

Institutt for informatikk

IN 1080

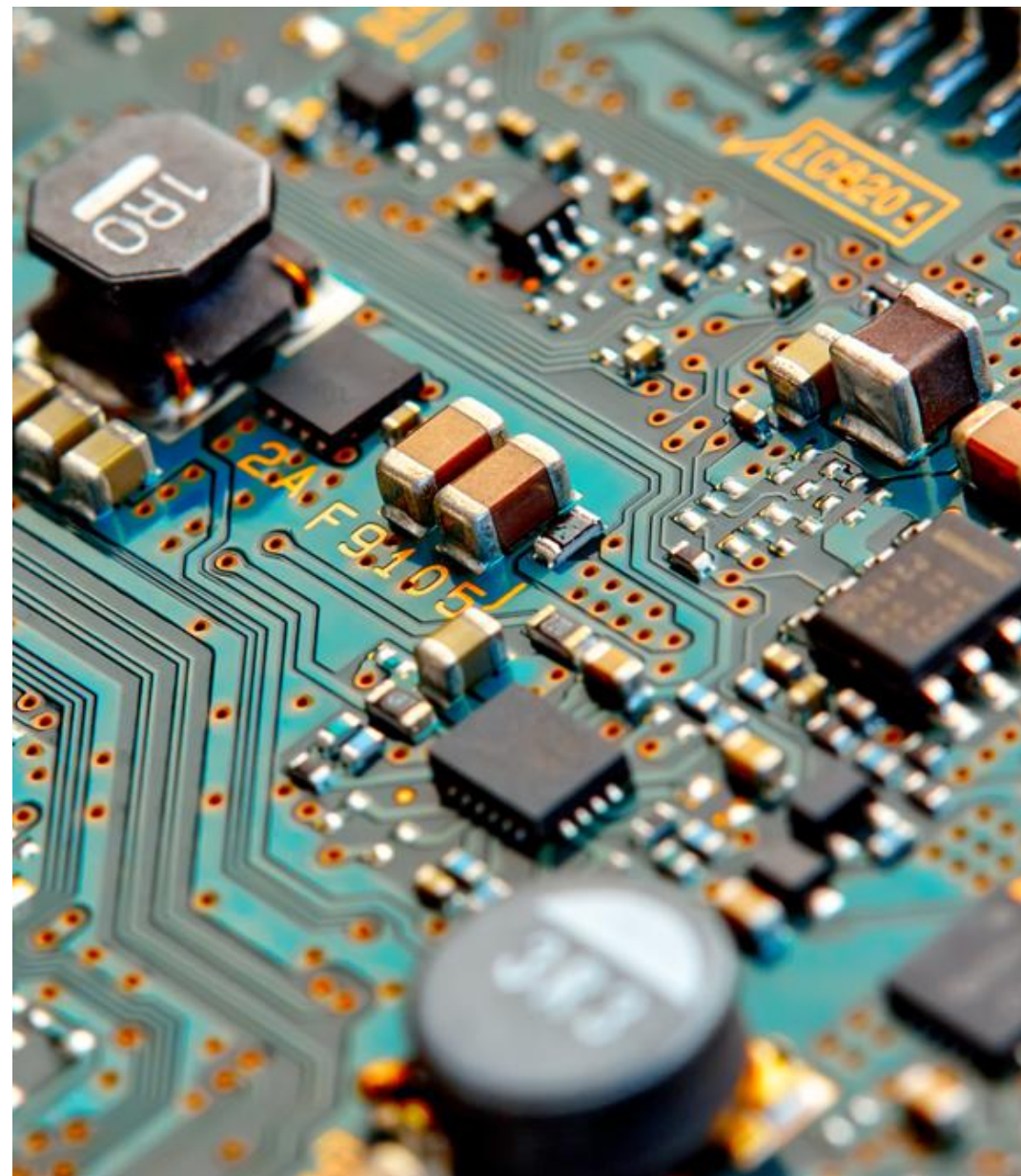
Mekatronikk

Del 1: Analog elektronikk

Forelesning 5



UNIVERSITETET
I OSLO



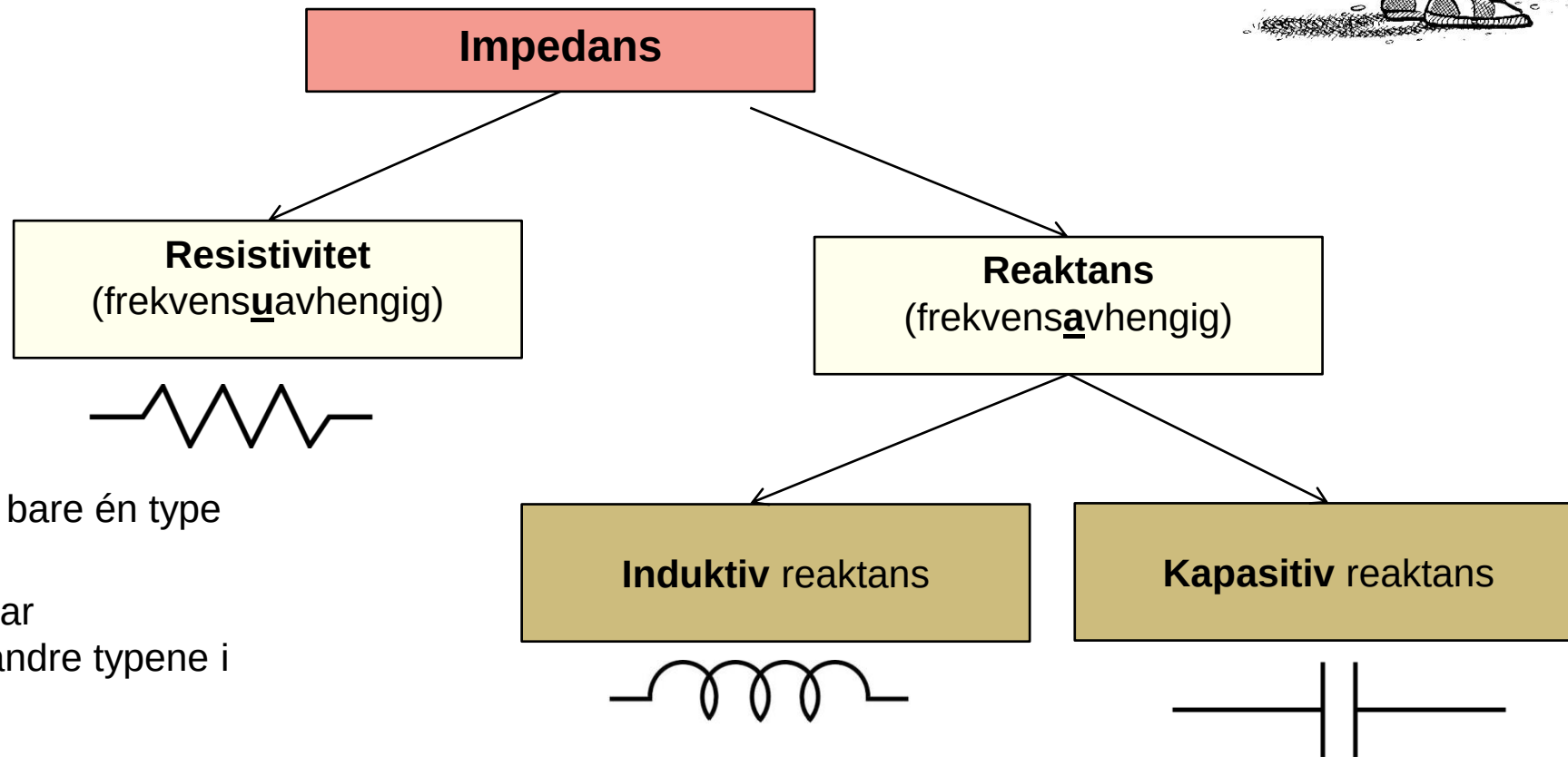
Om dagens forelesning

- Temaer i denne forelesningen er
 - Oppsummering terminologi på impedans og konduktans
 - Wheatstonebroer – design og bruk
 - Grunnleggende virkemåte halvledere og dioder
 - Bruk av dioder
 - Ulike typer dioder
 - Diodekretser - eksempler



