

# Forelesning nr.8 IN 1080

## Elektroniske systemer

Transistorer



# Dagens temaer

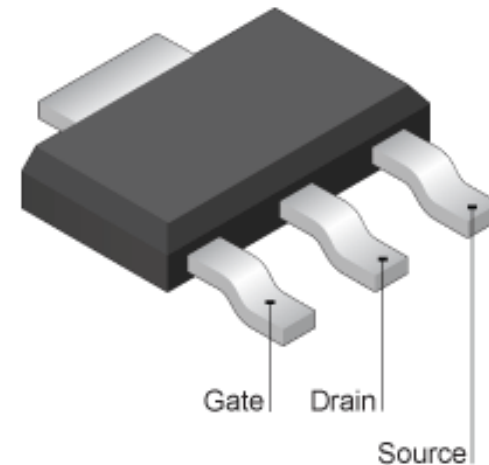
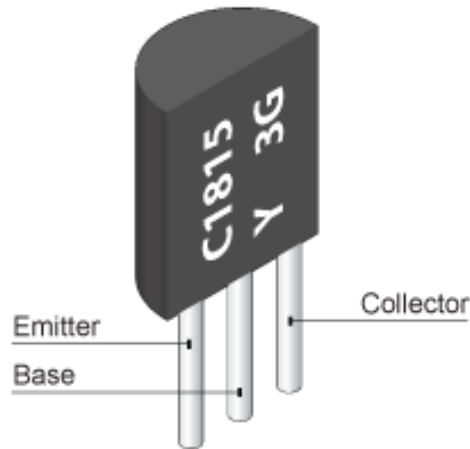
- Transistorer
  - Bipolare transistorer
  - Felteffekttransistorer
- Forsterkerkretser
- Digitale kretser: AND, OR og NOT
- Fra lærebokas kapittel 10.3-10.5

# Introduksjon

- Transistoren er den viktigste typen halvleder
- En transistor brukes både i analog og digital elektronikk
  - **Strømstyrt strømkilde:** I forsterkere og filtre i analog elektronikk;
  - **Strømstyrt bryter** (strømkilden er enten av eller på): I logiske porter (AND, OR og NOT, NAND/NOR)
- Med transistorer kan man også lage
  - Dioder
  - Kondensatorer
  - Resistorer

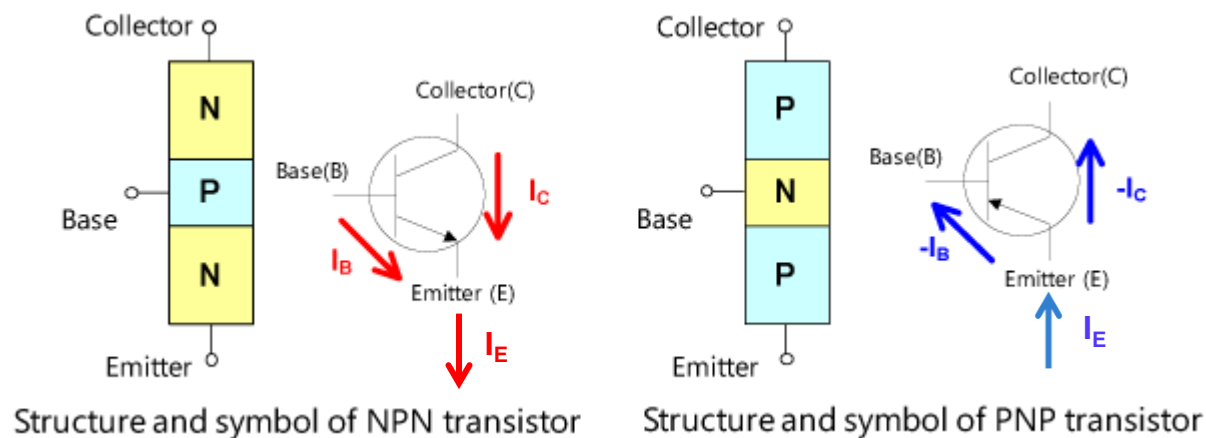
# Transistortyper

- Transistorer lages i mange ulike teknologier og for forskjellig bruk
- To hovedtyper
  - **Bipolare** (BJT) brukes hovedsaklig til forsterkere i analoge kretser
  - **Felteffektransistorer** (FET) er mest utbredt, bla i logiske porter i digitale kretser, i likerettere, strømforsyninger og styring av av elektriske motorer

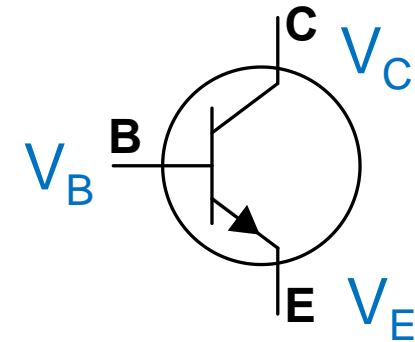


# Bipolare transistorer

- Bipolare transistorer (BJT = «Bipolar Junction Transistor») er *strømstyrte strømkilder*
  - En liten strøm brukes til å kontrollere en mye større strøm
- BJT'er finnes både som enkelt-transistor og på integrerte kretser
- En bipolar transistor består av tre terminaler: Base (B), Emitter (E) og Kollektor (C)
- En BJT er to dioder koblet sammen med enten felles p- eller n-region
  - NPN-transistor: To n-regioner med en p-region i mellom
  - PNP-transistor : To p-regioner med en n-region i mellom



## Bipolare transistorer (forts)



- Alle transistorer har tre terminaler
- For at den skal fungere, må spenningsforskjellene mellom basen B og emitteren E, og mellom kollektoren C og emitteren E ligge innenfor bestemte spenningsområder:
  - $V_{BE}$  er spenningsforskjellen mellom basen og emitteren:  $V_{BE} = V_B - V_E$
  - $V_{CE}$  er spenningsforskjellen mellom kollektoren og emitteren:  $V_{CE} = V_C - V_E$

