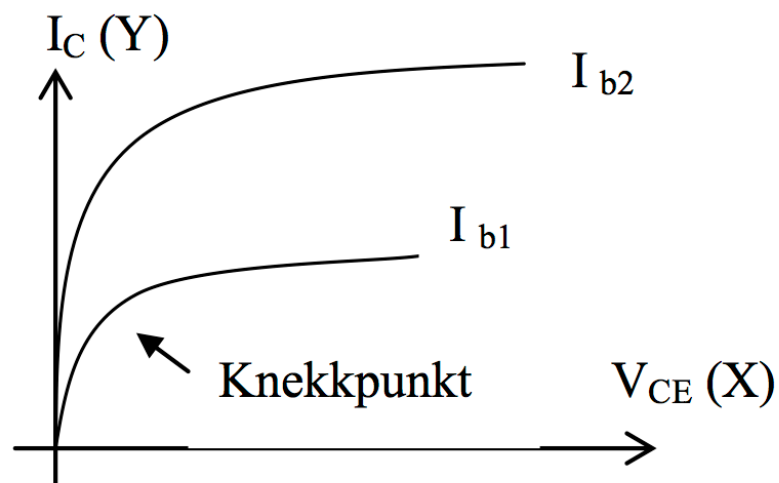
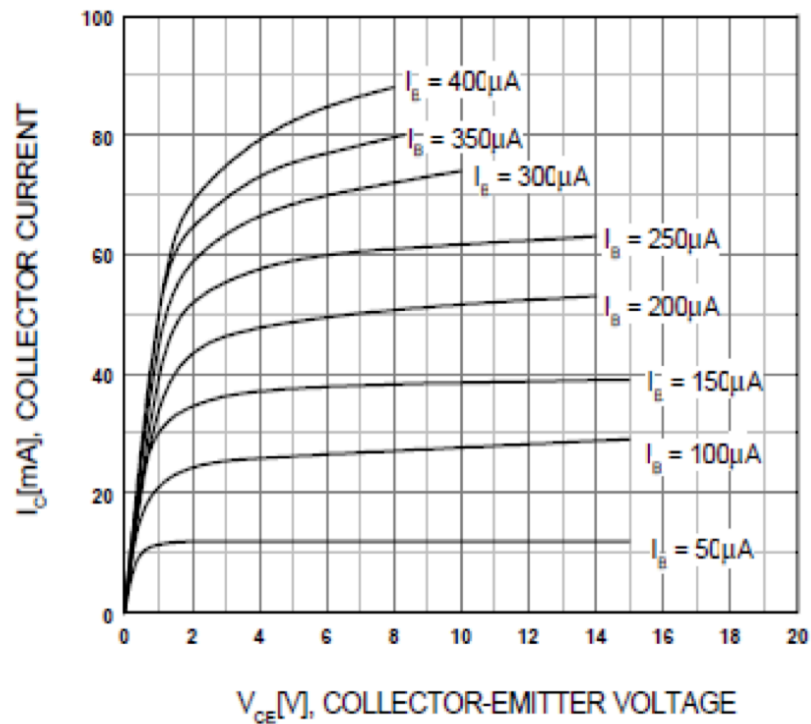
Strømförsterkning β ved $V_{CE} = 5V$ og $I_C = 2mA$, er oppgitt til å variere mellom 110 og 800.



Vi kan selv ta opp karakteristikker med noen enkle koblinger, som f.eks. den i figur 2.