Ulike typer impedans

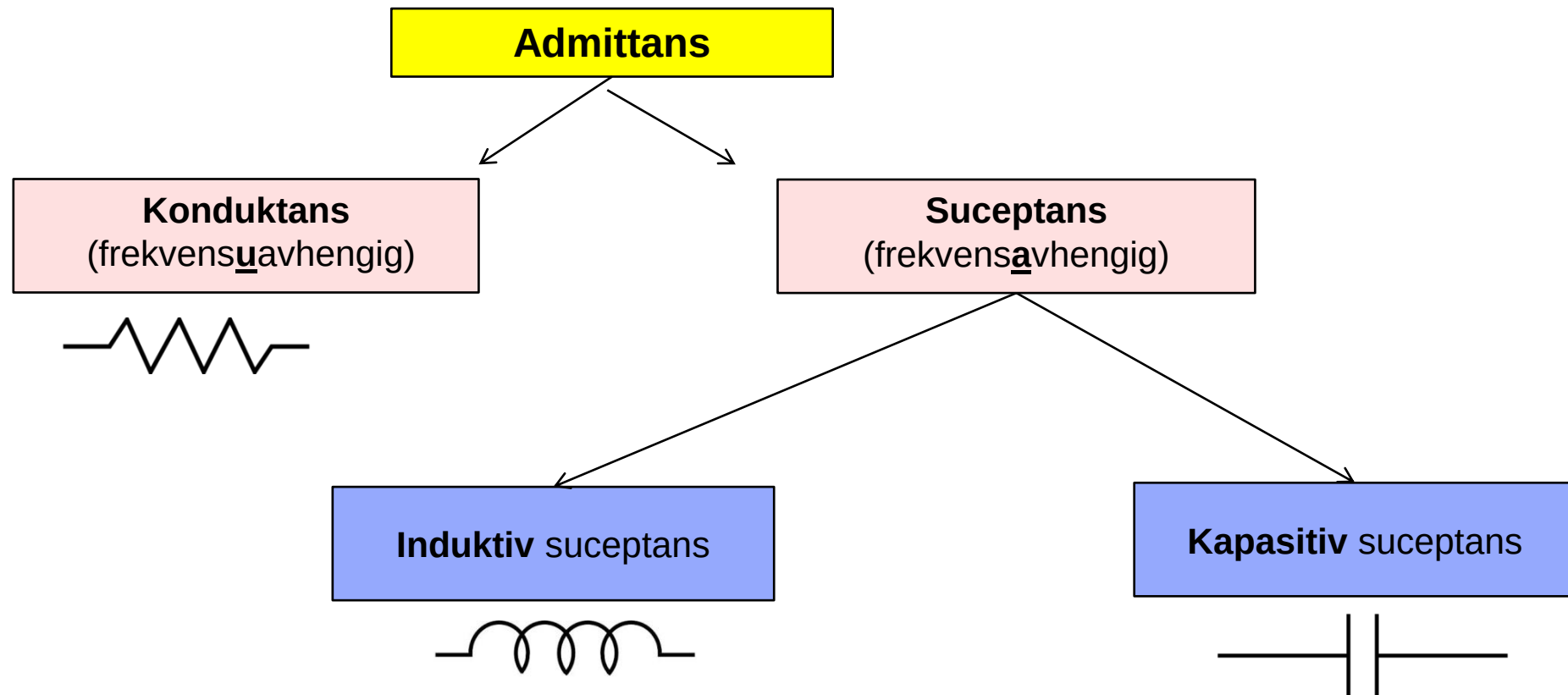
- *Impedans* er forholdet mellom spenning og strøm, dvs V/I



- *Idelle* komponenter har bare én type impedans
- *Fysiske* komponenter har parastitteffekter av de andre typene i tillegg

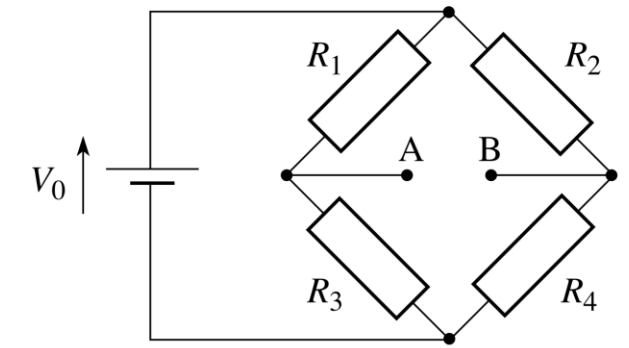
Ulike typer admittans

- Forholdet mellom strøm og spenning (I/V) kalles *admittans*, og er det inverse av impedans.
- Mens *impedans* kan ses på som motstand mot strøm, er *admittans* ledningsevne
 - Jo høyere impedans desto lavere admittans – og omvendt

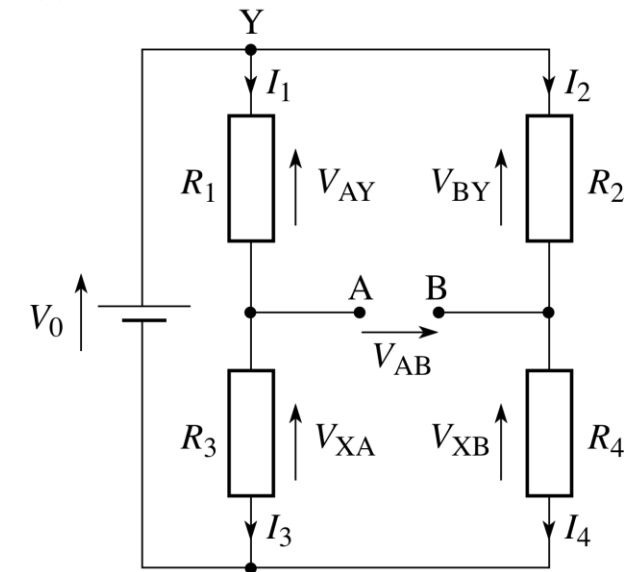


Wheatstone-bro

- **Oppgave:** Vi ønsker å måle en resistors ohm-verdi med stor nøyaktighet
- **Utfordring:** Vi må kunne måle både strøm og spenning med stor nøyaktig
- **Løsning:** Wheatstone-broen, en seriell-parallell krets som består av fire motstander hvorav den ene har ukjent resistans
- Wheatstone-broen «avleser» den ukjente resistansen som en spenning med høy presisjon
- En variant av Wheatstone-broen brukes i likeretter-kretser for å omdanne en ac-spenning til en dc-spenning



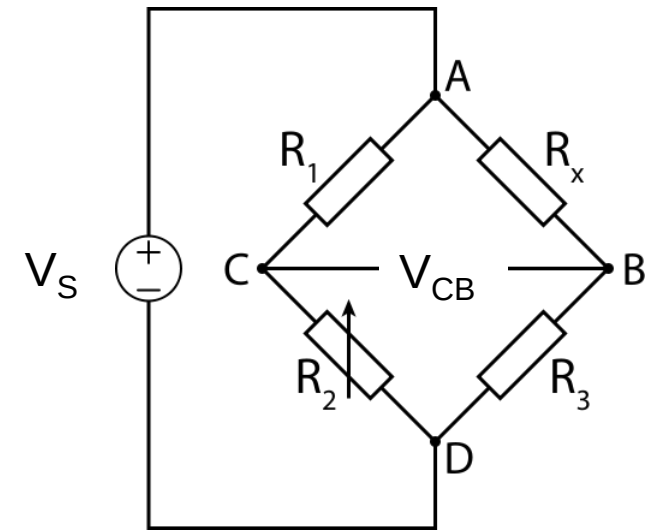
(a)



(b)

Wheatstone-bro (forts)

- Wheatstone-broen består av fire resistorer hvor to og to er koblet i serie som deretter er koblet i parallell
- Tre av resistorverdiene må være kjente
- En av de kjente resistorene kan være regulerbar
- Hvis spenningen $V_{CB} = 0$ volt er broen *balansert*
- Hvis $V_{CB} \neq 0$ volt er broen *ubalansert*
- Analyserer sammenhengene mellom V_S , V_{CB} , R_1 , R_2 , R_3 og R_x for hvert av de to tilfellene
 - Den ukjente resistoren R_x kan stå hvor som helst i kretsen, men formlene må ta hensyn plasseringen

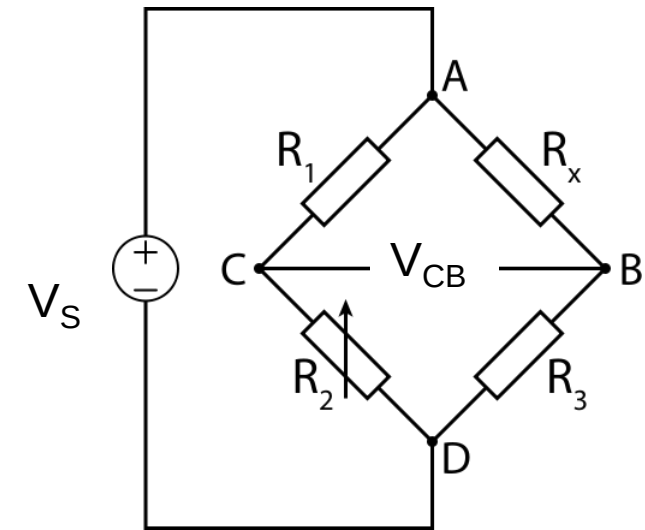


Balansert Wheatstone-bro

- Hvis spenningen $V_{CB} = 0$ volt, er spenningsfallet V_1 over R_1 og V_x over R_x like store, dvs $V_1 = V_x$
- Som en konsekvens må $V_2 = V_3$

- Da må også $\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_x}{V_3}$

- Bruker Ohms lov og får $\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_x R_x}{I_3 R_3} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$



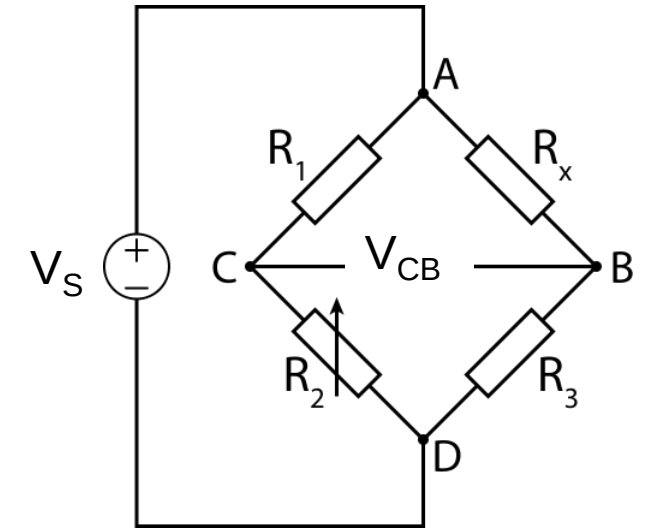
- Ved å variere R_2 (og lese av ohm-verdien) slik at $V_{CB} = 0$ volt, kan R_x utledes *kun* fra de andre motstandsverdiene uten å kjenne strømmene I_1 , I_2 , I_3 og I_4

Ubalansert Wheatstone-bro

- Hvis R_x er en resistor som f.eks varierer med temperatur, vil ikke nødvendigvis $V_{BC} = 0$ volt
- Antar D er virtuell jord og bruker formlene for spenningsdeling:

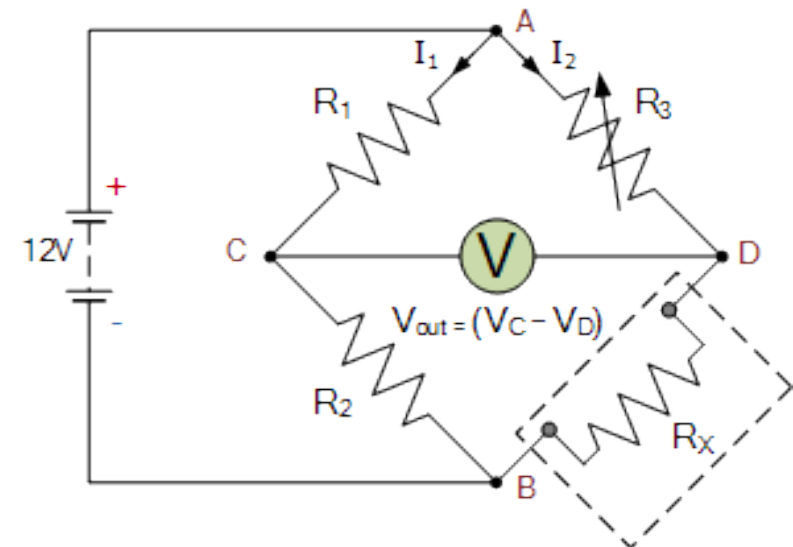
$$V_C = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S \qquad V_B = \frac{R_3}{R_x + R_3} V_S$$

- Dette gir $V_{CB} = V_C - V_B = V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right)$
- Hvis R_1 , R_2 , R_3 og V_S er kjent og V_{CB} kan måles, kan vi beregne R_x
- Hvis R_x er en *sensor* som måler en fysisk parameter (f.eks. temperatur) er vi ikke interessert i den faktiske resistansen, men endringen i V_{CB} fra et kjent referansepunkt



Eksempel: Temperaturmåling

- R_3 er en regulerbar motstand for å sette et referansepunkt/nullstille målekretsen
- R_x er en temperaturavhengig resistor; ved $T_p = 25^\circ$ er $R_x = 1\text{k}\Omega$
 - R_3 settes til $1\text{k}\Omega$ slik at $V_{CD} = 0\text{V}$ (balansert Wheatstone-bro)
 - $R_1 = R_2 = R_3 = 1\text{k}\Omega$
- Ved $T_p = 50^\circ$ er $R_x = 900\ \Omega$. Hva blir at V_{CD} ?
 - $V_C = R_2 / (R_1 + R_2) * 12\text{V} = 1\text{k}\Omega / (1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega) * 12\text{V} = 6\text{V}$
 - $V_D = R_x / (R_x + R_3) * 12\text{V} = 900\Omega / (900\Omega + 1\text{k}\Omega) * 12\text{V} = 5,68\text{V}$
 - $V_{CD} = V_C - V_D = 6\text{V} - 5,68\text{V} = 0,32\text{V}$
- Ved $T_p = 60^\circ$ er $R_x = 850\ \Omega$. Da blir V_{CD}
 - $V_C = R_2 / (R_1 + R_2) * 12\text{V} = 1\text{k}\Omega / (1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega) * 12\text{V} = 6\text{V}$ (dvs uendret)
 - $V_D = R_x / (R_x + R_3) * 12\text{V} = 800\Omega / (800\Omega + 1\text{k}\Omega) * 12\text{V} = 5,33\text{V}$
 - $V_{CD} = V_C - V_D = 6\text{V} - 5,33\text{V} = 0,67\text{V}$

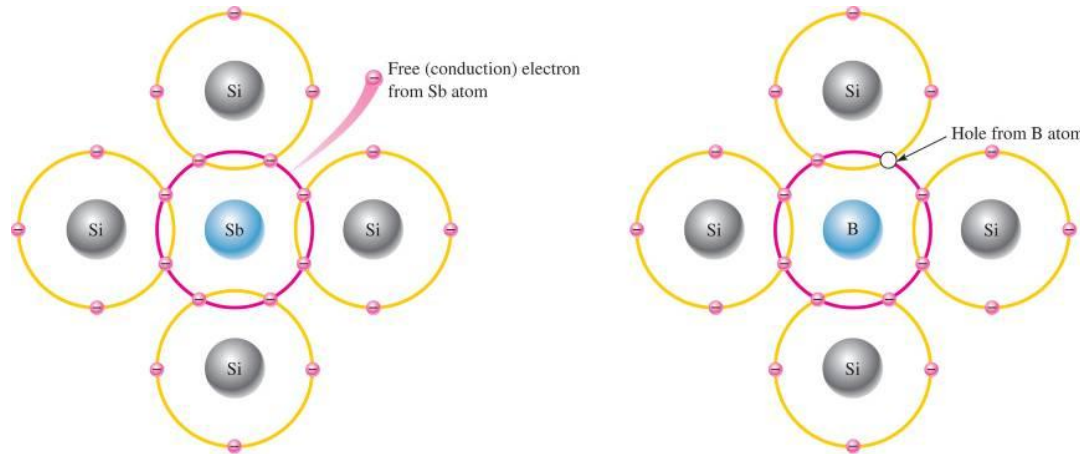


Halvledere

- **Halvledere** er en type materiale som under visse betingelser leder strøm (har lav impedans), og under andre betingelser ikke leder (har høy impedans)
- **Transistorer** er halvledere som kan styres med en strøm eller spenning
 - Impedansen kan økes eller senkes gradvis ved hjelp av en strøm eller spenning
- **Dioder** er halvledere som ikke kan styres
 - Retningen på strømmen avgjør om dioden leder (veldig lav motstand) eller sperrer (veldig høy motstand)

