

# Elektronikk med prosjektoppgaver

## FYS 1210 - vår 2014

### Viktig informasjon

#### Husk:

- 1. februar** er siste frist for -
  - betaling av semesteravgift
  - semesterregistrering
  - melding til eksamen
- å søke om tilrettelegging ved eksamen

# Elektronikk med prosjektoppgaver

## FYS 1210 - 2014

*Foreleser : Torfinn Lindem*

Forelesninger :	Tirsdag 10:15 – 12:00 Onsdag 15:15 – 16:00 ( etter behov)
Regneøvelser:	Torsdag 12:15 – 14:00 (?)
Lab.øvelser :	8 stk. + kurs i myklodding Mandag - torsdag
Prosjektoppgave:	2 - 3 uker

# FYS 1210 Forelesningsplan våren 2014

## Uke 3

Introduksjon - Ledere, isolatorer og halvledere. Ohms lov. Serie- og parallellkopling av motstander, Kirchhoff, Superposisjon og Thevenin Kap. 1-7

## Uke 4 .

Kondensatorer og spoler. RC og RL-kretser. Filter. Litt fysikalsk elektronikk, Halvledere, doping, Kap 9 – 17 ( Lab - myklodding )

## Uke 5

Doping p-n overgang, dioder, diodekoplinger, Lysdioder og Zenerdioder. Bipolar transistor. Transistorforsterker. Kap 17 – 19 ( Lab 1 – PSpice simulering )

## Uke 6 & 7

Transistorforsterkere. Arbeidspunkt. Stabilisering. Kap 20 ( Lab 2 målinger )

## Uke 8 & 9

Unipolare komponenter. Felteffekt transistor FET. - JFET, MOS & CMOS. Kap 21 ( Lab 3 Dioder – Lab 4 bipolar transistor )

Uke 9 Diode transistor logikk, DTL og transistor transistor logikk, TTL. Eget kompendium om digitale kretser ( litt fra KAP. 24 ) ( Lab 5 DTL xx74LS )

Uke 10 Digitale kretsfamilier Kombinatoriske digitale kretser. Binær addisjon,  
Lab Digitale kretser

Uke 11 Operasjonsforsterkere - Egenskaper , Analog computing KAP 22 +  
forelesningsnotater

Uke 12 Frekvensfiltre og tilbakekopling (Feedback) KAP. 23

Uke 13 Miller-effekt - Frekvensrespons –

Uke 14 Oscillatorer / piezoelektrisk effekt / Signalbehandling / Oppsamlingsuke lab

Uke 15 Datakonvertering DA/AD / Radio AM/FM

Uke 16-17 Påskeferie

Uke 18 Multivibratorer / Schmitt-trigger KAP 24 / Sensorer & måleteknikk / Prosjekt

Uke 19 Spenningsforsyninger KAP 25 / Prosjekt

Uke 20 Repetisjon / Prosjekt      Uke 20 Repetisjon / Prosjekt

Uke 22 Repetisjon /      Uke 23 Eksamen (6 juni kl.0900)

The background image shows two individuals in cleanroom attire. The person on the left is wearing a grey cleanroom suit with a blue hood and a white face mask. The person on the right is wearing a white cleanroom suit with a white hood and a white face mask. They are both looking at a purple circular object held by the person in the grey suit. The setting appears to be a cleanroom or laboratory, with various pieces of equipment and machinery visible in the background.

**FYS1210**

**Applied Physics and  
Electrical Engineering**

Torfinn Lindem Fysisk inst. UiO

**FYS1210 åpner for en Master i  
Elektronikk Instrumentering og sensorteknologi  
( FAM / ELDAT )  
eller Fysikalsk elektronikk – avh. kursvalg**