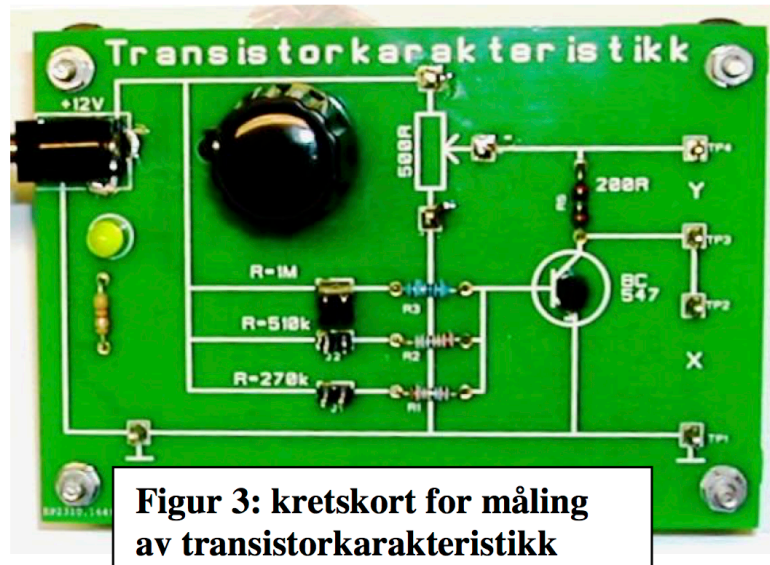
Figur 2



Oppgave 1: Tegn V_{CE}/I_C karakteristikken til BC547 for 3 forskjellige basestrømmer

Prinsippskissen i Figur 2 er realisert på et ferdig kretskort - som vist i figur 3. Basemotstandene velges vha. en 'strap' på kretskortet. Begynn med $R = 1 \text{ M}\Omega$.

1. Beregn I_{B1} .
2. Finn først hvor karakteristikken knekker. Mål noen verdier rundt knekkpunktet. F.eks. $V_{CE} = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.50, 1.0$ volt Mål noen få punkter langs den lineære delene av kurven. (F.eks. $V_{CE} = 3V, 5V$ og $6V$). Pass på at du lar V_{CE} spenningen øke til minst 6 volt.
3. Gjenta målingene over også for basemotstandene: $510\text{ K}\Omega$ og $270\text{ K}\Omega$. Bruk de samme verdiene for V_{CE} når du måler I_C med andre de basestrømmer I_{B2} og I_{B3} .



Hint: Når transistoren arbeider riktig skal $V_{BE} \approx 0,7$ volt - dvs. $V_{RB} = 12V - 0.7V$. Strømmene I_C måles indirekte:

1. Mål spenningen over motstanden på 200 ohm.
2. Beregn I_C .

Bruk de samme V_{CE} -verdiene når du skal måle I_C for de andre basestrømmene.

```
In [1]: %matplotlib notebook
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from numpy import asarray
import lab5
```

Funksjon for å regne ut kollektorstrømmen:

```
In [ ]: RC = 200
def IC(VRC, RC):
    return asarray(VRC)/RC
```

Målinger

Basestrøm 1: R = 1M Ω

```
In [ ]: ### Beregn IB1 her ###  
R1 = 1e6  
IB1 = ## ? ##
```

```
In [ ]: ### Dine målinger her ###  
VCE1 = []  
VRC1 = []  
IC1 = IC(VRC1, RC)
```

```
In [ ]: plt.figure()  
### Din kode for plot her ###
```

Basestrøm 2: R = 510k Ω

```
In [ ]: ### Beregn IB2 her ###  
R2 = 510e3  
IB2 = ## ? ##
```

```
In [ ]: ### Dine målinger her ###  
VCE2 = []  
VRC2 = []  
IC2 = IC(VRC2, RC)
```

```
In [ ]: plt.figure()  
### Din kode for plot her ###
```

Basestrøm 3: R = 270k Ω

```
In [ ]: ### Beregn IB3 her ###  
R3 = 270e3  
IB3 = ## ? ##
```

```
In [ ]: ### Dine målinger her ###  
VCE3 = []  
VRC3 = []  
IC3 = IC(VRC3, RC)
```

```
In [ ]: plt.figure()  
### Din kode for plot her ###
```