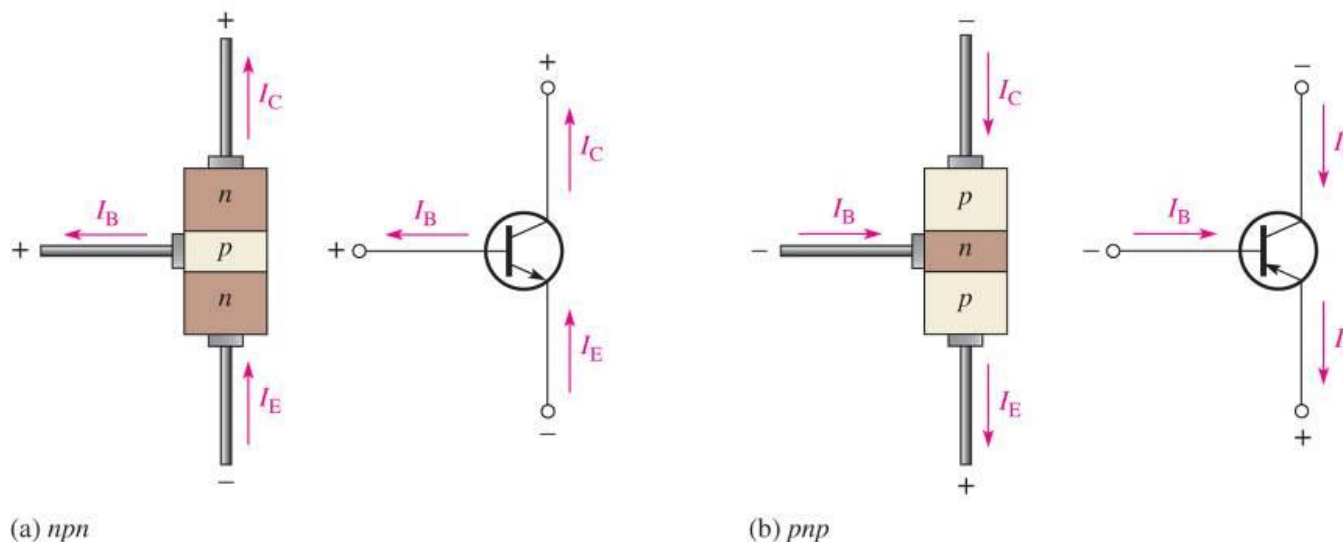
# Strømmer i bipolare transistorer (1)

- Kirchhoffs strømlov gir følgende

$$I_C = \beta I_B \quad I_E = I_C + I_B \quad I_C = \alpha I_E$$

der  $\alpha = I_C/I_E$  og  $\beta = I_C/I_B$

- Typiske verdier for  $\alpha$  er 0.950-0.995, mens  $\beta$  er 20-300 (strømforsterkning)



## Strømmer i bipolare transistorer (2)

- En liten strøm  $I_B$  brukes til å styre en mye større strøm  $I_C$ , dvs  $I_C = \beta I_B$ 
  - Forutsetning: Spenningene  $V_B$ ,  $V_C$  og  $V_E$  må være innenfor bestemte intervaller
  - I en krets må strømmene  $I_B$ ,  $I_C$  og  $I_E$  begrenses slik at transistoren ikke ødelegges
- *Forspenninger* eller *bias* er de spenningene som gjør at transistoren oppfører seg slik den skal.
- Forspenninger kan lages med spenningsdelernetverk og/eller spenningskilder



# Operasjonsområder

- En BJT har ulike *operasjonsområder* som bestemmes av  $V_E$ ,  $V_B$  og  $V_C$ , og  $I_B$  og  $I_C$
- Hva transistoren brukes til bestemmer hvilket operasjonsområde den må være i, f.eks. strømstyrt strømkilde (variabel strømkilde) eller strømstyrt bryter
- Transistor brukes i ett av tre områder:
  - *Avstengt* («Cut-off»)
  - *Lineær* («Linear»)
  - *Metning* («Saturation»)
- I et fjerde område kalt *breakdown* kan transistoren ødelegges pga høye strømmer

# Sammenheng strøm-spenning

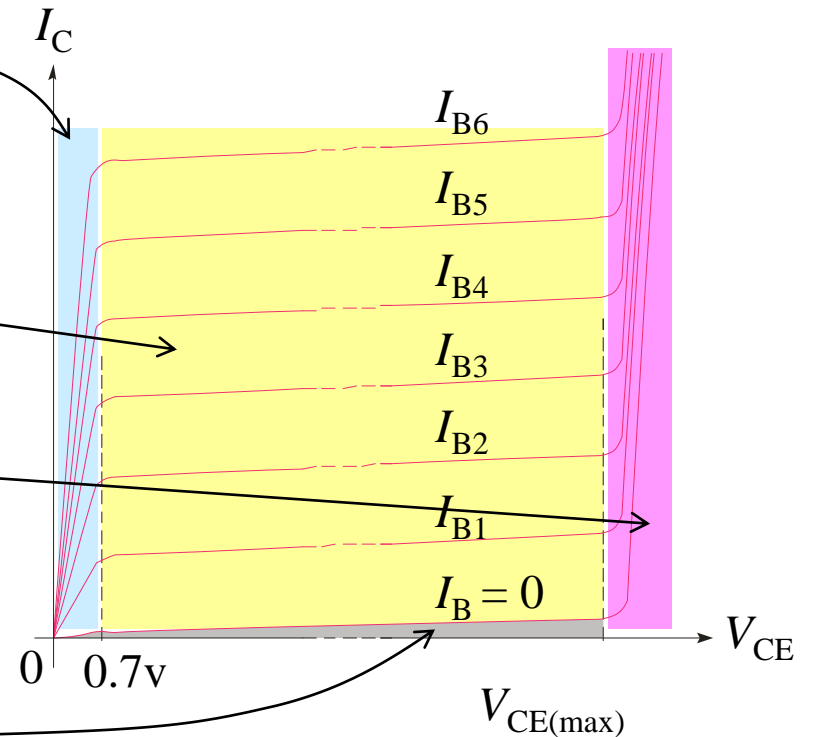
- En transistor har mange I-V karakteristikker
- Den mest relevante er hvordan  $I_C$  varierer som funksjon av  $V_{CE}$  og  $I_B$ 
  - $V_{BE}$  må være  $> 0.7$  v for at  $I_B > 0$