# Medisinsk instrumentering / Bioimpedans

Ørjan Martinsen

Fokuserer på to hovedretninger

- Grunnleggende teori bioimpedans
- Kliniske anvendelser

Samarbeidet med Teorigruppa,  
Biofysikk og Medisinsk fysikk

Utgir *Journal of Electrical  
Bioimpedance* ,



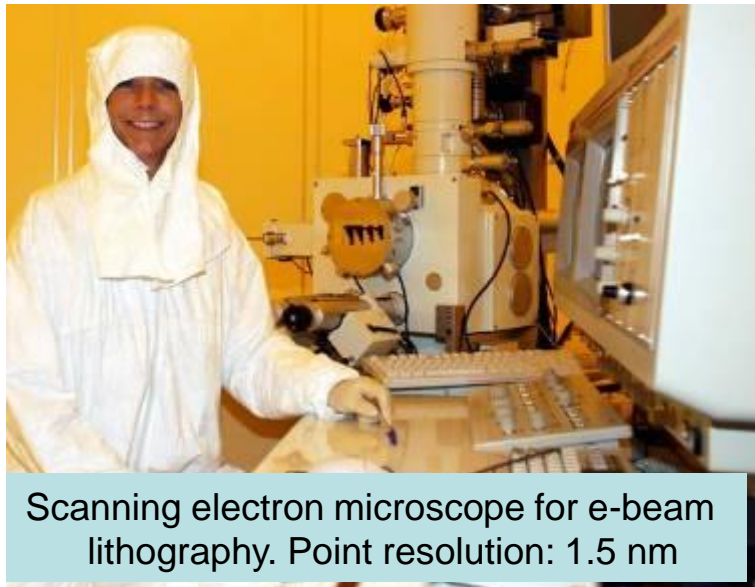
Griseforsøk på Intervensjonsenteret

Har ansvar for Masterprogrammet *Medisinsk Teknologi*.  
Et samarbeidet med HiOA innenfor studieprogrammet ELDAT



# Micro- and Nanotechnology Laboratory – MiNaLab – 5000 m<sup>2</sup>, Opened 2004

*Bengt Svenson*



## Secondary Ion Mass Spectrometry - SIMS

SIMS is a powerful method for characterizing solid materials. It has a very high detection sensitivity (ppb for certain elements) and dynamic range  $>10^5$ . A depth resolution of  $<2$  nm in depth profiling can be obtained.

SIMS is usually used in 3 measurement modes:  
Depth profile, Mass spectrum and Ion image

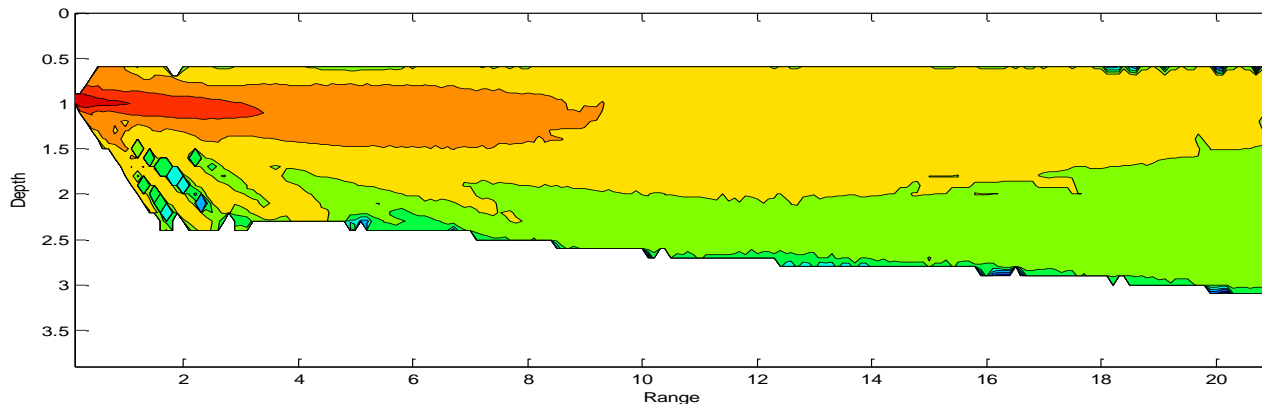


# Instrumentering / sensorteknologi

## Hydroakustikk / Sub Sea Technology

*Torfinn Lindem og Helge Balk*

- Instrumentering og signalbehandling
- Kartlegge lydfelt på grunt vann.
- Simulering av lydfelt / signalbehandling
- Sonarsystemer for overvåkning av elver/innsjøer/merder (NINA / IMR)