N- og P-type halvledere

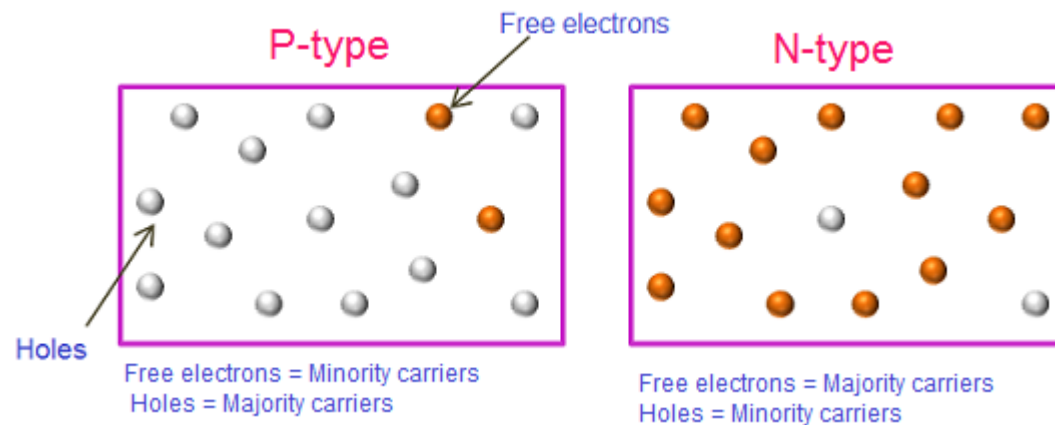
- De fleste halvledere er laget av silisium pluss et annet grunnstoff
- Ren silisium leder strøm dårlig på grunn av få elektroner som kan bevege seg fritt
- Ved å tilsette urenheter (*doping*) bedres ledningsevnen ved at det blir flere frie elektroner eller flere hull (hull = ledig plass til elektroner)
- Doping kan enten være av *n-type* eller *p-type*, avhengig av om man vil øke antall frie elektroner eller antall hull



Sb = Antimon
B = Bor

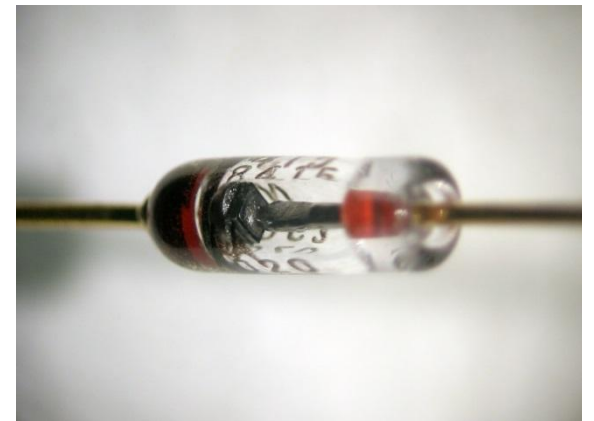
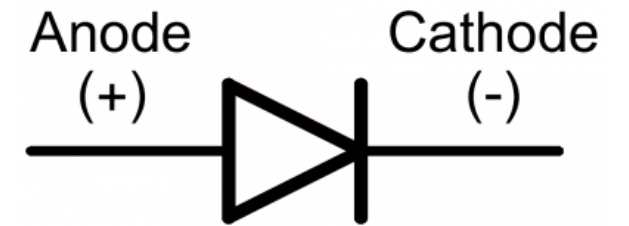
N- og P-type halvledere (forts)

- Hvis det er flere frie elektroner enn hull, er elektronene *majoritets-bærere* i N-type halvledere, og hullene er *minoritetsbærere*
- I P-type halvledere er det flere hull enn elektroner, og hullene er da *majoritetsbærere*, mens elektronene er *minoritetsbærere*

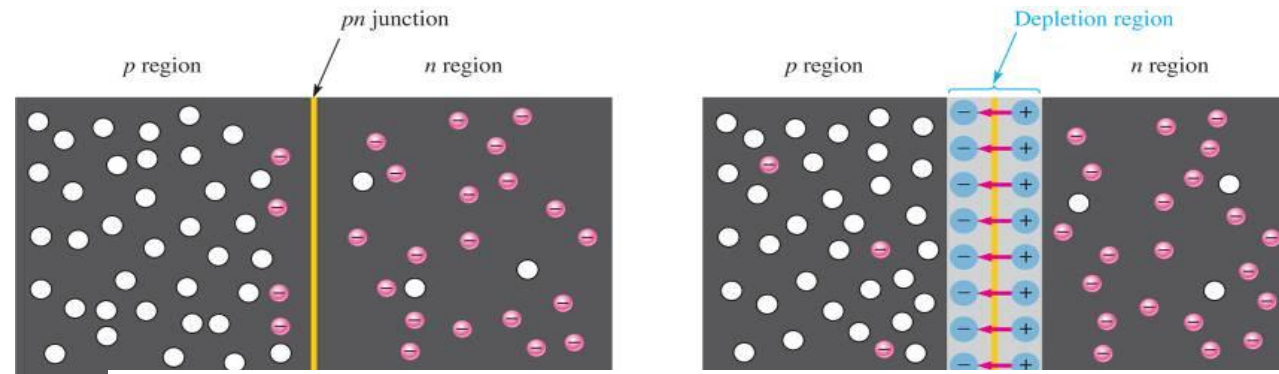


Dioder

- En diode leder strøm i bare én retning
 - «null» motstand for strøm i den ene retningen (i praksis: lav motstand)
 - «uendelig» motstand for strøm i motsatt retning (i praksis: høy motstand)
- En diode består av en *p-type* og *n-type* halvleder festet til hverandre; i snittflaten oppstår det en *pn-overgang*
- Siden det ene området har overskudd av frie elektroner og det andre av hull, vil elektroner i overgangsområdet «vandre» over til siden med overskudd av hull
 - n-siden får et lite overskudd av positiv ladning, mens p-siden får overskudd av negativ ladning
 - Det er ikke slik at alle elektronene hopper over til siden med overskudd av hull, fordi overgangsområdet blir mer positivt etter hvert som elektroner forlater det
 - Kan tenke på det som at elektronene holdes tilbake etter hvert



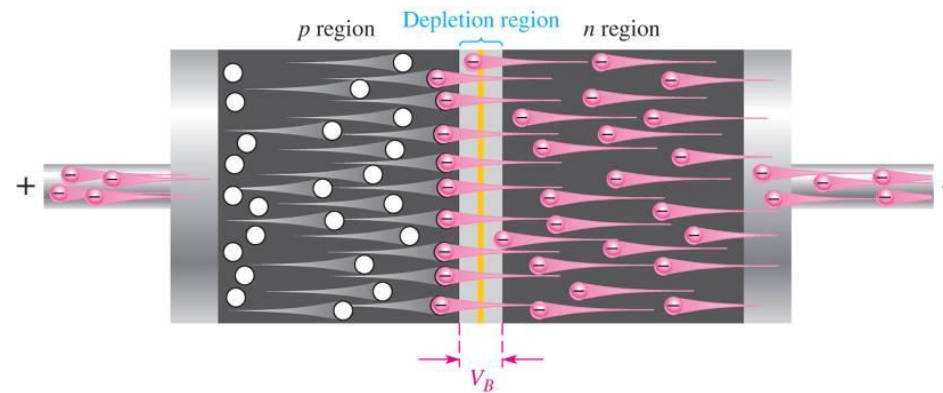
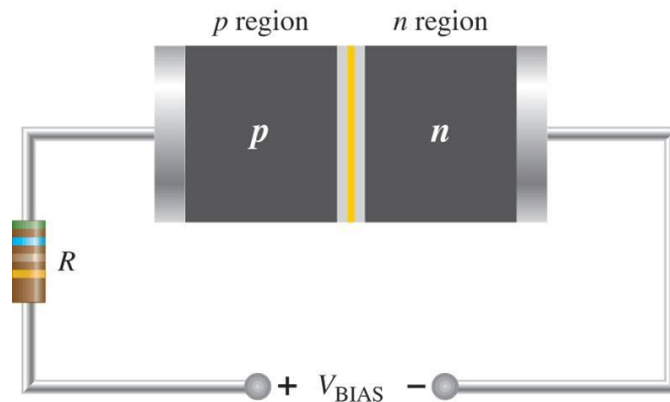
Dioder (forts)



- Området hvor det er opphopning av elektron-hull kalles for et *deplesjonsområde*, som betyr at det er tømt for frie elektroner
- Deplesjonsområdet har en spenningsforskjell (potensial-barriere) på ca. 0.3-0.7 volt, avhengig av dopingmaterialet

Dioder (forts)

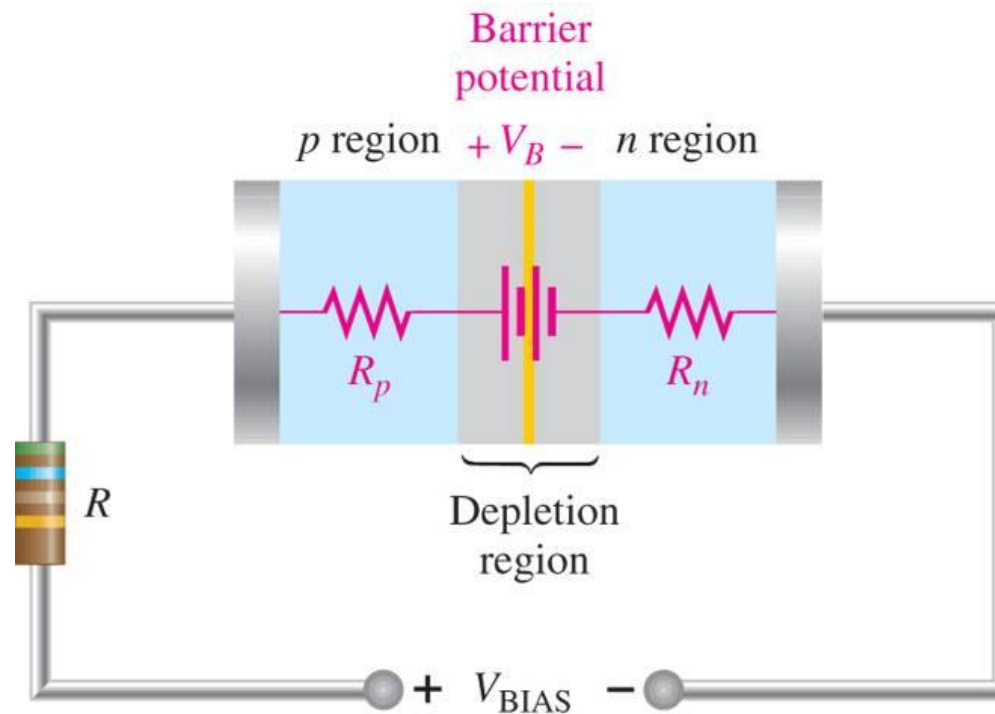
- Avhengig av polariteten til p -regionen i forhold til n -regionen vil dioden enten **lede** eller **sperre** for strøm
 - Dvs dioden får lav eller høy motstand



- Hvis p er mer positiv enn n -regionen (forover-modus), vil dioden lede strøm hvis V_{bias} er større enn potensialbarrieren V_b
 - Sagt litt enklere: dioden leder strøm hvis spenningsforskjellen mellom anode og katode $> V_b$

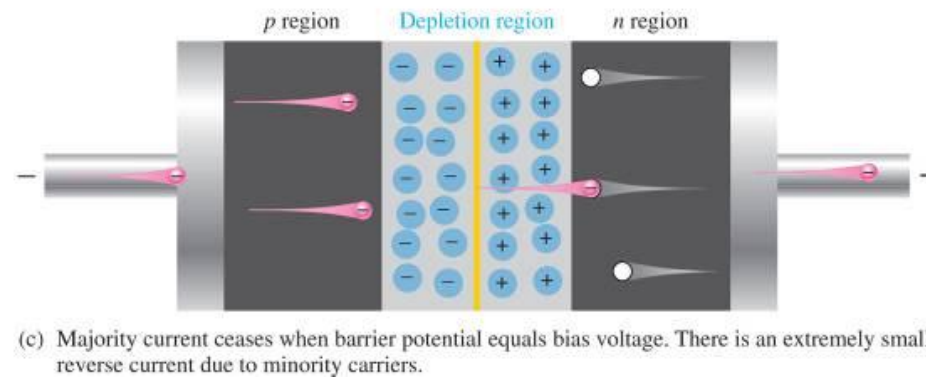
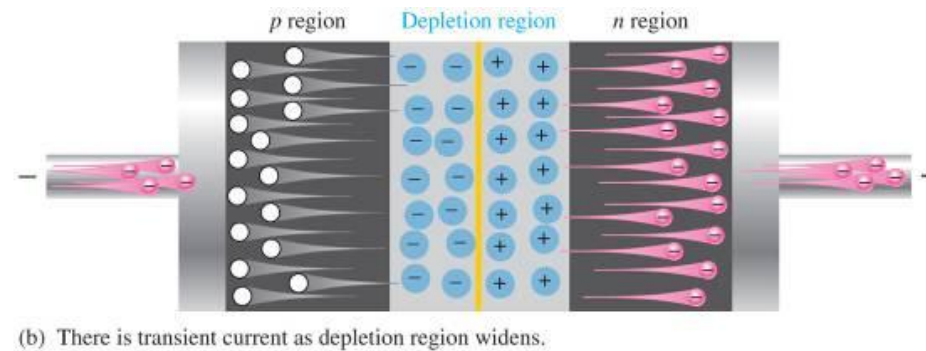
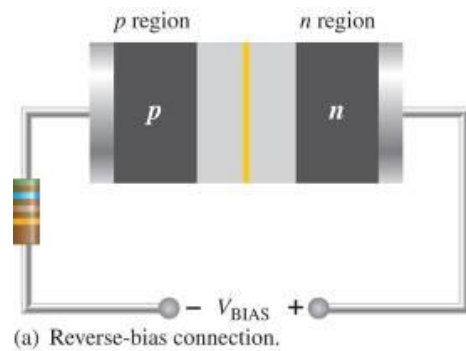
Diodes i forovermodus (dioden leder)

- Når dioden opererer i forover-modus, kan den modelleres som to motstander i serie med et batteri



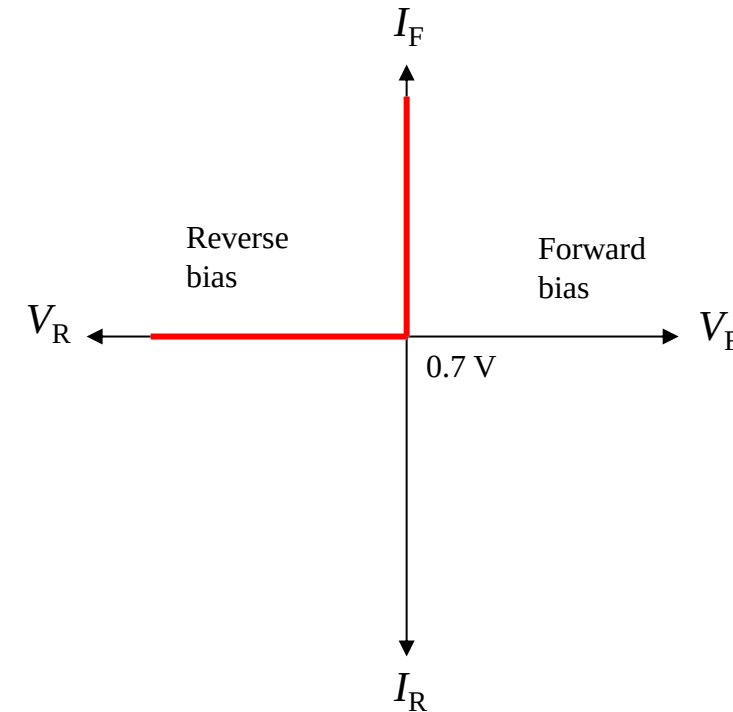
Diode i reversmodus (dioden sperrer)

- Hvis p-regionen er mer negativ enn n-regionen, vil dioden være sperret («reverse bias»)

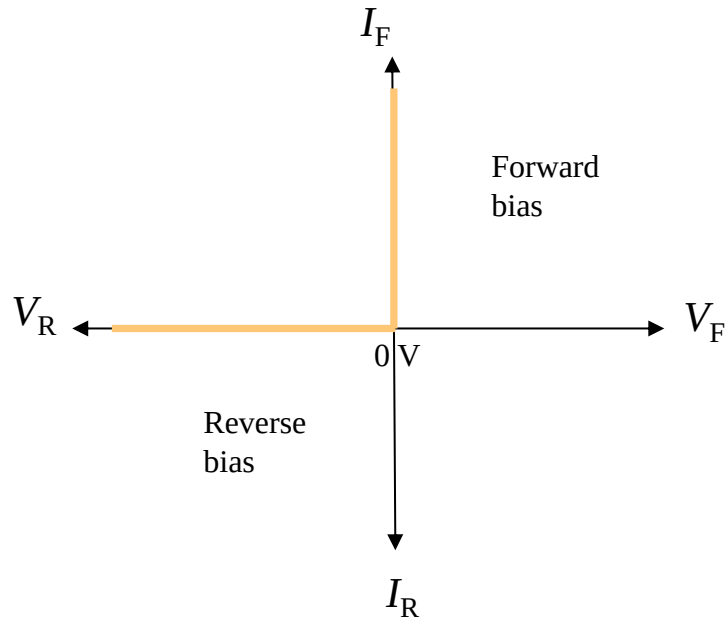


Teoretiske diodemodeller (1)

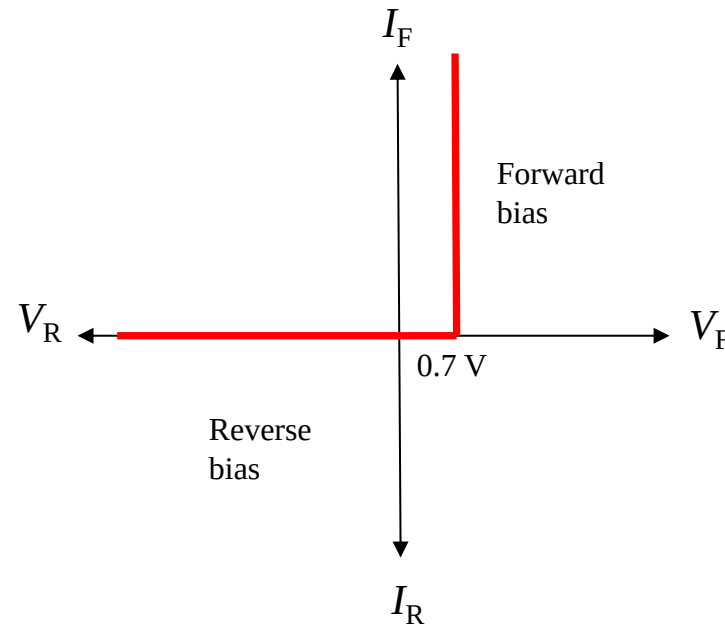
- For å forstå og bruke dioder er det enklest å se på sammenhengen mellom strømmen gjennom og spenningen over den, dvs. I-V karakteristikken
- I-V karakteristikken til høyre viser hvordan strømmen gjennom dioden varierer med spenningen.
- Strøm- og spenningsretningene har fått egne navn som sier om dioden leder eller sperrer
- I_F = strømmen når dioder leder, dvs strømmen i foroverretningen
- I_B = strømmen i reversretningen, dvs. når dioden sperrer
- Denne modellen er for enkel for praktisk bruk
 - Vi trenger modeller med bedre tilpasning til faktisk oppførsel



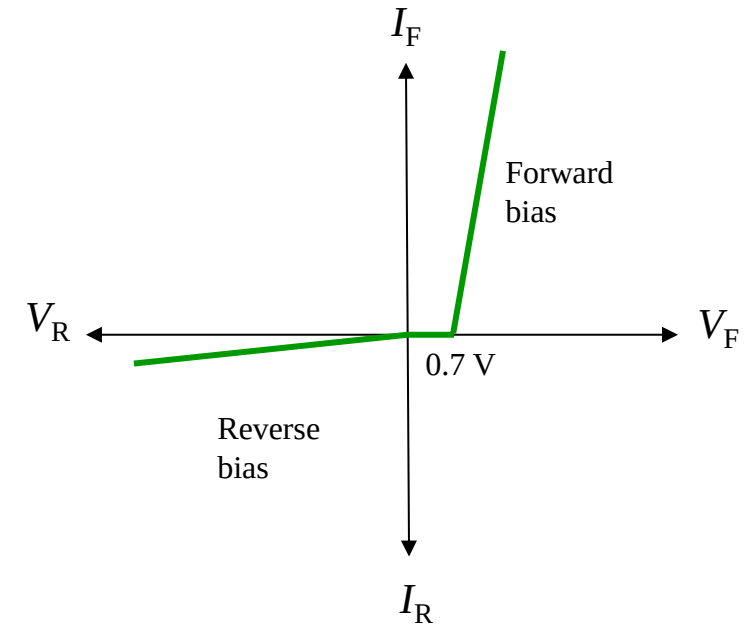
Teoretiske diodemodeller (2)



Enklest: dioden er en bryter som slår av/på ved 0 volt. Null motstand i foroverretningen og uendelig stor motstand i reversretningen



Mer realistisk: Dioden begynner å lede når foroverspenningen er større enn 0.7v, null motstand i foroverretningen og uendelig stor motstand i reversretningen



Enda mer realistisk: Dioden leder når foroverspenningen er større enn 0.7v, det går litt strøm i reversretningen og det er motstand også i foroverretningen

Sammenbrudd

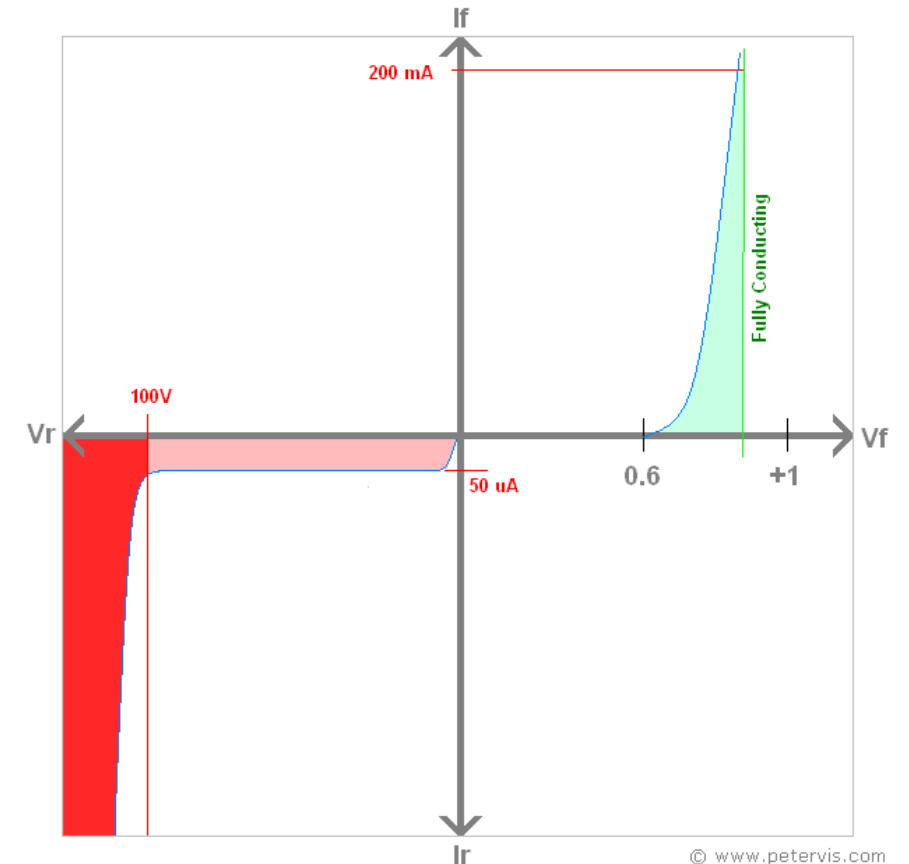


- Hvis dioden opererer i revers (sperre)-modus og spenningen faller til et visst nivå (dvs blir spenningen blir mer og mer negativ), vil en vanlig diode til slutt bryte sammen og bli ødelagt
- Dioden vil da lede strøm i begge retninger (eller den brenner opp og slutter å lede strøm i noen retning)
- Mens vanlige dioder blir permanent ødelagt av å gå forbi breakdown-spenningen, tåler Zenerdioder å «bryte sammen» og sperrer på nytt når spenningen blir mer positiv enn breakdown-spenningen
 - Også Zenerdioder vil på et eller annet tidspunkt ikke lenger tåle en stor negativ spenning og bryte sammen
- Heller ikke i foroverretningen tåler dioder ubegrenset høye spenninger
- I tillegg har dioder begrensninger på hvor mye strøm de tåler
 - Løses som regel ved å koble dem i serie med en resistor som begrenser strømmen

Fysiske diodekarakteristikker

- Fysiske dioder oppfører seg litt mer komplisert enn de forenklede teoretiske modellene

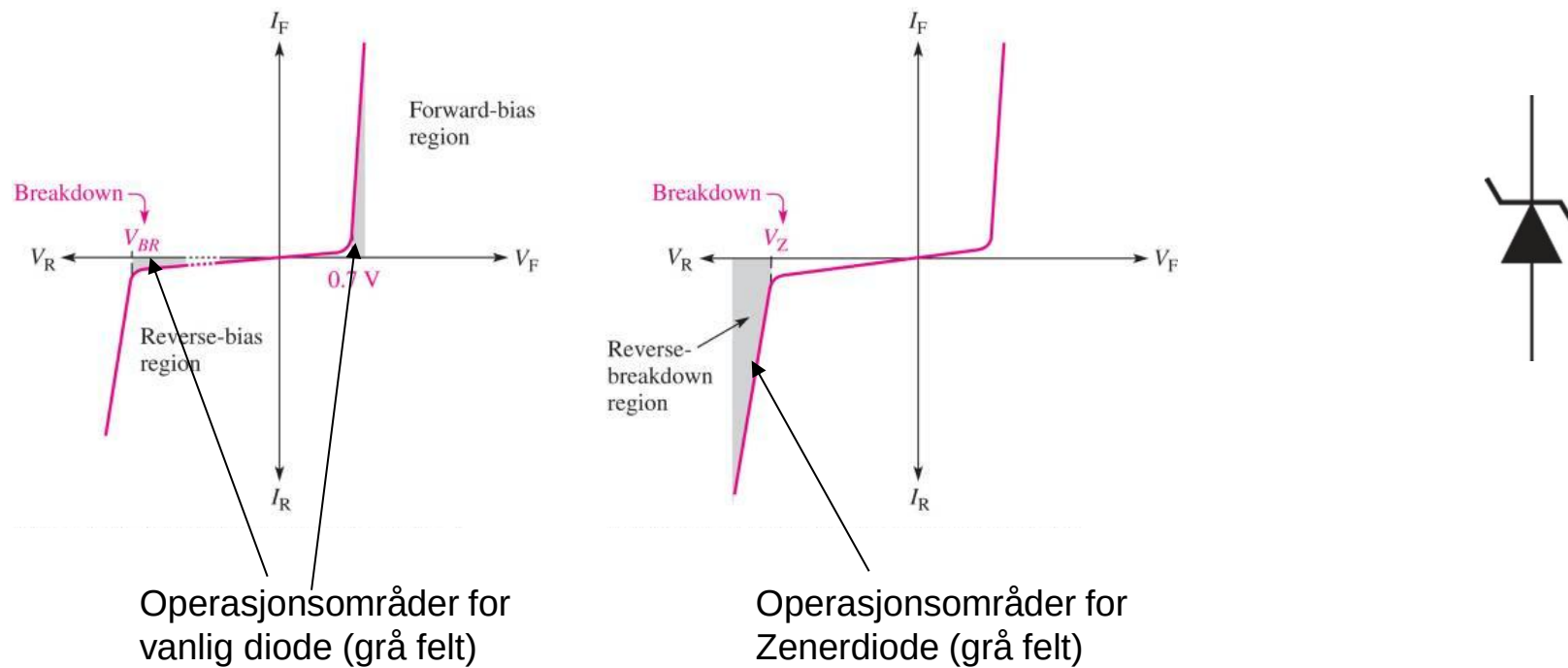
- I forover-retningen begynner ikke strømmen å flyte momentant når spenningen overstiger barrierespenningen V_B
 - Gradvis og eksponentiell økning i strømmen
- I revers-retningen går det litt strøm før V_{BR} nås (størrelsesorden 10^{-6} til 10^{-12} ampere, avhengig av type diode)
- Sammenbrudd skjer gradvis med eksponentiell økning i strømmen innenfor et lite spenningsområde
- $|V_{BR}|$ er typisk mye større enn $|V_B|$



Merk: Områdene er ikke korrekt mhp skala og $V_B = 0.6\text{V}$

Zenerdioder

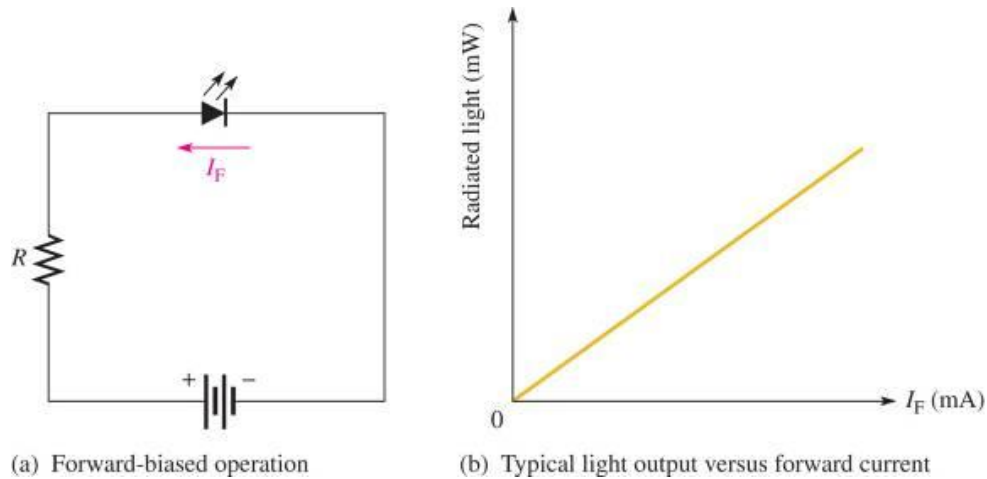
- En Zener-diode tåler høy revers-spenning uten å ødelegges og er konstruert for å jobbe i break-down



- Når Zener-dioden er i «reverse breakdown» har den litt motstand

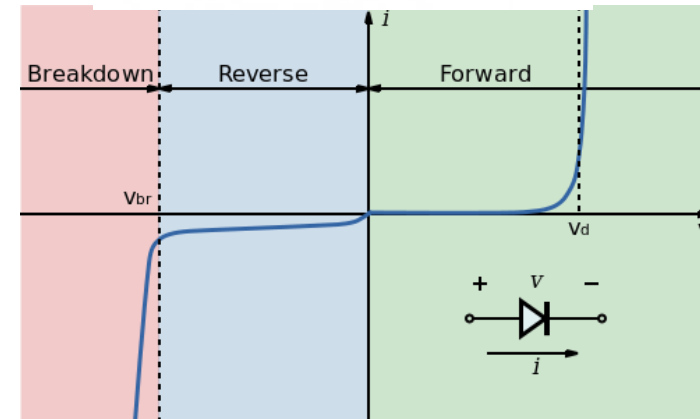
Spesialdioder (forts)

- En lysdiode (Light Emitting Diode, LED) gir fra seg synlig lys når den opererer i forover-retningen
- Avhengig av halvledermaterialet og doping kan man produsere lysdioder i mange ulike farger



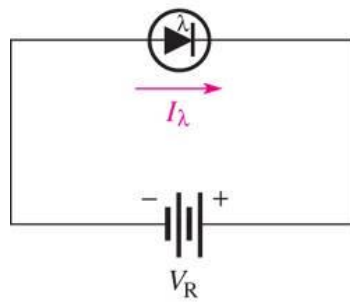
LED begynner å lyse når spenningen over den er $> V_d$

V_B (kalt V_d for LED), typisk $> 2V$

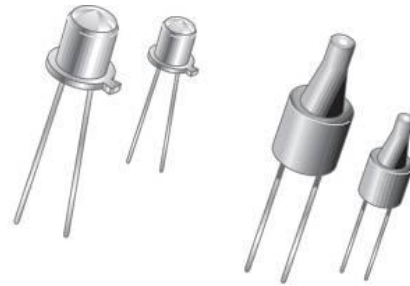


Fotodioder

- En fotodiode gjør det «motsatte» av en lysdiode: den begynner å lede strøm når det kommer lys på den
- En fotodiode opererer i revers-modus og vil lede en strøm som er proporsjonal med lyset som treffer den
 - Lyset tilfører energi som øker reversstrømmen
- Fotodioder kan gjøres følsomme for bestemte frekvensområder av lys (rødt, blått, gult) og brukes bla i kameraer



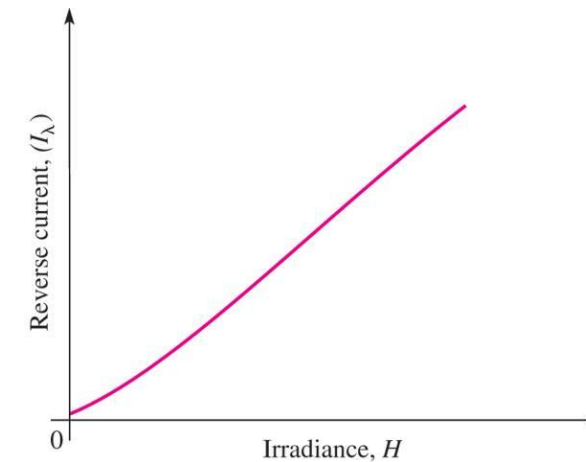
(a) Reverse-bias operation



(b) Typical devices

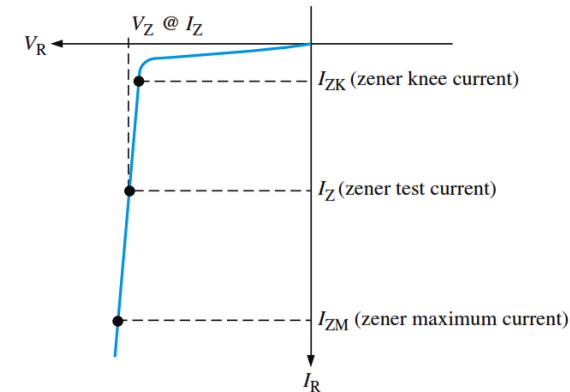
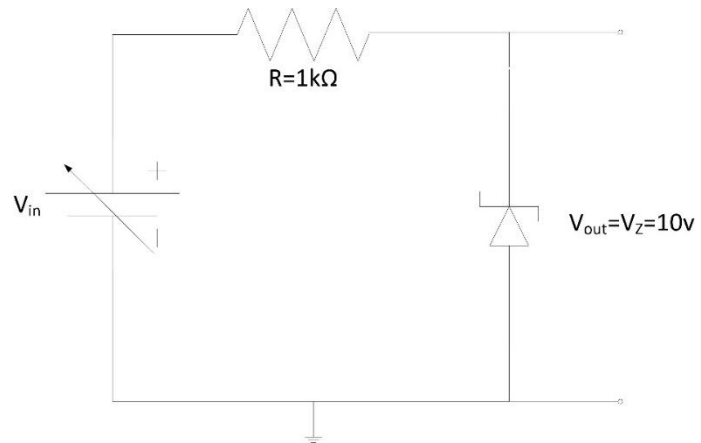


(c) Alternate symbol



Zenerdiode i spenningsreferanser

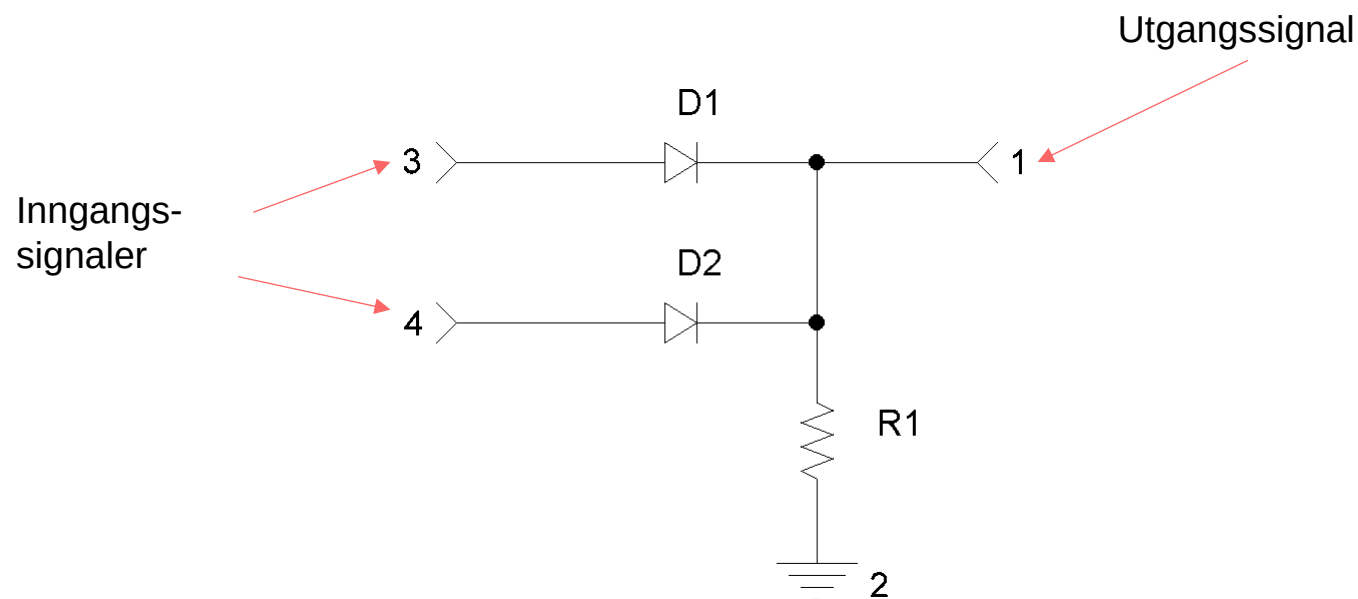
- Spenningsreferanse: Spenning som er nøyaktig og som man måler andre spenninger i forhold til
- En Zenerdiode tåler høy revers-spenning uten å ødelegges og er konstruert for å takle varierende strøm
- Zenerdioden bryter sammen (dvs begynner å lede i reversretningen) innenfor et veldig smalt spenningsintervall



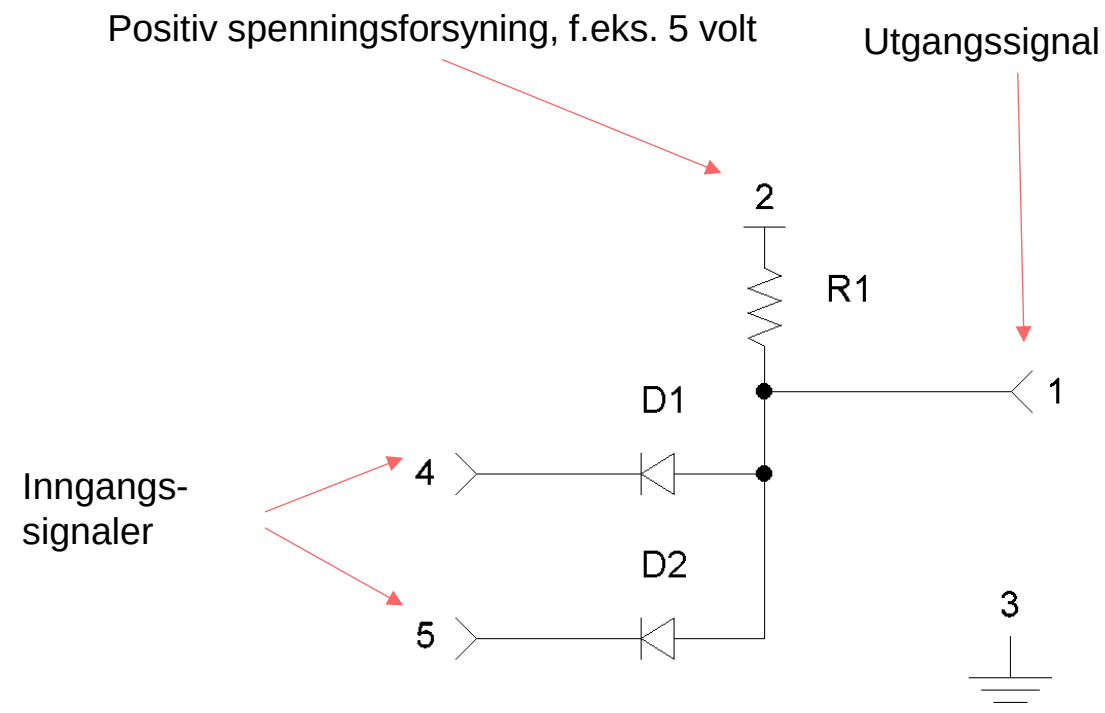
- Resistoren R sørger for at I_Z ikke blir større enn I_{Zmax}

Nøtt til neste gang

Hvilke Booleske funksjoner utfører de to kretsene?
(du kan anta den enkleste diodemodellen)



Krets a)



Krets b)

Inngangssignalene er enten logisk '0' eller '1', som kan representeres ved at '0' $\rightarrow$ 0 volt og '1' $\rightarrow$ 5 volt