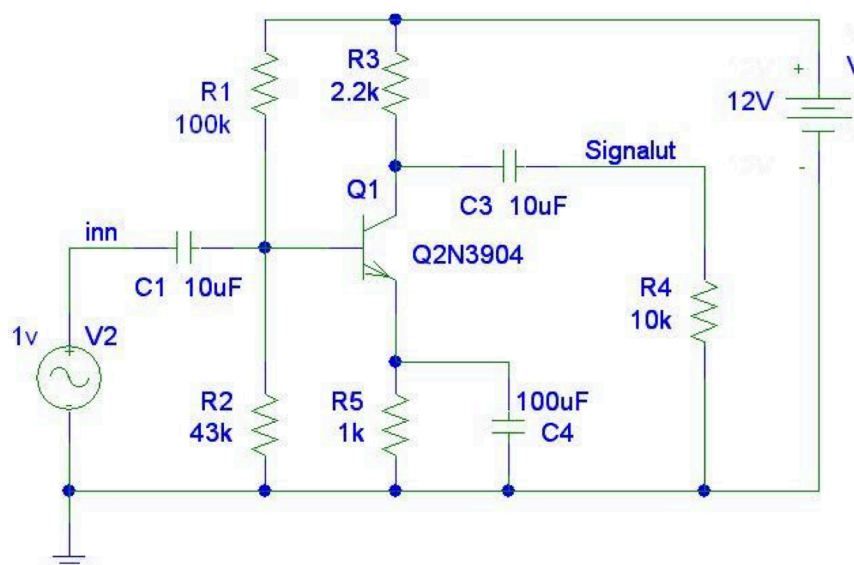
Plott karakteristikk

Tegn opp V_{CE}/I_C -karakteristikken for de tre basemotstandene. Plott grafene i samme figur ved å kjøre cellen under.

```
In [ ]: plt.figure()
plt.plot(VCE1, IC1, '-o', label="IB1=%duA" % (IB1*1e6))
plt.plot(VCE2, IC2, '-o', label="IB2=%duA" % (IB2*1e6))
plt.plot(VCE3, IC3, '-o', label="IB3=%duA" % (IB3*1e6))
plt.legend(loc=4)
plt.grid(True)
plt.xlabel("VCE [V]")
plt.ylabel("IC [A]")
```

Oppgave 2: Simuler en transistorforsterker med PSpice

Noen detaljer knyttet til oppgave 2 : Studentversjonen av PSpice har ingen modell for BC547. Bruk Q2N3904 som er en tilnærmet lik NPN-transistor. Husk at PSpice benytter M for milli, MEG for mega, u for micro og at desimal-tegnet er punktum.



Figur 4: Transistorforsterker med felles emitter (NB! som signalgenerator (V2) bruker du VSIN)

Tegn kretsen i PSpice og svar deretter på oppgavene. For VSIN, sett AC til 0.025 (50 mVpp) mens de andre paramterne kan settes til 0.

```
In [ ]: %pspice
```

Oppgave 2a

Kjør først en simulering uten påtrykt signal (kun Bias Point Detail). Under `Analysis` finner du `Display results on schematics`. Hvis du "enabler" denne funksjonen vises spenninger og strømmer i alle kretsens knutepunkter. Kopier dette skjema inn i besvarelsen ved å

1. Merk kretsen.
2. Edit -> Copy to Clipboard.
3. Kjør cellen under for å hente bilde av kretsen fra Clipboard.

```
In [ ]: lab5.clipboard("oppgave2a", w=700)
```

Oppgave 2b

Hvor ligger arbeidspunktet (V_{CE} , I_C)?

Tegn opp arbeidslinjen til forsterkeren og sett på arbeidspunktet (se forelesningsnotat om BJT (<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS1210/v17/notater/05-fys1210-2017-uke7.pdf>)).

```
In [ ]: ### Dine utregninger her ###  
VCC = ## ? ##  
ICsat = ## ? ##  
VCE = ## ? ##  
IC = ## ? ##
```

```
In [ ]: lab5.plot2b(VCC, ICsat, VCE, IC)
```

Oppgave 2c

Strømførsterkningen β gir et uttrykk for hvor mange ganger større kollektorstrømmen (I_C) er i forhold til basisstrømmen (I_B), $I_C = \beta \cdot I_B$.

Beregn transistorens strømførsterkning β .

```
In [ ]: ### Din beregning her ###
```

Oppgave 2d

Teori

Emitterstrømmen (I_E) = Basestrømmen (I_B) + Kollektorstrømmen (I_C):

$$I_E = I_B + I_C$$

Hvis vi ønsker kollektorstrømmen snur vi likningen og får $I_C = I_E - I_B$. Ofte blir kollektorstrømmen I_C gitt som en fraksjon (α) av emitterstrømmen I_E :

$$I_C = \alpha \cdot I_E$$

Emitterstrømmen er gitt av diodelikningen

$$I_E = I_S e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

hvor V_D er spenningen over base/emitter-dioden V_{BE} og $V_T = 25mV$ ved romtemperatur. I_S er "reverse saturation current" – strømmen vi måler gjennom dioden når den er koplet i sperreretning – en meget liten strøm ($\approx 1 \mu A$).

