

Forelesning nr.9 INF 1411

Elektroniske systemer

Transistorer



Dagens temaer

- Historisk overblikk
- Bipolare transistorer (BJT)
- Transistorforsterkere
- Presentasjon 4. obligatoriske labøvelse
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 16.1-16.4

Introduksjon

- Transistoren er den viktigste typen halvleder
- En transistor er en strøm- eller spenningsstyrt strømkilde
- I analog elektronikk brukes transistorer til bla forsterkere og filtre
- I digital elektronikk brukes transistorer for å lage logiske porter (AND, OR og NOT) og hukommelse (RAM/ROM)
- Med transistorer kan man lage andre typer kretselementer
 - Dioder
 - Kondensatorer
 - Resistorer

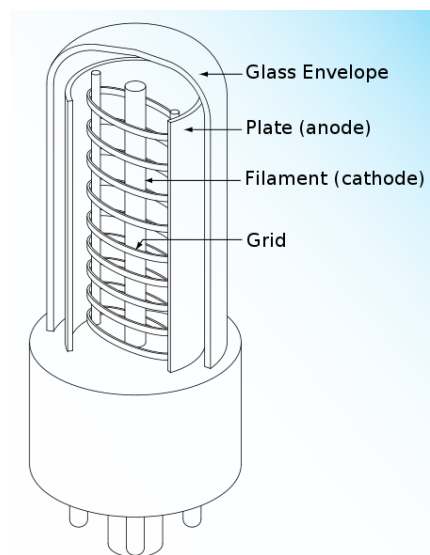
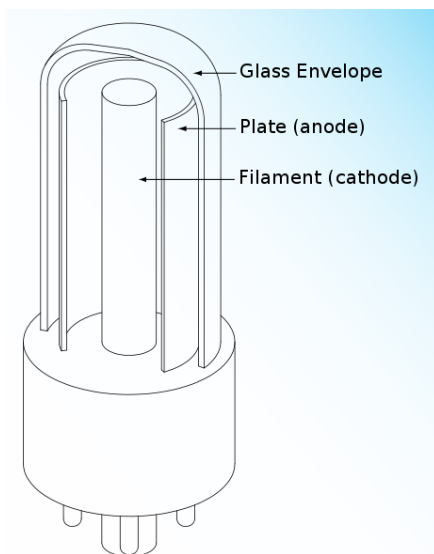
Vakuumrør

- Forløperen til transistoren er vakuumrøret, også kalt radorør
- Radorør ble oppfunnet tidlig på 1900-tallet og gjorde radiosendinger og – mottak over større avstander mulig fordi man kunne forsterke radiosignalene
- Radorør kan enten brukes som en forsterker eller diode og baserer seg på elektroner som beveger seg i et vakuum



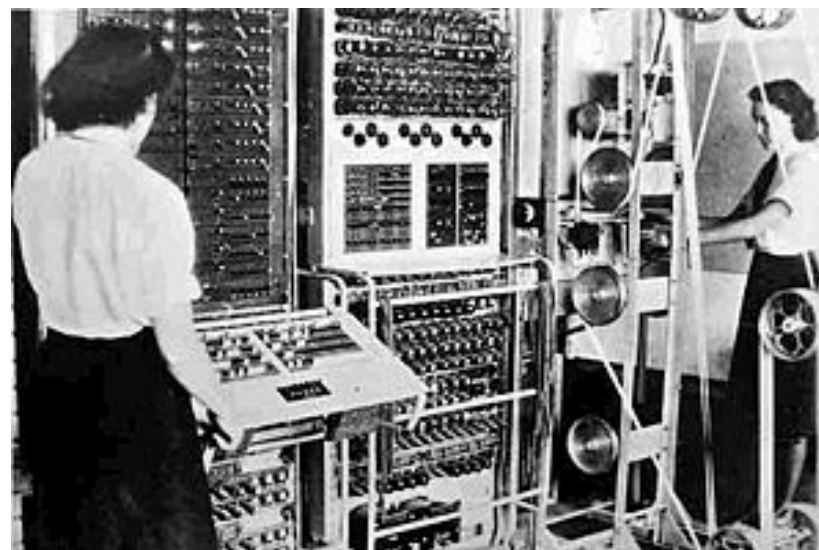
Vakuumrør (forts)

- Radiorøret består av tre deler: *Anode*, *katode* og *gitter*
- Hvis *katoden* varmes opp vil elektroner frigjøres og bevege seg over til *anoden* hvis katoden er mer negativ enn anoden. Det vil da gå en strøm fra anoden til katoden
- *Gitteret* kan brukes til å styre mengden elektroner fra katoden til anoden



Vakuumrør (forts)

- Radiorøret var enerådende i analog elektronikk og i de første datamaskinene frem til 50-tallet
 - Den første moderne datamaskinen (von Neumann-arkitektur) var Colossus M1 som bestod av rundt 1500 rør
 - Colossus ble brukt til kryptoanalyse av britene i 2. verdenskrig
- Strømforbruket var på 15kW



Vakuumrør (forts)

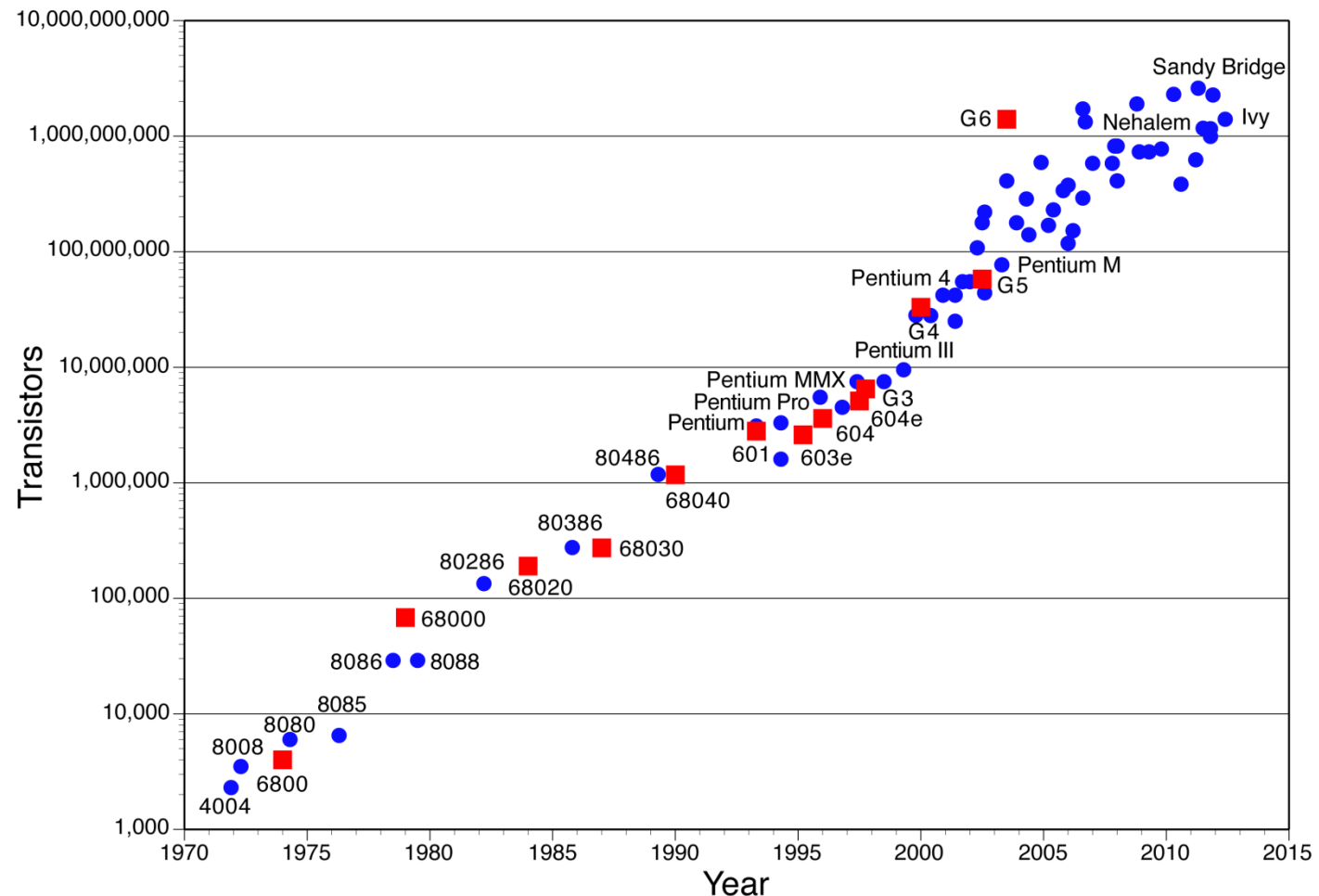
- Radiorøret brukes fortsatt i noen anvendelser, bla i høy-kvalitets audioforsterkere og radiosendere med høy effekt
- Radiorør har en rekke ulemper
 - Stor fysisk størrelse
 - Stort effektforbruk som forsvinner i varme (40-70%)
 - Upålitelig (vakuum ødelegges)
 - Degradring over tid (soting etc)
 - Treg oppstart (oppvarming av katode)
 - Generelt langsomme (som brytere)
 - Trenger relativt høy spenning på anoden (fra 22v og oppover til 130v)

Transistoren

- Transistoren avløste radorøret som den mest brukte halvleder på slutten av 50-tallet
- Transistorens halvlederegenskaper baserer seg på elektriske egenskaper i fysiske overganger mellom ulike materialer, f.eks silisium, germanium eller silisiumkarbid mot bor, arsen eller silisium
- Transistorer blir stadig mindre
 - Flere transistorer får plass på samme chip (et par milliarder!)
 - Effektforbruket synker
 - Hastigheten øker (tiden det tar å slå av/på strømmen)

Transistoren – Moores lov

- Moores lov fra 1956:
Antall transistorer på
en integrert krets vil
dobles hvert annet år
- Regnekraft og
tilgjengelig
hukommelse dobles
ca hver 18.måned
- Begge deler er
eksponentiell vekst



Transistoren – Moores lov i praksis

- Bærbar fra 1982 med 4MHz CPU vs iPhone5 2012 med 412 MHz CPU 1.3 GHz dual core
 - 100 ganger tyngre
 - 500 ganger større volum
 - 10 ganger dyrere (justert)
 - 1/325 av klokkefrekvensen



Moore's lov - fremtiden

1 The accelerating pace of change ...



2 ... and exponential growth in computing power ...