# STAR - Space Technology and Research

*Torfinn Lindem,  
Ketil Røed,  
J.K.Bekkeng*

*Space weather  
GPS*

**Instrumentering :**  
CubeSTAR 2014 /15  
ICI-5 des. 2015 ?



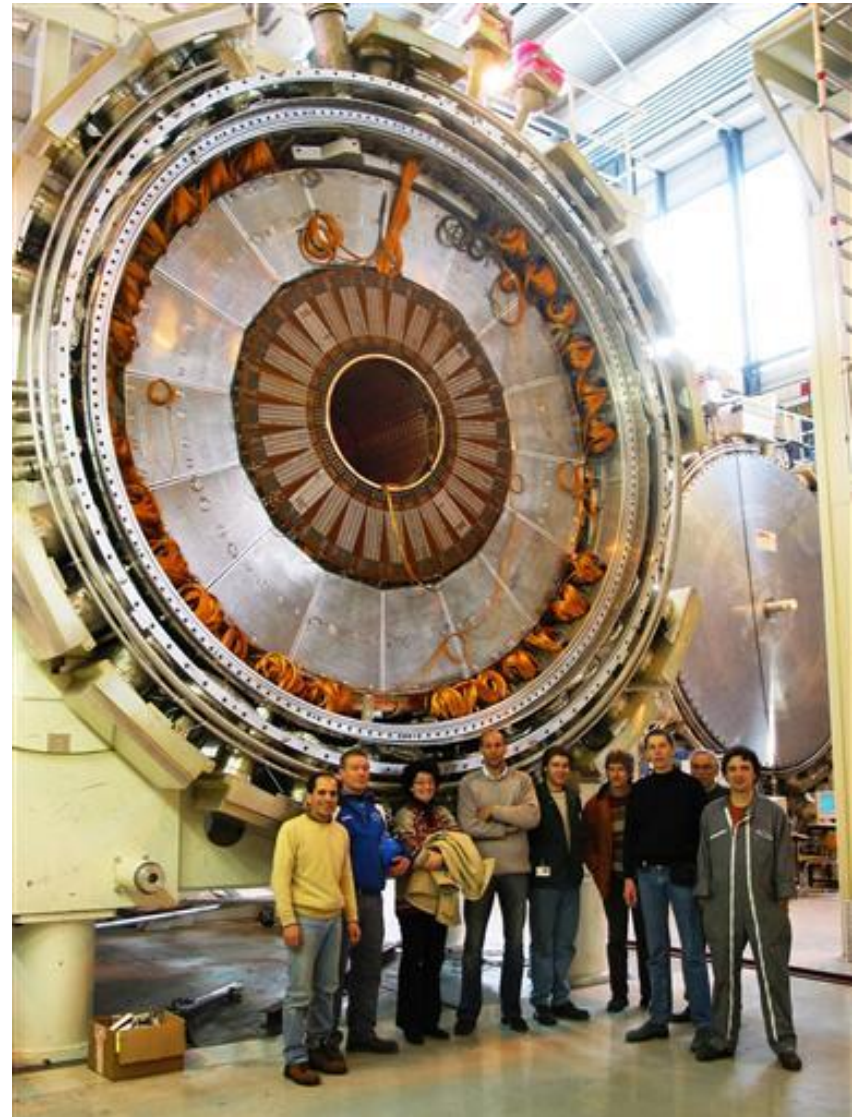
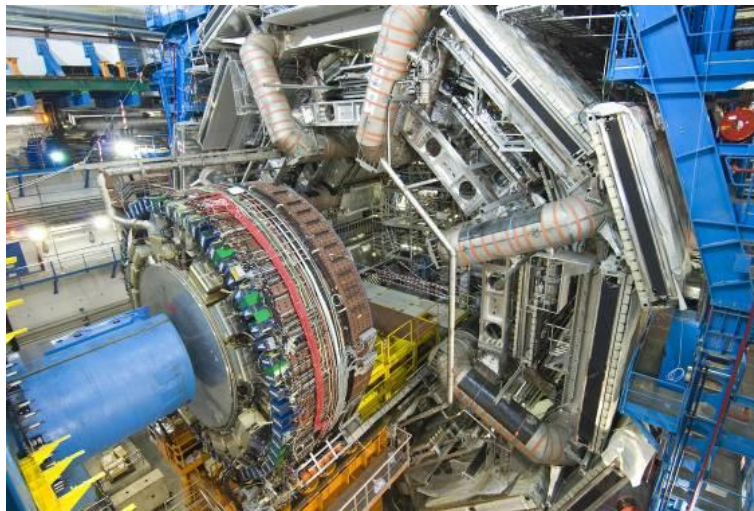
Plasmalab  
ESA –  
ESTEC  
The European  
Space Research  
and Technology  
Centre





CERN – detektorer og raske datasystemer er utviklet og produsert av medlemmer / studenter / verksteder ved Fysisk institutt

*Ketil Røed*



# Elektronikk med prosjektoppgaver

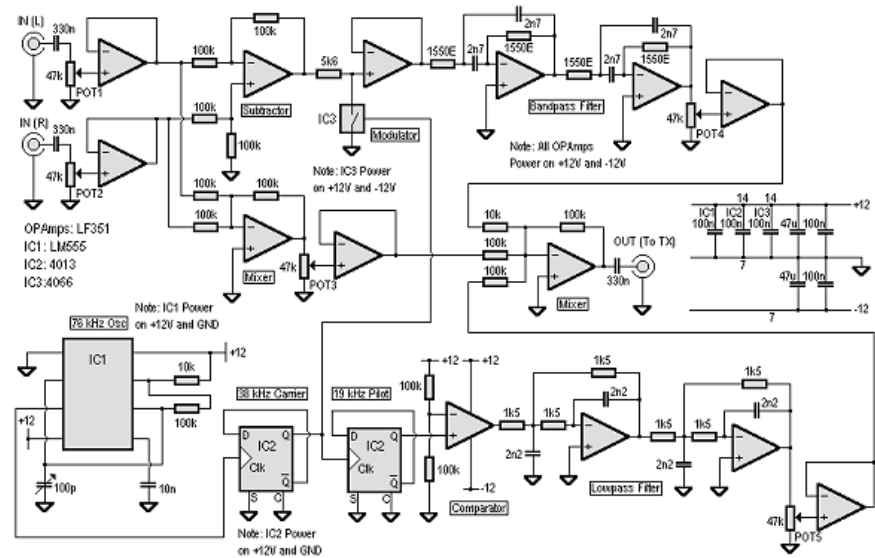
## FYS 1210

- Passive komponenter
- Kretselektronikk
- Fysikalsk elektronikk
- Elektriske ledere/ halvledere
- Doping
- Dioder - lysdioder
- Bipolare transistorer
- Unipolare komponenter FET, MOS, CMOS

# Elektronikk med prosjektoppgaver

## FYS 1210

- Digitale kretsfamilier
- Operasjonsforsterkere
- Tilbakekopling/feedback
- Analog computing
- Frekvensrespons
- Bodeplot
- Digital til analog D/A
- Analog til digital A/D
- Signalgeneratorer



# Elektronikk med prosjektoppgaver

## FYS 1210

- Signalbehandling
- Elektrisk støy – HiFi – TIM - klirr
- Radiokommunikasjon / superheterodyneradio
- GSM \* mobiltelefoni
- Antenner
- Kraftforsyning
- Måleteknikk
- Sensorer

\* Globalt System for Mobilkommunikasjon

Den nye læreplanen i fysikk (2008) for videregående skole -

## **Fysikk og teknologi - Elektronikk**

*Mål for opplæringen er at eleven skal kunne*

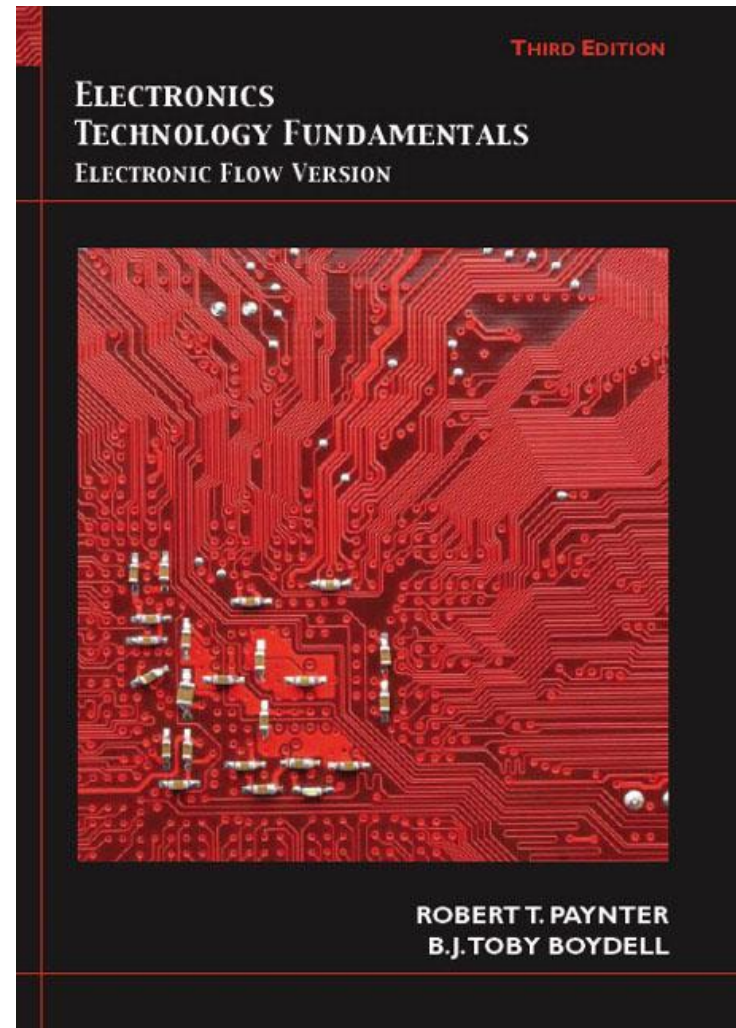
1. gjøre rede for forskjellen mellom ledere, halvledere og isolatorer ut fra dagens atommodell, og forklare doping av halvleder.
2. sammenligne oppbygningen og forklare virkemåten til en diode og en transistor, og gi eksempler på bruken av dem.
3. gjøre rede for virkemåten til lysdetektorer i digital fotografering eller digital video.
4. gjøre rede for hvordan moderne sensorer karakteriseres, og hvordan sensorenes egenskaper setter begrensninger for målinger.



# Elektronikk med prosjektoppgaver

## FYS 1210

- Lærebok  
Electronics  
Technology  
Fundamentals  
Robert Paynter &  
B.J.Toby Boydell
- Gammel bok  
fra FYS108/204  
Microelectronics  
Jacob Millman &  
Arvin Grable



# Fysikk og teknologi – Elektronikk FYS 1210

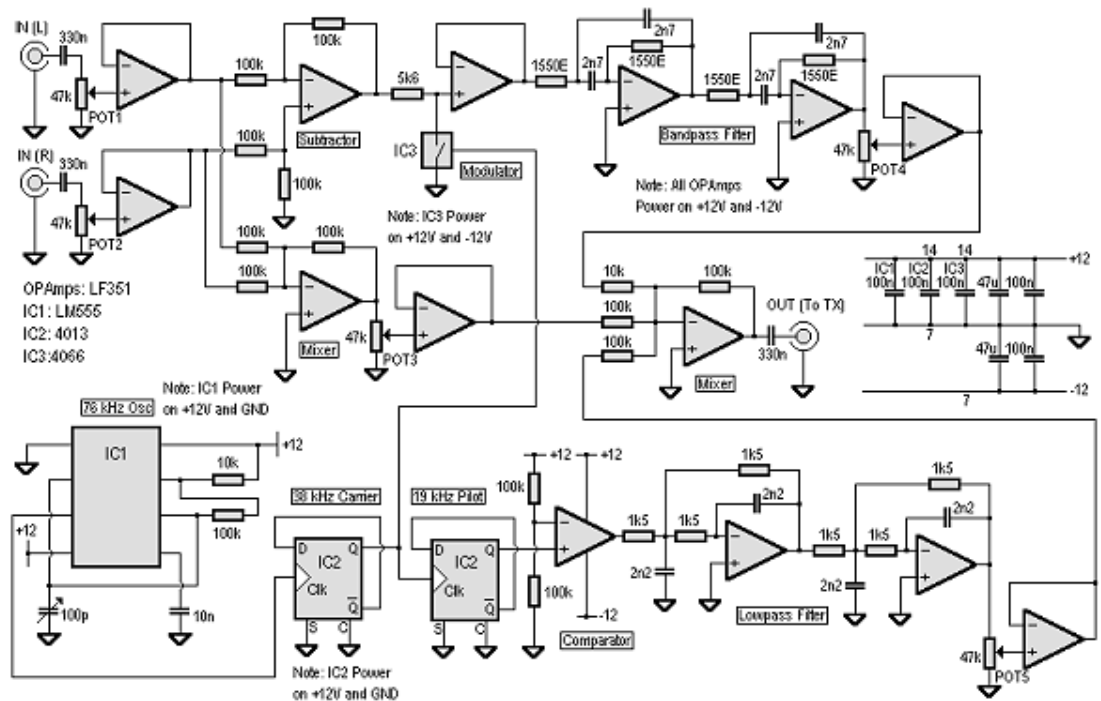
Skal vi forstå moderne elektronikk - må vi først beherske elementær lineær kretsteknikk - og litt om passive komponenter - motstander, kondensatorer og spoler