- **Metning:** Liten økning i  $V_{CE}$  gir stor økning i  $I_C$

- **Lineær:**  $I_C$  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



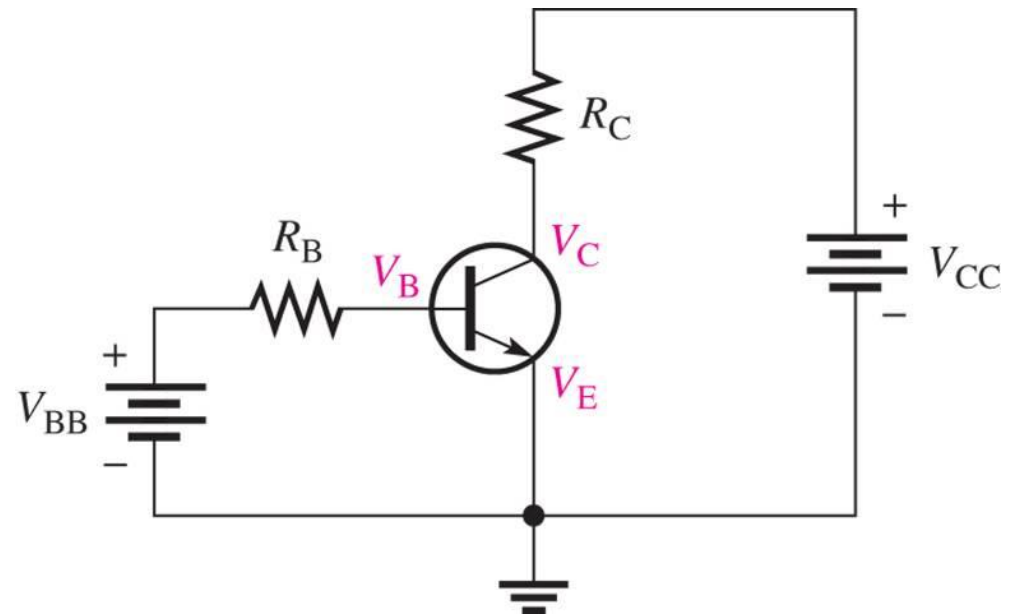
# Spenninger i bipolare transistorer

- For en BJT som er i ett av de tre tillatte operasjonsområde, er spenningene gitt av

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

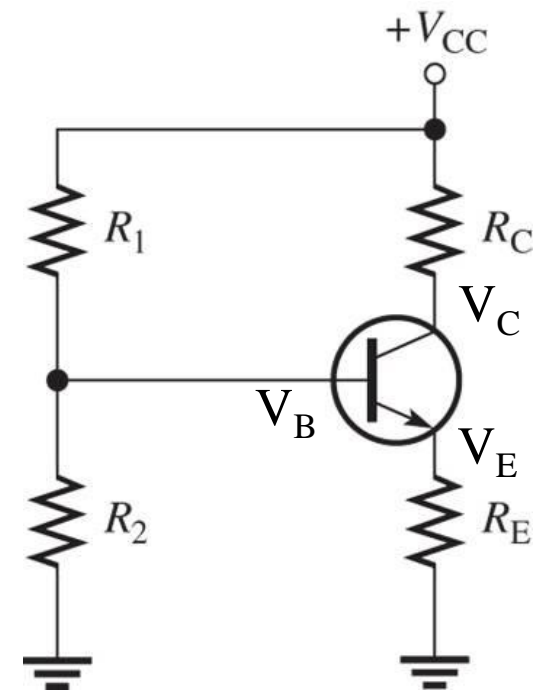
$$V_B = V_E + V_{BE}$$

- $R_B$  og  $R_C$  begrenser  $I_B$  og  $I_C$  slik at transistoren ikke ødelegges
- Inngangsmotstanden  $R_{in}$  på basen er høy og tilnærmet lik  $R_{in} = \beta * R_E$



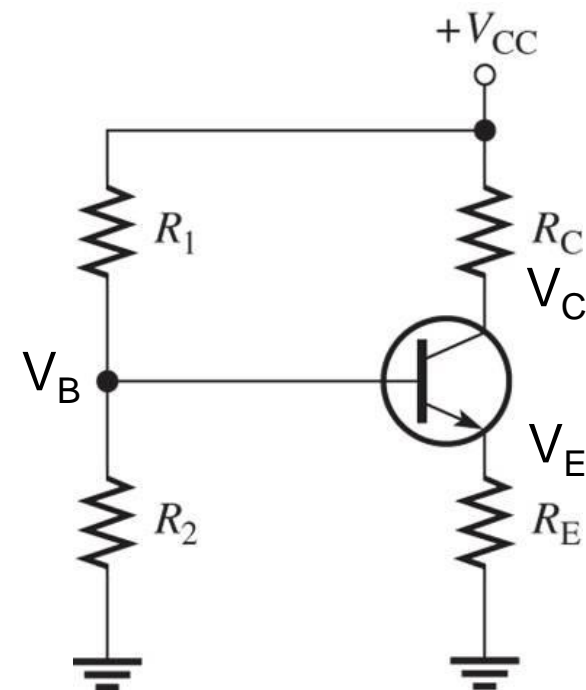
## Spenninger i bipolare transistorer (forts)