Computer technology, shown here climbing dramatically by powers of 10, is now progressing more each hour than it did in its entire first 90 years

COMPUTER RANKINGS

By calculations per second per \$1,000



Analytical engine
Never fully built, Charles Babbage's invention was designed to solve computational and logical problems



Colossus
The electronic computer, with 1,500 vacuum tubes, helped the British crack German codes during WW II



UNIVAC I
The first commercially marketed computer, used to tabulate the U.S. Census, occupied 943 cu. ft.

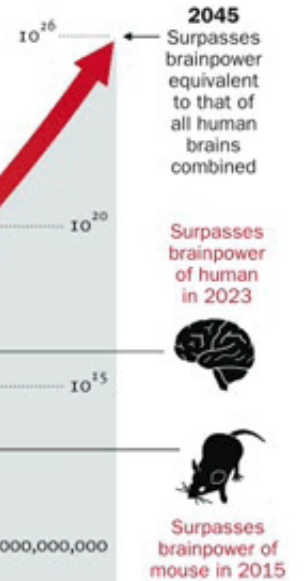


Apple II
At a price of \$1,298, the compact machine was one of the first massively popular personal computers



Power Mac G4
The first personal computer to deliver more than 1 billion floating-point operations per second

3 ... will lead to the Singularity



Transistoren (forts)

- Sammenlignet med radorøret har transistoren en lang rekke fordeler:
 - Liten størrelse og minimal vekt
 - Enkel og fullautomatisert produksjonsprosess
 - Lav arbeidsspenning (3.3 v eller lavere)
 - Ingen oppvarmingstid
 - Lavt effektforbruk og lite varmetap
 - Høy pålitelighet og fysisk robust
 - Lang levetid
 - Tåler mekanisk sjokk og vibrasjon

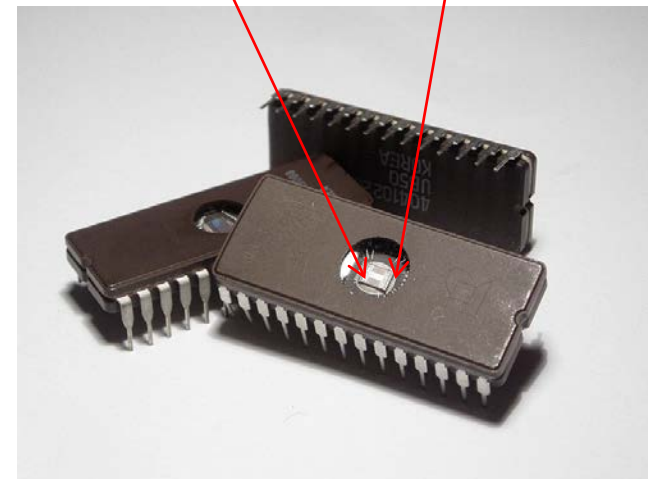
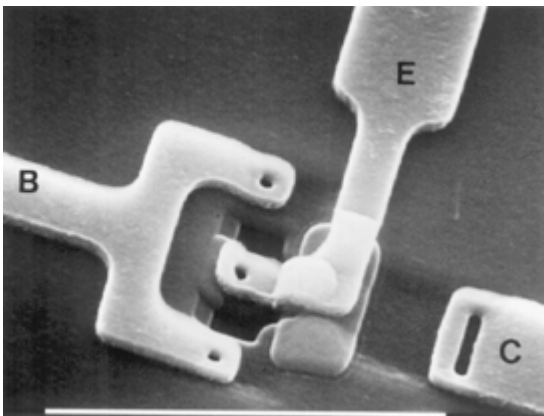
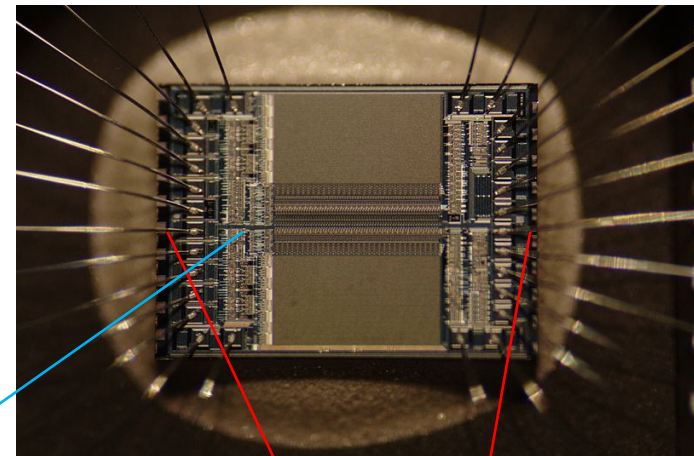
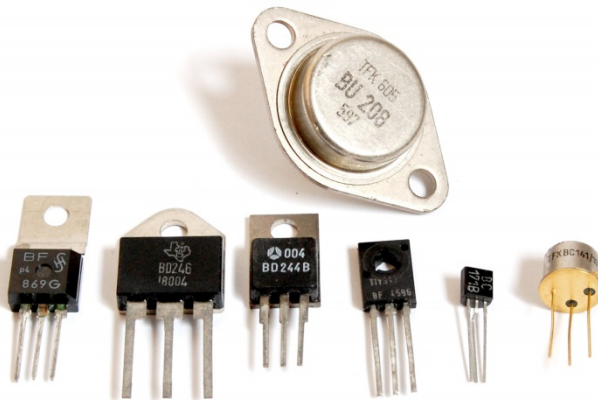


Transistoren (forts)

- Transistoren har også noen ulemper sammenlignet med radorør
 - Kan operere på maks 1000 volt
 - Vanskelig å lage transistorer for både høy frekvens og høy effekt samtidig (f.eks ved kringkasting)
 - Transistorer er mer følsomme for kraftig stråling og elektriske utladninger i omgivelsene
 - Ikke mulig å bytte ut enkelt-transistorer hvis de feiler; Hele kretsen må kastes

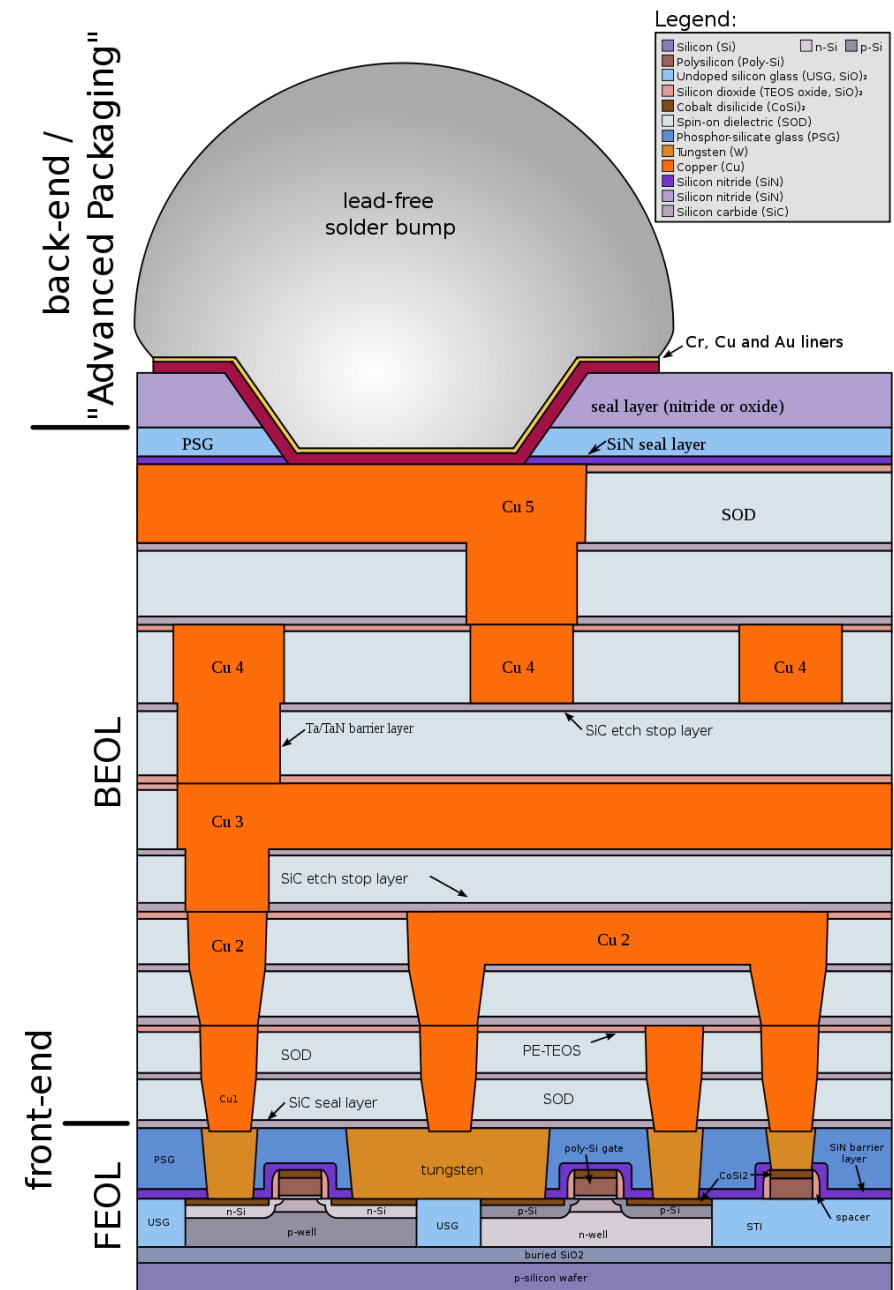
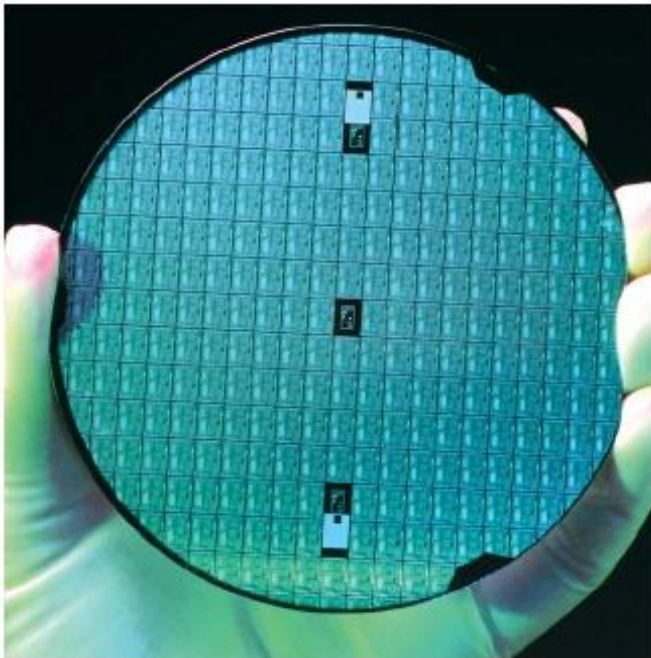
Produksjon av transistorer