Vi ønsker å se hvilken virkning det har på kollektorstrømmen I_C - hvis vi endrer litt på spenningen over emitter/basis-dioden V_{EB} . Dette forholdet kaller vi transistorens transkonduktans (g_m)

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{EB}} \quad [\text{Siemens}] \quad (1)$$

g_m beskriver tangenten til kurven som viser kollektorstrømmen I_C som funksjon av spenningen over basis/emitter-dioden V_{EB} .

For å finne g_m uttrykt ved kjente størrelser tar vi utgangspunkt i likningen $I_C = \alpha I_E$, hvor vi setter inn uttrykket for emitterstrømmen $I_E = I_S \cdot e^{\frac{V_{EB}}{V_T}}$ (diodelikningen til emitter/basis-dioden $V_D = V_{EB}$)

Kollektorstrømmen kan da uttrykkes slik : $I_C = \alpha \cdot I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$ For å finne et uttrykk for tangenten til denne kurven (g_m) deriverer vi likningen mhp. V_{BE} . Dette gir oss da

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}} = \alpha \cdot I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \cdot \frac{1}{V_T} = I_C \cdot \frac{1}{V_T}$$

$$\Rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (2)$$

Hvor $V_T = 25mV$ (den termiske spenningen ved 300 K). Som vi kan se vil transkonduktansen (g_m) være prop. med kollektorstrømmen I_C i transistoren.

Spenningsforsterkningen til kretsen

Utgangspunktet for denne betraktningen er at $g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$ Dvs. at en liten endring i basespenningen ΔV_{BE} vil gi en endring i kollektorstrømmen $\Delta I_C = g_m \cdot \Delta V_{BE}$ (2). Kollektorstrømmen I_C går igjennom lastmotstanden R_L og gir et spenningsfall V_{RL} over denne: $V_{RL} = I_C \cdot R_L$ (ohms lov). I denne likningen setter jeg nå inn uttrykket for endringen i kollektorstrøm $\Delta I_C = g_m \cdot \Delta V_{BE}$, som gir $\Delta V_{RL} = g_m \cdot \Delta V_{BE} \cdot R_L$.

Spenningsforsterkning er definert som forholdet mellom utgangsspenning og inngangsspenning

$$A_V = \frac{V_{UT}}{V_{INN}} = \frac{\Delta V_{RL}}{\Delta V_{BE}} = g_m \cdot R_L \Rightarrow A_V = g_m \cdot R_L$$

Forsterkningen blir bestemt av lastmotstanden R_L og transkonduktansen g_m .

Beregn spenningsforsterkningen til forsterkeren. (Hint – du må først beregne g_m (transkonduktansen))

In []: `### Din beregning her ###`

Oppgave 2e

Kjør en AC sweep analyse – du lar frekvensen variere fra 10 Hz til 100MHz. Sett AC Sweep Type til dekad.

Kopier simuleringen fra PSpice og kjør cellene under.

In []: `x2e, y2e, cid2e = %psd`

In []: `plt.figure()
plt.semilogx(x2e, y2e)
plt.grid(True)
plt.xlabel("Frekvens [Hz]")
plt.ylabel("Vut [V]")`

Hva blir båndbredden (BW) til forsterkeren?

In []: `### Din utregning her ###`

Oppgave 2f

Vi måler forsterkningen for midlere frekvenser – i det flate området mellom knekkpunktene.

$$A_V(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{V_{UT}}{V_{INN}}\right)$$

Hva er spenningsforsterkningen til kretsen angitt i dB?

In []: `### Din utregning her ###`

Oppgave 2g

Ta bort emitterkondensator C4. Gjør målingen ved 100kHz.

1. Hent simuleringen fra PSpice
2. Hva blir nå spenningsforsterkningen?
3. Se på forholdet R_{CIIRL} / R_E – er det en sammenheng ?