- For at en BJT skal forsterke strøm, må  $V_B$ ,  $V_C$  og  $V_E$  ligge innenfor bestemte intervaller
- Spenningsdeleren  $R_1 - R_2$  gjør at  $V_B$  har ønsket nivå
- $R_C$  og  $R_E$  sammen med den indre motstanden  $R_{CE}$  sikrer at  $V_C$  og  $V_E$  ligger innenfor ønsket spenningsintervall og at  $I_C$  og  $I_E$  begrenses
- $V_{CC}$  og motstandene må velges slik at transistoren er i ønsket operasjonsområde



# Oppgave

- Gitt kretsen til høyre med følgende verdier:  $R_1=22\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=1\text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC}=30\text{v}$ ,  $\beta=200$  og  $V_{BE}=0.7\text{v}$ 
  - Spm-1: Finn  $V_B$
  - Spm-2: Finn  $V_E$
  - Spm-3: Finn  $I_E$
  - Spm-4: Finn  $I_C$
  - Spm-5: Finn  $I_B$
  - Spm-6: Finn  $V_C$
  - Spm-7: Finn  $V_{CE}$
  - Spm-8: I hvilke to regioner opererer denne transistoren **ikke**?
  - Spm-9: I hvilken region opererer den hvis vi forutsetter at den ikke ødelegges?

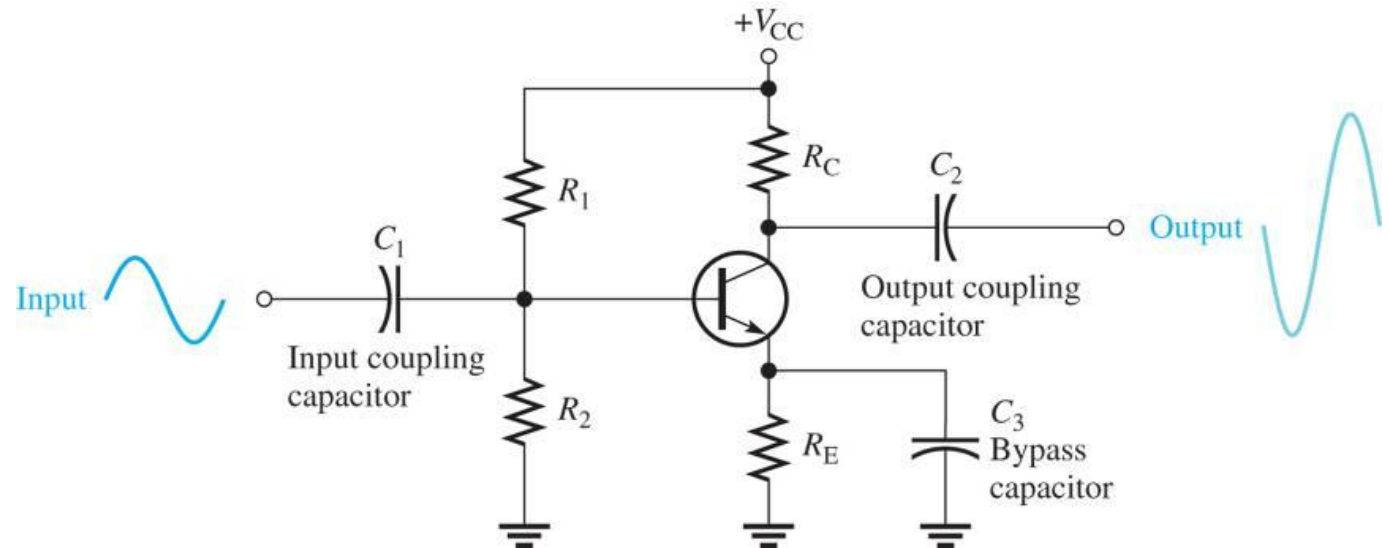


# Felles emitter-forsterker

- Felles emitter-forsterkeren er en forsterker med én bipolar transistor
- Transistoren isoleres fra input og output dc-last vha *koblingskondensatorer*
- Spenningsforsterkningen for ac-signaler økes med en *bypass-kondensator*
- Selv om en BJT er en strømstyrt strømforsterker, brukes den her som en spenningsforsterker

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

$r_e$  er den indre motstanden gjennom emitteren

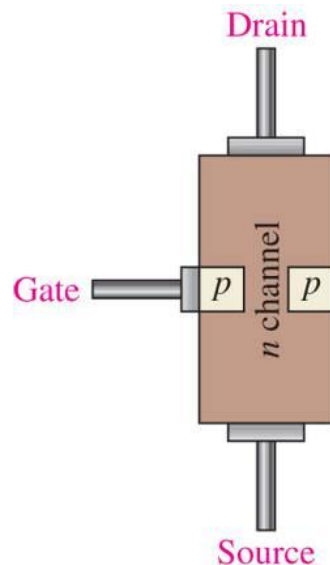


# Felteffekttransistorer (FET)

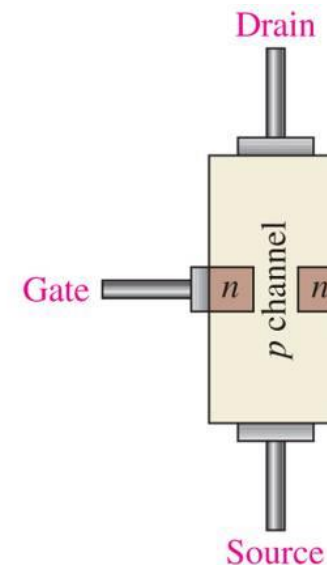
- En FET er en *spenningsstyrt strømbryter*
- De tre terminalene heter
  - Drain (tilsvarer Collector),
  - Gate (tilsvarer Base)
  - Source (tilsvarer Emitter)
- To hovedtyper FET
  - Junction FET (JFET)
  - Metal-Oxide Semiconductor FET (MOSFET)
  - Pluss mange andre typer for spesielle anvendelser
- MOSFET er den vanligste i digitale kretser
- Power-MOSFET brukes til bla å styre motorer (tåler høy effekt)

# JFET

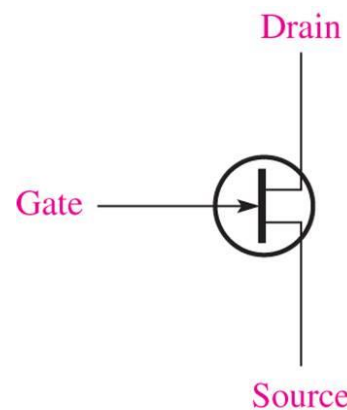
- JFET har en ledende kanal med tilkobling i hver ende og pn-overgang der *Gate* møter kanalen mellom *Drain* og *Source*
- Resistansen i kanalen kontrolleres av spenningen på gaten
- Kanalen er enten av n-type eller p-type, avhengig av hva som er majoritetsbærer i kanalen
  - For **n-type** må gate-spenningen være *høyere* (ca 0.7-3v) enn *source*-spenningen for at transistoren skal lede
  - For **p-type** må gate-spenningen være *lavere* (ca 0.7- 3v) enn *drain*-spenningen for at transistoren skal lede



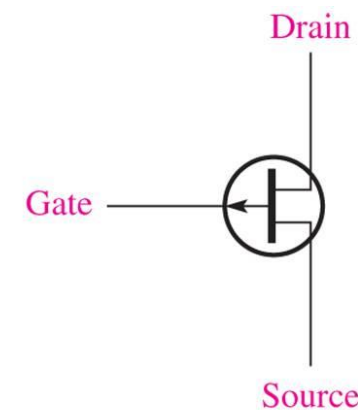
(a) n channel



(b) p channel



(a) n channel



(b) p channel

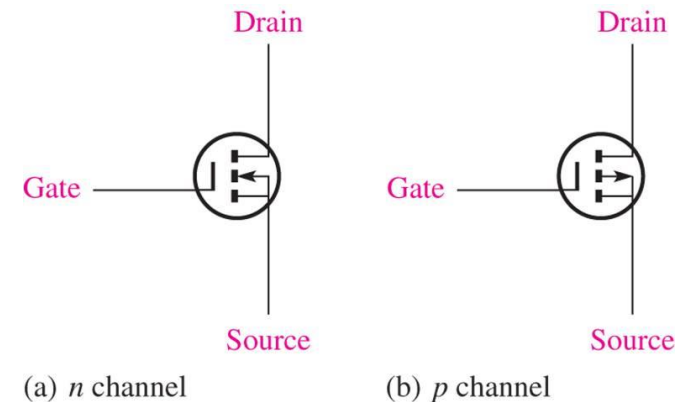
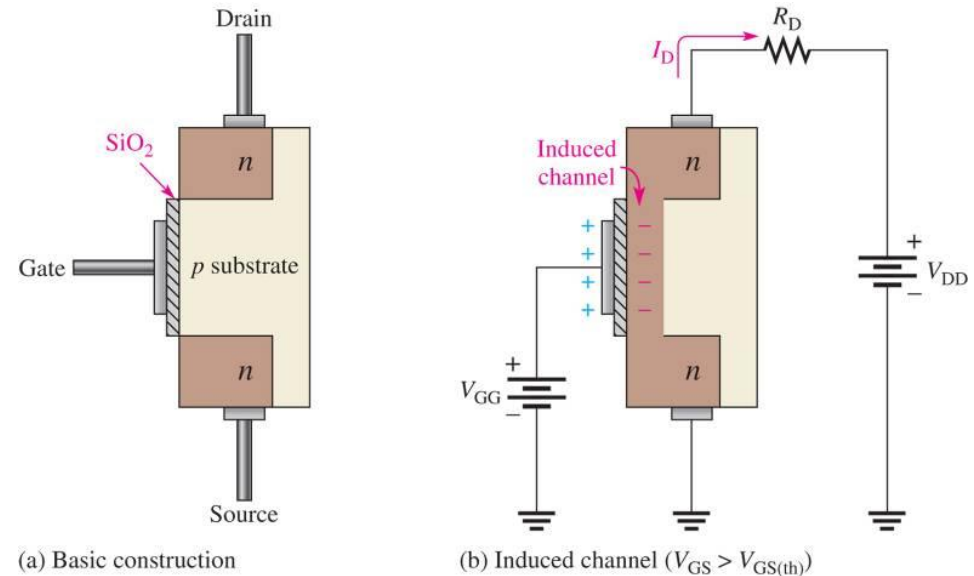


# MOSFET

- En MOSFET har ingen pn-overganger som JFET, BJT eller dioder
- Gatn på en MOSFET er elektrisk isolert fra drain-source vha et tynt lag med silisiumdioksyd
- MOSFET er den aller vanligste transistorer i digitale kretser; den kan også brukes som spenningskontrollert motstand eller som kondensator, i f.eks hukommelsesceller (RAM)
- MOSFET kan lages for å tåle store strømmer/høy effekt og er svært raske

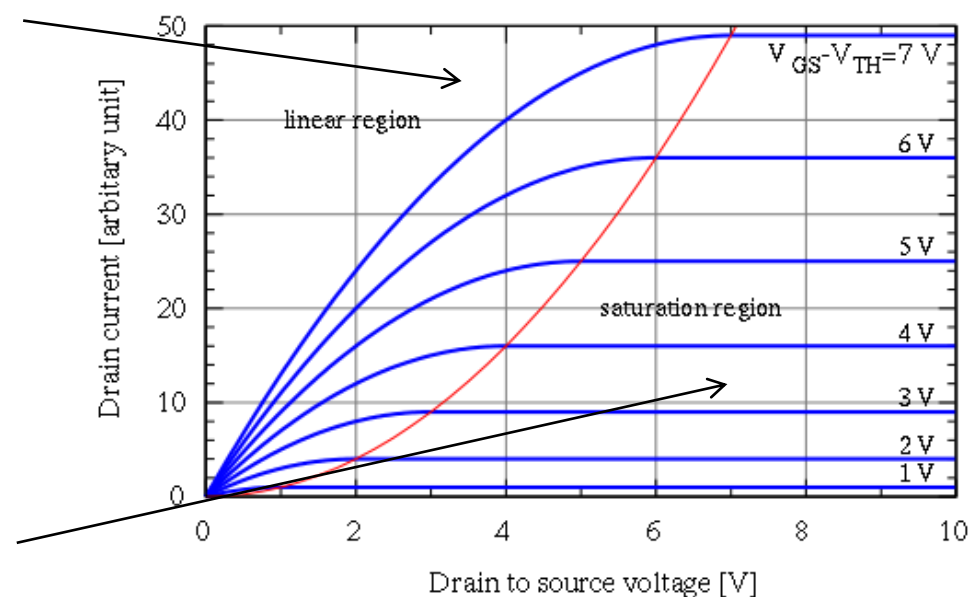
# MOSFET (forts)