- Transistorer lages enten som diskrete komponenter eller integrerte kretser



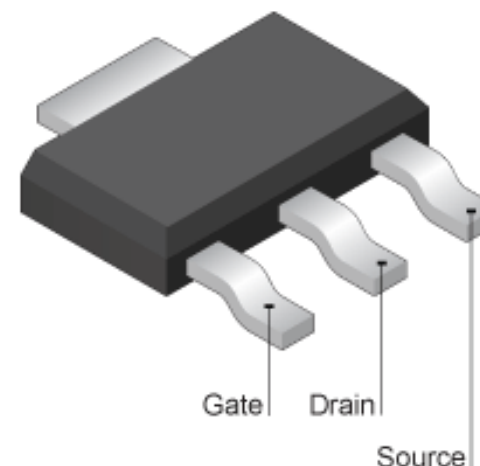
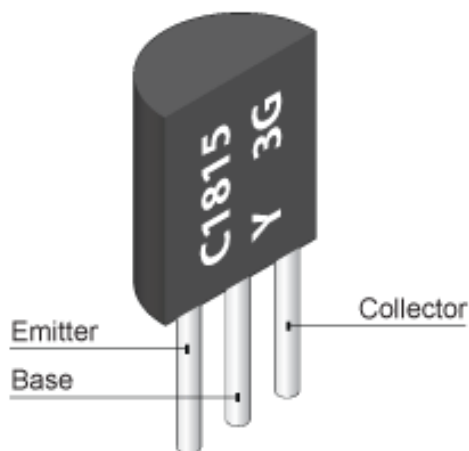
Produksjon av transistorer

- Transistorer på integrerte kretser består av mange lag
- En «wafer» består av mange integrerte kretser



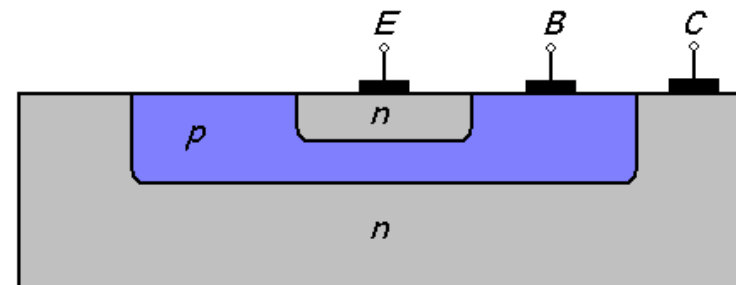
Transistorens to hovedanvendelser

- Transistoren brukes stort sett som enten forsterker eller elektrisk styrt bryter
- Transistorer lages i mange ulike teknologier og hver type har sine anvendelsesområder
- **Bipolare** (BJT) brukes hovedsaklig til forsterkere i analoge kretser, mens **felteffekttransistorer** (FET) brukes som brytere i logiske porter i digitale kretser



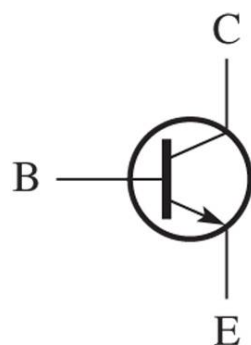
Bipolare transistorer (BJT)

- Bipolare transistorer (BJT) kan tenkes på som strøm-kontrollerte strømkilder
- Bipolare transistorer finnes både som diskrete transistorer og på integrerte kretser
- En BJT består av tre terminaler: *Base*, *emitter* og *kollektor*
- En BJT er enten av typen *pnp* eller *npn*
- En BJT er to dioder med koblet sammen, med enten felles p- eller n-region

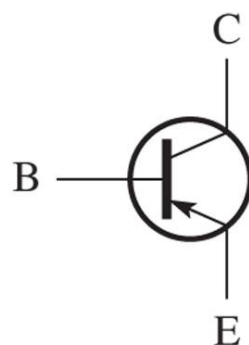


Bipolare transistorer (forts)

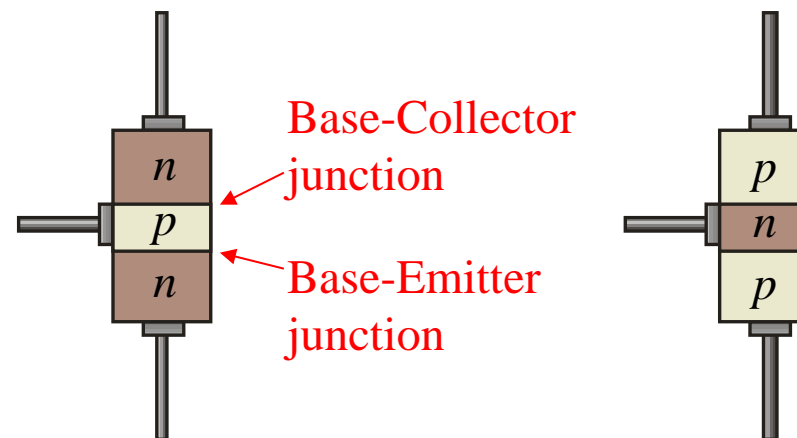
- BJT har to pn-overganger, og baseregionen er lett dopet, mens emitter- og kollektor-regionen er tungt dopet. Base-regionen er mye tynnere enn de andre



(a) *npn*

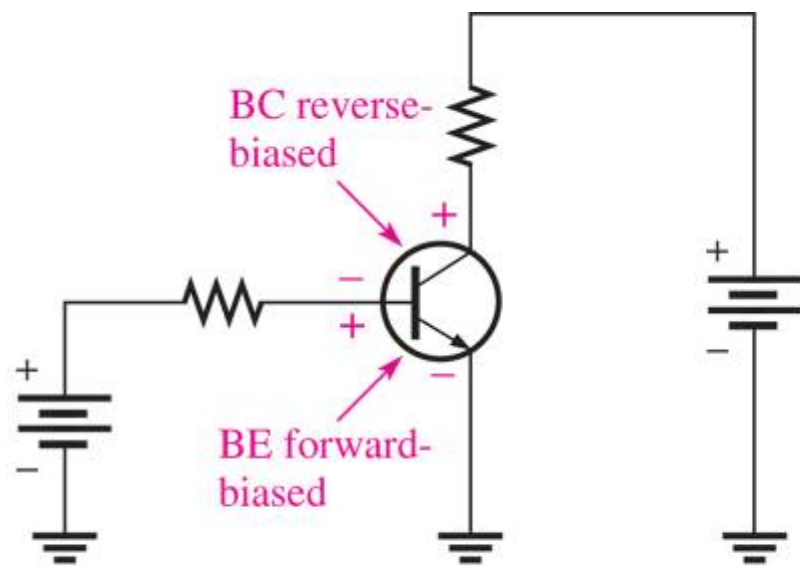


(b) *pnp*

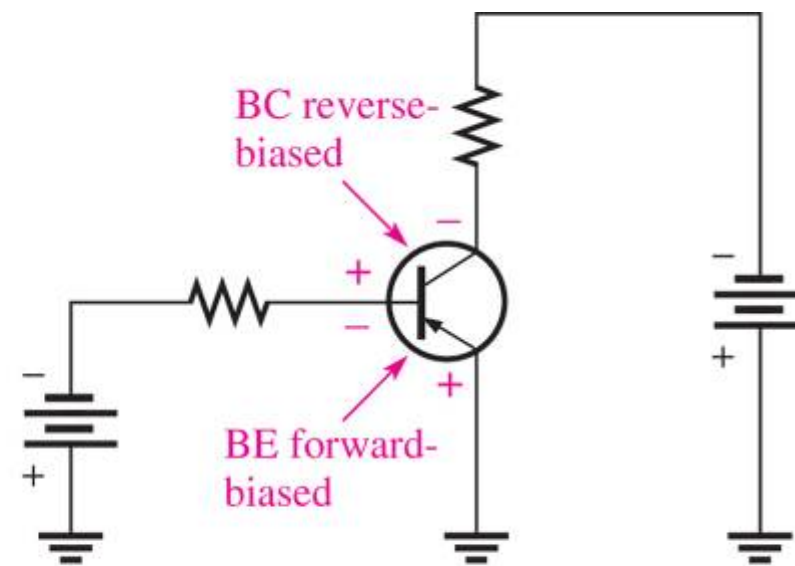


Operasjonspunkt i bipolare transistorer

- Under normal drift er base-kollektor (BC) overgangen reverse-biased, mens base-emitter (BE) er forward-biased både for PNP og NPN-type transistorer



(a) *npn*



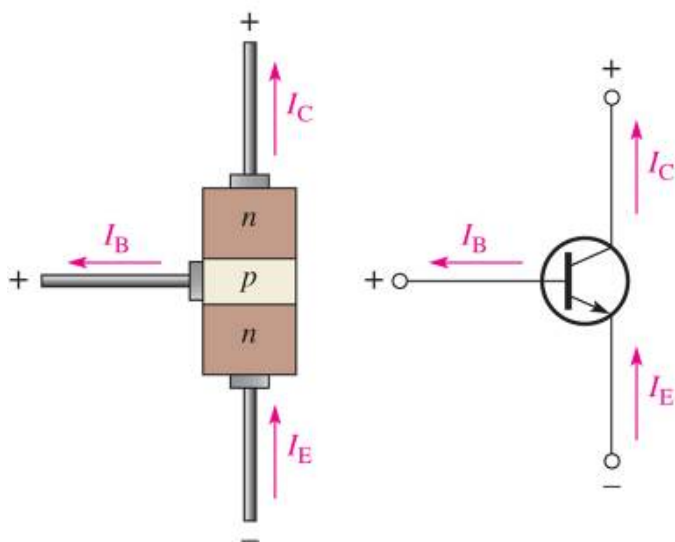
(b) *pnp*

Strømmer i bipolare transistorer

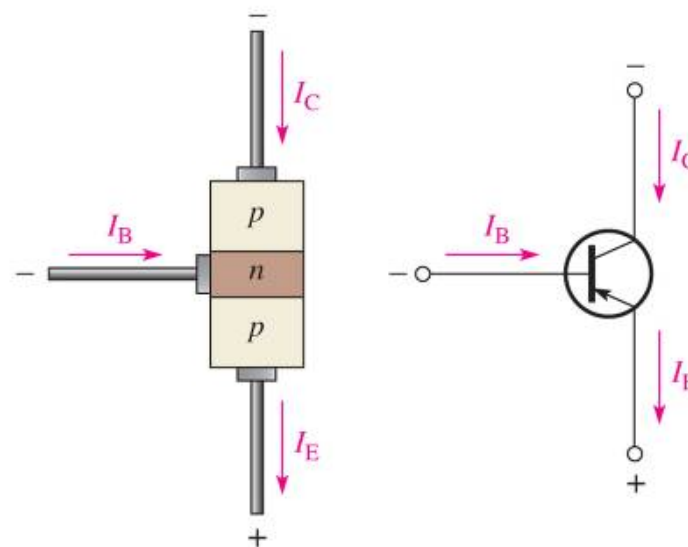
- KCL gjelder som vanlig
 - Strømmene er gitt ved følgende likninger

$$I_E = I_C + I_B \quad I_C = \alpha_{DC} I_E \quad I_C = \beta_{DC} I_B$$

- $\alpha_{DC} = I_C/I_E$ og $\alpha_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_E$
- $\beta_{DC} = I_C/I_B$ og $\beta_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_B$
- Typiske verdier for α er 0.950-0.995, mens β er 20-300



(a) npn



(b) pnp

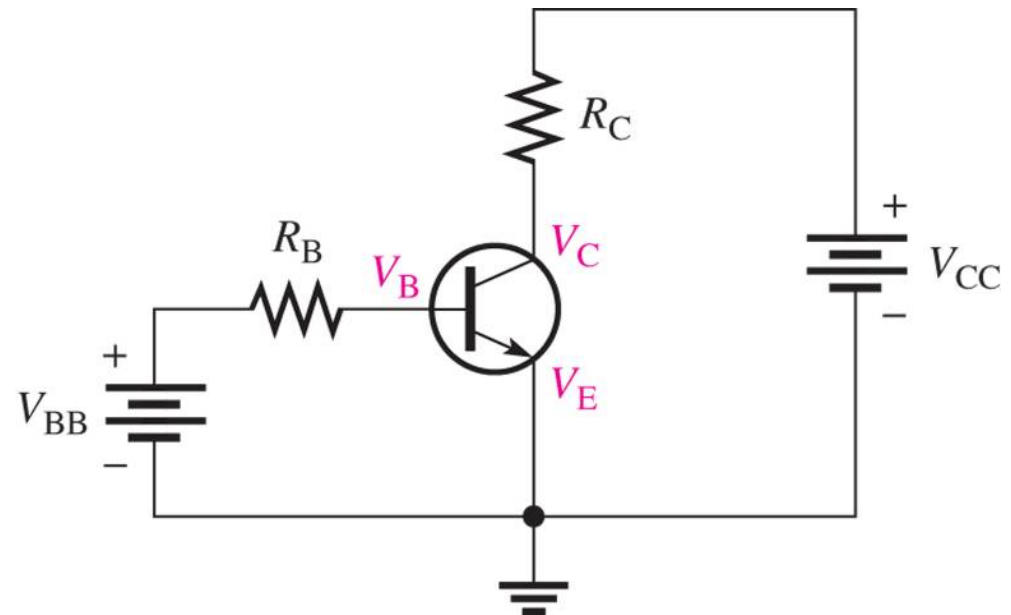
Spenninger i bipolare transistorer

- For en BJT som er i korrekt operasjonsområde, er spenningsene gitt av (KVL gjelder)

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

- R_B og R_C reduserer I_B og I_C slik at transistoren ikke ødelegges



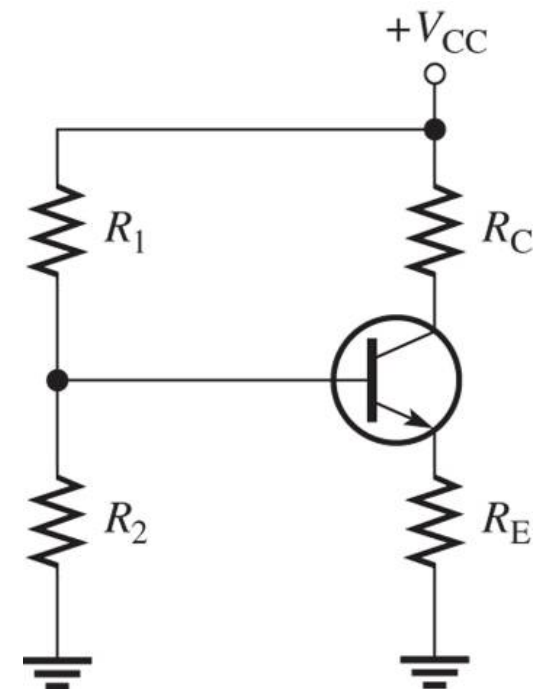
Spenninger i bipolare transistorer (forts)

- For at en transistor skal fungere som en strømforsterker, må V_B , V_C og V_E ligge i korrekt område
- Vanligst med spenningsdeler-nettverk med mostander og en felles forsyningsspenning

$$R_{IN} \cong \beta_{DC} R_E$$

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

$$V_E = V_B - 0.7\text{V}$$



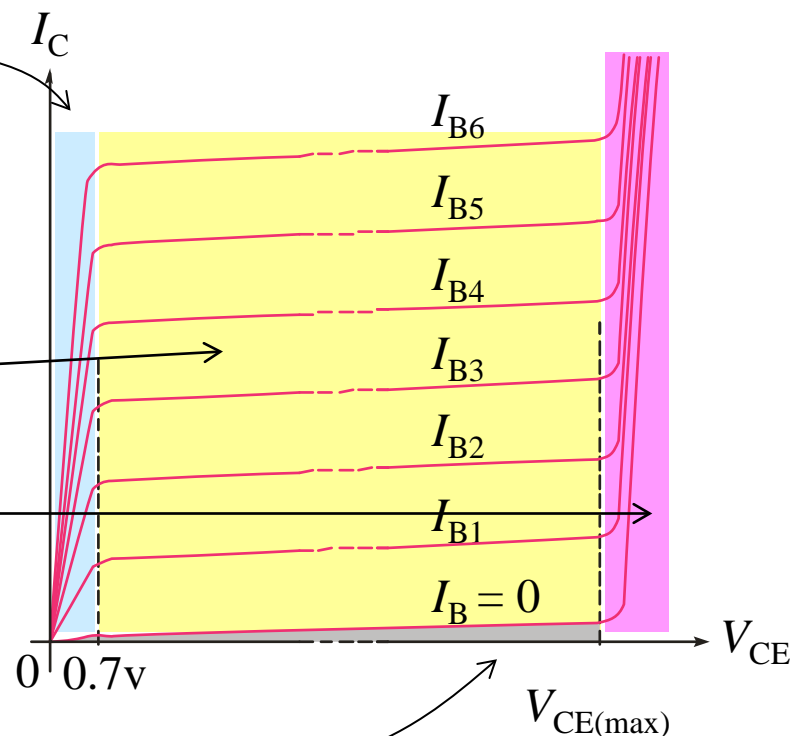
Transistor-karakteristikker

- Når man skal bruke en transistor, må man sørge for at den opererer i det korrekte området
- Hva som er korrekt område avhenger av anvendelsen, f.eks analogforsterker eller digital bryter
- En transistor opererer normalt i ett av tre områder:
 - Avstengt («Cut-off»)
 - Lineært («Linear»)
 - Metning («Saturation»)
- I tillegg kan den være i *breakdown*, men kan da bli ødelagt av for høy strøm

Sammenheng strøm-spenning

- Operasjonsområde og strømforsterkning er bestemt av I_C som funksjon V_{CE} og I_B

- Metning:** Begge pn-overgangene er forward-biased; liten økning i V_{CE} gir stor økning i I_C
- Lineært:** I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , kun av I_B
- Breakdown:** I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- Avstengt:** $I_B=0$ og I_C veldig liten

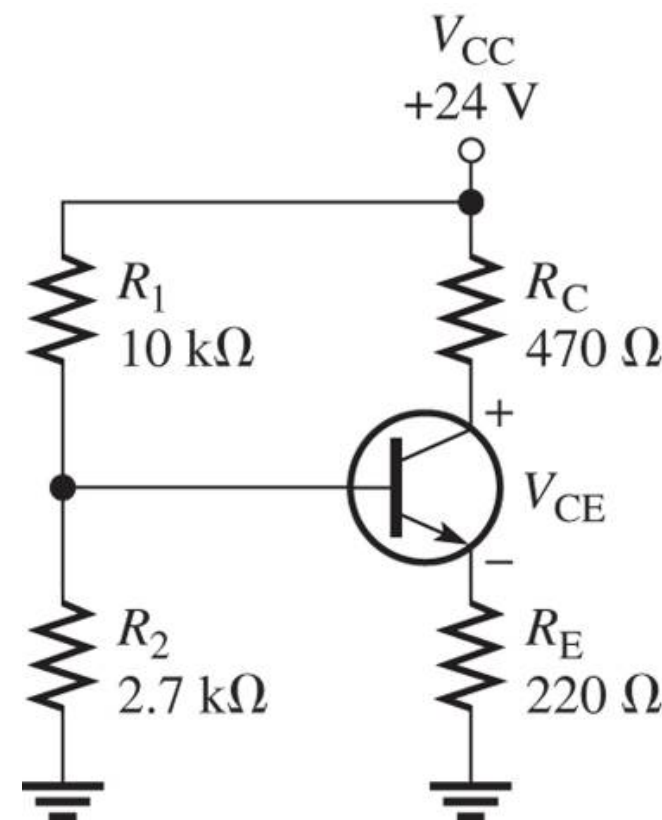


Forsterkere

- Forsterkere klassifiseres i ulike klasser, avhengig av effektbehov, forsterkning, forvrengning osv:
 - **Klasse A:** 100% av input-signalet benyttes, dvs at transistoren leder i det lineære området gjennom hele syklusen til input (360°)
 - **Klasse B:** 50% av input-signalet benyttes, dvs at transistoren leder i det lineære området gjennom halve syklusen til input (180°), og er i cut-off (ingen strøm) den resterende tiden
 - **Klasse AB:** To overlappende klasse B, dvs at hver klasse B leder mer enn 50% av tiden
 - **Klasse C:** Mindre enn 50% av inputsignalet benyttes
 - **Klasse D:** Mer enn 90% av signalet brukes i høyeffekt-applikasjoner

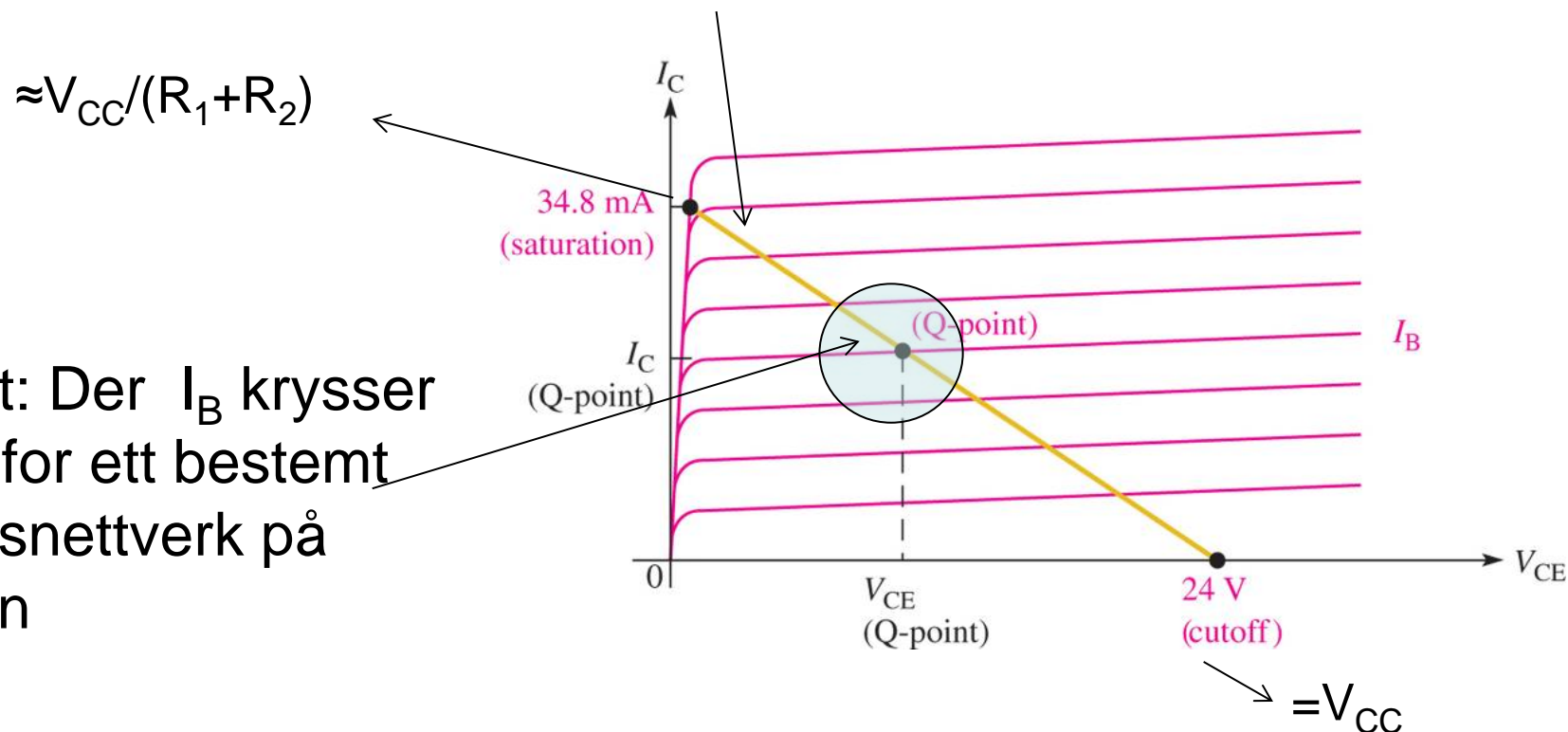
BJT klasse A-forsterker i dc-modus

- En klasse A forsterker lager en kopi av et svakt ac-input signal, men med større amplitude opptil 1W effekt
- Fremgangsmåte for design:
 - Først bestemmes maksimalt tillatt strøm I_C
 - Deretter beregnes R_1 og R_2 for å lage I_B
 - Til slutt bestemmes minimal og maksimal V_{CE}



BJT klasse A-forsterker dc-modus (forts)

- Linjen som angir hvordan V_{BE} og I_C varierer for de gitte motstandsverdiene kalles for *dc-lastlinje*

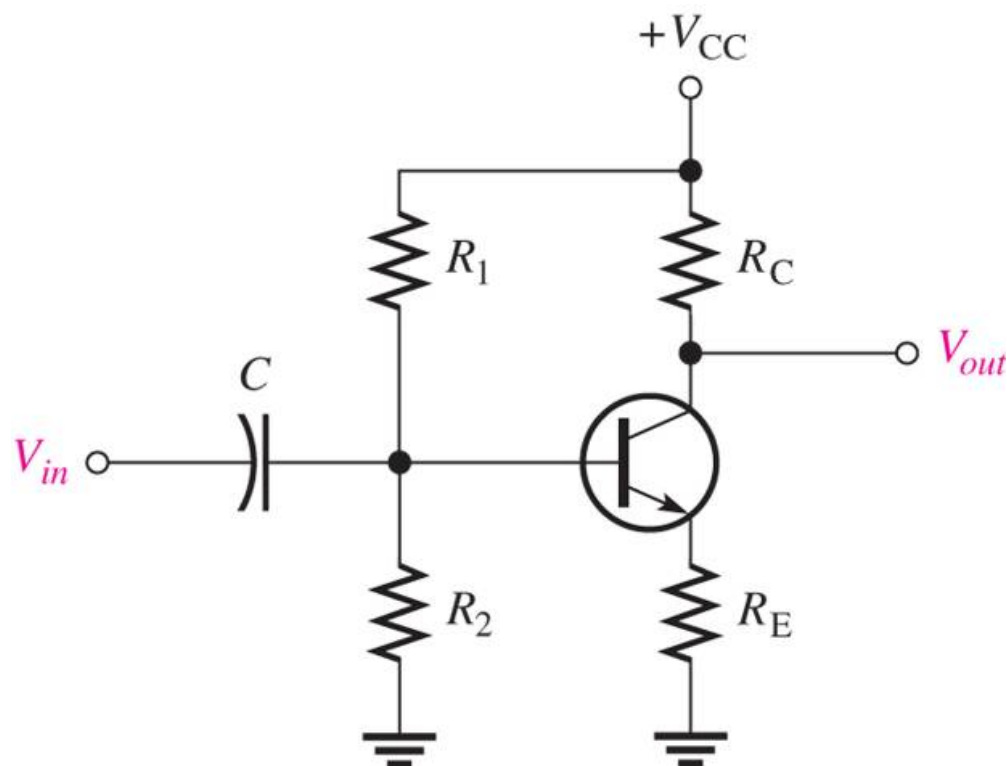


- Q-punktet: Der I_B krysser lastlinjen for ett bestemt motstandsnettverk på inngangen

Strømforsterkning med ac-input

- Deretter kobles et ac-signal til baseinngangen via en koblingskondensator slik at dc-operasjonsområdet ikke påvirkes
- Strømforsterkningen i denne kretsen er gitt av

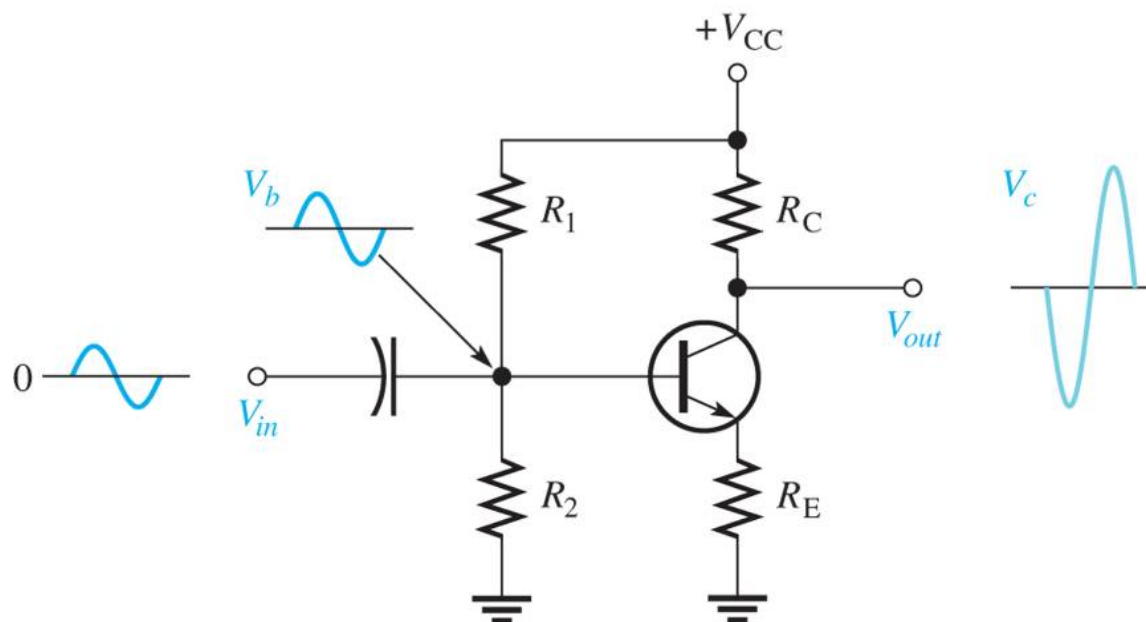
$$\beta_{ac} = \frac{I_c}{I_b} \cong \beta_{DC}$$



Spenningsforsterkning med ac-input

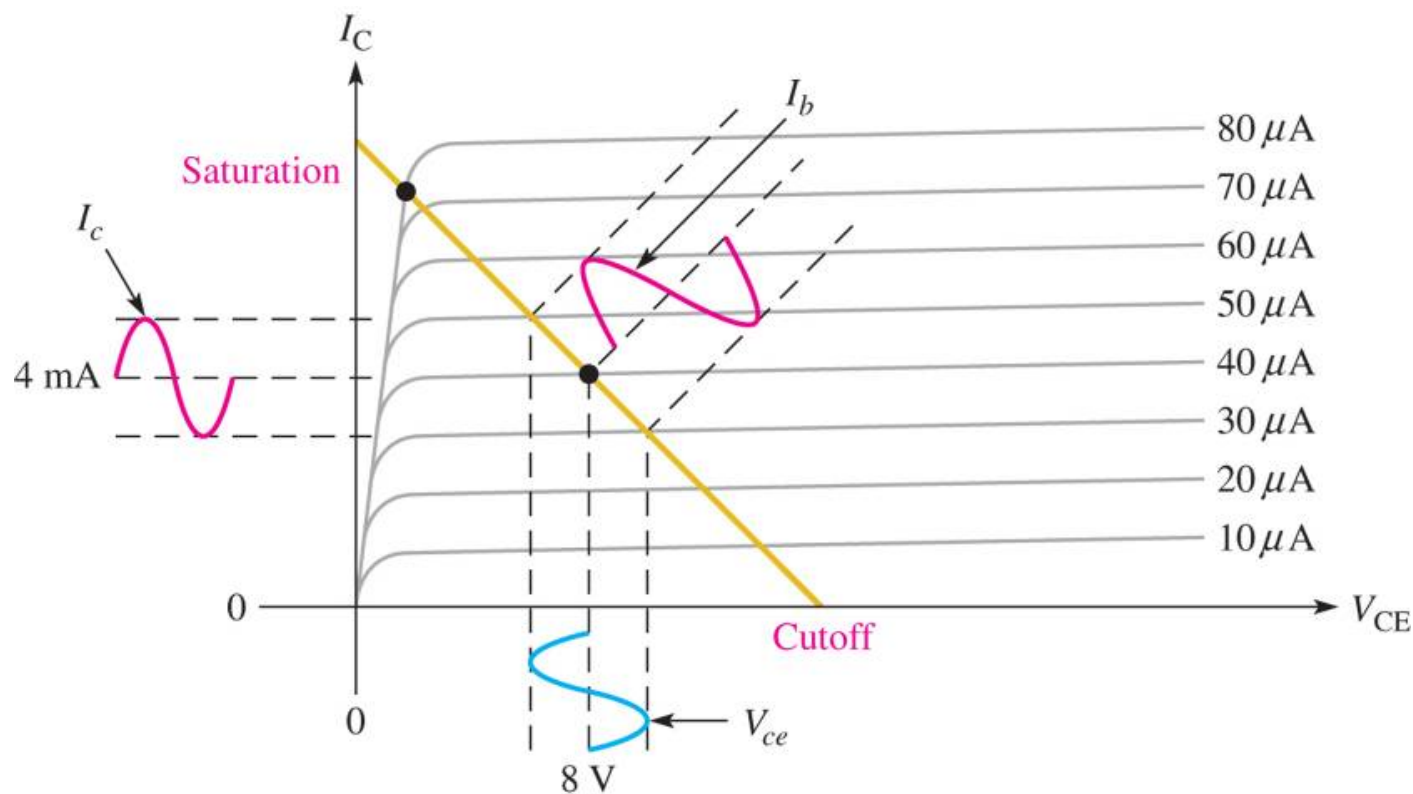
- Når base-emitter overgangen er forward-biased, er V_b tilnærmet lik V_e .
- Dermed er spenningsforsterkningen A_v gitt av

$$A_v \cong \frac{V_c}{V_e} = \frac{I_c R_c}{I_e R_e} \cong \frac{R_c}{R_e}$$



Oppførsel langs lastlinjen

- Man ønsker lineær sammenheng mellom inngang og utgang
- For en bestemt krets og min-max område for inputsignalet kan man plote I_b , I_c og V_{ce} langs lastlinjen og sjekker for linearitet

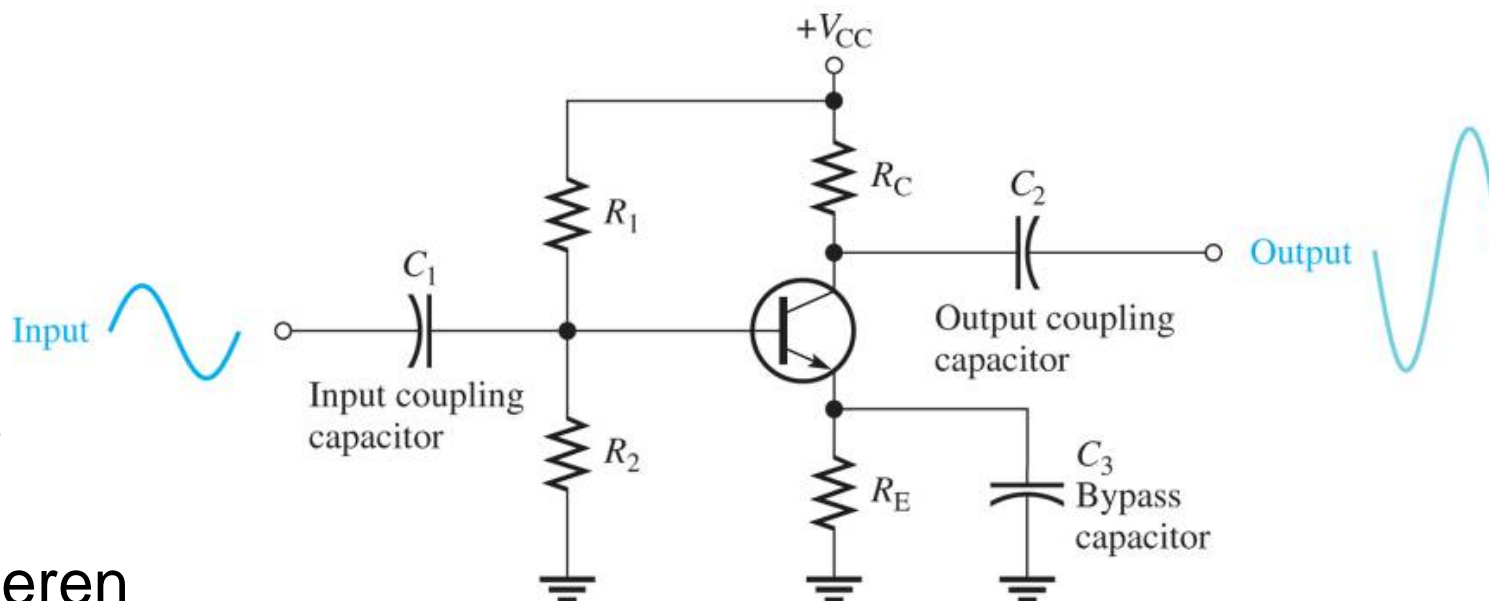


Felles emitter-forsterker

- En felles-emitter forsterker (CE) isolerer forsterkeren både fra input og output DC-last vha kondensatorer
- I tillegg gjør en *bypass*-kondensator at spennings-forsterkningen øker

$$A_v = \frac{R_c}{r_e}$$

r_e er den indre motstanden gjennom emitteren

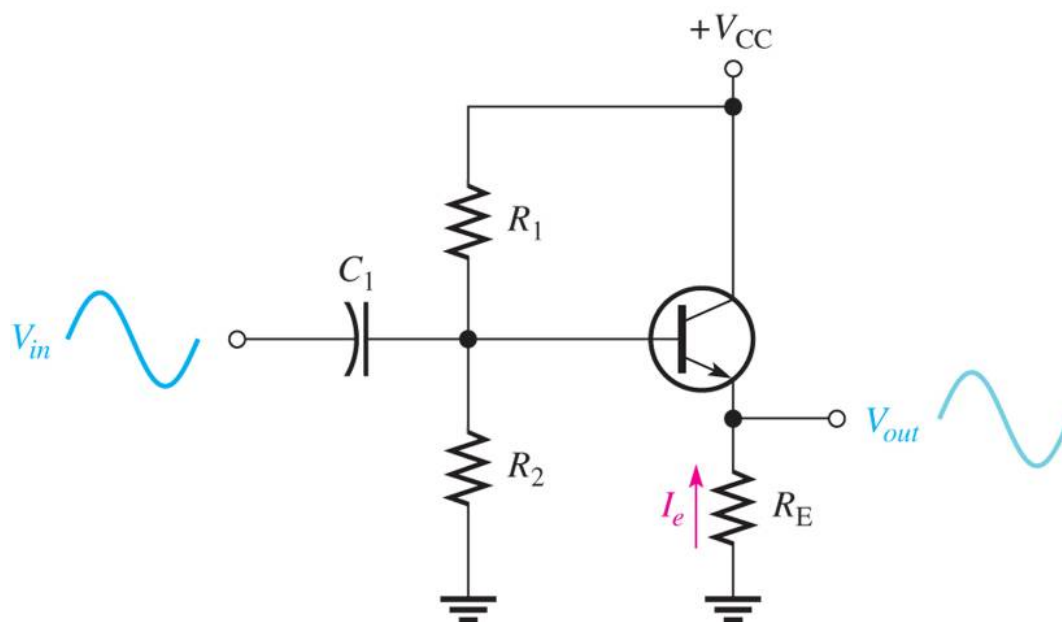


Felles kollektor-forsterker

- En annen type forsterker er felles-kollektor (CC) eller emitter-følger forsterker hvor V_{out} tas fra emitter og ikke kollektor
- Felles-kollektorforsterkeren har en spenningsforsterkning på ca 1, mens strømforsterkningen er større enn 1

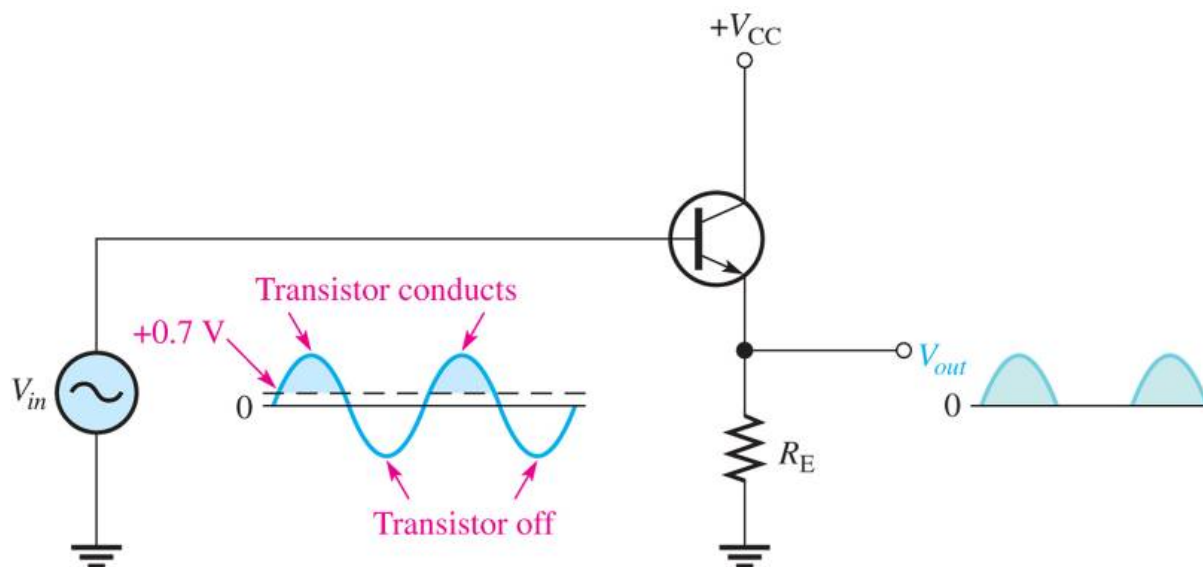
$$A_v = \frac{R_E}{r_e + R_C} \quad A_i = \frac{I_e}{I_s}$$

$$I_s = \frac{V_s}{R_{in(tot)}}$$



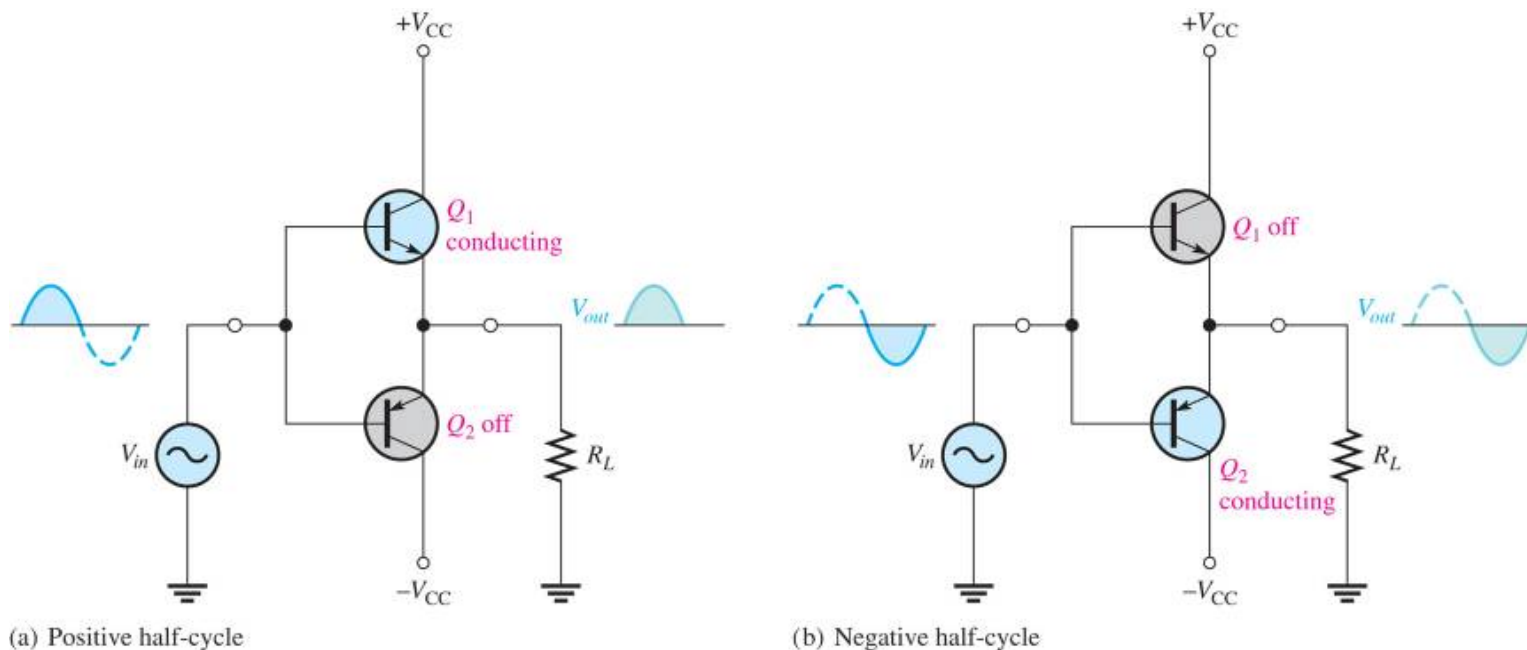
BJT klasse B-forsterker

- En enkel klasse B forsterker bruker bare halve inputsignalet, dvs 180 grader
- Klasse B-forsterkere gir mer output-effekt enn en klasse A
- Nesten halvparten av tiden er transistoren i cutoff og resten av tiden leder den



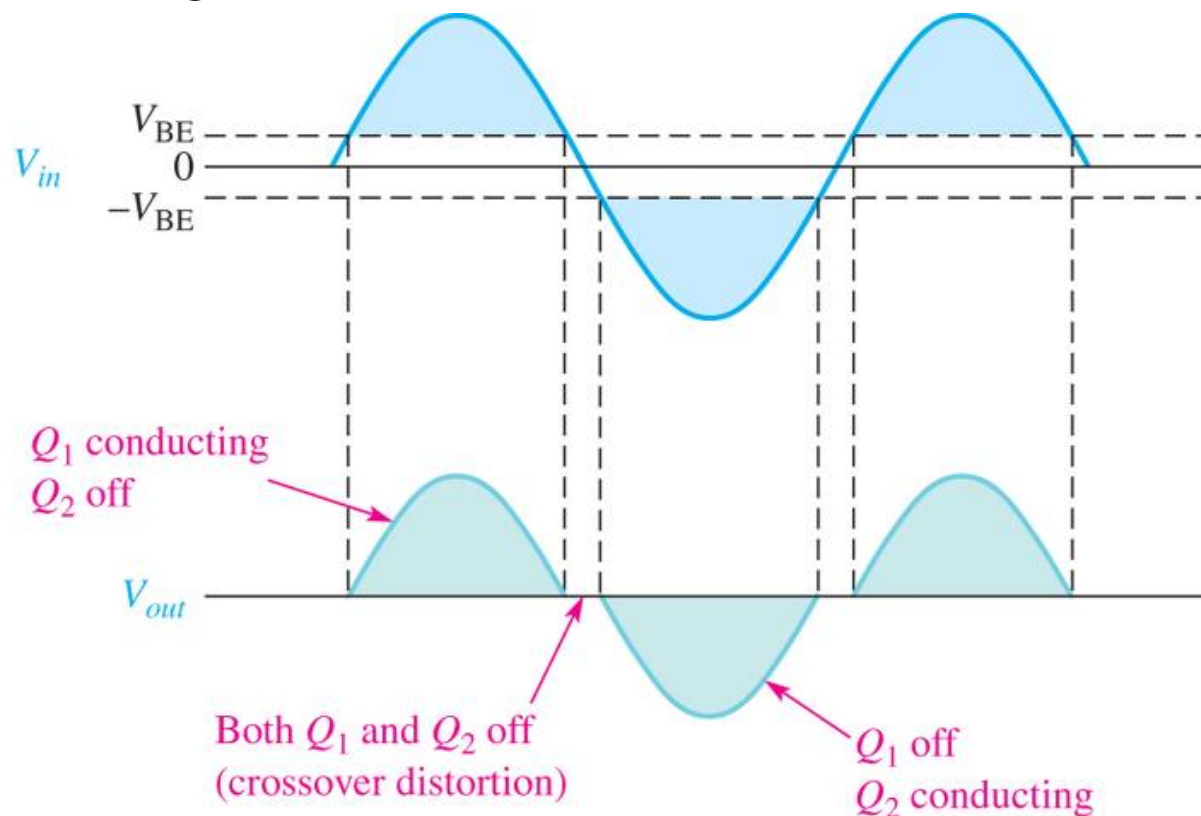
Push-pull

- For å gjøre en klasse B-forsterker mer anvendelig, lager man et komplementært trinn med én npn- og én pnp-transistor
- I den ene halvperioden leder den ene transistorer, mens den andre leder i motsatt halvperiode



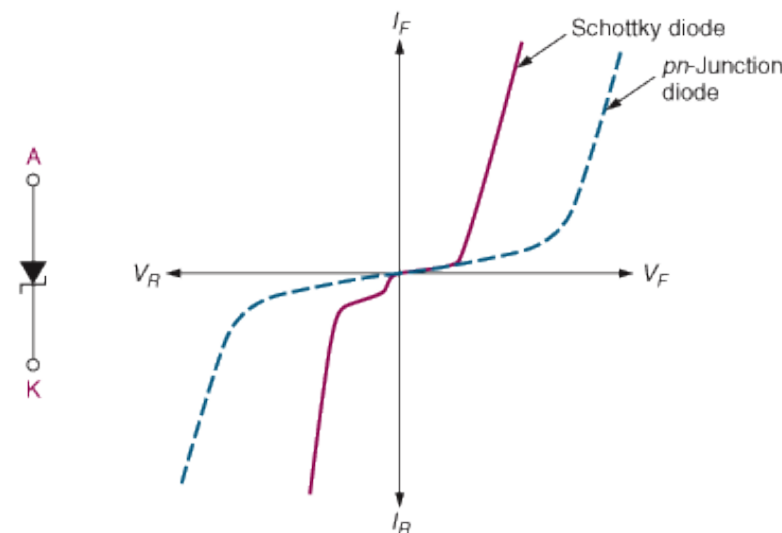
Push-pull (forts)

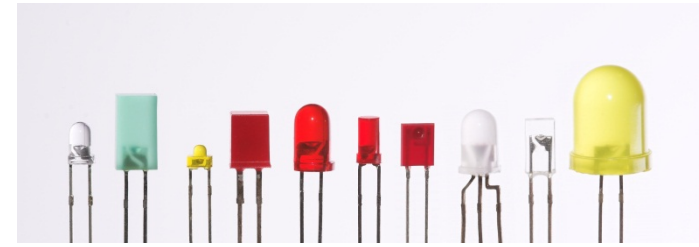
- Pga forward bias-spenningene er det områder hvor begge transistorene er i cutoff, og dette kalles crossover-forvrengning



Presentasjon labøvelse 4

- Oppgaven handler om ulike typer dioder og anvendelser:
 - Oppsett og måling på LED (lysdioder) og V-I karakteristikk
 - Måle på Zenerdioder og bestemme Zener-spenningen
 - Lage en halvbølgelikeretter med kondensator og Schottky-diode
 - Lage en spenningsregulator med Schottky-diode, kondensator og BJT-transistor
- NB: Det er **VIKTIG** at dere har lest stoffet om dioder, likerettere og spenningsregulatorer FØR dere begynner på labøvelsen!





Oppsummeringsspørsmål

Kapittel 16



Spørsmål

- Hvilke to typer bipolare transistorer finnes det, og hva er forskjellen?
- Hva heter de tre terminalene på en bipolar transistor?
- For at det skal gå en kollektorstrøm, hvordan må base-emitter og base-kollektor være biased?
- Hvor stort er spenningsfallet mellom base og emitter?
- Hva er sammenhengen mellom
 - Base-, emitter- og kollektorstrømmene?
 - Base- og kollektorstrømmene?
 - Kollektor- og emitterstrømmene?
- Hvilke fire operasjonsområder kan en BJT være i?

Spørsmål

- Hva er forskjellen mellom en klasse A og klasse B forsterker?
- Hva er en DC lastlinje?
- Hva er Q-punktet?
- Hva er ytterpunktene på lastlinjen?
- Hvorfor kobler man input til en ac-forsterker via en kondensator?
- Hva er strømforstrekningen og spenningsforsterkningen for klasse-A forsterkeren basert på en BJT?

Spørsmål

- Hva er et radorør?
- Hva er en transistor?
- Hvilke fordeler har radorør (sammenlignet med transistorer)?
- Hvilke fordeler har transistoren (sammenlignet med radorør)?
- Nevn 3 ulemper med radorør
- Nevn 3 ulemper med transistorer
- Hva er de to hovedanvendelsene til transistorer?
- Hvilken hovedfunksjon har en BJT?
- Hvilken hovedfunksjon har en FET?

Spørsmål 1

En transistor er

- a) En passiv komponent
- b) En spenningsstyrt kondensator
- c) En styrt strømkilde
- d) Ingen av delene

Spørsmål 2

Hvilken komponent kan man IKKE lage av en transistor?

- a) Dioder
- b) Kondensatorer
- c) Resistorer
- d) Induktorer

Spørsmål 3

En bipolar transistor (BJT) brukes valigvis som en

- a) Spenningsstyrt spenningskilde
- b) Spenningsstyrt strømkilde
- c) Strømstyrt spenningskilde
- d) Strømstyrt strømkilde

Spørsmål 4

Under normal drift må en BJT ha følgende:

- a) Både base-emitter og base-kollektor overgangene være forward biased
- b) Både base-emitter og base-kollektor overgangene være reversed biased
- c) Base-emitter må være forward biased mens base-kollektor må være reversed biased
- d) Base-emitter må være reversed biased mens base-kollektor må være forward biased

Spørsmål 5

Parameteren β er et mål på

- a) Forholdet mellom emitter- og kollektorstrøm
- b) Forholdet mellom emitter og basestrøm
- c) Forholdet mellom kollektor- og basestrøm
- d) Forholdet mellom base- og emitterstrøm

Spørsmål 6

Sammenhengen mellom base-, emitter- og kollektorstrøm er

a) $I_E = I_C + I_B$

b) $I_E = I_C - I_B$

c) $I_C = I_E + I_B$

d) $I_B = I_C + I_E$

Spørsmål 7

Sammenhengen mellom base-, emitter- og kollektorstrøm er

a) $I_E = \alpha_{DC} I_E + \beta_{DC} I_B$

b) $I_E = \alpha_{DC} I_E + \frac{I_C}{\beta_{DC}}$

c) $I_E = \alpha_{DC} I_E - \beta_{DC} I_B$

d) $I_E = I_C + \beta_{DC} I_B$

Spørsmål 8

I en BJT som er i **metning** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b) I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , men kun av I_B
- c) I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- d) $I_B=0$ og I_C veldig liten

Spørsmål 9

I en BJT som er **avstengt** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b) I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , men kun av I_B
- c) I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- d) $I_B=0$ og I_C veldig liten

Spørsmål 10

I en BJT som er i det **lineære** området er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b) I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , men kun av I_B
- c) I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- d) $I_B=0$ og I_C veldig liten

Spørsmål 11

I en BJT som er i **breakdown** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b) I_C er nesten ikke avhengig av V_{CE} , men kun av I_B
- c) I_C er svært stor og ikke lenger avhengig av I_B
- d) $I_B=0$ og I_C veldig liten

Spørsmål 12

DC lastlinjen for en transistor med et bestemt bias-nettverk angir

- a) Sammenhengen mellom V_{BE} og I_C varierer for de gitte motstandsverdiene
- b) Sammenhengen mellom V_C og V_B for de gitte motstandsverdiene
- c) Sammenhengen mellom I_C , I_B og I_E for de gitte motstandsverdiene
- d) Sammenhengen mellom V_{BE} og I_E for de gitte motstandsverdiene

Spørsmål 13

I en klasse B-forsterker opererer transistoren

- a) I metning 50% av tiden og cutoff resten
- b) I det lineære området 50% av tiden og breakdown resten
- c) I det lineære området 50% av tiden og cutoff resten
- d) I metning 50% av tiden og det lineære resten