

# FYS1210

Robin A. T. Pedersen      Dawid P. Kuleczko

February 29, 2016

## Contents

<b>1</b>	<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Uke 3 - Introduksjon</b>	<b>4</b>
2.1	Elektrisitet . . . . .	4
2.1.1	Ladning . . . . .	4
2.1.2	Strøm . . . . .	5
2.1.3	Spenning . . . . .	6
2.2	Leder og isolator . . . . .	6
2.2.1	Komponenter . . . . .	6
2.2.2	Ledere . . . . .	7
2.3	Ohms lov . . . . .	8
2.4	Serie- og parallellkobling . . . . .	8
2.4.1	Seriekobling . . . . .	8
2.4.2	Parallellkobling . . . . .	8
2.5	Kirchhoff . . . . .	9
2.5.1	Kirchhoffs lov om strømmer . . . . .	9
2.5.2	Kirchhoffs lov om spenninger . . . . .	9
2.5.3	Spenningsdeler . . . . .	9
2.6	Superposisjon . . . . .	10
2.6.1	Eksempel . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Uke 4 - Fysikalsk elektronikk</b>	<b>12</b>
3.1	Thevenins Teorem . . . . .	12
3.1.1	Last-analyse . . . . .	12
3.1.2	Eksempel . . . . .	13
3.1.3	Nortons Teorem . . . . .	14
3.2	Spenningskilder - Batterier . . . . .	14
3.2.1	Virkemåte . . . . .	14
3.2.2	Maksimal effektoverføring . . . . .	15
3.2.3	Motstand og temperatur . . . . .	16
3.3	Fysikalsk elektronikk . . . . .	16
3.3.1	Valensbånd . . . . .	16
3.3.2	Ledningsevne . . . . .	17

3.3.3	Eksitasjon . . . . .	18
3.4	Doping . . . . .	18
3.4.1	n-type . . . . .	19
3.4.2	p-type . . . . .	19
3.5	Vekselstrøm . . . . .	20
3.5.1	Begreper . . . . .	20
3.5.2	Root mean square . . . . .	20
3.6	DC-Offset . . . . .	21
3.7	Pulser . . . . .	21
3.7.1	Begreper . . . . .	21
3.7.2	Firkantbølge fra sinusbølger . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Uke 5 - Kondensatorer</b>	<b>24</b>
4.1	Kondensatorer . . . . .	24
4.1.1	Beskrivelse . . . . .	24
4.1.2	Virkemåte og symbol . . . . .	24
4.1.3	Formler og enheter . . . . .	25
4.2	Kondensatorer i kretser . . . . .	26
4.2.1	DC- og AC-kretser . . . . .	26
4.2.2	Reaktanse . . . . .	28
4.2.3	Impedans . . . . .	28
4.2.4	RC-kretser . . . . .	28
4.3	Frekvensfilter . . . . .	31
4.4	Dioder . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Uke 6 - Dioder</b>	<b>34</b>
5.1	Kovalente bindinger . . . . .	34
5.1.1	Diamantstruktur . . . . .	34
5.1.2	Ledning i rene halvledere . . . . .	34
5.2	Doping . . . . .	35
5.2.1	Pentavalent . . . . .	35
5.2.2	Trivalent . . . . .	35
5.3	PN-Junction . . . . .	35
5.3.1	Diffusjon . . . . .	35
5.3.2	Sperresjikt . . . . .	36
5.3.3	Forward bias . . . . .	37
5.3.4	Reverse bias . . . . .	37
5.4	Dioder . . . . .	38
5.4.1	Ideell karakteristikk og Bulk resistance . . . . .	38
5.4.2	Temperatureffekt . . . . .	39
5.4.3	Eksempel . . . . .	39
5.4.4	Ulike typer dioder . . . . .	40
5.5	Anvendelse av dioder . . . . .	40
5.5.1	Powersupply . . . . .	40
5.5.2	Likeretter . . . . .	41

<b>6</b>	<b>Uke 7 - Bipolar Junction Transistorer (BJT)</b>	<b>42</b>
6.1	Oppbygning . . . . .	42
6.2	Virkemåte . . . . .	43
6.2.1	Operasjonsmodi . . . . .	43
6.2.2	Cutoff modus . . . . .	44
6.2.3	Metning . . . . .	44
6.2.4	Aktiv . . . . .	45
6.2.5	Modi-kvadrant . . . . .	45
6.3	Karakteristikk . . . . .	46
6.3.1	Strøm . . . . .	46
6.3.2	Virkeområde . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Uke 8 - Transistorforsterkere og småsignalmodeller</b>	<b>47</b>
7.1	Universal Bias . . . . .	47
7.1.1	Lastlinje . . . . .	48
7.2	Småsignalmodellen . . . . .	48
7.2.1	Transkonduktans - Steilhet . . . . .	49
7.2.2	Dynamisk inngangsresistans . . . . .	50
7.3	Spenningsforsterkning . . . . .	50
<b>8</b>	<b>Uke 9</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>Uke 10</b>	<b>52</b>
<b>10</b>	<b>Uke 11</b>	<b>52</b>
<b>11</b>	<b>Uke 12</b>	<b>52</b>
<b>12</b>	<b>Uke 13</b>	<b>52</b>
<b>13</b>	<b>Uke 14</b>	<b>52</b>
<b>14</b>	<b>Uke 15</b>	<b>52</b>
<b>15</b>	<b>Uke 16</b>	<b>52</b>
<b>16</b>	<b>Uke 17</b>	<b>52</b>
<b>17</b>	<b>Uke 18</b>	<b>52</b>
<b>18</b>	<b>Uke 19</b>	<b>52</b>
<b>19</b>	<b>Uke 20</b>	<b>52</b>
<b>20</b>	<b>Uke 21</b>	<b>52</b>
<b>21</b>	<b>Uke 22</b>	<b>52</b>

## 1 Forord

Dette dokumentet er hovedsaklig skrevet for meg selv i et forsøk på å tvinge hjernen min til å behandle informasjonen inneholdt i pensum. Kanskje vil det bli noe andre kan bruke hvis de ikke gidder å lese hele læreboka, eller det kan brukes som oppsummering før eksamen?

Jeg har kanskje vært litt lat og utålmodig på visse deler, så bjørn med meg.

Se etter feil og rapporter dem hvis du gidder.

## 2 Uke 3 - Introduksjon

Kap. 1, s.27-40

Kap. 3, s.76-77

Kap. 4, s.97-118

Kap. 5, s.131-141

Kap. 7, s.194-203

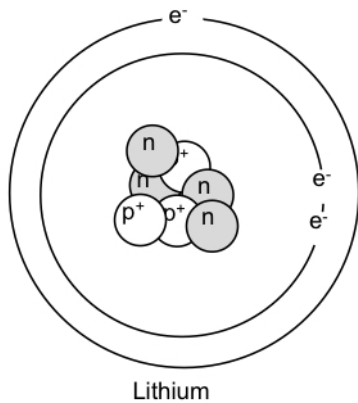
### 2.1 Elektrisitet

#### 2.1.1 Ladning

##### Atomet

Vi vet fra ungdomsskolen at atomer består av protoner, nøytroner og elektroner. Elektronene  $e^-$  er negativt ladet og protonene  $p^+$  positivt. Protoner og nøytroner er i atomets kjerne, mens elektronene ligger i "yttre skall".

Et ion er et atom med enten flere elektroner enn protoner, eller motsatt. Hvis det er flertall av elektroner kalles ionet negativt ladet.



**Bohr model of Lithium (Li)**

#### Enhet

SI enheten for ladning er Coulomb (C).

$$1 \text{ C} = 6.24 \times 10^{18} e$$

Hvor  $e$  står for elementærladning, den elektriske ladningen til et proton.

Ladning er rett og slett en egenskap en partikkel kan ha som spiller en rolle i elektromagnetisk kraft.

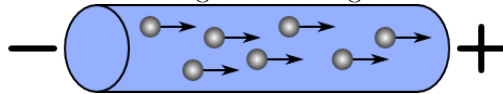
#### 2.1.2 Strøm

##### Frie elektroner i bevegelse

Hvis et elektron slipper løs fra et atom kan det bevege seg fra et atom til et annet. Når slike "frie elektroner" beveger seg gjennom en ledning har vi det som kalles elektrisk strøm.

Strømretningen er definert som den retningen elektronene beveger seg. Altså fra negativ til positiv.

NB! Det har lenge vært vanlig å definere strømretningen motsatt fra dette.



#### Enhet

Strøm måles etter hvor mange ladninger som passerer et punkt i løpet av et sekund. SI enheten for strøm er Ampere (A)

$$1 \text{ A} = C/s$$

#### AC/DC

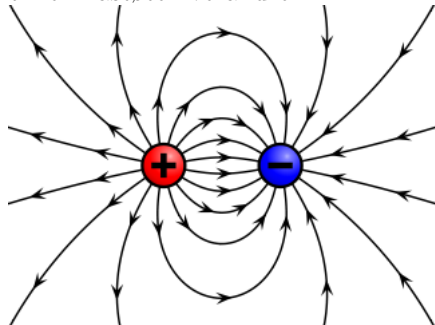
AC, alternating current, vekselstrøm "skifter retning" med en gitt frekvens.

DC, direct current, likestrøm har kun én retning.

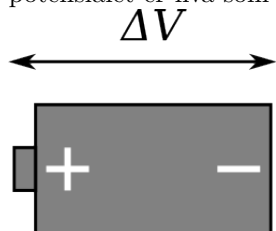
### 2.1.3 Spenning

#### Potensiale

Negativt ladde partikler har en tiltrekkende kraft og positive partikler har en frastøtende kraft. Hvis du plasserer en negativ og en positiv partikkel ved siden av hverandre vil de bli tiltrukket av hverandre. På samme måte vil to like partikler frastøte hverandre.



Et batteri har en negativ og en positiv pol. Det vil være potensiale for en elektromagnetisk kraft som trekker de ladde partiklene mot hverandre. Dette potensialet er hva som kalles spenning.



#### Enhet

SI enheten for spenning er volt (V)

Hvor J står energienheten Joule og C er Coulomb.

$$1 \text{ V} = J/C$$

## 2.2 Leder og isolator

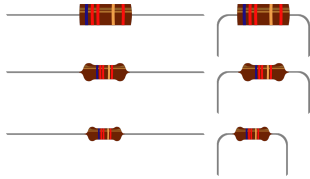
### 2.2.1 Komponenter

#### Motstand

En motstand, også kalt resistor, er en komponent som begrenser strømmen.

Tenk på det som en kran du skrur igjen for å begrense antall elektroner som flyter forbi. Det refererer også til et stoffs begrensede ledningsevne.

Motstand noteres som  $R$  (for resistance) og måles i ohm  $\Omega$ .



### Kondensator

En kondensator (engelsk: capacitor) er litt som et batteri, fordi den lagrer elektrisk energi.



### Spole

En spole (engelsk: inductor) motstår forandring i strøm. Det er likheter mellom funksjonen til en spole og en kondensator, men måten de fungerer på er forskjellig. Mer om både kondensator og spole i senere kapitler.

## 2.2.2 Ledere

### Leder

Ledere er materialer med liten motstand. Gode eksempler på ledere er metaller med et enslig elektron i sitt ytterste skall. Da er det lettere for elektroner å eksitere fra valensbåndet opp til ledningsbåndet. I disse materialene er det et mindre energigap mellom disse energibåndene.

### Isolator

Isolatorer leder ikke strøm (ved mindre du *virkelig* påfører strøm). Kjenntegnet for isolatorer er at de har ekstremt høy motstand.

### Halvleder

En halvleder har egenskaper midt i mellom ledere og isolatorer. De leder strøm dårligere enn ledere, men ikke så dårlig som isolatorer. Halvledere brukes bla. i transistorer og dioder og gjorde integrerte kretser mulig.

## 2.3 Ohms lov

Kort fortalt: Mer spenning gir mer strøm! Mer motstand gir mindre strøm.

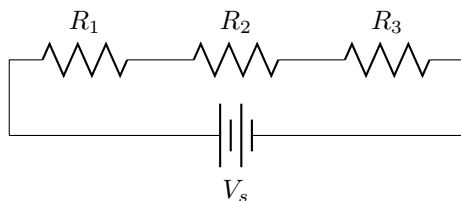
Finere fortalt: Elektrisk strøm er direkte proporsjonal med spenning og omvendt proporsjonal med motstand.

$$U = R \cdot I$$

$U$  = spenning       $R$  = motstand       $I$  = strøm

## 2.4 Serie- og parallellkobling

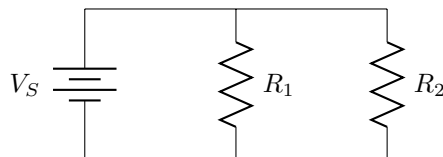
### 2.4.1 Seriekobling



I denne kretsen er 3 motstander koblet sammen i serie. Den totale motstanden i en seriekobling er gitt ved:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

### 2.4.2 Parallellkobling



Den totale motstanden i en parallellkobling gis via den *inverse* av totalen.

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Tilfellet med kun to motstander kan forenkles.

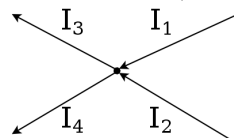
$$R_{total} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



## 2.5 Kirchhoff

### 2.5.1 Kirchhoffs lov om strømmer

Summen av strømmene rundt et knutepunkt er null. Eller sagt annerledes, summen av strømmene inn er lik summen av strømmene ut.

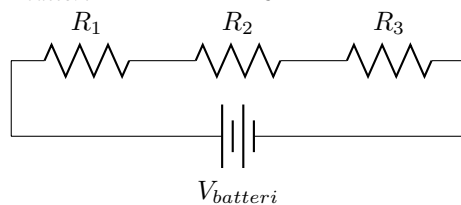


$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

### 2.5.2 Kirchhoffs lov om spenninger

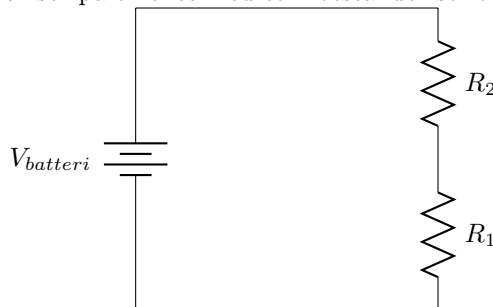
Summen av alle spenninger i en krets er null.

$$V_{batteri} = V_1 + V_2 + V_3$$



### 2.5.3 Spenningsdeler

Vi ser på tilfellet med to motstander seriekoblet til et batteri.



Hva er spenningen  $V_1$  over motstanden  $R_1$ ?

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{batteri}$$

Du kan tenke på det som dette:

Hvor stor del av kaka tar  $R_1$ ? sin rettfærdige andel:  $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Hvor mye kake er det egentlig?  $V_{batteri}$

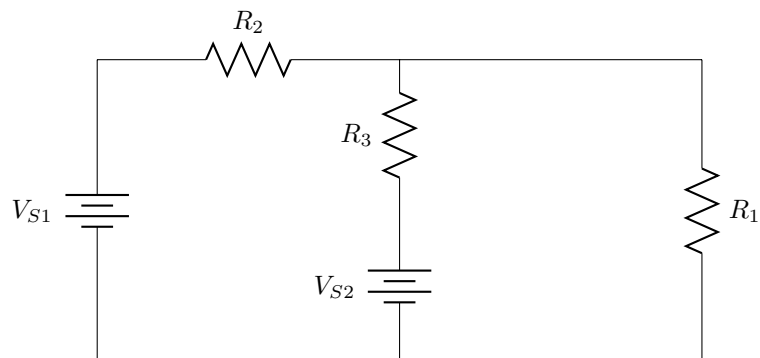
## 2.6 Superposisjon

Superposisjonsprinsippet brukes til å finne verdier i kretser med mer enn én spenningskilde. For å finne spenningen rundt en komponent ser man på bidraget fra én spenningskilde om gangen. Når bidraget fra alle kildene er funnet, legger man det sammen for å få totalverdien.

### 2.6.1 Eksempel

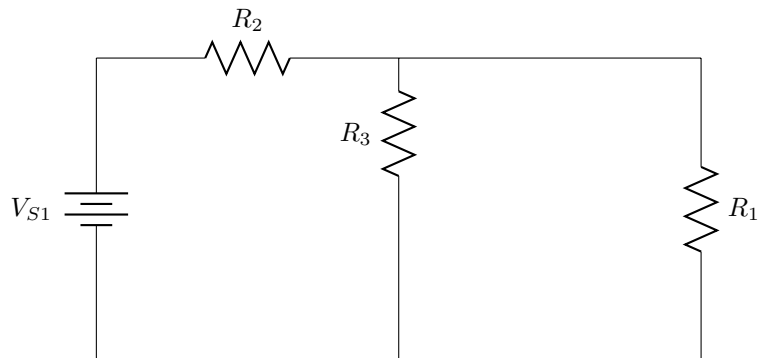
#### Krets med to spenningskilder

$$V_{S1} = 15 \text{ V}, \quad V_{S2} = 3 \text{ V}, \quad R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

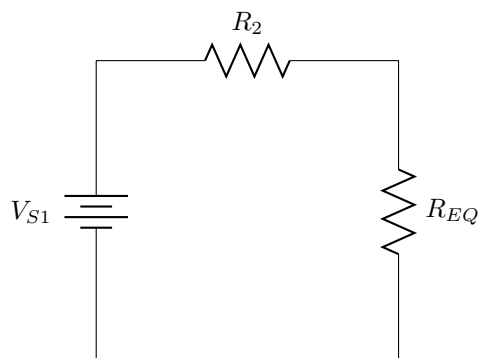


I denne kretsen er det to spenningskilder som begge bidrar til å skape spenning  $V_1$  rundt motstanden  $R_1$ .

#### Bidrag fra første spenningskilde



Vi later som den ene spenningskilden  $V_{S2}$  ikke eksisterer og regner ut bidraget fra  $V_{S1}$ .



Motstandene  $R_1$  og  $R_3$  danner en parallellkobling som vi kan betrakte som én motstand  $R_{EQ}$ .

Siden  $R_1$  og  $R_3$  er parallellkoblet får man  $R_{EQ}$  via den *inverse*.

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}$$

Eller, siden det bare er to motstander, via forenklingen.

$$R_{EQ} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = \frac{1 \cdot 1}{1 + 1} = \frac{1}{2}$$

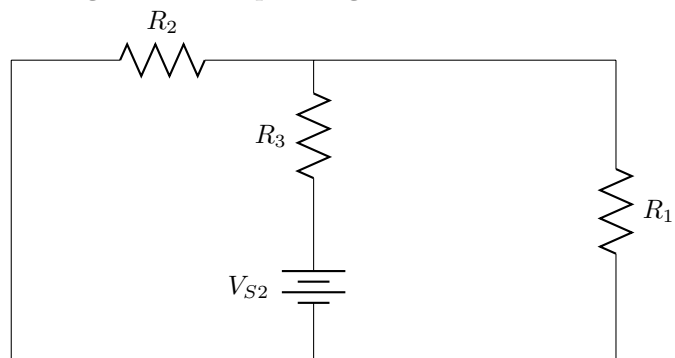
Spenningen over  $R_1$  vil være den samme som over  $R_3$ , fordi de er parallellkoblet. Det er den samme spenningen som over hele  $R_{EQ}$ .

Siden vi vil finne spenningen over  $R_1$  holder det da å regne ut spenningen over  $R_{EQ}$ .

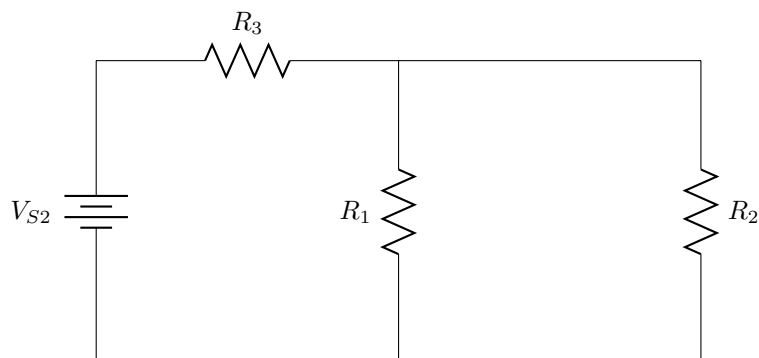
$$V_{EQ} = V_{1(S1)} = \frac{R_{EQ}}{R_{EQ} + R_2} \cdot V_{S1} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + 1} \cdot 15 = 5 \text{ V}$$

$V_{1(S1)}$  er da den delen av spenningen  $V_1$  forårsaket av  $V_{S1}$ .

#### Bidrag fra andre spenningskilde



Denne gangen later vi som  $V_{S1}$  ikke eksisterer.



Tegnet på en annen måte ser vi at  $R_1$  og  $R_2$  også danner en parallellkobling. Den kan vi betrakte som  $R_{FQ}$  og regne ut på samme måte. Totalmotstanden til  $R_{FQ}$  gis på samme måte som ista.

$$R_{FQ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2}$$

Spenningen over  $R_{FQ}$  er lik spenningen over  $R_1$  som er lik spenningen over  $R_2$ .

$$V_{FQ} = V_{1(S2) = \frac{R_{FQ}}{R_{FQ} + R_3} \cdot V_{S2} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + 1} \cdot 3 = 1 \text{ V}$$

### Total spenning!

Nå som vi har regnet ut begge bidragene  $V_{1(S1)}$  og  $V_{1(S2)}$  kan vi legge dem sammen og få den totale spenningen  $V_1$ .

$$V_1 = V_{1(S1)} + V_{1(S2)} = 5 + 1 = 6 \text{ V}$$

## 3 Uke 4 - Fysikalsk elektronikk

Kap. 7, s.203-217

Kap. 9, s.247-279

Kap. 12, s.364-382

Kap. 13, s.389-413

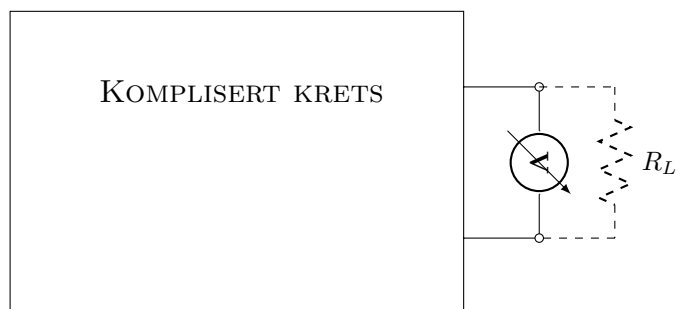
Kap. 15, s.462-500

Kap. 16, s.510-528

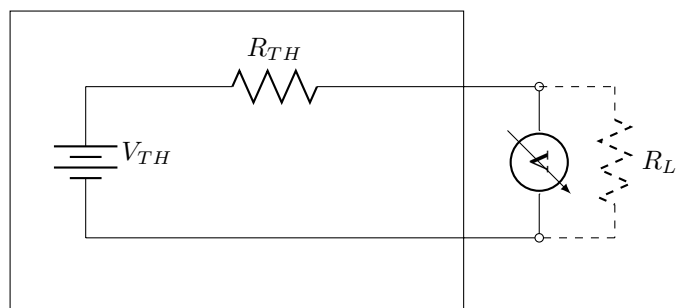
### 3.1 Thevenins Teorem

#### 3.1.1 Last-analyse

Thevenins teorem er en regneteknikk hvor du kan betrakte noe komplisert som noe enkelt. Det brukes som regel for å regne på forskjellig last uten å måtte regne ut hele kretsen på nytt.



Alle topolede, lineære nettverk (krets)...

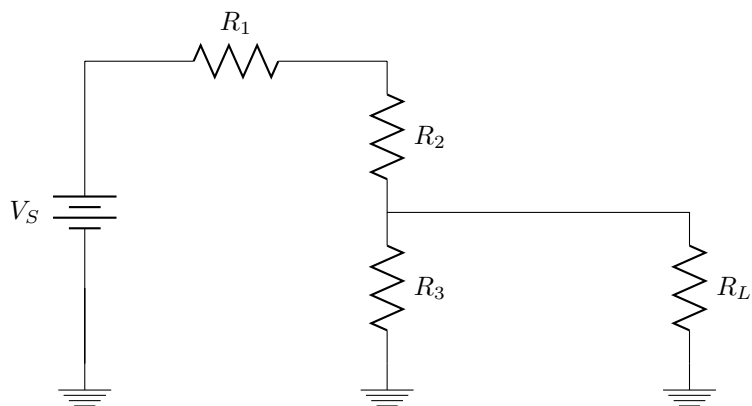


...kan erstattes med en spenningskilde  $V_{TH}$  og en motstand  $R_{TH}$ .

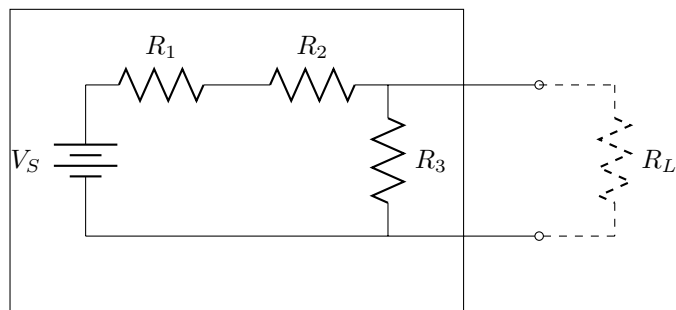
$V_{TH}$ =Spenningen over polene uten last.

$R_{TH}$ =Motstand over polene når alle spenningskilder er kortsluttet og alle strømmer brutt.

### 3.1.2 Eksempel



Denne kretsen kan skrives om til å ligne på beskrivelsen av Thevenin ovenfor.



Vi regner ut  $V_{TH}$ :

Spenning målt over polene uten last, tilsvarer å måle spenning rundt  $R_3$ .  
(Husk at  $R_1$  og  $R_2$  står i serie)

$$V_{TH} = V_3 = \frac{R_3}{(R_1 + R_2) + R_3} \cdot V_S$$

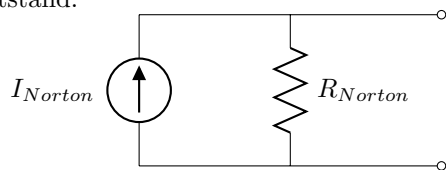
Vi regner ut  $R_{TH}$ :

Motstand over polene når spenningskilder er kortsluttet, blir som å betrakte kretsen som en parallellkobling.

$$R_{TH} = \frac{(R_1 + R_2)R_3}{(R_1 + R_2) + R_3}$$

### 3.1.3 Nortons Teorem

Nortons teorem bygger videre på thevenins teorem. Det sier at enhver krets, uansett hvor kompleks, kan representeres med en strømkilde i parallell med en motstand.



## 3.2 Spenningskilder - Batterier

### 3.2.1 Virkemåte

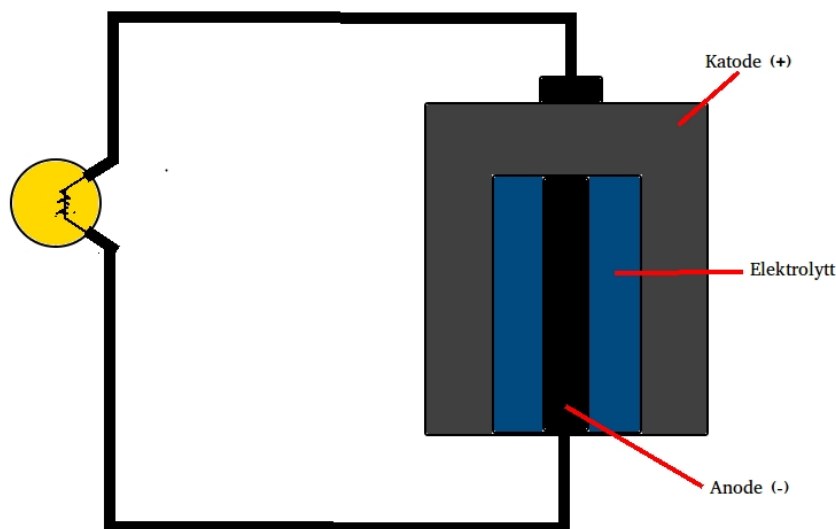
Pensum I fys12010 er å kunne beskrive hvordan et batteri fungerer.

Batterier deles i to grupper: oppladbare batterier og engangsbatterier. I fys1210 skal vi se nærmere på engangsbatterier.

Det finnes mange typer engangsbatterier som blant annet: Sink-karbon batterier, alkaliske batterier og lithium batterier. Men de fleste batteriene er bygget reativit likt:

Et batteri består av to elektroder, en anode som er negativ ladet og en katode som er positiv ladet. I tillegg har batteriet en elektrolytt som skiller disse fra hverandre. Dette er ofte en væske eller gele som kun leder ioner, men ikke elektroner.

Når man da kobler noe til batteriet, f.eks. en diode, slik at det blir en lukket krets så vil det oppstå en kjemisk reaksjon der elektroner fra anoden beveger seg over til katoden. Akkurat som vist på tegningen.



### 3.2.2 Maksimal effektoverføring

#### Ideell spenningskilde

En perfekt spenningskilde vil ha like stor spenning hele tiden, uavhengig av hvor mye strøm den leverer. I virkeligheten vil dette ikke være sant for en reell spenningskilde.

Strømmen ut av en spenningskilde vil påvirkes av kildens indre motstand (tenk thevenin). Eksempel på indre motstand:

Lommelyktbatteri: 1 til 10  $\Omega$ .

Bilbatteri: 0.01 til 0.004  $\Omega$ .

### Maximum power!

Effekten  $P$  fra en spenningskilde maksimaliseres når man kobler på en lastmotstand som er *lik* kildens indre motstand.

$$R_L = R_I$$

Effekt er gitt ved ligningen

$$P = \frac{U^2}{R}$$

### 3.2.3 Motstand og temperatur

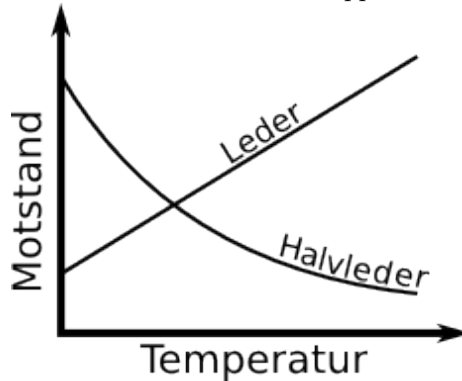
Motstand og ledningsevne påvirkes av temperaturforandring.

Ledere:

Motstanden i en leder har en positiv temperaturkoeffisient og *øker* med temperaturen. Det er fordi elektronene kolliderer med hverandre.

Halvledere:

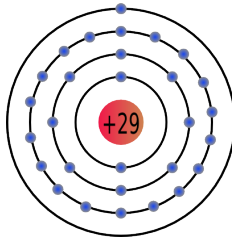
Motstanden har negativ temperaturkoeffisient og motstanden synker fordi elektronene blir termisk eksitert opp til ledningsbåndet.



## 3.3 Fysikalsk elektronikk

### 3.3.1 Valensbånd

Etter Niels Bohrs atommodell ligger elektroner i skall rundt atomkjernen.





Kobberatom med 29 protoner og 29 elektroner.

Skall 1: 2 elektroner

Skall 2: 8 elektroner

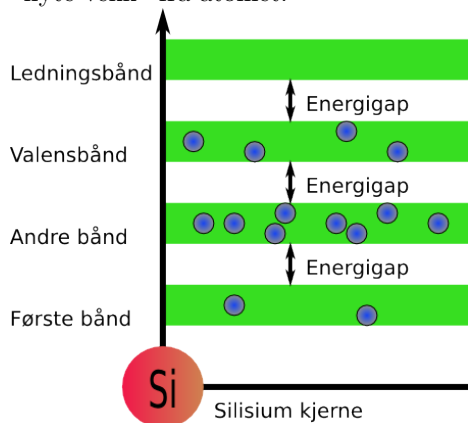
Skall 3: 18 elektroner

Skall 4: 1 elektron

Det ytterste elektronet har en svakere binding til kjernen og gjør at kobber leder strøm så godt.

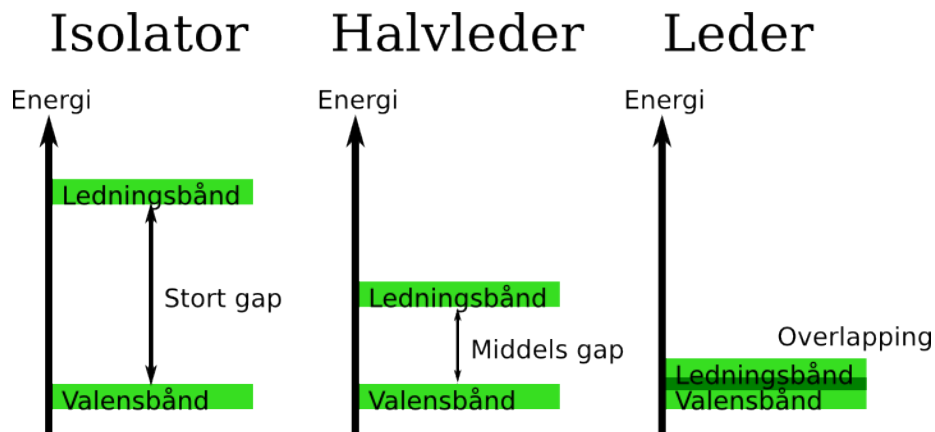
### Energigap

Når man ser på de forskjellige energinivåene til disse skallene, kalles de for bånd. Det ytterste av disse båndene heter valensbåndet, og hvis et elektron her blir eksitert vil det komme opp i ledningsbåndet. I ledningsbåndet kan elektronet "flyte vekk" fra atomet.



### 3.3.2 Ledningsevne

Energi-gapet mellom valensbåndet og ledningsbåndet kan variere for forskjellige stoffer. Store gap, som gjør det vanskelig for et elektron å nå ledningsbåndet, er karakteristisk for isolatorer. Tilsvarende er gapet mindre i halvledere. Og i ledere er det er overlapp mellom valensbåndet og ledningsbåndet, som gjør at det leder strøm ved romtemperatur.



### 3.3.3 Eksitasjon

For at elektroner skal hoppe fra valensbåndet, over energigapet, til ledningsbåndet, må det få tilført energi. Energien kan komme fra andre partikler (varme) eller elektromagnetisk stråling (fotoner).

Bølgelengden  $\lambda$  som kreves for å eksiteres av et foton er

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

$c$  = lyshastigheten =  $3E8$  = målt i meter per sekund m/s

$h$  = plancks konstant =  $6.626E-34$  = målt i Joule ganger sekund = Js

$E$  = energiforskjell til neste nivå = målt i elektronvolt = eV

Frekvensen  $f$  finner man ved

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Og energien  $E$  ved

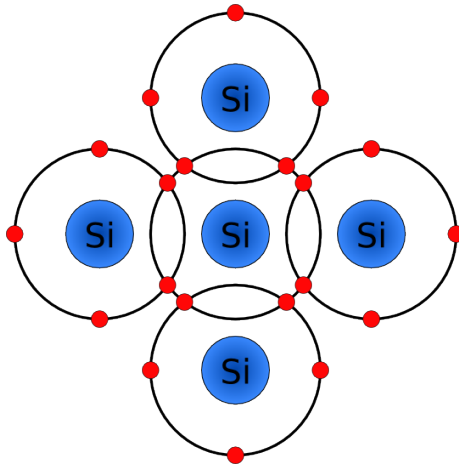
$$E = hf$$

## 3.4 Doping

Når man f.eks. lager transistorer bruker man dopa halvledere.

Halvledere som karbon, silisium og germanium har 4 valenselektroner som etter oktettregelen danner kovalente bindinger.

oktettregelen:  
atomer  
"ønsker" å  
binde seg til  
hverandre  
s.a. de får  
8 valenselek-  
troner

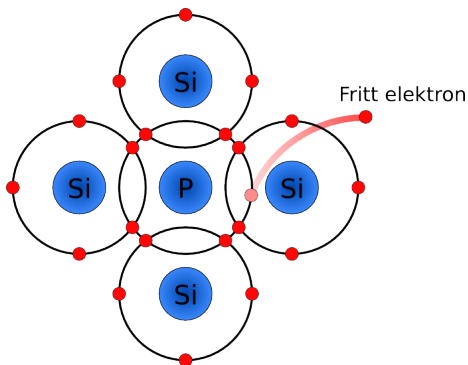


Silisium atomer i diamantstruktur

### 3.4.1 n-type

For å dope et stoff som ovenfor, tilsetter man atomer med 3 eller 5 valenselektroner.

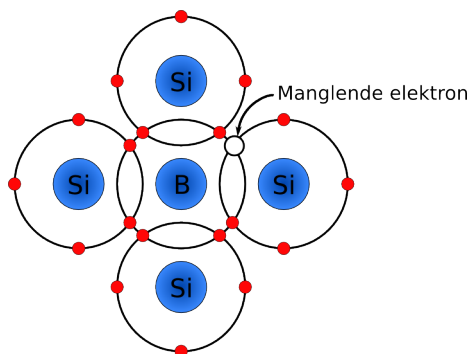
I n-type doping tilsettes atomer med 5 valenselektroner. Slike atomer kalles donor-atomer, da man får et ekstra elektron som kan flyte rundt.



Fosfor blandt silisium.

### 3.4.2 p-type

Akseptor-atomer med 3 valenselektroner gjør at det er "hull" der det skulle være et elektron. Disse hullene kan "ta imot" elektroner.



Bor blandt silisium.

### 3.5 Vekselstrøm

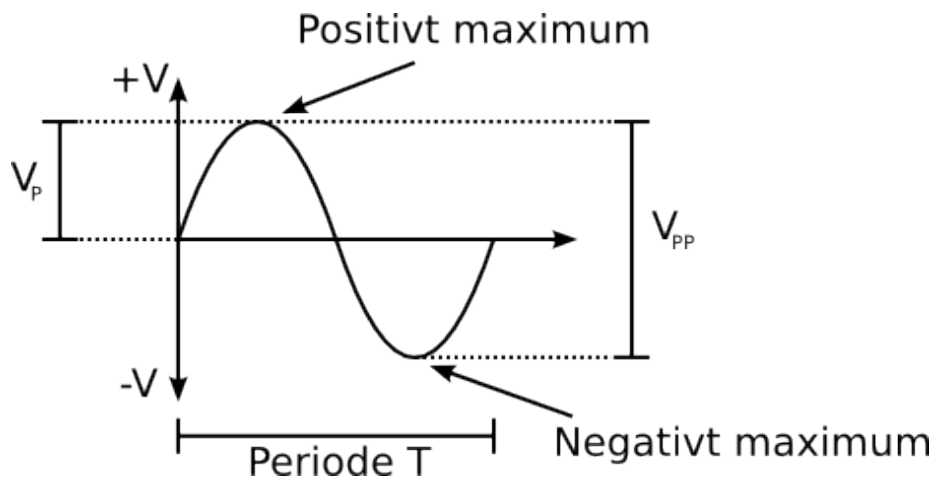
#### 3.5.1 Begreper

Positivt/negativt maksimum: Høyeste verdi i hver retning.

Periode: Tid fra starten av en bølge til starten av neste.

Peak voltage  $V_P$ : Den største spenningen målt fra null.

Peak to peak voltage  $V_{PP}$ : Spenningen mellom topp og bunn.



#### 3.5.2 Root mean square

RMS brukes for å beregne gjennomsnitt til en AC-krets, eller hva den samme spenningen ville tilsvare i en DC-krets.

For eksempel har vi i norske stikkontakter vekselstrøm på 240 volt rms, med peak voltage på 339 volt. Det vil si at for å få samme effekt med DC må vi ha 240 volt.

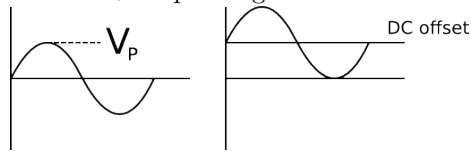
Effektverdi, rms, er gitt ved

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

Der  $V_P$  er peak verdien i AC-kretsen.

### 3.6 DC-Offset

I noen systemer er det viktig at ikke strømmen eller spenningen skifter retning. Hvis man har utgangspunkt i vekselstrøm kan man forskyve den ved å legge til en likestrømsspenning minst like sterk som  $V_P$ .



### 3.7 Pulser

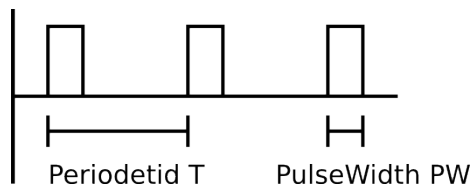
#### 3.7.1 Begreper

Her er noen begreper som brukes om pulstog:

Periodetid  $T$ : avstand fra bynelsen av en puls til bynelsen av neste.

PulseWidth  $PW$ : avstand fra bynelse til slutt av en puls.

DutyCycle (i prosent):  $\frac{PW}{T} \cdot 100$



#### Uperfekt virkelighet

Firkantbølgen stiger ikke momentant.

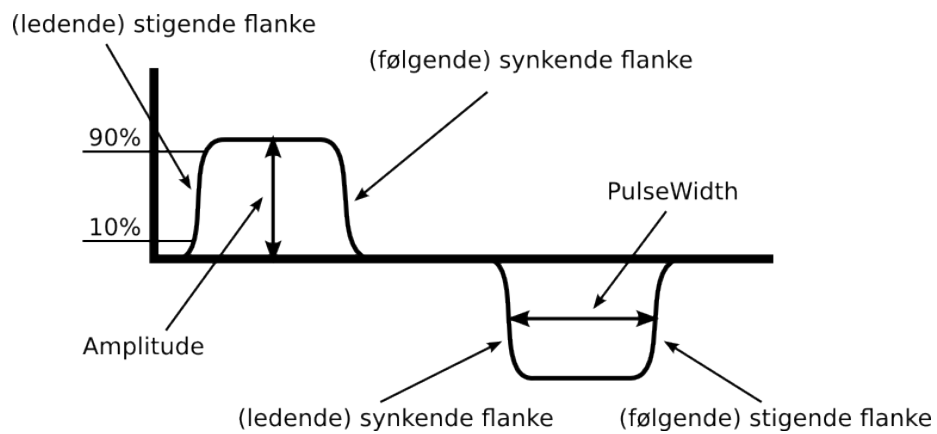
Amplitude: høyeste variasjon i spenning.

PulseWidth: Avstand fra første 50% til neste.

Flanker: Stigning og nedgang.

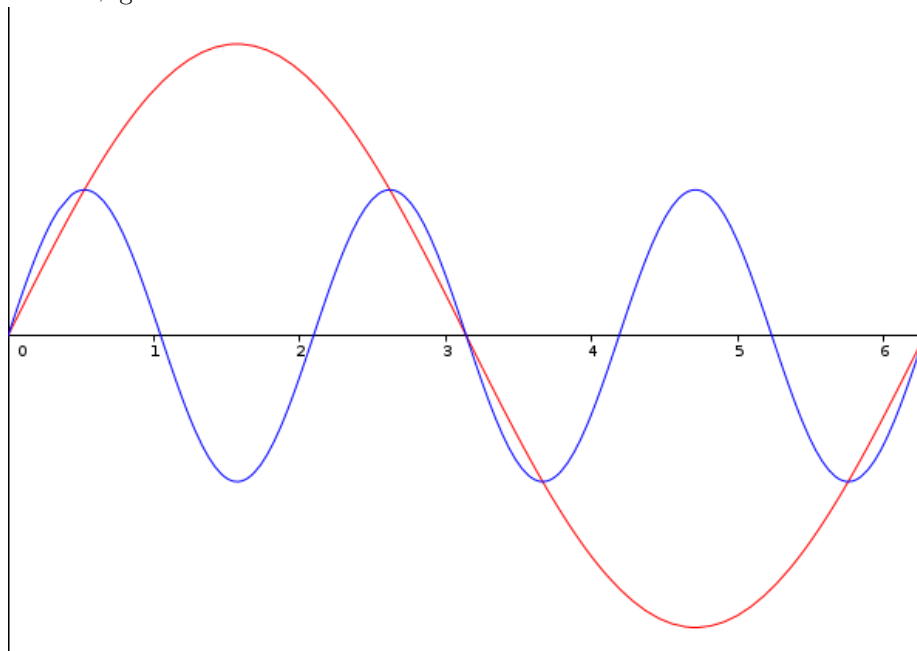
Rise time: Tid fra 10% opp til 90%.

Fall time: motsatt av rise time.



### 3.7.2 Firkantbølge fra sinusbølger

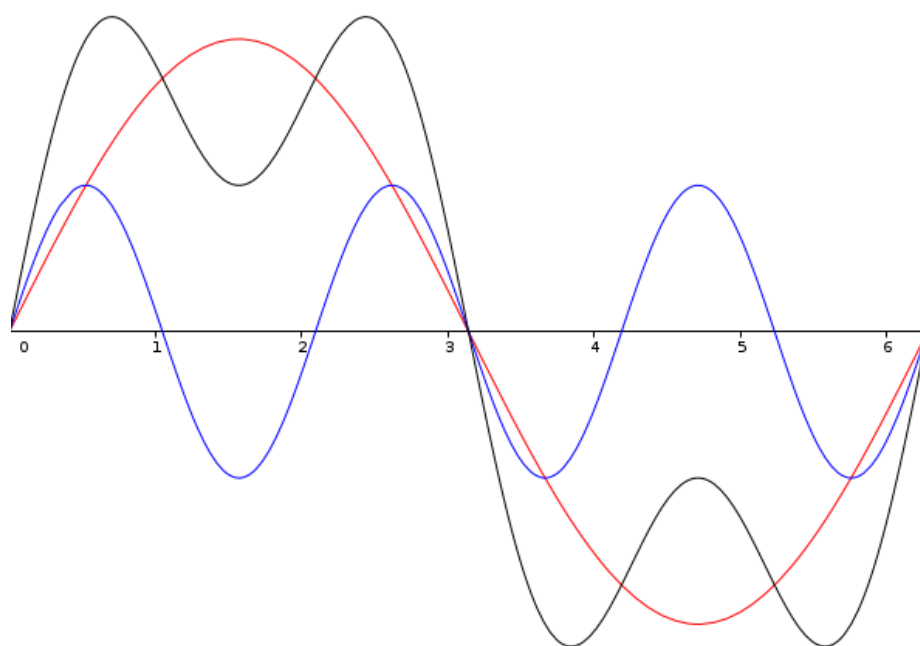
Ved å generere to sinusbølger kan man addere dem sammen for å tilnærme en firkantbølge.



Vi har to funksjoner:

$$a = 2 \sin x$$

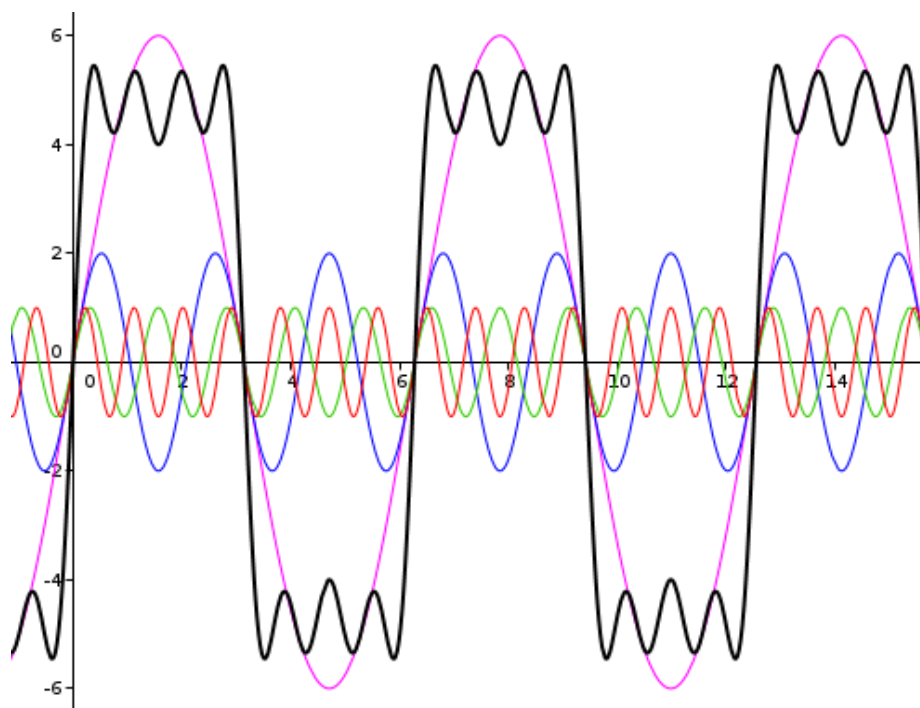
$$b = \sin 3x$$



Lagt sammen blir

$$c = a + b$$

Du kan se at det begynner å ligne på en firkantbølge.



Her er et eksempel med 1, 3, 5 og 7 harmoni.

## 4 Uke 5 - Kondensatorer

Kap. 12, s.364-382

Kap. 13, s.389-413

Kap. 15, s.462-500

Kap. 16, s.510-528

Kap. 17, s.533-564

Kap. 18, s.574-605

### 4.1 Kondensatorer

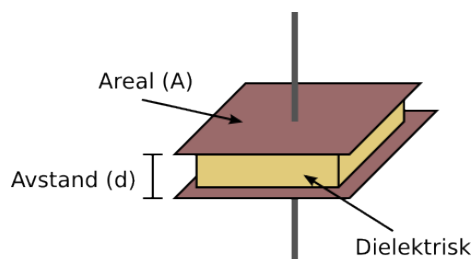
#### 4.1.1 Beskrivelse

En kondensator (engelsk: capasitor) er en av de mest fundamentale kompenentene vi bruker. Dens funksjon er å lagre elektrisk ladning. De brukes bl.a. til lokal energilagring (som et lite batteri), dempe brå forandring av spenning (for å beskytte sårbare komponenter) og signalfiltrering.

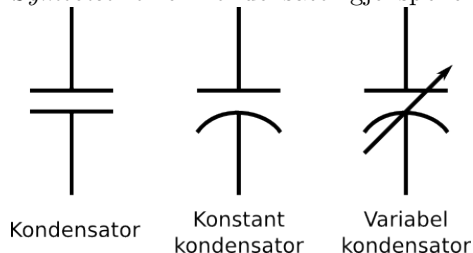
#### 4.1.2 Virkemåte og symbol

En kondensator består av to ledende plater med et isolerende materiale (et dielektrisk) i mellom.





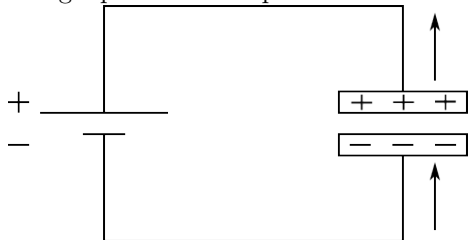
Symboler for en kondensator gjenspeiler oppbygningen.



## Spenning

Når en kondensator kobles til en spenningskilde vil det gå strøm gjennom kretsen. Elektronene strømmer *mot* den ene siden av kondensatoren, og *fra* den andre siden.

Men strømmen blir blokkert av dielektrikumet og går ikke gjennom kondensatoren. Istedenfor samler elektronene seg på den ene siden, og det blir en mangel på elektroner på andre siden.



Man kan tenke på det som om det går to strømmen. En fra negativ pol til kondensatoren. Og en fra kondensatoren mot positiv pol.

Nå er det negative ladninger på den ene siden, og positive på den andre. Det vil si at vi har en spenning over kondensatoren.

### 4.1.3 Formler og enheter

Kapasitet (C), evnen til å lagre ladning, er gitt ved følgende formel.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\text{Ladning}}{\text{Spenning}}$$

Enheten for kapasitet er farad (F).

En 1 farads kondensator ladet med 1 coulomb har en spenning på 1 volt mellom platene.

Kapasiteten til en kondensator er avhengig av arealet til flatene, avstanden mellom dem og dielektrikumet i mellom.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

$C$  = kapasitet i farad

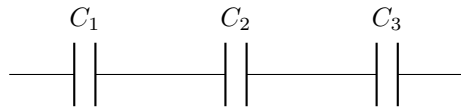
$\varepsilon_0$  = permittiviteten til dielektrikumet i vakuum

$\varepsilon_r$  = relativ permittivitet til dielektrikumet

$A$  = arealet til overflatene til platene

$d$  = avstand mellom platene i meter

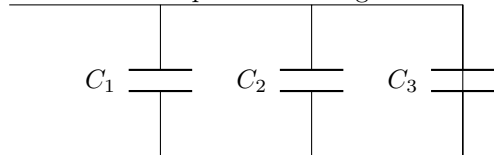
Serie- og parallellkobling fungerer motsatt av hvordan vi er vant med å tenke med motstander. Vi ser på en seriekobling



Den totale kapasiteten er gitt ved.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Tilsvarende for parallellkobling



Den totale kapasiteten er gitt ved.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

## 4.2 Kondensatorer i kretser

### 4.2.1 DC- og AC-kretser

#### Kondensator i DC-kretser

En kondensator i en DC krets vil bli ladet opp til det elektriske feltet i kondensatoren kansellerer effekten av det elektriske feltet i spenningskilden. Da vil det ikke gå noe strøm lenger.

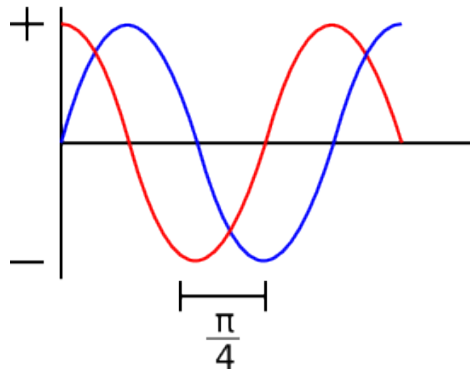
### Kondensator i AC-kretser

Strømmen  $I$  gjennom en kondensator er proporsjonal med forandring i spenning.

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

Det vil si at det går mer strøm når spenning forandrer seg mest.

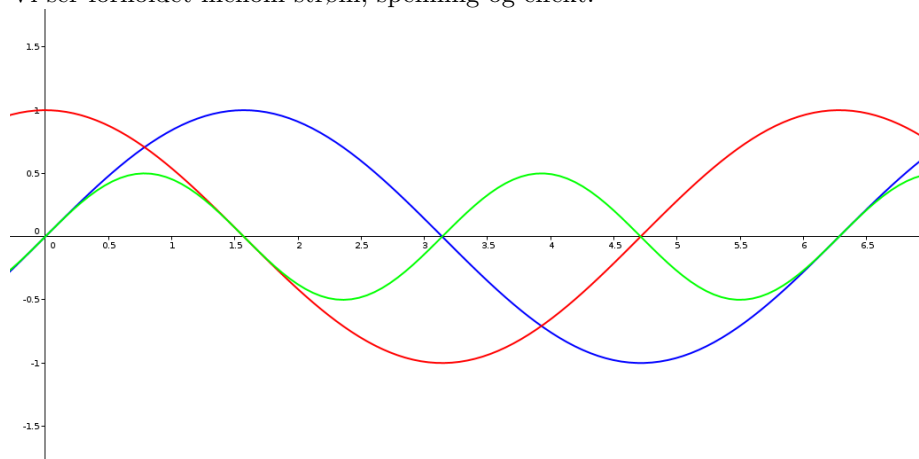
**Strøm** **Spenning**



Vi ser at strømmen er størst når spenningen er 0. Det er fordi strømmen er gitt ved den derivert av spenning, og den største forandring i spenning er ved 0.

Husk at **effekt (P)** er gitt ved  $P = U \cdot I$ .

Vi ser forholdet mellom strøm, spenning og effekt.



### 4.2.2 Reaktanse

Når en kondensator er i en AC-krets fungerer den som en motstand. Vi kaller denne motstanden reaktans ( $X_C$ ). Reaktans er gitt ved

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

f = frekvens

C = kapasitet

Vi ser fra dette at motstanden i en kondensator minker når frekvensen øker.

### Serie- og parallellkobling

Koblinger med hensyn på reaktans fungerer som med motstander.

Seriekobling

$$X_{CT} = X_{C1} + \dots + X_{Cn}$$

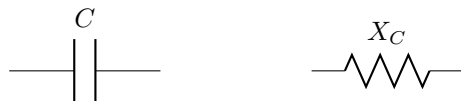
Parallellkobling

$$\frac{1}{X_{CT}} = \frac{1}{X_{C1}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}}$$

### 4.2.3 Impedans

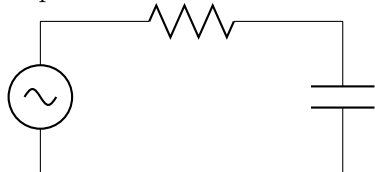
Impedans (Z), fra engelsk impede (å stå i veien for fremgang), er synonymt med motstand. Impedans er den totale motstanden med hensyn på både motstand og reaktans.

I AC-kretser kan man bytte ut kondensatorsymbolet C med en motstand  $X_C$ .



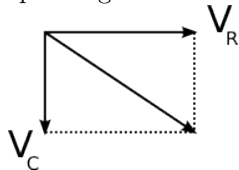
### 4.2.4 RC-kretser

RC, står for Resistor og Kapasitor (motstand og kondensator). Og en RC-krets er simpelthen kretser som består av motstander og kondensatorer.



### Spenning og impedans

Husk at strømmen i en kondensator ligger 90 grader forran spenningen. Det vil si at spenningen over en kondensator ligger forskøvet 90 grader i forhold til spenningen i en motstand. Vektorsummen gir den totale spenningen.



I en krets med en motstand og en kondensator i serie gir dette oss

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$

Og tilsvarende for impedansen.

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

### Eksempel

Finn den totale impedansen  $Z$  for en seriekoblet motstand, kondensator og vekselstrømkilde.

$$R = 25 \text{ k}\Omega \quad C = 6 \text{ nF} \quad f = 2 \text{ kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-9}} = 13.3 \text{ k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(25 \cdot 10^3)^2 + (13.3 \cdot 10^3)^2} = 28.3 \text{ k}\Omega$$

### Tidskonstant

Når en ladet kondensator står i en lukket krets med motstand, vil kondensatoren lade seg ut.



Spenningen  $U$  er gitt ved  $U = R \cdot I$ .

Spenningen til kondensatoren kaller vi  $V$ .

Etter kirchhoffs lov om spenninger er summen av alle spenninger i en krets lik null.

$$R \cdot I + V = 0$$

Strøm  $I$  er gitt ved

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

Satt inn for  $I$  gir det

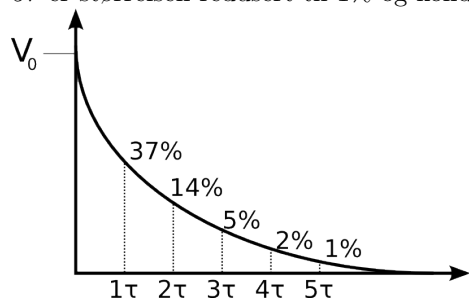
$$R \cdot C \cdot \frac{dV}{dt} + V = 0$$

Løser man dette for spenningen over kondensatoren får man

$$V_C(t) = V_0 \cdot e^{\frac{-t}{RC}} = V_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$$

Hvor  $\tau = RC$  er *tidskonstanten*.

Etter en tid  $\tau$  har størrelsen blitt redusert til ca 37% av startverdien. Etter  $5\tau$  er størrelsen redusert til 1% og kondensatoren anses som utladet.



### 4.3 Frekvensfilter

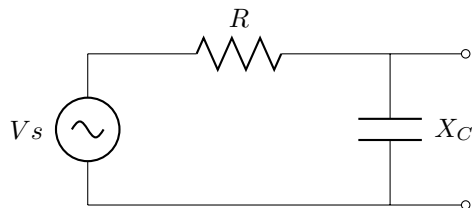
#### Lavpass

Husk at reaktansen  $X_C$  er avhengig av frekvens.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Det tilsier at reaktansmotstanden blir lavere med høy frekvens.

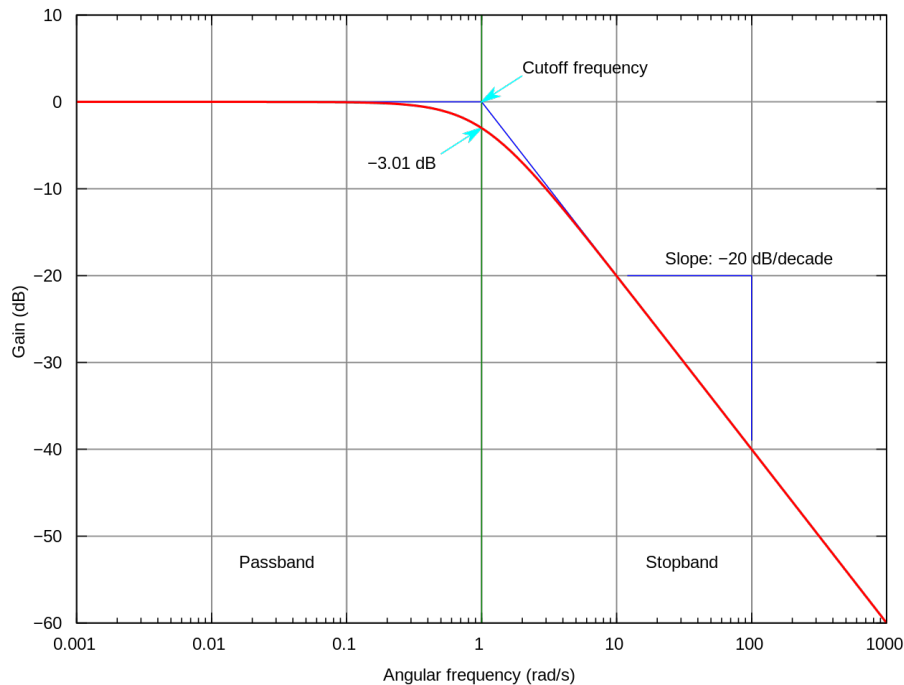
La oss se hva dette gjør med spenningen over kondensatoren i en RC-krets.



Spenningsdeling (husk: 90 grader forskyvning) for  $X_C$  gir oss

$$V_{ut} = \frac{X_C}{\sqrt{X_C^2 + R^2}} \cdot V_S$$

Dette viser at spenningen ut blir lavere ved høy frekvens.



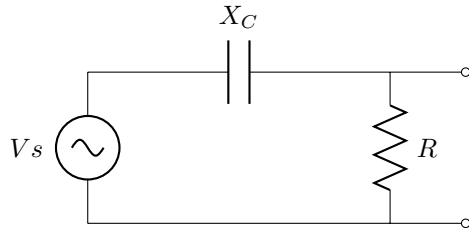
Cutoff (grense) frekvensen får man når  $X_C = R$ .

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC}$$

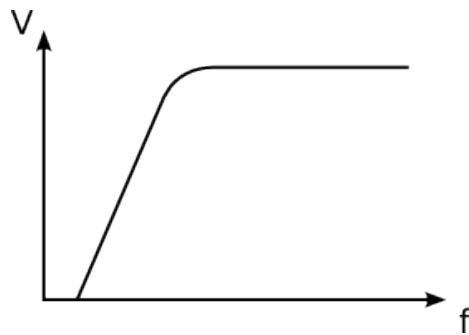
### Høypass

I motsetning til et lavpassfilter som slipper gjennom lave frekvenser, slipper høypassfiltre gjennom høye frekvenser.

Dette gjøres ved å måle spenning over motstanden istedenfor kondensatoren.



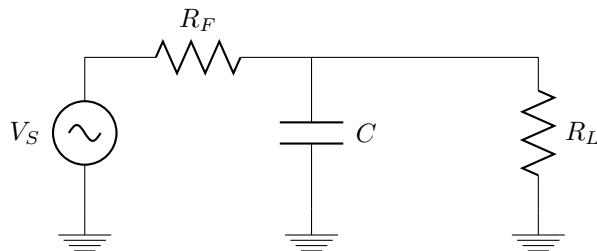
Når frekvensen blir høyere blir motstanden i kondensatoren lavere og ved spenningsdeling blir spenningen over motstanden høyere.



### Eksempel

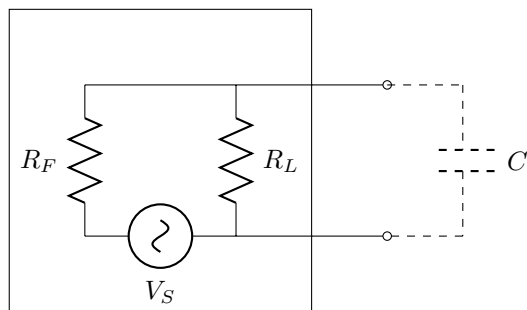
Hva er grensefrekvensen (cutoff frequency)?

$$R_F = 100 \, \Omega \quad C = 10 \, \mu\text{F} \quad R_L = 910 \, \Omega$$



Dette kan skrives om slik vi er vant til å se thevenin





Regner ut theveninmotstanden

$$R_{TH} = \frac{R_L \cdot R_F}{R_L + R_F} = \dots = 90.1 \, \Omega$$

Vi husker at cutoff frekvensen er der hvor reaktansen og motstanden er lik.

$$X_C = R = \frac{1}{2\pi f C}$$

Løser med hensyn på f

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} = \dots = 177 \, \text{Hz}$$

#### 4.4 Dioder

En diode har to poler, en anode og en katode, og kan lede elektrisk strøm kun fra anoden til katoden. Snur vi dioden så vil den fungere som en sperre. Derfor sier man ofte at en diode har en lederetning og en sperreretning.

En diode er i stand til å stoppe ganske mye volt, men om det er koblet for å lede strøm så tåler den ikke så mye.



Ved hjelp av en diode kan vi sende strømmen i den retningen vi vil, og beskytte mot situasjoner som overslag.

En diode som vanligvis består av silisium vil ikke lede strøm før den blir påtrykt med en spenning på ca. 0,7 V. Dette har konsekvenser for resten av komponentene i kretsen, for om vi sender 12V inn over dioden, så vil det være igjen ca. 11,3 V for resten av komponente. Det vil si at vi må huske på at en diode stjeler litt av spenningen fra kretsen.

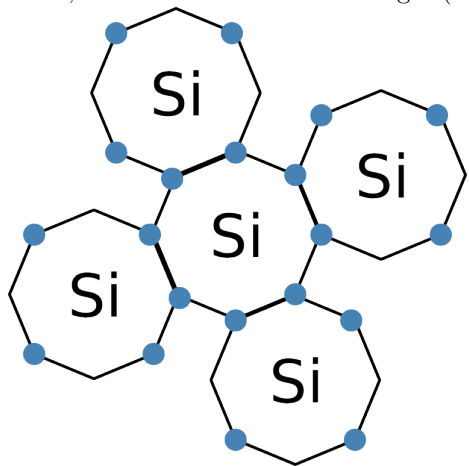
## 5 Uke 6 - Dioder

Kap. 17, s.533-564 Kap. 18, s.574-605

### 5.1 Kovalente bindinger

#### 5.1.1 Diamantstruktur

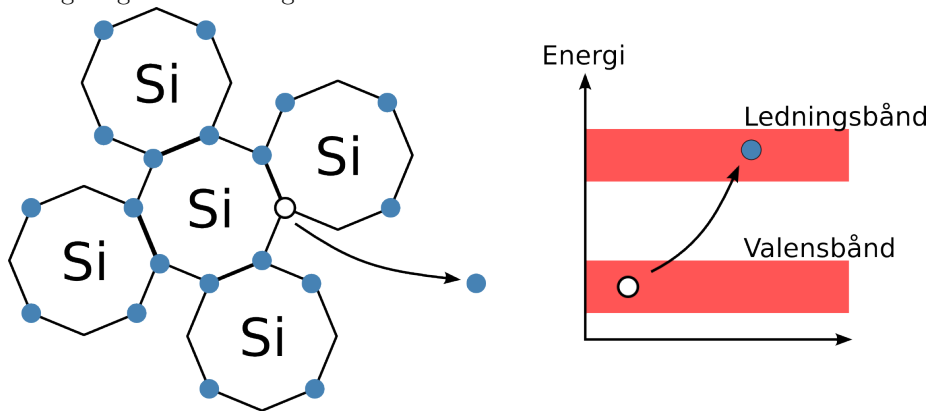
Vi vet allerede at halvledere har 4 elektroner i valensbåndet. Etter oktettregelen ønsker disse atomene å fullføre sitt ytterste skall med 8 elektroner. For å oppnå dette, danner de kovalente bindinger (elektronparbindinger) med andre atomer.



Silisiumatomer danner en krystallstruktur.

#### 5.1.2 Ledning i rene halvledere

Ved tilført energi (varme eller lys) kan elektronene løsnes fra valensbåndet og bevege seg fritt i ledningsbåndet.



Når elektroner faller tilbake igjen, ned i disse hullene, kalles des rekombinasjon.

## 5.2 Doping

Hvordan doping fungerer er beskrevet i tidligere seksjoner.

### 5.2.1 Pentavalent

Pentavalente grunnstoffer (n-type) har 5 valenselektroner. Dette gir et overflødig elektron som er svakt bundet. Husk, stoffet er fremdeles nøytralt! I denne type doping er elektronene majoritetsbærere.

Eksempel:

P - fosfor

As - Arsenikk

Sb - Antimov

Bi - Bismut

### 5.2.2 Trivalent

Trivalente grunnstoffer (p-type) har 3 valenselektroner. Vi får et hull blandt kovalentbindingene. Elektroner er minoritetsbærere.

Eksempel:

B - Bor

Al - Aluminium

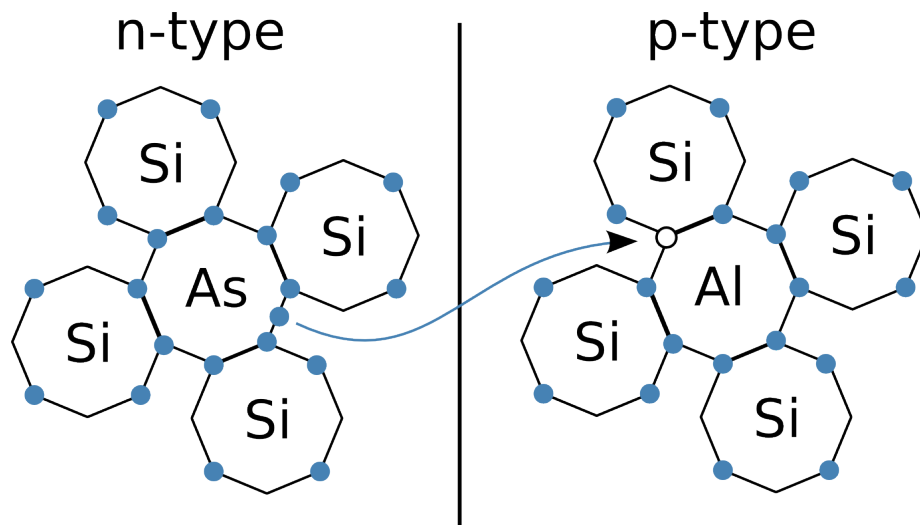
Ga - Gallium

In - Indium

## 5.3 PN-Junction

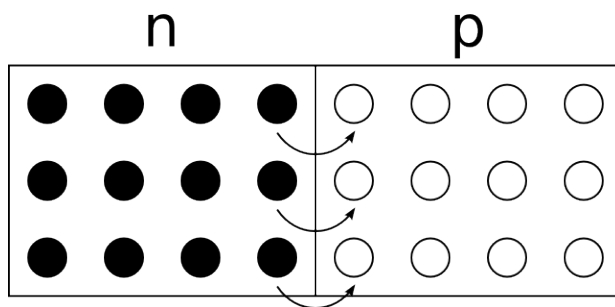
### 5.3.1 Diffusjon

Et n-type stoff ved siden av et p-type stoff, fører til diffusjon. De svakt bundede elektronene i n-type swoopper over til hullene i p-type. Dette kalles *diffusjon*.

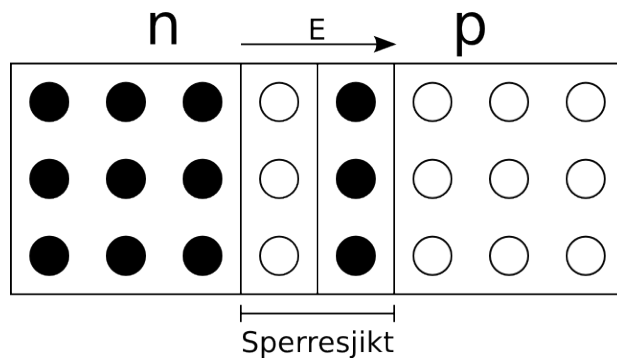


### 5.3.2 Sperresjikt

Hvis man setter sammen n-type og p-type materialer, vil det ved diffusjon trekkes elektroner fra n-type over til p-type.



Elektronene *rekombinerer* med hull på den andre siden, og etterlater seg hull der de kom fra.



Det skapes et sperresjikt (depletion layer) mellom materialene. Dette sjiktet fungerer som en isolator og stopper videre overføring.

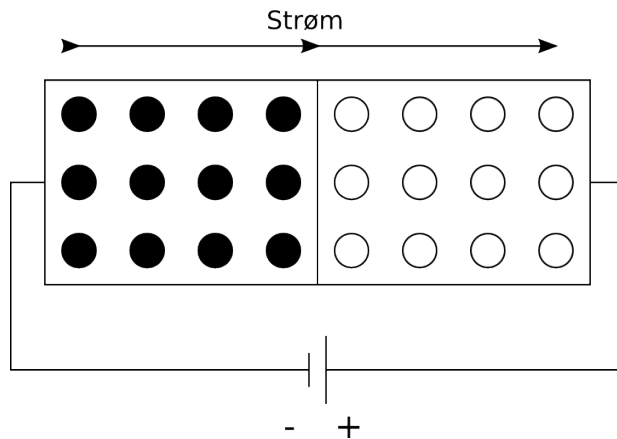
Sperresjiktet har en potensialbarriere på 0.3 - 0.7 Volt, avhengig av materiale.

### 5.3.3 Forward bias

Når man påfører en spenning til en PN-Junction vil elektroner bevege seg mot positiv terminal.

Elektronene på p-side vil forlate sin posisjon og gå mot positiv. Elektroner på n-side vil bevege seg mot positiv og fylle igjen hullene i n-side på veien.

Spenningsjiktet er nå brutt ned og strøm kan gå gjennom.

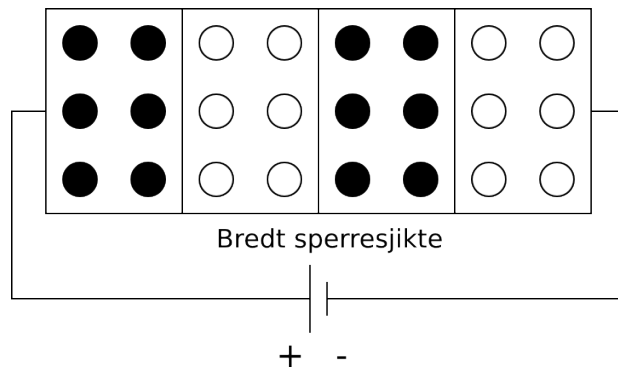


### 5.3.4 Reverse bias

Reverserer man spenningskilden går elektronene andre vei.

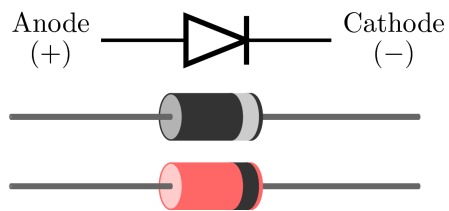
Elektronene på n-side vil gå mot positiv terminal og etterlate seg hull på sin egen side.

Elektroner fra negativ terminal frastøter elektroner på p-side. Disse beveger seg *fra* negativ, intill de møter den positive barrieren på n-side.



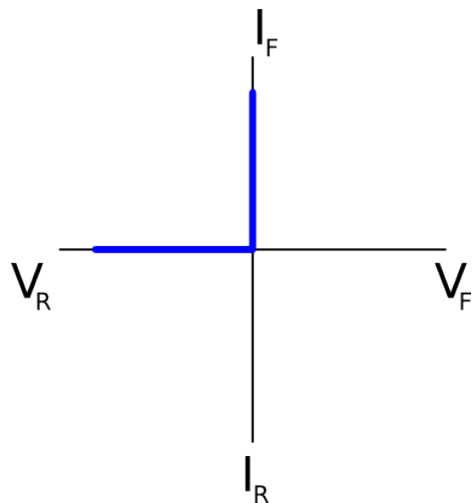
## 5.4 Dioder

En diode er en komponent som bare leder strøm i én retning. De er beskrevet mer i tidligere seksjoner.

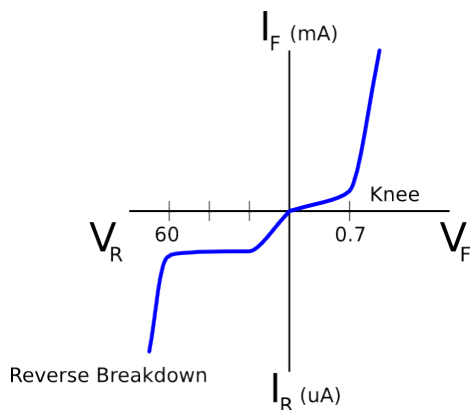


### 5.4.1 Ideell karakteristikk og Bulk resistance

Ideelt sett skulle en diode blokkere strøm i en retning, og slippe igjennom *all* strøm i motsatt retning.



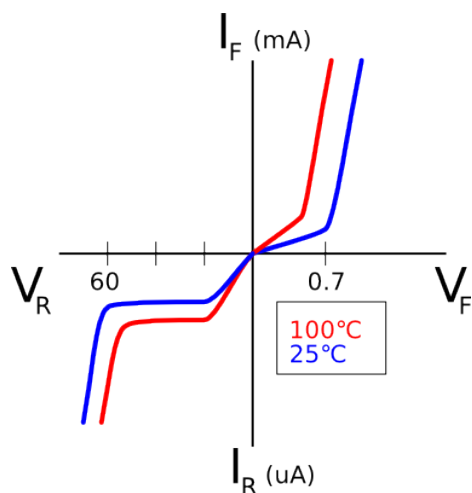
I virkeligheten er det en naturlig motstand (bulk resistance) i enhver diode.



Vi ser at det ved å reversere spenningen vil det gå en svak lekkasjestrøm.

#### 5.4.2 Temperatureffekt

Ved høyere temperatur vil elektroner i halvledermaterialet bli termisk eksitert og gjøre ledningsevnen bedre.

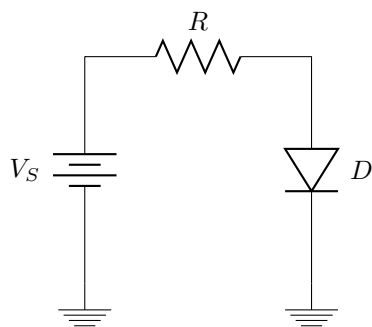


#### 5.4.3 Eksempel

Finn strømmen!

(Husk at dioder har en potensialbarriere på ca 0.7 Volt)

$$V_S = 5 \text{ V} \quad R = 1 \text{ k}\Omega$$



Etter Kirchhoffs lov om spenninger vet vi at

$$V_S = V_R + V_D$$

Videre ser vi at

$$V_R = V_S - V_D = 5 - 0.7 = 4.3 \text{ V}$$

Strømmen er gitt ved

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{4.3}{1 \cdot 10^3} = 4.3 \text{ mA}$$

#### 5.4.4 Ulike typer dioder

##### Zenerdioder

Zenerdioder viker i *Reverse Breakdown* området i diodens virkeområde. Det vil si, når spenningen er revers i forhold til diodens retning.

De brukes som bl.a. spenningsregulator fordi stor forandring i strøm fører til liten forandring i spenning.

##### Varicap

Varicapdiode, variable capacitance diode, brukes som en variabel kondensator. Kan brukes i radioapparater for å stille inn ønsket frekvens.

### 5.5 Anvendelse av dioder

Hva kan man bruke dioder til?

#### 5.5.1 Powersupply

En PSU brukes i alle DC enheter som henter strøm fra AC nettet. F.eks. en datamaskin. Vekselstrømmen fra strømnettet må konverteres til et stabilt DC signal før det kan brukes.

AC signalet kjøres først gjennom en likeretter, for å bli kvitt negativ spenning. Deretter gjennom et elektronisk filter, som fjerner mesteparten av spenningsvariasjonene. Spenningen har nå små variasjoner og kalles ripple. Noen



enheter trenger et finere signal enn dette og signalet kjøres gjennom en spenningsregulator.

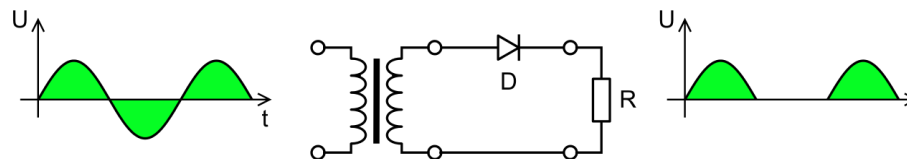


### 5.5.2 Likeretter

I PSUen sitter en likeretter. Her er mer detalj om hvordan den fungerer.

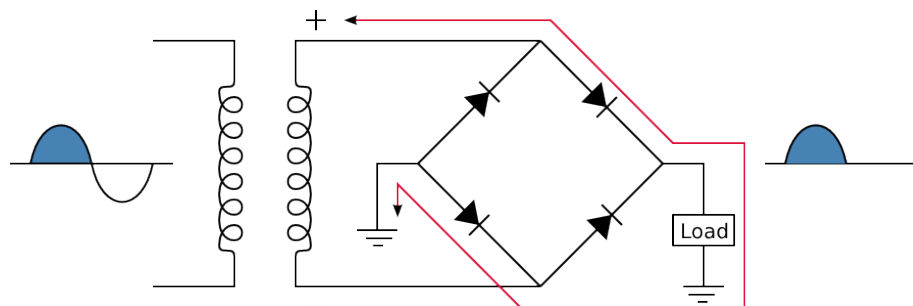
#### Halvbølge

I en halvbølge-likeretter blir enten den positive eller den negative halvdelen av AC signalet sluppet igjennom.

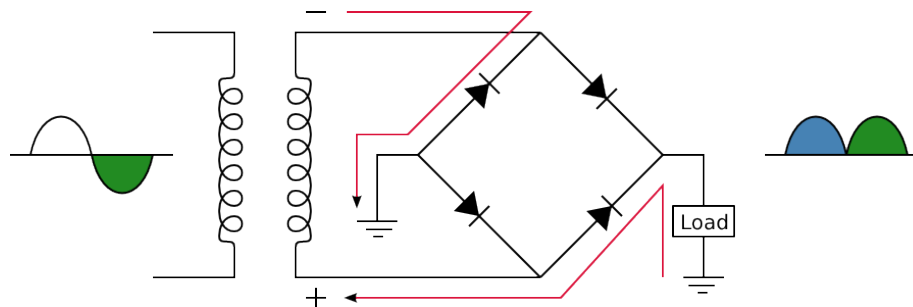


#### Helbølge

Diodene slipper igjennom strøm i bare én retning.



Når spenningen reverseres, slipper de andre diodene strøm igjennom.



## 6 Uke 7 - Bipolar Junction Transistorer (BJT)

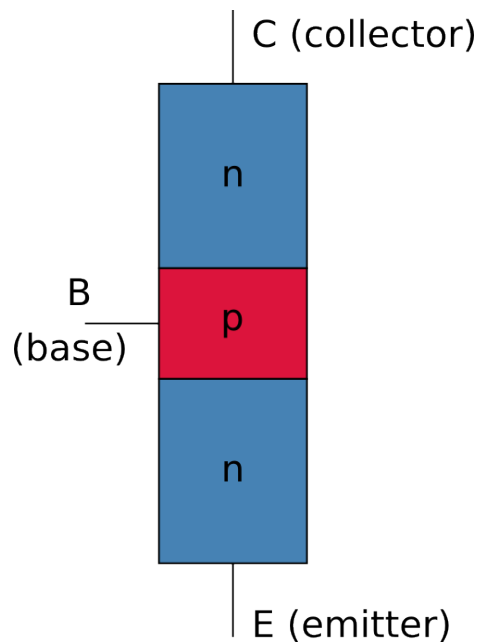
Kap. 19, s. 617-652 + notater på nett

### 6.1 Oppbygning

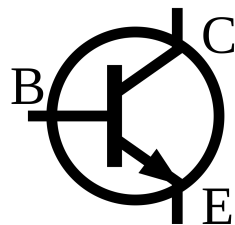
En bipolar junction transistor bruker både elektron- og hullstrøm, og har 2 *junctions* mellom ulikt dopede halvledere. BJTer kommer i 2 typer, NPN og PNP. Vi skal se på den første av dem.

#### Collector, Base og Emitter

En BJT består av 3 deler: collector, base og emitter. Disse er bygget opp av tre dopede halvleder materialer, n-type og p-type. Mellom disse regionene er pn-overganger akkurat som i dioder.

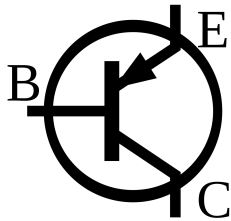


Symbolet for BJTer ser slik ut for npn



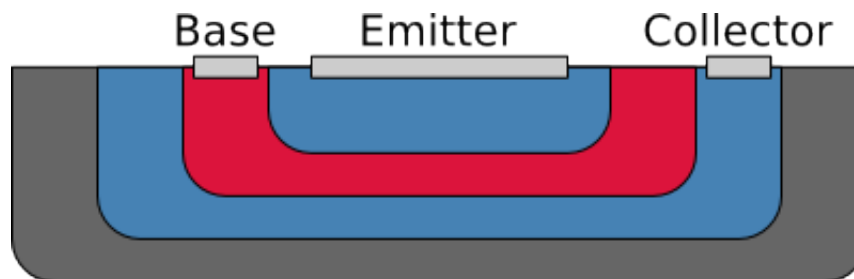
Hvor den lille pilen peker mot det n-dopede materialet.

Tilsvarende for pnp



### Fysisk struktur

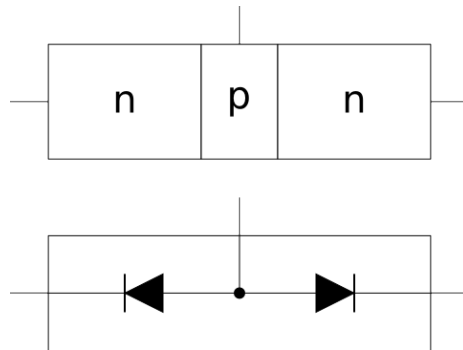
I virkeligheten er en BJT bygget opp lag på lag med en isolator rundt.



## 6.2 Virkemåte

### 6.2.1 Operasjonsmodi

Siden NPN-transistoren består av 2 PN-overganger, kan man anse det som to dioder koblet sammen.



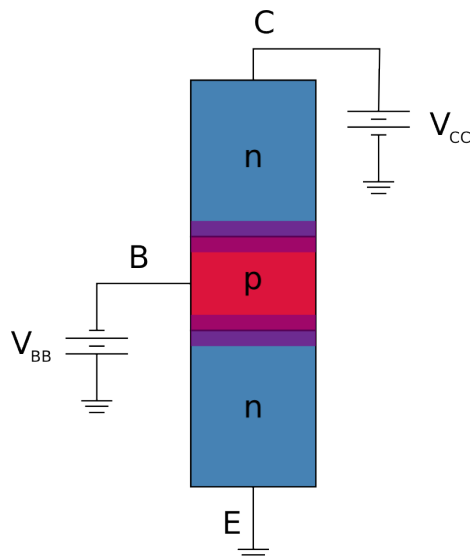
Disse diodene kan kjøres i forskjellig bias (forward, reverse). Avhengig av forholdet mellom spenningen ved diodens collector, base og emitter, fungerer transistoren forskjellig.

De forskjellige kombinasjonene utgjør transistorens operasjonsmodi.

Base-Emitter	Base-Collector	Operasjonsmodi
Reverse	Reverse	Cutoff
Forward	Reverse	Aktiv
Forward	Forward	Metning

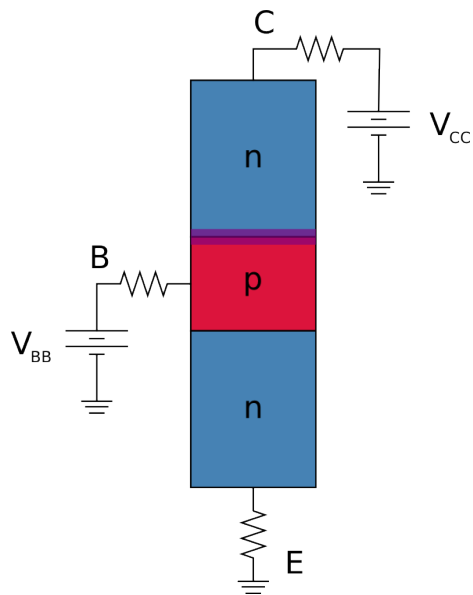
### 6.2.2 Cutoff modus

Både base-emitter junction og collector-base junction er i reverse bias. Vi vet fra hvordan dioder fungerer at sperresjiktet mellom de dopede materialene vokser. I cutoff modus fungerer transistoren som en åpen krets, ingen strøm passerer gjennom.



### 6.2.3 Metning

Når spenningen ved basen er større enn ved collector, fungerer transistoren som en kortslutning. Strøm går fra emitter til collector.



#### 6.2.4 Aktiv

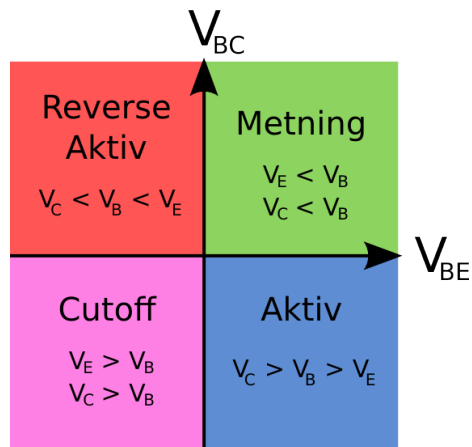
Aktiv modus ser lik ut som ved metning, men med en forskjell. Spenningen ved collector er større enn ved base.

$$V_C > V_B > V_E$$

I aktiv modus er strømmen fra emitter til collector proporsjonal med strømmen til base.

#### 6.2.5 Modi-kvadrant

En annen måte å illustrere transistorens modi på er ved forholdet mellom spenningene.



$V_C$  = spenning fra collector til jord.  
 $V_E$  = spenning fra emitter til jord.  
 $V_B$  = spenning fra base til jord.  
 $V_{BC}$  = spenning fra base til collector.  
 $V_{BE}$  = spenning fra base til emitter.

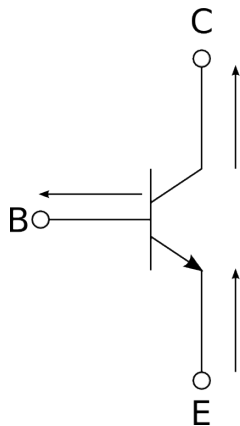
## 6.3 Karakteristikk

### 6.3.1 Strøm

I aktiv modus er strømmen gjennom collector proporsjonal med strømmen gjennom base. Forstørrelsen er gitt ved  $\beta$ .

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Hvor strømforsterkningen  $\beta$  er mellom 50 og 300.



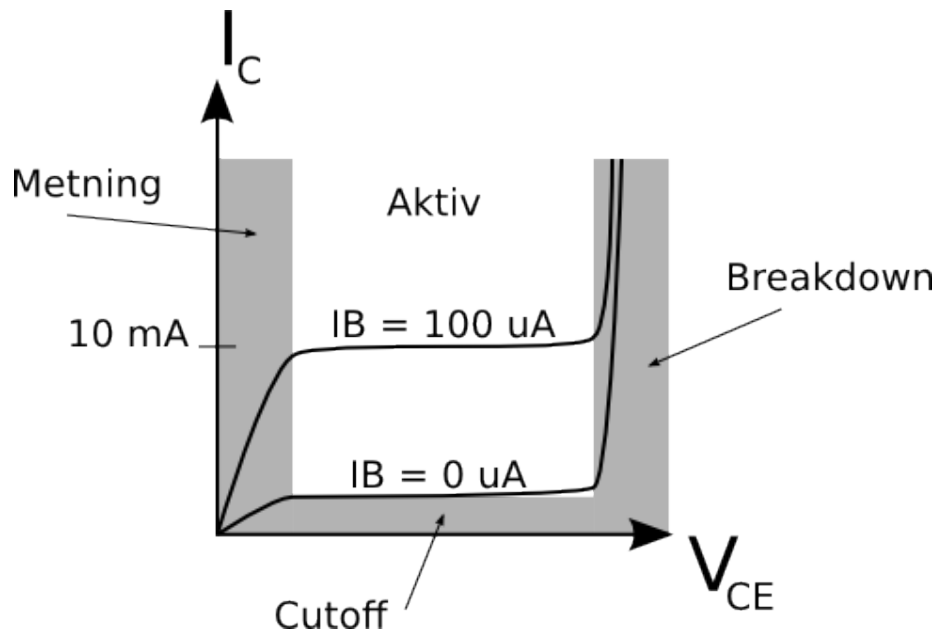
Strømmen gjennom emitter er lik summen av strømmen gjennom base og collector.

$$I_E = I_B + I_C$$

### 6.3.2 Virkeområde

Når spenningen over base-emitter dioden når ca 0.7 V vil det gå strøm fra emitter til base. Fra det punktet vil strømmen  $I_C$  holde seg nesten konstant, selv om  $V_{CE}$  øker.

Når  $V_{CE}$  øker, blir sperresjiktet tykkere. Men hvis spenningen blir for stor får vi et *punch through*.



## 7 Uke 8 - Transistorforsterkere og småsignalmodeller

Kap. 20, s 662 -695

### 7.1 Universal Bias

Her har det vært mye uklarheter.

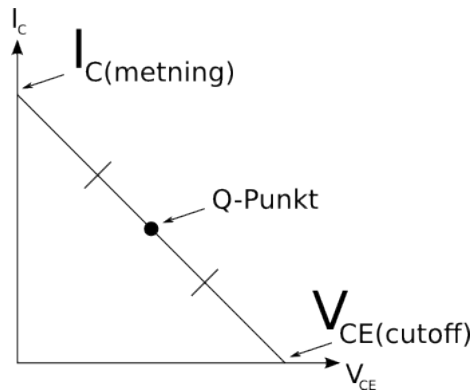
Vi er blitt fortalt at det norske ordet for universal bias er spenningsfordeler. Etter å ha sett på flere kilder ser det ut til at spenningsfordeling er noe som skjer, og må tas hensyn til, under universal bias stabilization.

Formålet med universal bias stabilization, er å få et stabilt Q-punkt (forklart straks). Dette er bra for å få en gjevn  $I_C$  uavhengig av  $\beta$ .

### 7.1.1 Lastlinje

Lastlinjen viser alle *mulige* kombinasjoner av  $I_C$  og  $V_{CE}$ .

For å ta hensyn til temperaturforandringer og andre forstyrrelser, velger vi et punkt midt på denne linja.



$$I_{C(\text{metning})} = \frac{V_{RC}}{R_C}$$

$$V_{CE(\text{cutoff})} = V_{cc}$$

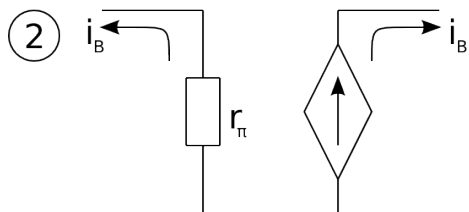
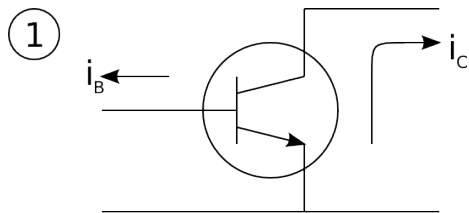
Man bruker dette når man velger hvor store motstandere man vil ha.

$$R_C = \frac{V_{CE}}{I_C}$$

## 7.2 Småsignalmodellen

Småsignalmodellen brukes til å se hvordan en transistor reagerer på små signaler ved å dele transistoren i to deler. En dynamisk motstand  $r_\pi$  mellom base-emitter. Og en strømgenerator mellom collector-emitter. Strømgeneratorens strøm bestemmes av transistorens transkonduktans  $g_m$  (steilhet).





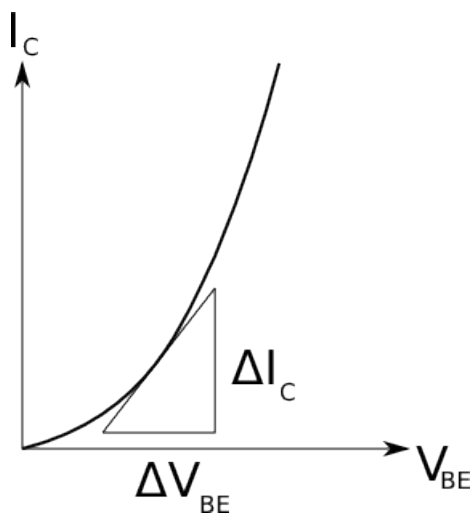
$$i_C = \beta \cdot i_B$$

$$i_C = g_m \cdot V_{BE}$$

### 7.2.1 Transkonduktans - Steilhet

Steilhet  $g_m$ , eller bratthet, er hvor bratt strømmen stiger. Med andre ord tangenten.  $g_m$  benevnes i Siemens.

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$$



Strømmen  $I_C$  er gitt ved

$$I_C = \alpha \cdot I_{ES} \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$

Vi finner  $g_m$  ved å derivere  $I_C$ .

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} = \alpha \cdot I_{ES} \cdot e^{V_{BE}/V_T} \cdot \frac{1}{V_T} = I_C \cdot \frac{1}{V_T} = \frac{I_C}{V_T}$$

Hvor  $V_T = 25mV$ .

### 7.2.2 Dynamisk inngangsresistans

Mellom base-emitter ”er det” en dynamisk motstand  $r_\pi$ . Den dynamiske motstanden  $r_\pi$  er gitt ved

$$r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

#### Et annet uttrykk

Vi vet at  $I_C = \beta \cdot I_B$ . Stokket om og derivert gir det

$$\Delta I_B = \frac{\Delta I_C}{\beta}$$

Vi vet også at  $g_m = \Delta I_C / \Delta V_{BE}$ . Stokket om gir det

$$\Delta I_C = g_m \cdot \Delta V_{BE}$$

Slår vi dem sammen

$$\Delta I_B = \frac{g_m \cdot \Delta V_{BE}}{\beta}$$

Dette kan vi bruke i formelen for dynamisk inngangsresistans.

$$r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}$$

## 7.3 Spenningsforsterkning

Det finnes forskjellige typer forsterkning: strømforsterkning, spenningsforsterkning, effektforsterkning.

Vi skal se på spenningsforsterkning  $A_V$ . A står for Amplify og V står for Voltage.  $A_V$  er gitt ved

$$A_V = \frac{V_{ut}}{V_{inn}} = \frac{\Delta V_{RC}}{\Delta V_{BE}} = g_m \cdot R_C$$

**Utleddning**

Vi vet at steilhet  $g_m = \Delta I_C / \Delta V_{BE}$ . Stokket om

$$\Delta I_C = g_m \cdot V_{BE}$$

Fra ohms lov har vi også

$$\Delta V_{RC} = \Delta I_C \cdot R_C$$

Slår vi dem sammen får vi

$$\Delta V_{RC} = g_m \cdot V_{BE} \cdot R_C$$

Dette kan vi bruke i formelen for  $A_V$

$$A_V = \frac{V_{ut}}{V_{inn}} = \frac{\Delta V_{RC}}{\Delta V_{BE}} = \frac{g_m \cdot V_{BE} \cdot R_C}{\Delta V_{BE}} = g_m \cdot R_C$$

- 8 Uke 9
- 9 Uke 10
- 10 Uke 11
- 11 Uke 12
- 12 Uke 13
- 13 Uke 14
- 14 Uke 15
- 15 Uke 16
- 16 Uke 17
- 17 Uke 18
- 18 Uke 19
- 19 Uke 20
- 20 Uke 21
- 21 Uke 22
- 22 Uke 23