In []: `x2g, y2g, cid2g = %psd`

In []: `plt.figure()
plt.semilogx(x2g, y2g)
plt.grid(True)
plt.xlabel("Frekvens [Hz]")
plt.ylabel("Vut [V]")`

In []: `### Din utregning her ###`

Oppgave 3: Praktiske målinger på transistorforsterker

Vi har laget en transistorforsterker som er meget lik den simulerte forsterkeren. Se bilde under.

- Forsterkeren skal ha tilført 12 VDC.
- La strappene J1 og J2 være avkoplet.
- På oppgave 3a og 3b bruker du et multimeter.

Oppgave 3a

Hvor ligger arbeidspunktet (V_{CE}) til forsterkeren?

In []: *### Din måling her ###*

Oppgave 3b

Hvor stor er kollektorstrømmen I_C i arbeidspunktet?

In []: *### Din måling og utregning her ###*

Oppgave 3c

Hvor stor er g_m (transkonduktansen)?

In []: *### Din utregning her ###*

Tilkobling av oscilloskop og funksjonsgenerator

- Ta bort måleledningene fra multimeteret.
- Kople til funksjonsgeneratoren med en RCA-kabel.
- La signalet inn til forsterkeren være 1Vpp med en frekvens på 20 kHz.
- Bruk RCA-kabel fra kortet til kanal 1 på oscilloskopet.

Kjør cellen under for å koble til oscilloskopet.

In []: `osc = %tek osc`

Oppgave 3d

Hvor stor er forsterkningen?

In []: `lab5.screenshot(osc, "lab5_oppgave3d", display=True)`

Svar:

Oppgave 3e

Hva er øvre knekkfrekvens til forsterkeren? (OBS: Øvre knekkfrekvens begrenses av kablernes kapasitans)

```
In [ ]: # Regner ut spenningen ved ovre fc
Vfc = 1.74/np.sqrt(2)
print(Vfc)
```

Svar:

```
In [ ]: lab5.screenshot(osc, "lab5_oppgave3e", display=True)
```

Oppgave 3f

Hva blir forsterkningen ved 20 kHz hvis strappen J1 tilkoples?

Svar:

```
In [ ]: lab5.screenshot(osc, "lab5_oppgave3f", display=True)
```

Forsterker med avkoblet emitter

På de tre siste spørsmålene skal kondensatoren på 100uF være koplet parallelt med emittermotstanden (avkoblet emitter).

1. Sett amplitude på funksjonsgeneratoren til 50 mVpp og frekvens til 20kHz.
2. Ta av strap på J1
3. Sett strap på J2

Oppgave 3g

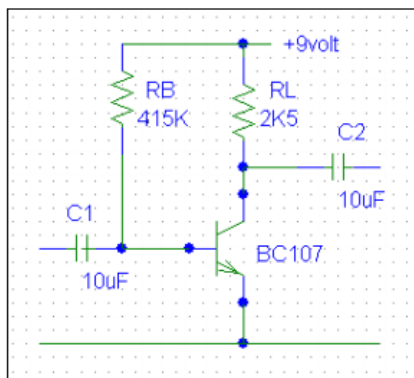
Hvor stor er forsterkningen?

```
In [ ]: ### Din utregning her ###
```

In []: `lab5.screenshot(osc, "lab5_oppgave3g", display=True)`

Eksempel

Hva blir spenningsforsterkningen A_V til forsterkeren?



- Forsterkeren vår bruker transistoren BC107 med $\beta = 100$. Vi har bestemt at kollektorstrømmen I_C skal være $2mA$. Hvis vi velger en kollektorspenning (V_{CE}) på 4 volt kan vi beregne kollektormotstanden $R_L = 5V/2mA = 2,5k\Omega$.
- Transkonduktansen g_m finner vi ved, $g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2mA}{25mV} = 80mS$.
- Forsterkningen $A_V = g_m \cdot R_L$, $A_V = 80mS \cdot 2,5k\Omega = 200$

Kretsen har en spenningsforsterkning på 200 ganger. En signalspenning på $10mV$ på basis blir forsterket til et signal på 2 volt på kollektor.

In []: