



- 1 Jan: Introduktion til AEL og Spice
- 2 PN-dioden: Fysik, egenskaber
- 3 Diodekredsløb
  - o Småsignalmodel
  - o Ensretterkredsløb
  - o Specielle dioder og kredsløb
- 4 Bipolar Junction Transistor, BJT
  - o Lidt fysik
  - o Egenskaber
  - o Simpel model og forstærkertrin
  - o Arbejdslinier
- 5 BJT-fortsat
  - o DC-forspænding
  - o Forstærkning, arbejdslinier
  - o Egenskaber, modeller
- 6 Jan: Forstærkere med BJT
- 7 ...



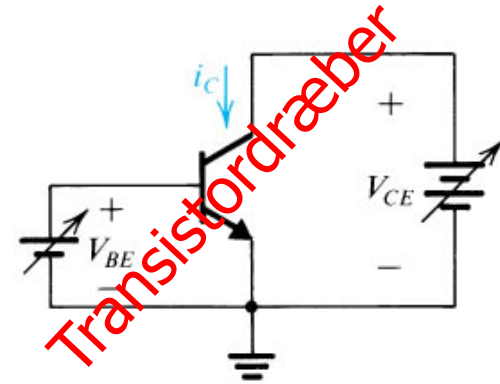
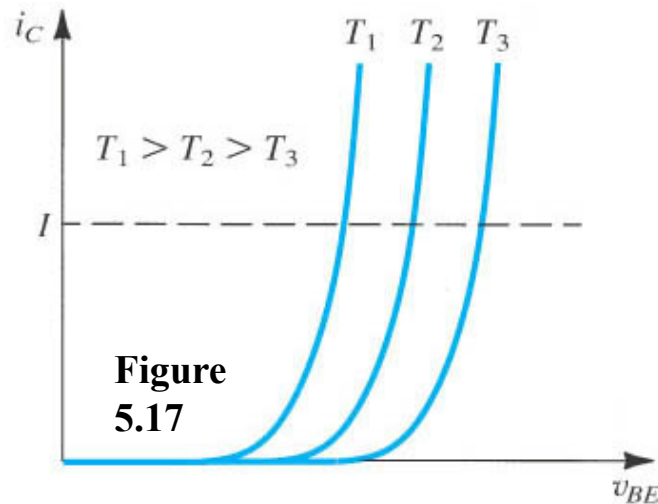
### Emner:

- BJT-forstærkere
  - DC-forspænding
  - DC/AC-arbejdslinier
- Modeller for BJT-transistorer
  - Kort omtale af Spice-model for BJT, strømafhænging  $\beta$
  - Småsignalmodel: Hybrid- $\pi$  model
  - Interne transistorkapaciteter
  - Bestemmelse af hybrid- $\pi$  parametre ud fra h-parametre (datablad)



## Variation af transistorparametre

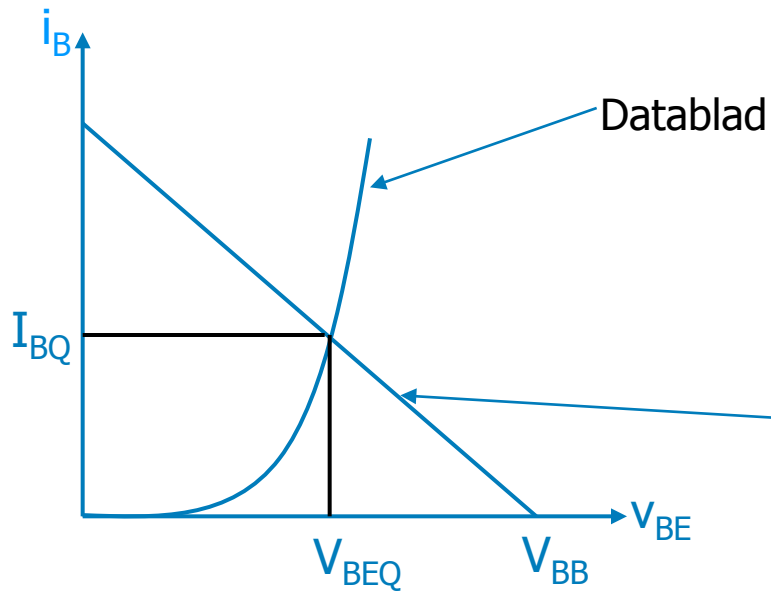
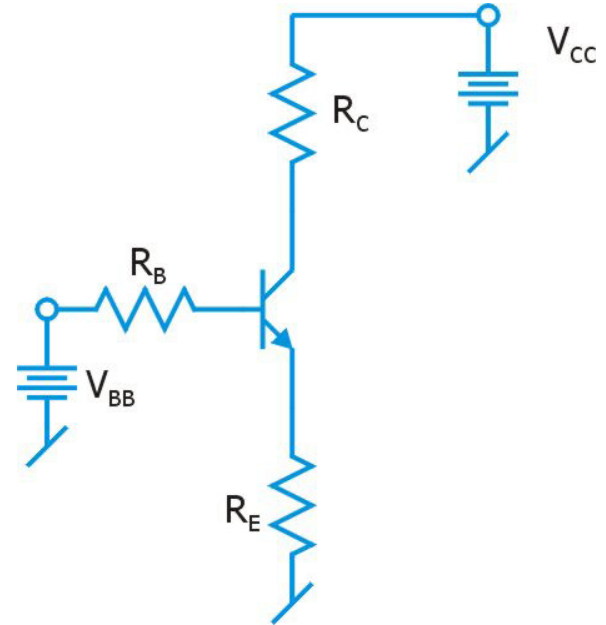
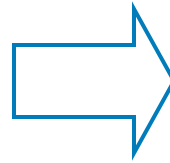
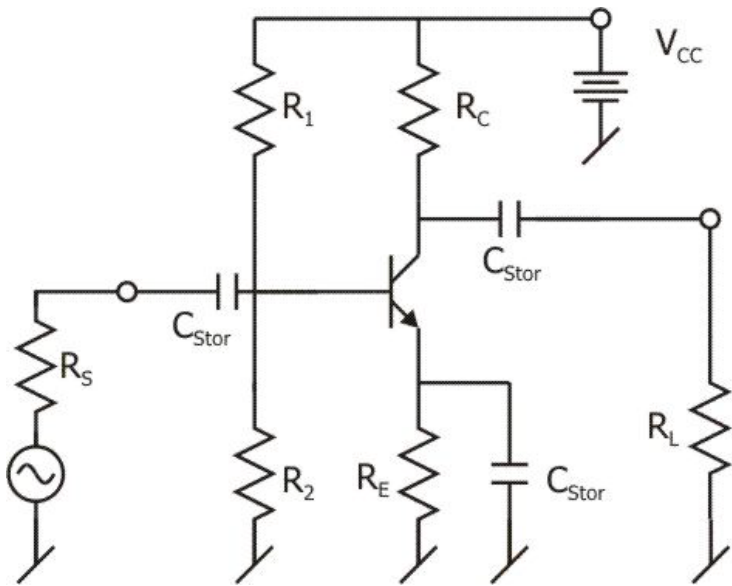
- $V_{BE}$ :
  - Drift: ca.  $-2 \text{ mV/K}$
  - Spredning
- $\beta$ :
  - Drift: ca.  $0,6\%/K$
  - Stor spredning



### Electrical DC Characteristics

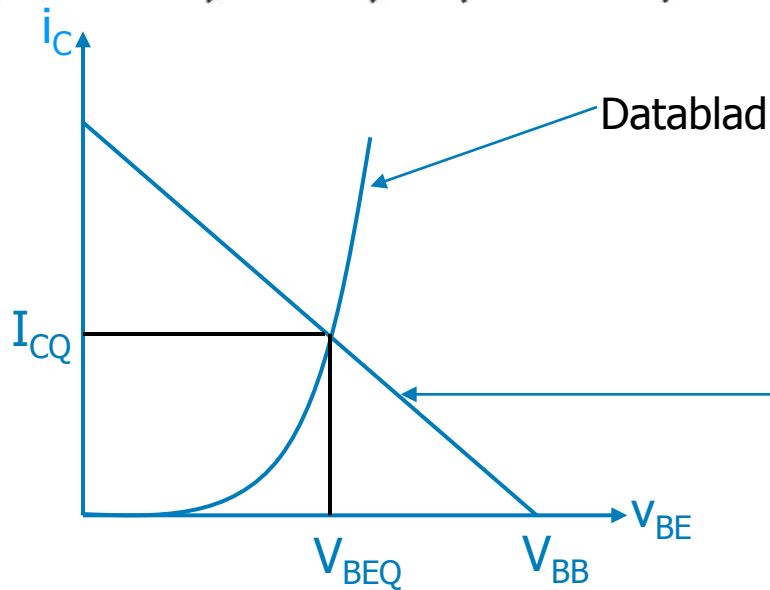
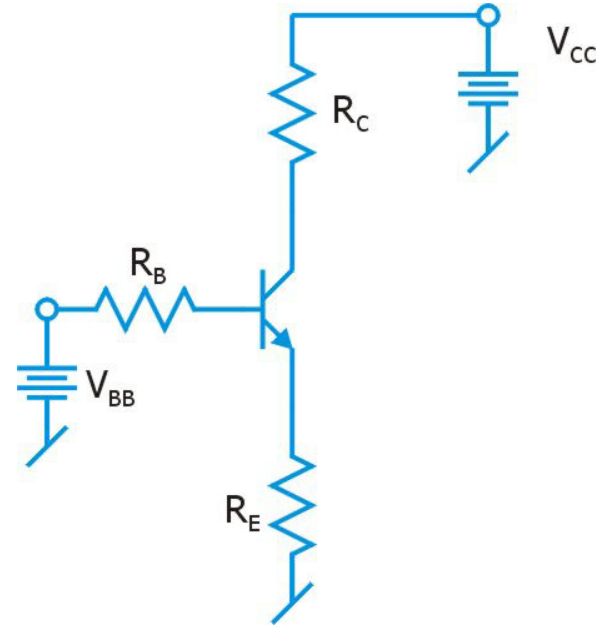
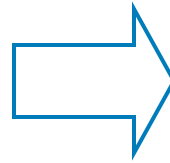
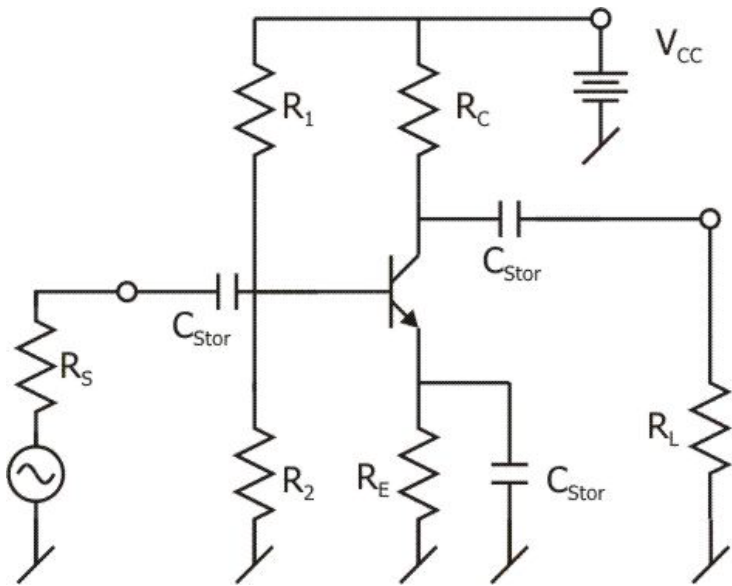
BC547 (0,13 kr @ 1000 stk.)

Parameter	Test condition	Part	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Base - emitter voltage	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$		$V_{BE}$	580	660	700	mV
	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 10 \text{ mA}$		$V_{BE}$			720	mV
DC current gain (current gain group A)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$		$h_{FE}$	110	180	220	
DC current gain (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$		$h_{FE}$	200	290	450	
DC current gain (current gain group C)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$		$h_{FE}$	420	500	800	



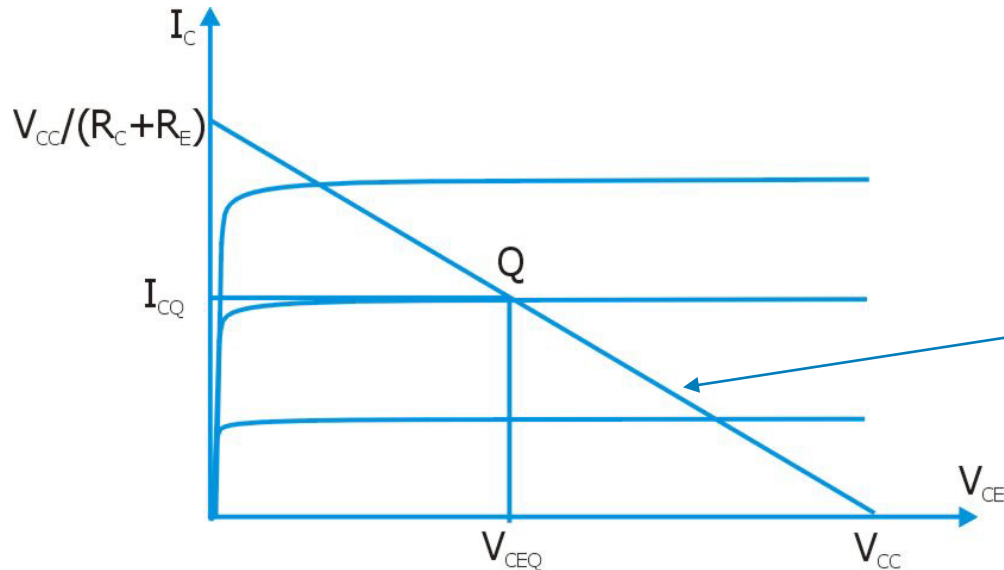
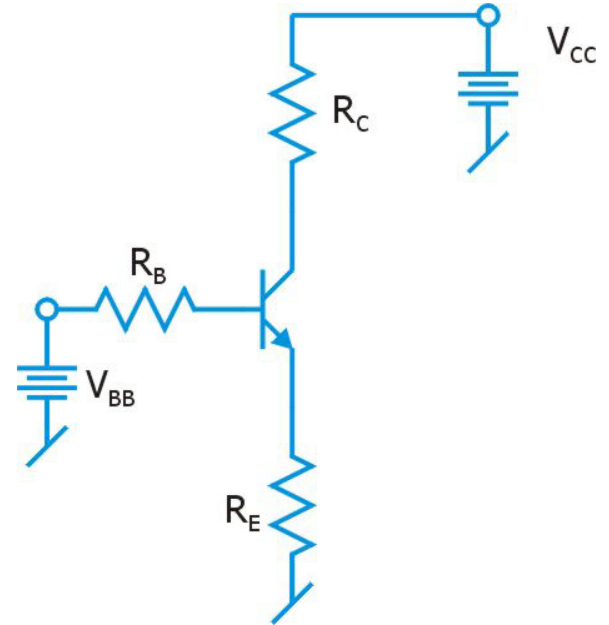
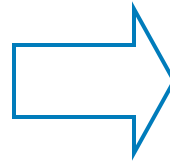
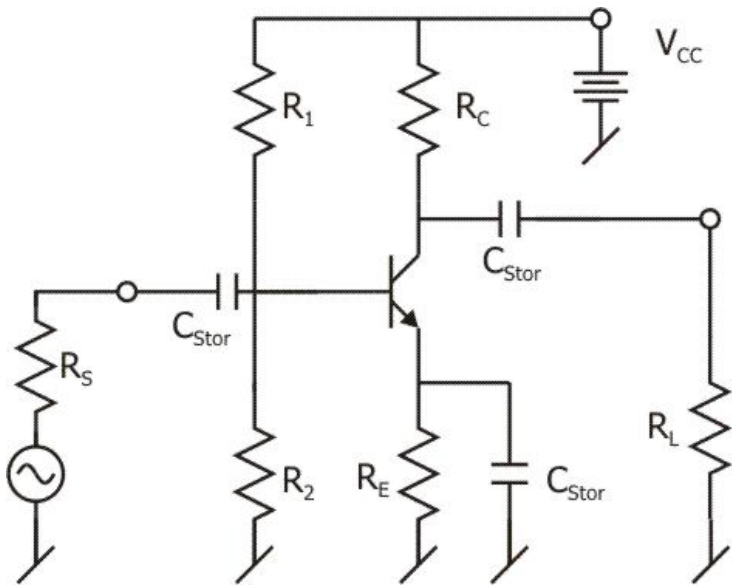
$$\begin{aligned} V_{BB} &= V_{BE} + R_B I_B + R_E I_E \\ &= V_{BE} + R_B I_B + R_E I_B (1 + \beta) \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E (1 + \beta)}$$



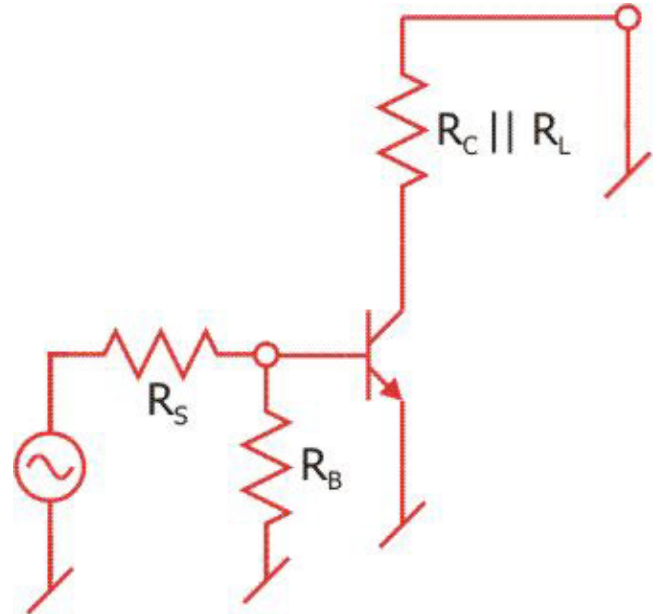
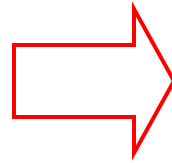
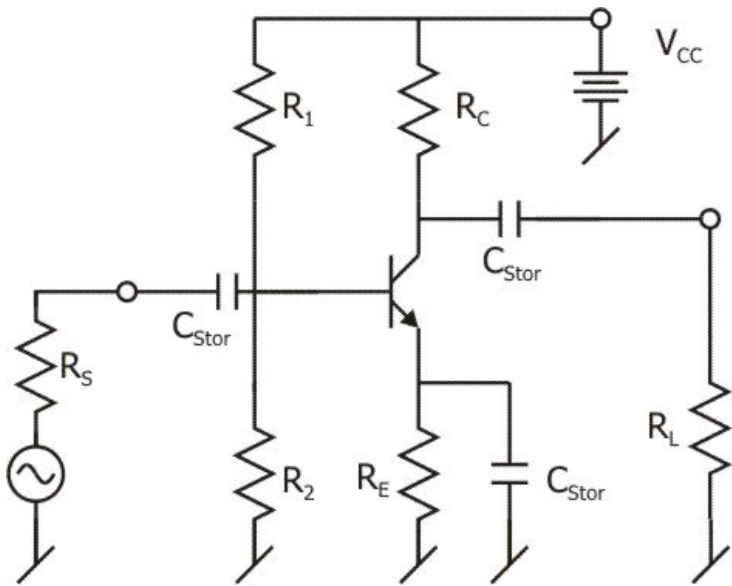
$$V_{BB} \approx V_{BE} + R_B \frac{I_C}{\beta} + R_E I_C$$

$$I_C \approx \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

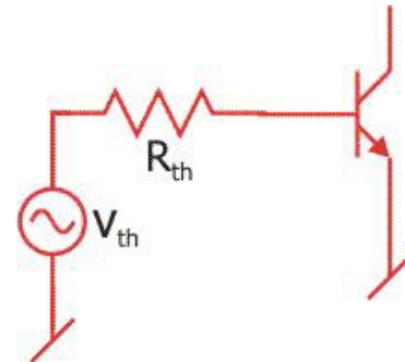


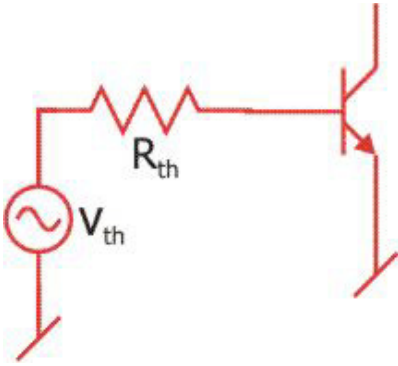
$$V_{CE} \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$



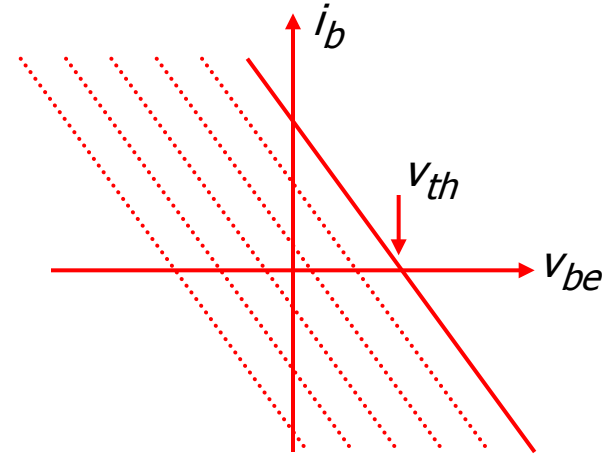
$$R_{th} = R_S \parallel R_B$$



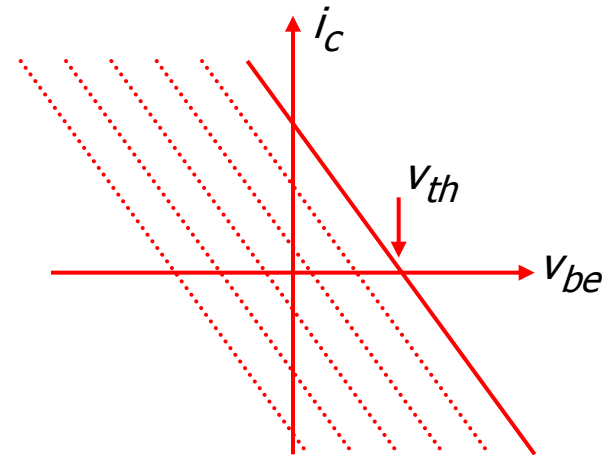


$$v_{th} = i_b R_{th} + v_{be}$$

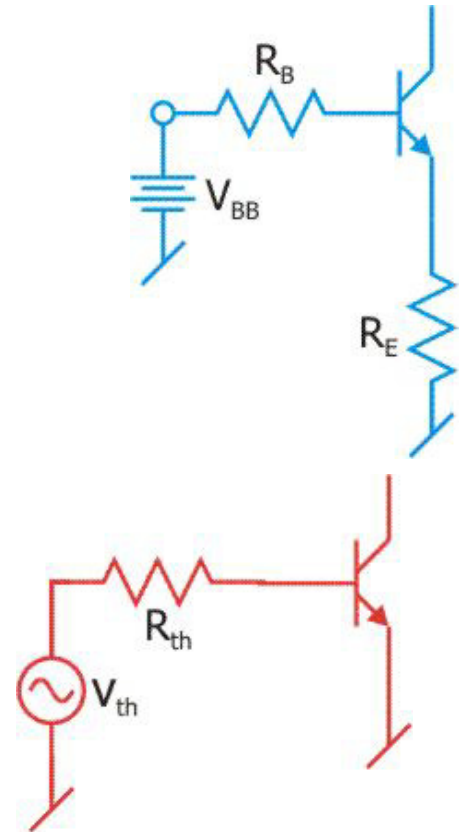
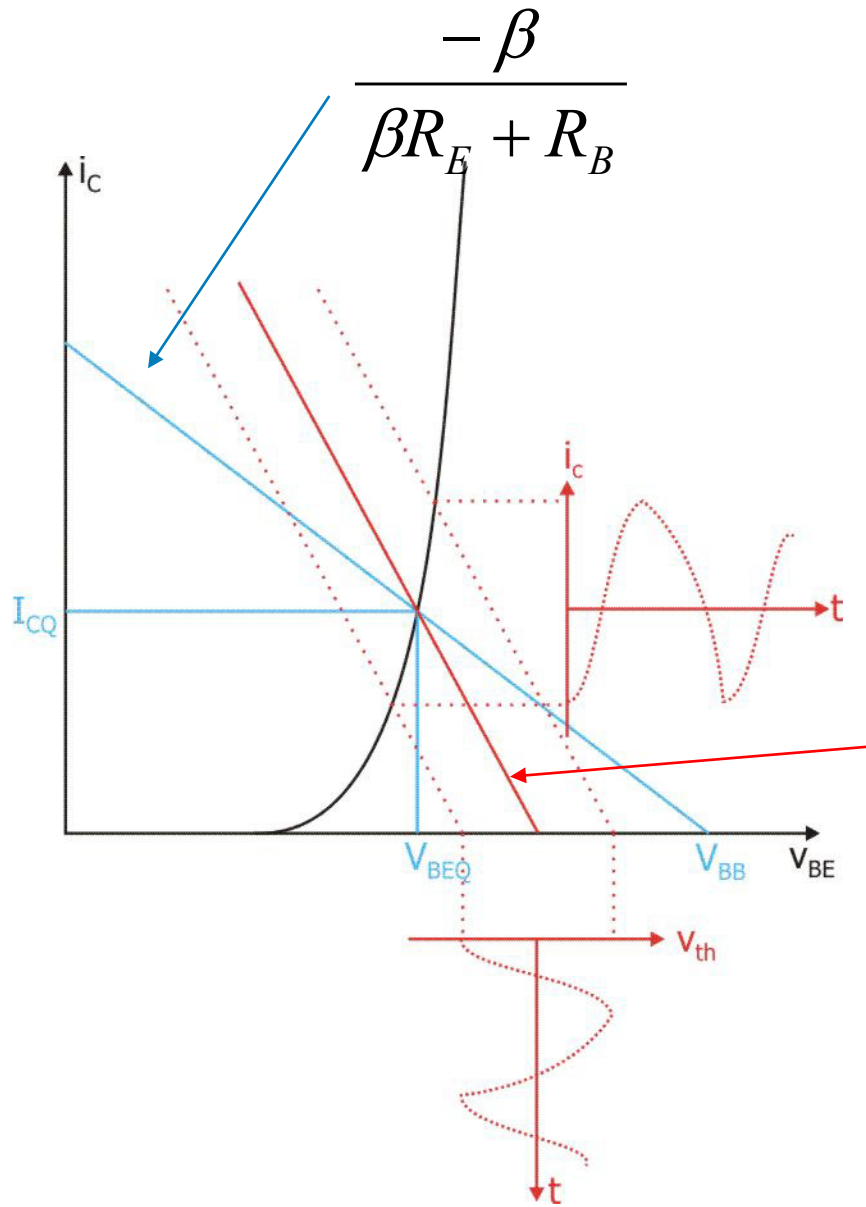
$$i_b = \frac{v_{th} - v_{be}}{R_{th}}$$