- En MOSFET har ingen permanent fysisk kanal som kan lede strøm
- Det dannes en ledende kanal når gate-spenningen er over et visst nivå i forhold til source-spenningen
- Resistansen mellom *drain* og *source* øker eller minker med spenningsforskjellen mellom *gate* og *source*
- Det går svært lite strøm når transistoren er i *cutoff* og at det går nesten ingen strøm gjennom gaten uansett operasjonsområde ( $\sim \text{pA}$ )



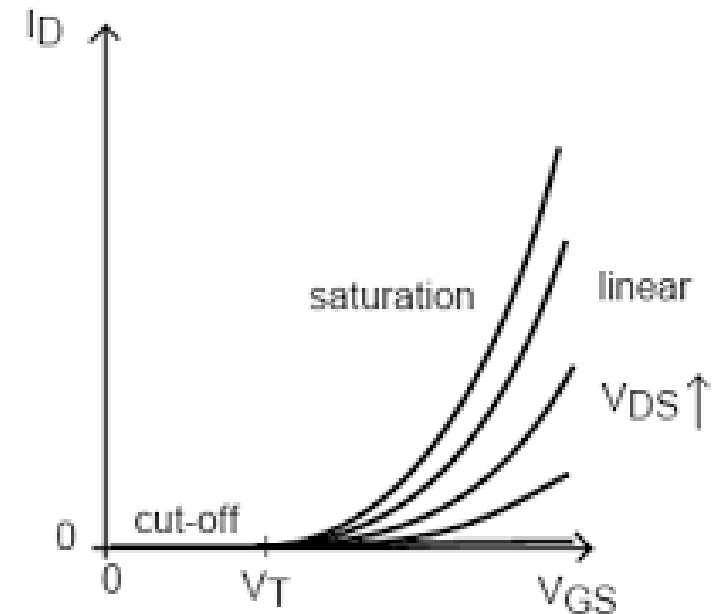
## FET karakteristikk (1)

- I-V karakteristikkene til FET'er har mye til felles med BJT'er
  - Men: begrepene *saturation* og *linear* er byttet om
- I det *lineære* området vil endring i drain-source spenningen  $V_{DS}$  føre til en endring i drain-strømmen  $I_{DS}$  (dvs. fast resistans)
- I metningsområdet vil endring i spenningen  $V_{DS}$  *ikke* føre til en endring i drain-strømmen  $I_{DS}$  (dvs. variabel resistans)



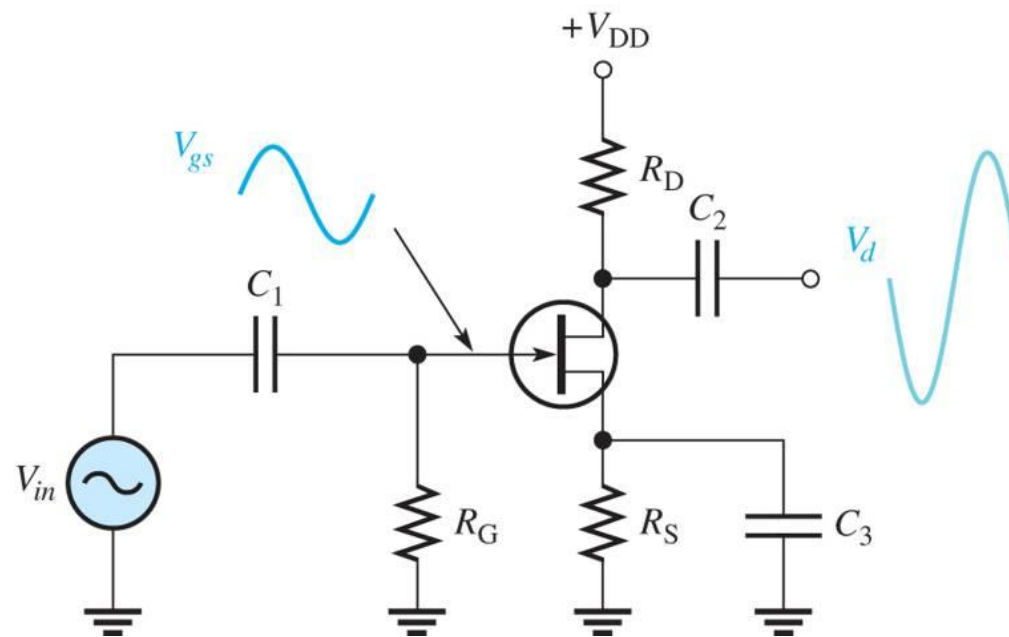
## FET karakteristikk (2)

- $I_{DS}$  bestemmes av  $V_{GS}$  forutsatt tilstrekkelig høy  $V_{DD}$
- Hvis  $V_{GS}$  er lavere enn terskelspenningen  $V_T$  vil transistoren ha meget høy motstand og det vil ikke gå noe strøm  $I_{DS}$



# FET basert forsterker

- FET-baserte forsterkere er spenningsstyrte og har verken så stor forsterkning eller er så lineære som BJT-forsterkere
- Den største fordelen med FET-forsterkere er høy inngangs-impedans
- Input-resistansen er avhenger av bias-motstanden( $e$ )
- $R_G$  er høyere enn for BJT-forsterkere siden det nesten ikke går strøm inn gjennom gaten

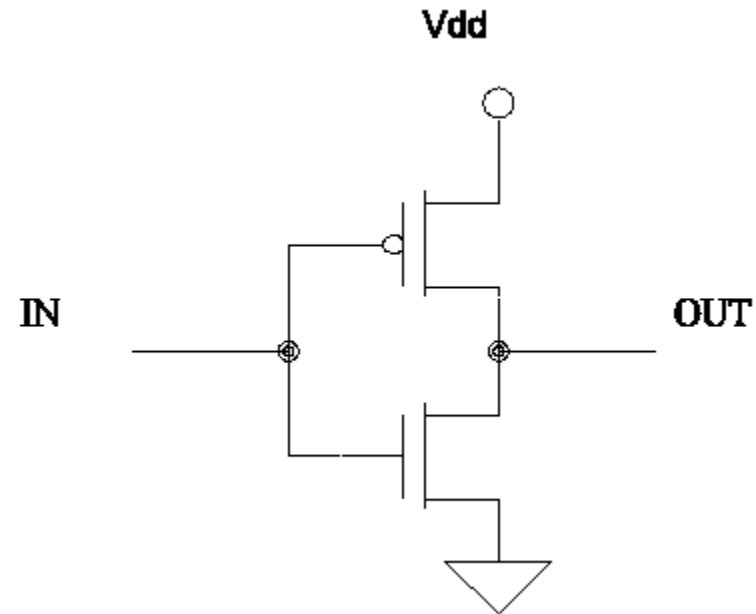


# Power MOSFET

- I digitale kretser er det ikke behov for mye strøm mellom drain og source
  - Vi ønsker at det skal gå så lite som mulig for å redusere strømforbruk/effektforbruk og dermed behov for kjøling
  - Blir  $I_{ds}$  for stor vil transistoren bli ødelagt
- Ønsker man å styre (slå av/på) store strømmer (mange ampère) i f.eks motorstyringer, brukers power MOSFET
- Disse er konstruert for å tåle store strømmer uten å bli ødelagt

# CMOS

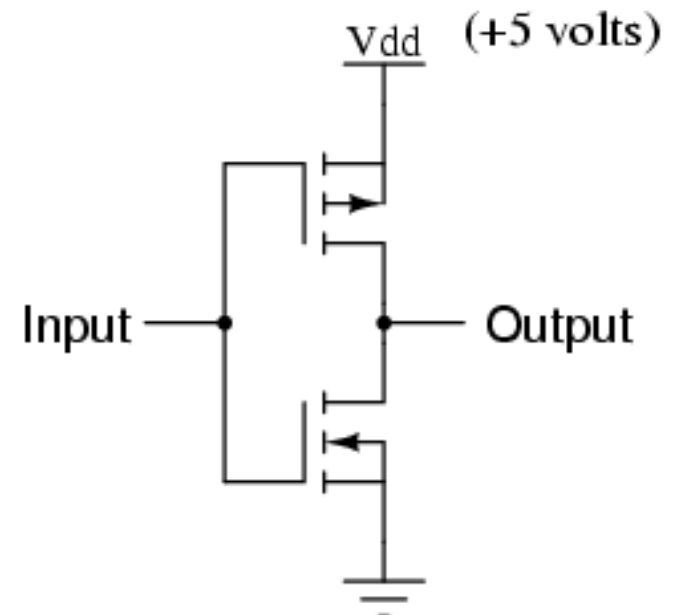
- CMOS er en spesiell type MOSFET hvor man produserer både p- og n-kanaltype på samme krets
- CMOS er svært utbredt i digitale kretser bla fordi man får høy transistortetthet kombinert med lavt effektforbruk, og fordi man kan lage noe nær ideelle svitsjer
  - Bruker kun strøm når de åpner/lukker, men ikke ellers



# Digitale porter: inverter

- En inverter tar som input et signal som enten er lavt (0v) eller høyt (5v) og produserer et utsignal som er det inverterte av innsignalet

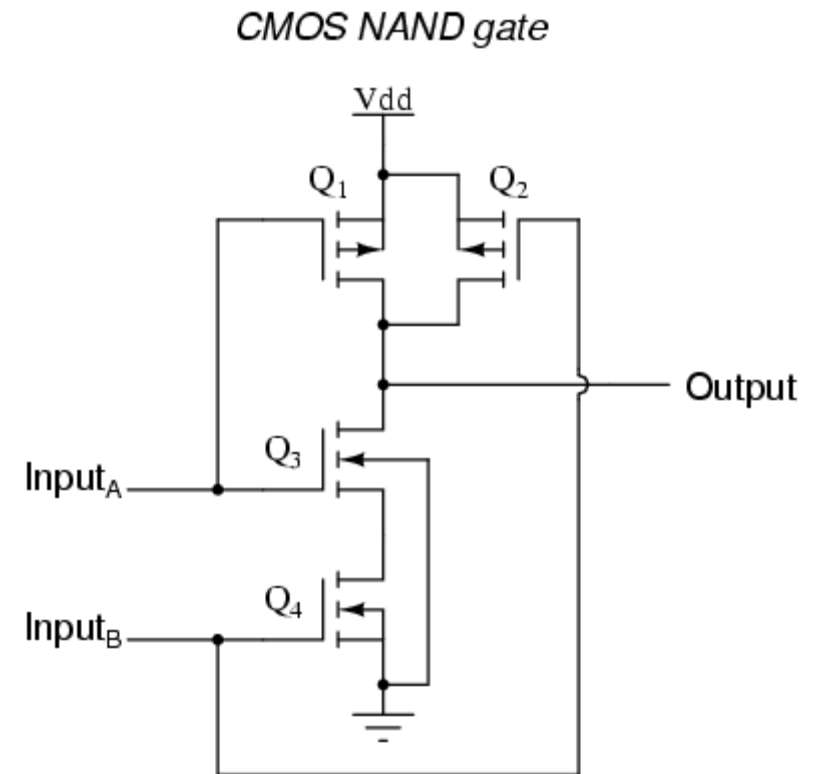
*Inverter circuit using IGFETs*





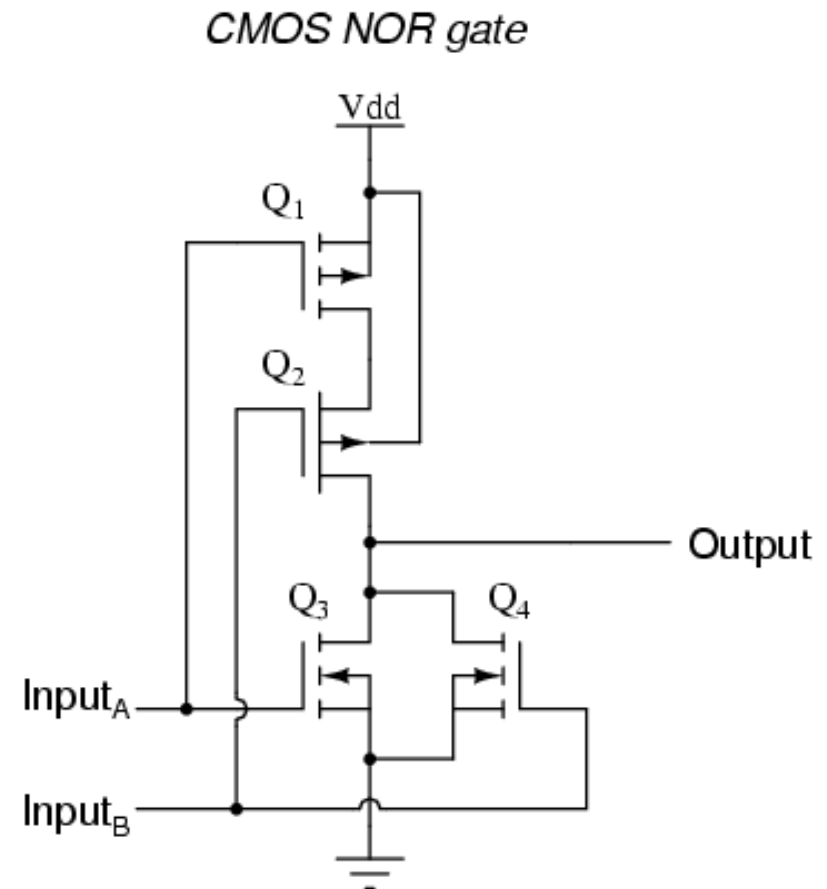
# Digitale porter: NAND-port

- En NAND-port utfører en logisk NAND-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalnivåer)



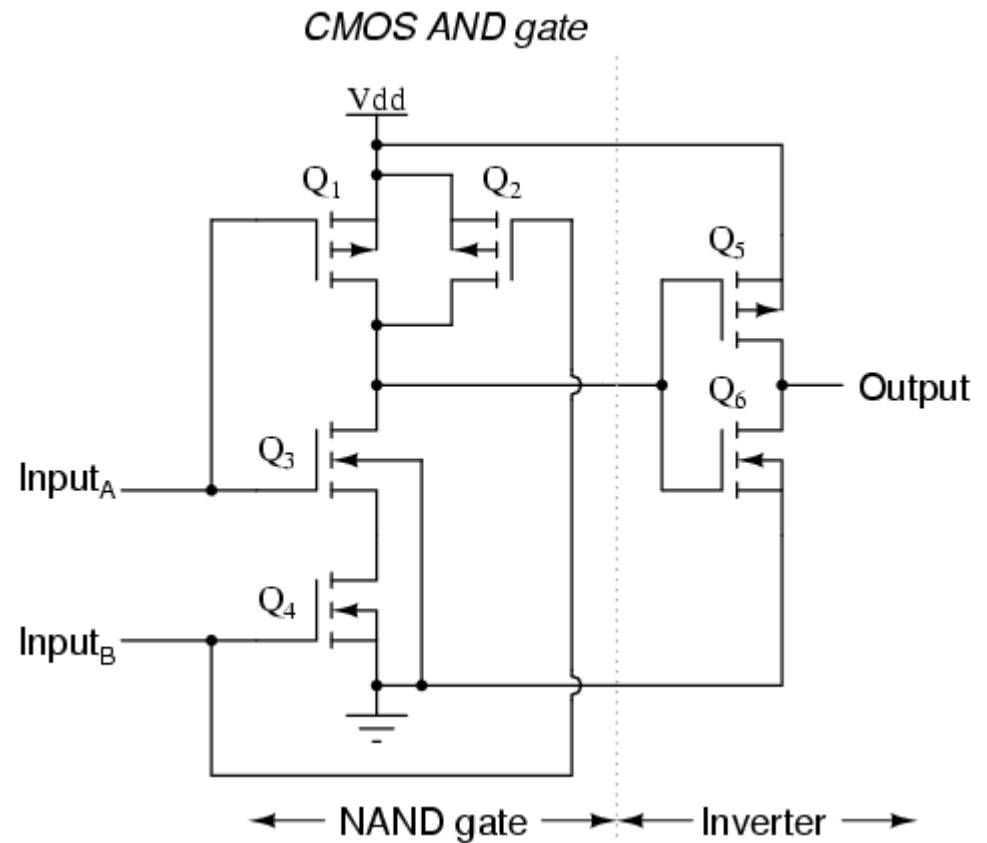
# Digitale porter: NOR-port

- En NOR-port utfører en logisk NOR-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalnivåer)



# Digitale porter: AND-port

- En AND-port konstrueres vha en NAND-port og en inverter



# Digitale porter: OR-port

- En OR-port konstrueres vha en NOR-port og en inverter