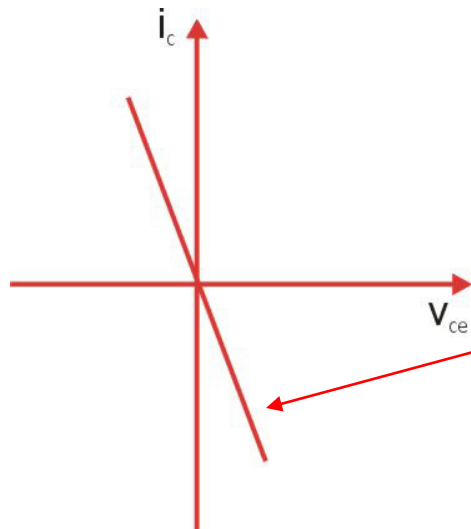
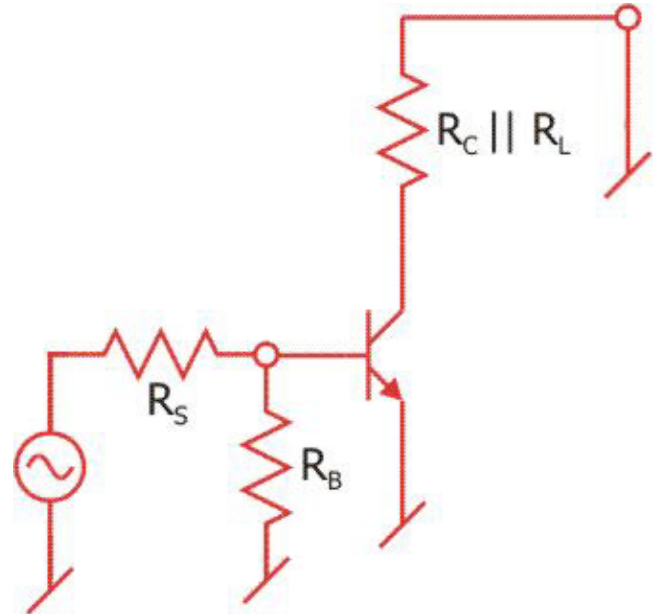
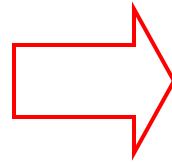
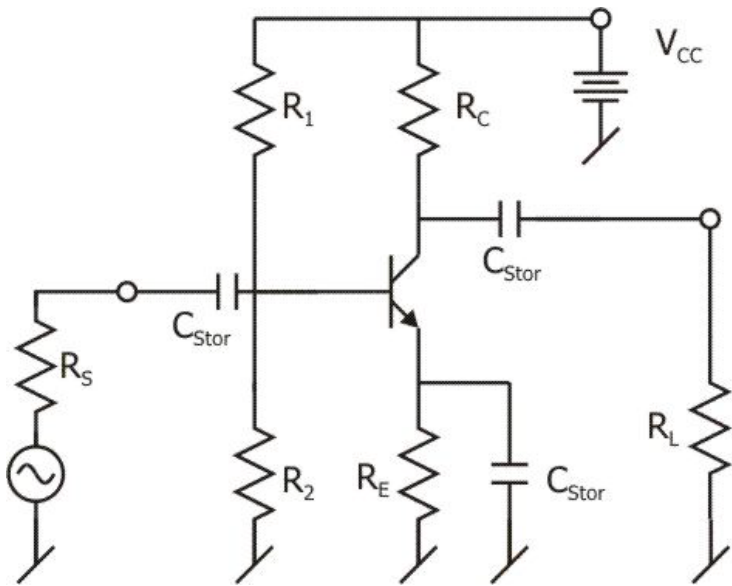


$$i_c = \frac{v_{th} - v_{be}}{R_{th} / \beta}$$



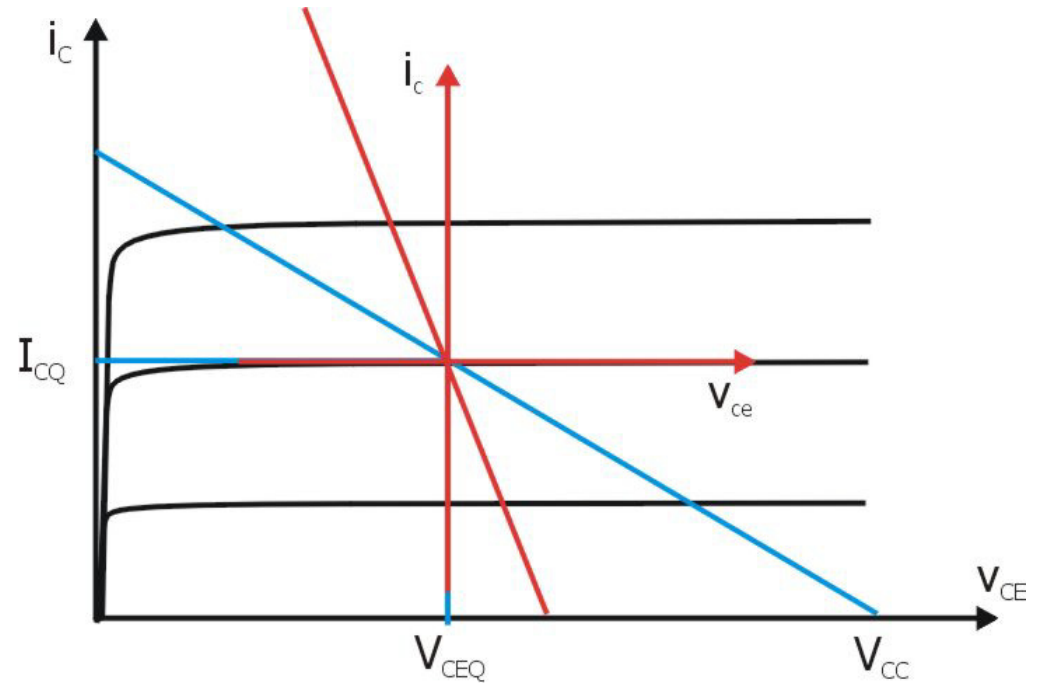
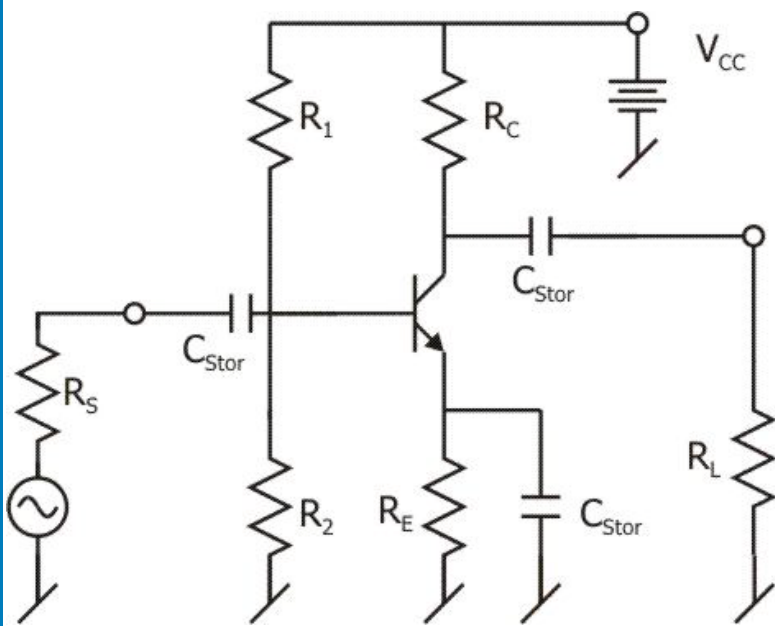


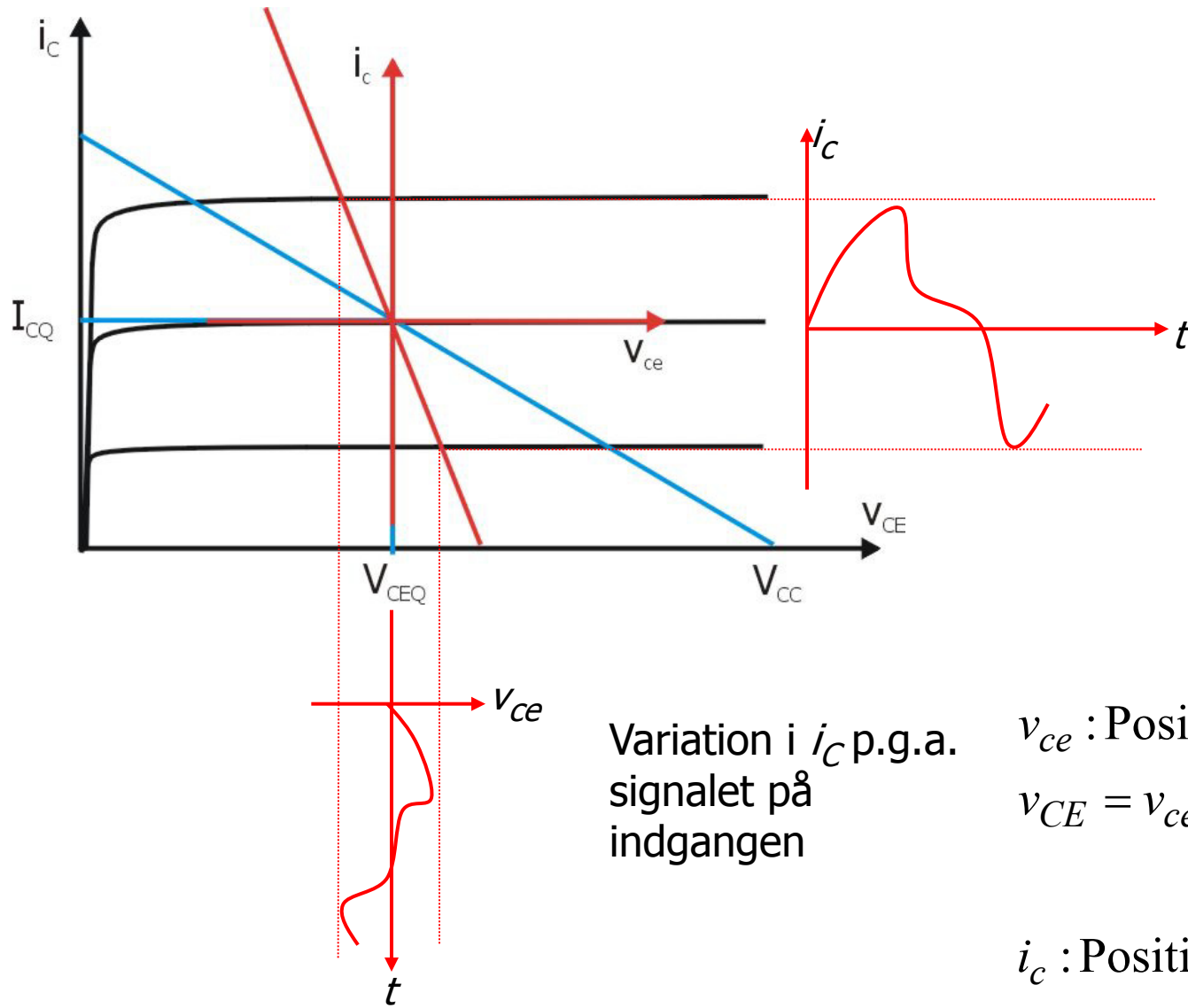




$$v_{ce} = -i_c R_C \parallel R_L$$

$i_c$  er styret af  $i_b$  (eller  $v_{be}$ )





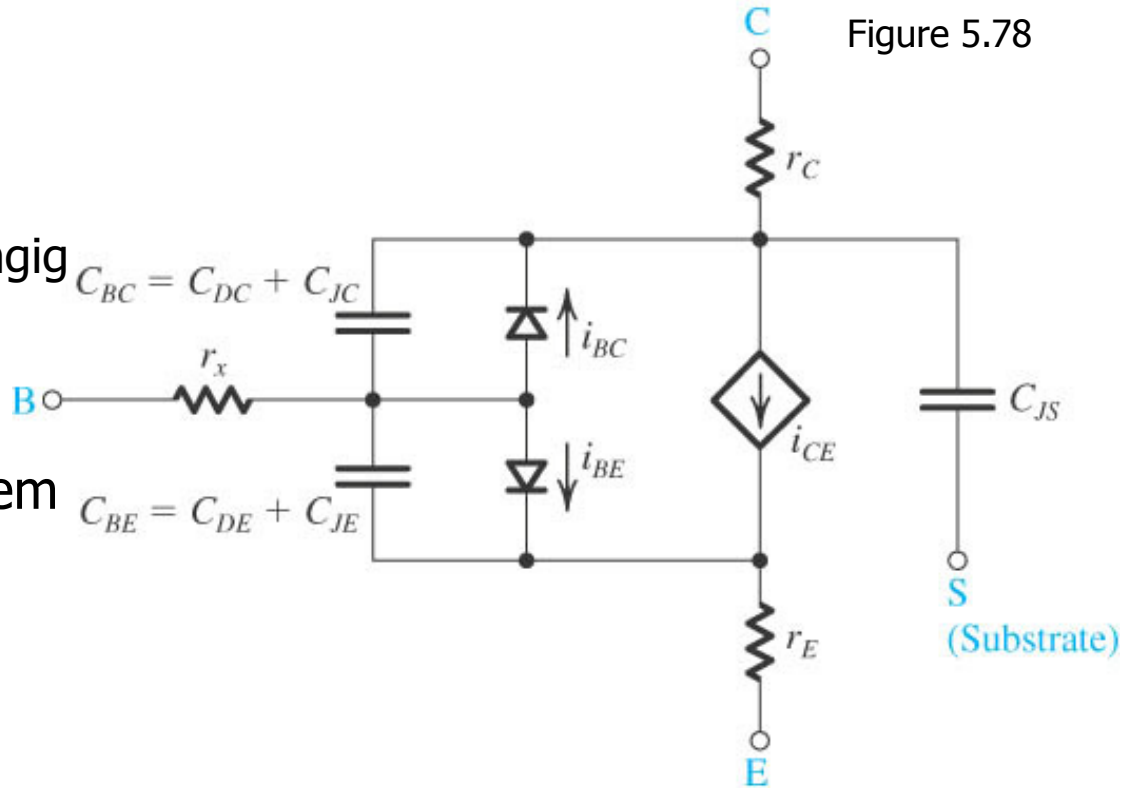
Variation i  $i_C$  p.g.a.  
signalet på  
indgangen

$v_{ce}$  : Positiv eller negativ  
 $v_{CE} = v_{ce} + V_{CEQ} > V_{CEsat}$

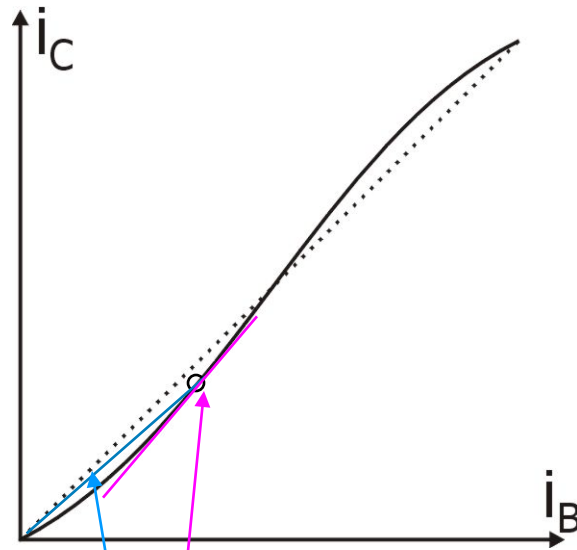
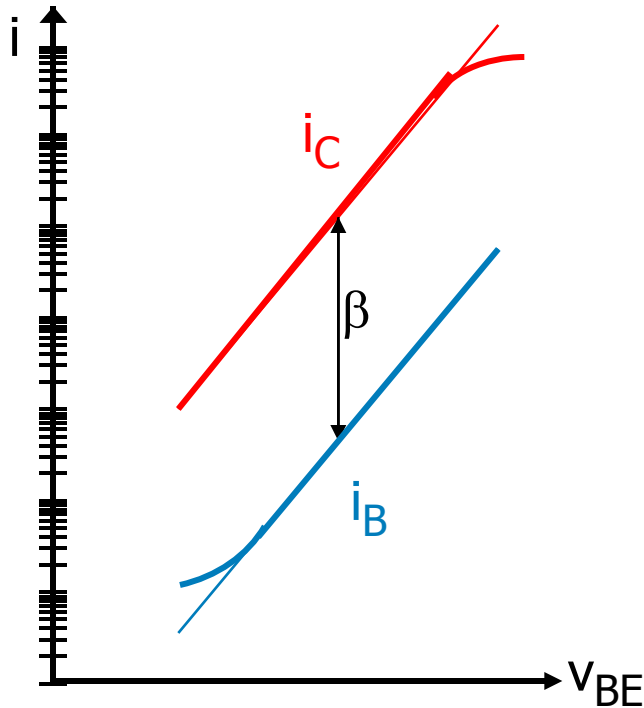
$i_c$  : Positiv eller negativ  
 $i_C = i_c + I_{CQ} > 0$



- BE-diode og BC-diode:
  - Diodeligning
  - Rumladningskapacitet afhængig af spænding
  - Diffusionskapacitet afhængig af strøm
  - BC-diode normalt i spærreretningen
- Styret strømgenerator mellem emitter og collector
- Tabsmodstande i B, E, og C
- Evt. ekstra kapacitet til substrat
- ca. 41 parametre – ikke alle transistormodeller anvender alle parametre



$$i_{CE} = I_S \left( e^{\frac{v_{BE}}{n_F V_T}} - e^{\frac{v_{BC}}{n_R V_T}} \right) \left( 1 - \frac{v_{BC}}{V_A} \right) \quad (5.192)$$



- Strømafhengig strømforstærkning er inkluderet i Spice

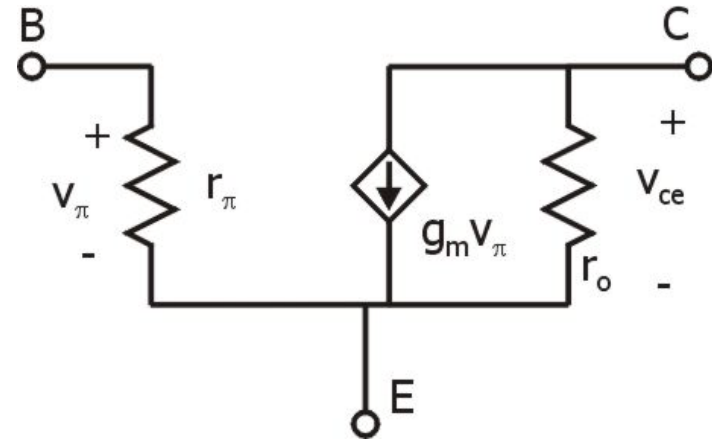
- Strømafhengig strømforstærkning  
⇒ lidt forskellige DC- og småsignal-værdier

$$\beta = \frac{i_C}{i_B}$$

$$\beta_{ac} = \beta_{småsignal} = \frac{di_C}{di_B}$$

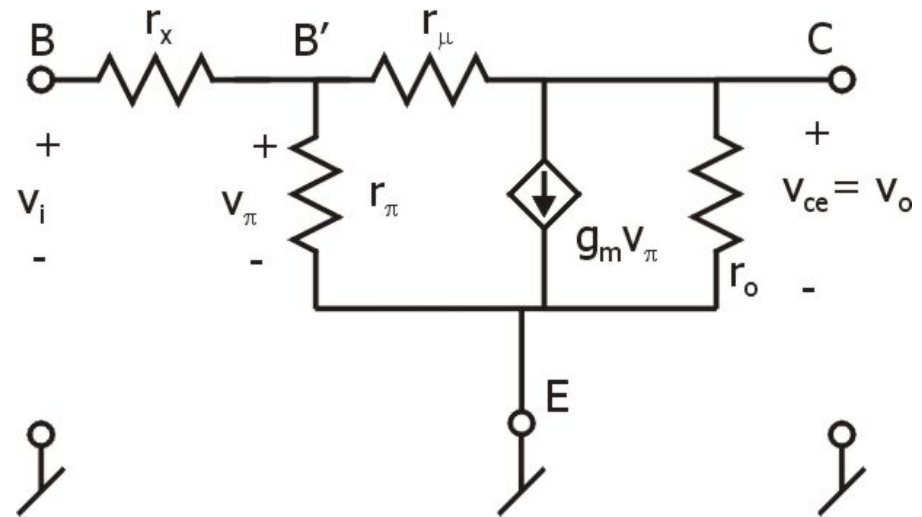
## $\pi$ -model:

- $g_m = I_C/V_T$  Transkonduktans
- $r_\pi := \beta_{\text{småsignal}} V_T/I_C$   
Småsignalmodstand (" $I_S/\beta$ "-diode)
- $r_o = (V_A + V_{CE})/I_C$  ( $\approx V_A/I_C$ ):  
Udgangsmodstand (hældning af  $i_C/v_{CE}$ -kurver)



## Hybrid- $\pi$ -model:

- $r_x$ : Tabsmodstand i basis (lav dotering), ofte  $\ll r_\pi$
- Bemærk:  $v_\pi$  ligger mellem B' og E
- $r_\mu$ : Tilbagevirkning. Kan oftest negligeres.



- Der findes flere forskellige småsignalparametre (lineær toport)
- Black-box-modeller: Ren matematik, der forudsættes intet kendskab til fysiske forhold

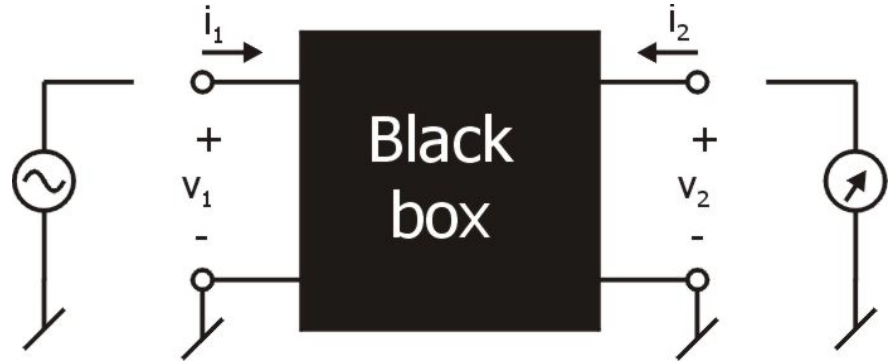
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2$$



z-, y- og h-parametre:

- er ikke relateret til fysiske forhold,
- kan måles direkte på komponenten og er derfor objektive og veldefinerede og
- er velegnede til et juridisk bindende datablad.

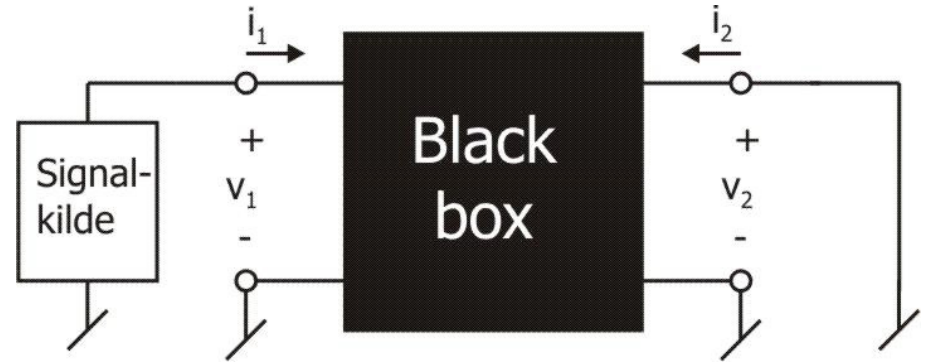
Hybrid- $\pi$ -parametre giver fysisk indsigt, der kan udnyttes ved design.





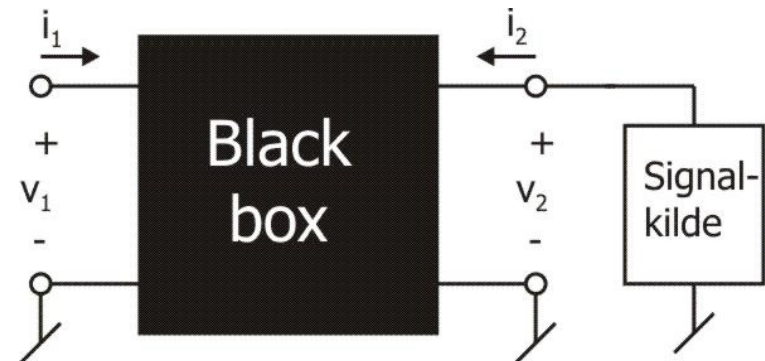
## Måling af h-parametre

$$v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \Rightarrow h_{11} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2=0}$$
$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \Rightarrow h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0}$$

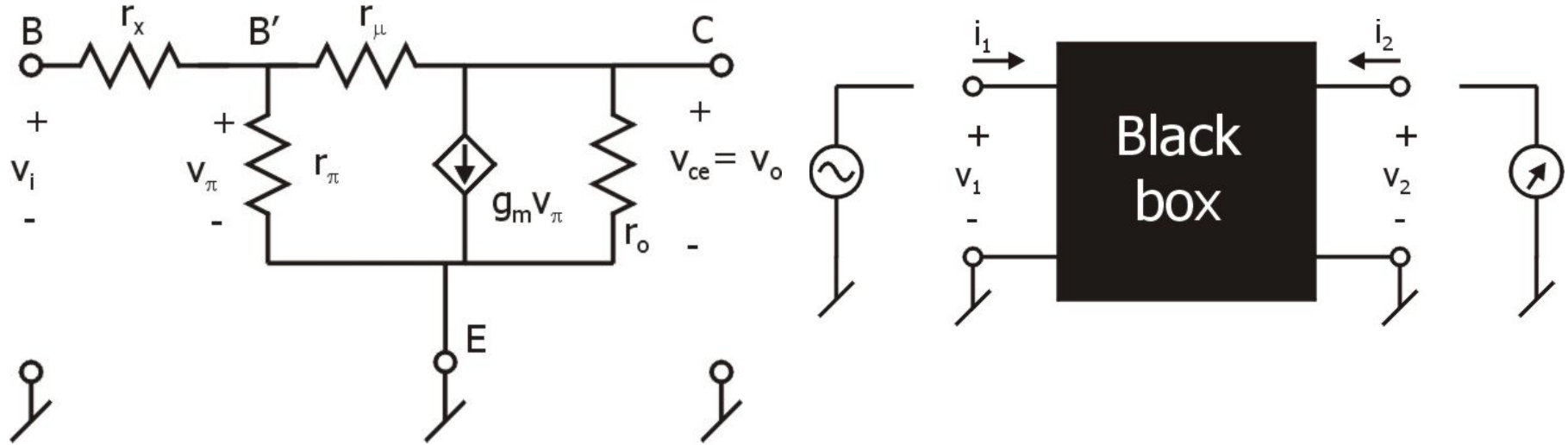


- AC-kortslutning på port 2, småsignalkilde på port 1
- Mål småsignalværdier:  $i_1$ ,  $i_2$  og  $v_1$  og bestem forhold.

$$v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \Rightarrow h_{12} = \left. \frac{v_1}{v_2} \right|_{i_1=0}$$
$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \Rightarrow h_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{i_1=0}$$



- AC-afbrydelse på port 1, småsignalkilde på port 2
- Mål småsignalværdier:  $v_2$ ,  $v_1$  og  $i_2$  og bestem forhold.



## ○ Fremgangsmåde:

- Opstil kredsløbsligninger for hybrid- $\pi$ -ækvivalentet
- Opstil udtryk for h-parametre v.h.a. hybrid- $\pi$ -ækvivalentet
- Eksempel (der ses bort fra  $r_\mu$ ):

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0} \approx \frac{g_m v_\pi}{i_1} = \frac{g_m i_1 r_\pi}{i_1} = g_m r_\pi = \beta_{ac}$$

○ i ~input

○ f ~forward

○ r ~reverse

○ o ~output

e ~fælles emitter

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix}$$



## Bestemmelse af hybrid- $\pi$ parametre

- DC-arbejdspunkt  $\rightarrow g_m$  m.v.
- - ellers mest fra h-parametre
- $r_x$  usikkert bestemt

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

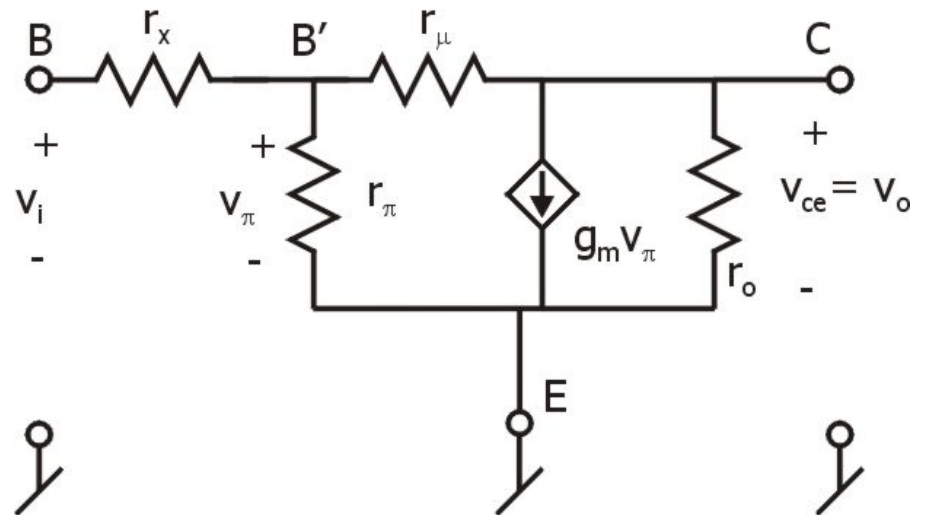
$$r_\mu = \frac{r_\pi}{h_{re}}$$

$$r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m}$$

$$r_o = \left( h_{oe} - \frac{h_{fe}}{r_\mu} \right)^{-1}$$

$$r_x = h_{ie} - r_\pi$$

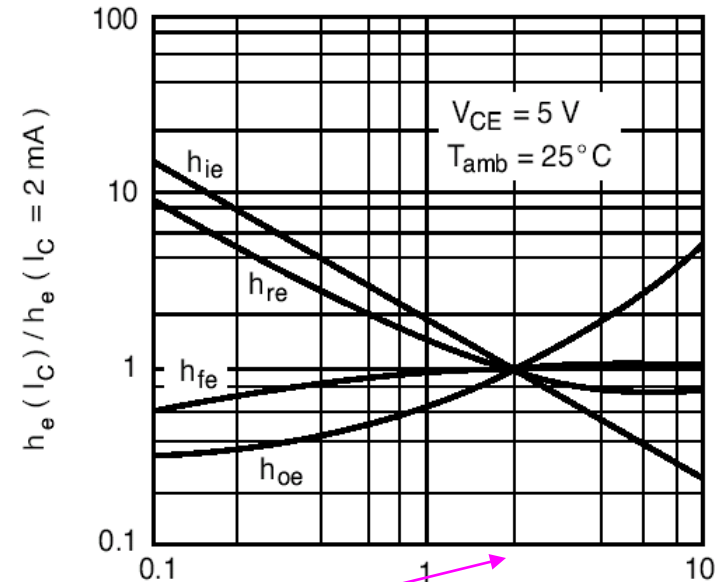
$$r_o = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \approx \frac{V_A}{I_C}$$





## BC547B-parametre (Vishay)

- DC (storsignal):  $h_{FE}$  ( $\beta$ )
- AC (småsignal):  $h_{fe}$  ( $\beta_{ac}$ )
- Stor spredning på h-parametre
- Husk strømafhængighed!!



Parameter	Test condition	Part	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
DC current gain (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$		$h_{FE}$	200	290	450	
Small signal current gain (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, f = 1 \text{ kHz}$		$h_{fe}$		330		
Input impedance (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, f = 1 \text{ kHz}$		$h_{ie}$	3.2	4.5	8.5	$k\Omega$
Output admittance (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, f = 1 \text{ kHz}$		$h_{oe}$		30	60	$\mu\text{S}$
Reverse voltage transfer ratio (current gain group B)	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, f = 1 \text{ kHz}$		$h_{re}$		$2 \times 10^{-4}$		

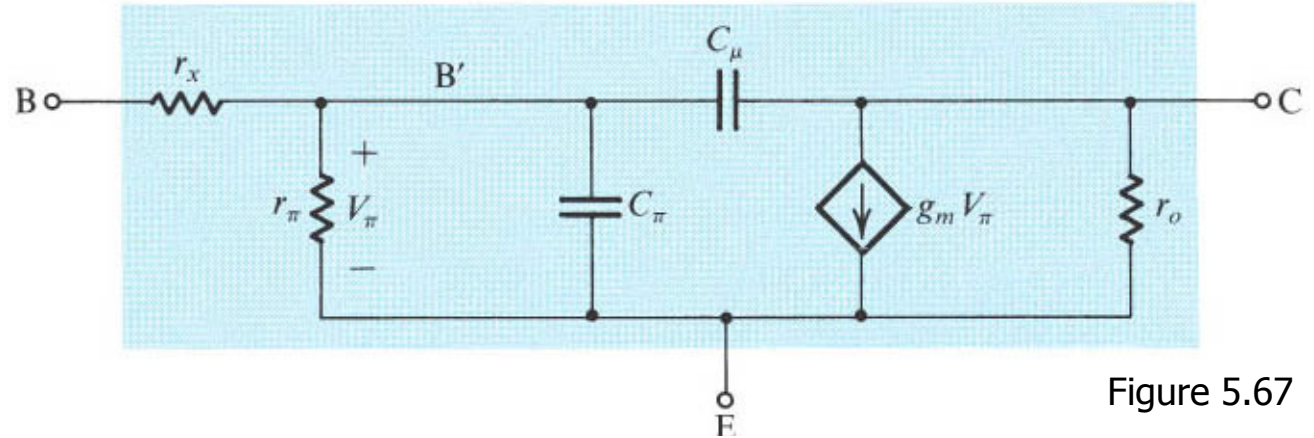


Figure 5.67

- CB-dioden i spærreretningen => rumladningskapacitet
  - afhængig af  $v_{CB}$
- BE-dioden i lederetning => diffusionskapacitet
  - proportional med  $i_C$  (ladningsophobning)

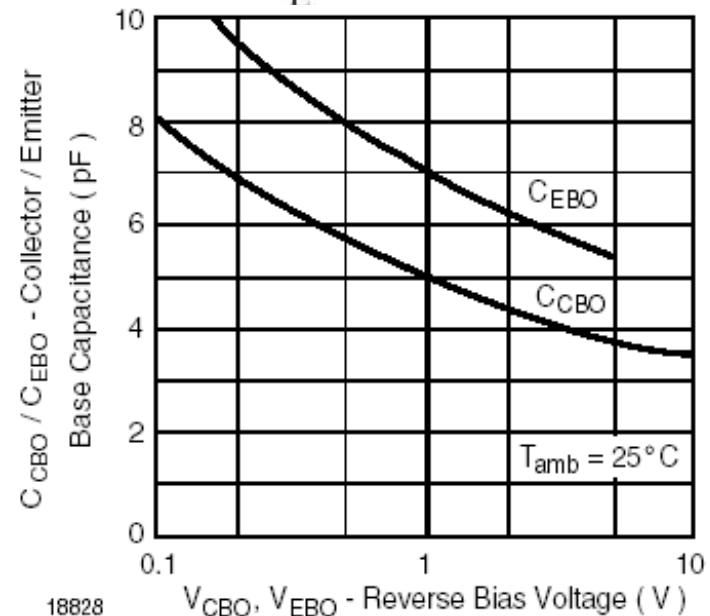


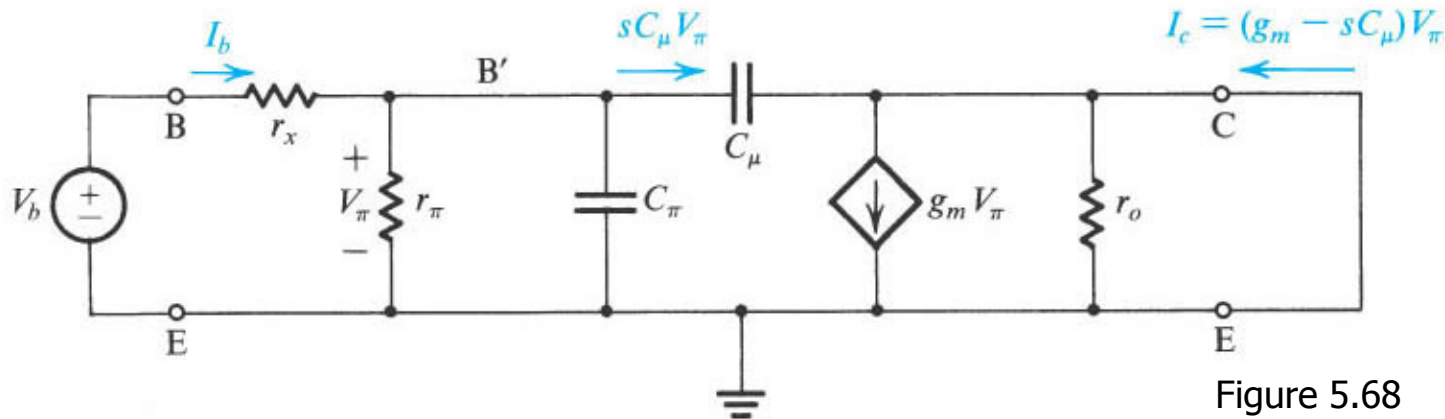
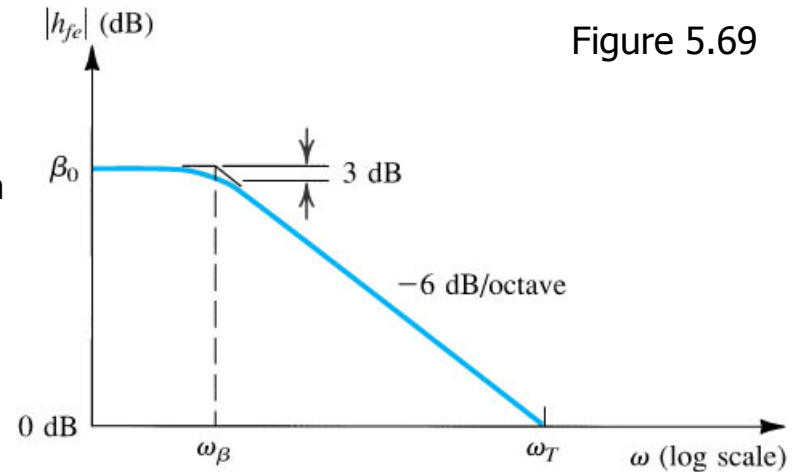
Fig. 6 Collector Base Capacitance, Emitter base Capacitance vs. Bias Voltage



- BE-dioden i lederetning
  - Kapacitet bestemmes indirekte
  - $C_\pi$  er strømafhængig – mest. p.g.a.  $g_m$
  - $f_T$  er også strømafhængig

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$

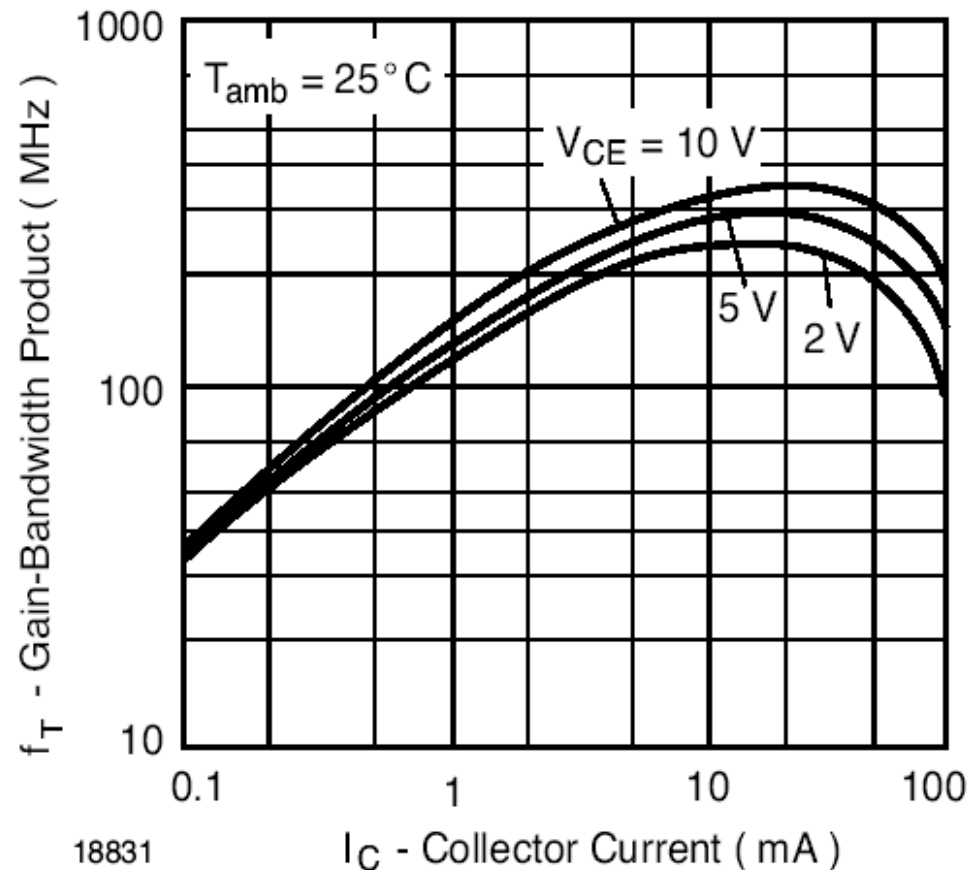
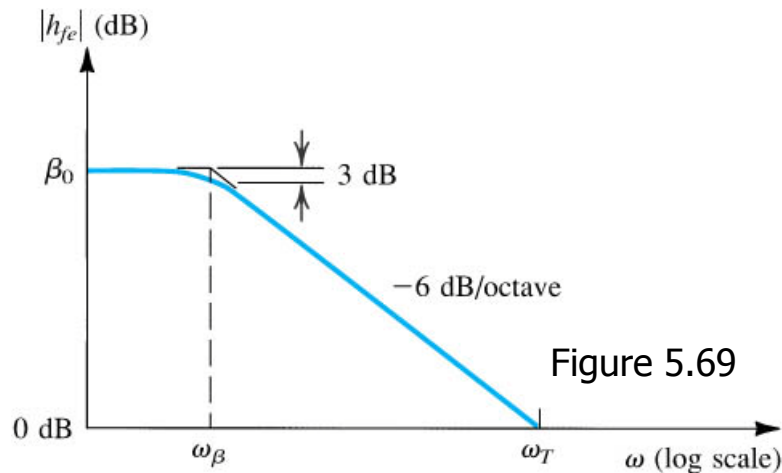
$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu$$



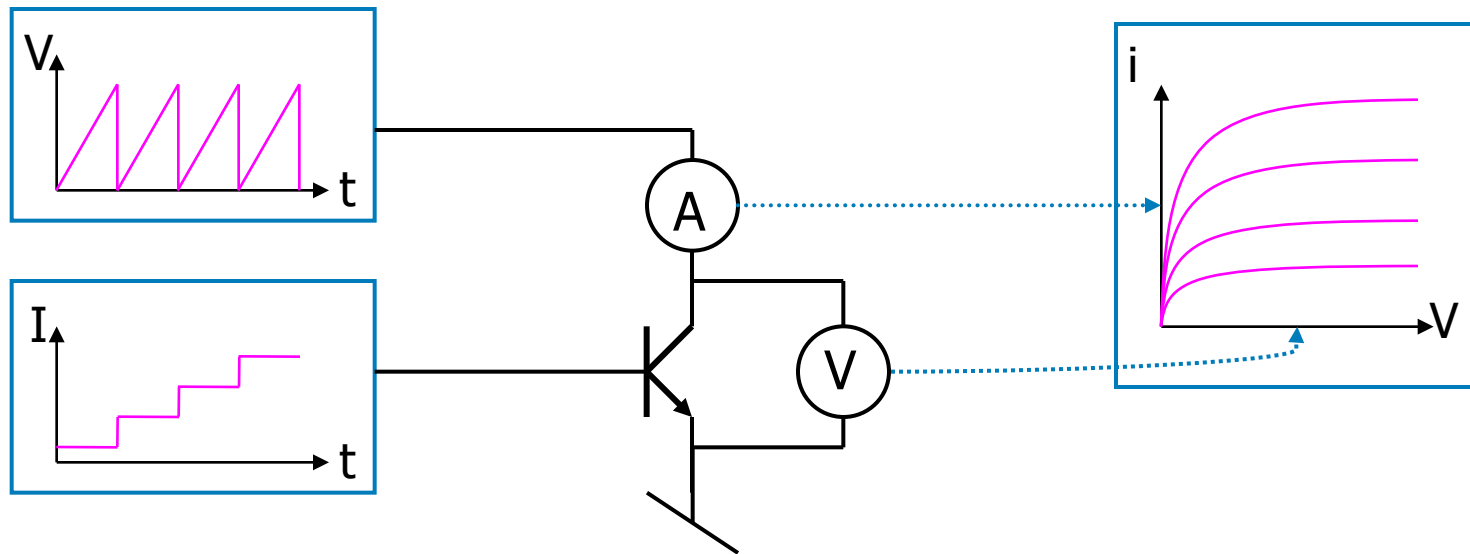
- BC547 (Vishay)
- $f_T$  ofte lav for effekttransistorer, MJE3055  $\sim 2\text{MHz}$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$

$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu$$



- Spændingsgenerator: Savtak (eller lignende) som funktion af tiden
- Strømgenerator: Trappekurve som funktion af tiden (spænding til FET'er)
- Spænding vises på x-aksen
- Strøm vises på y-aksen
- Beskyttelseskredsløb indbygget
- Hameg HM6042: En grovkornet digital opløsning er et problem ved små strømme og ved beregning af  $h_{11}$
- Spændinger op til 50 V. Hold fingrene fra komponenten under brug.





## 1 : Forstærkerkredsløb

- DC-analyse
- Arbejdspunkt, DC & AC-arbejdslinie (udgang)
- Maksimalt signalsving
- Simulering

## 2 : Transistordata

- Arbejdspunkt kendt
- h- parametre kendt fra datablad
- Beregn hybrid- $\pi$ -parametre