1 ) Det betyr - beherske Ohms lov -  $U = R \cdot I$  og  $P = U \cdot I = U^2 / R$

2 ) Kirchhof "lover" om distribusjon av strømmer og spenninger i en krets

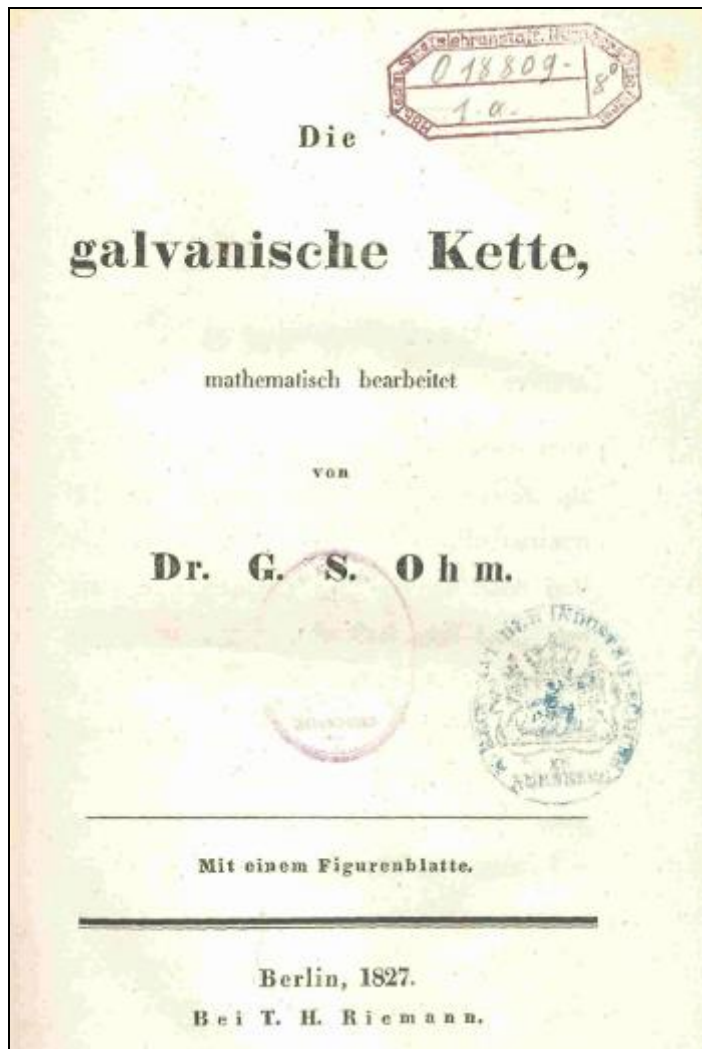
3 ) Thevenins teorem

4 ) Superposisjonsprinsippet



Skjema viser en FM-stereo sender – etter FYS1210 skal du kjenne alle disse kretselementene

# Kretsteknikk – en gammel historie



Det meste av grunnlaget for den elektrisk kretsteknikk ble beskrevet av den tyske fysiker George Simon Ohm i 1827 – **Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet** - En matematisk beskrivelse av den elektriske krets ( Kette = lenke, kjede )

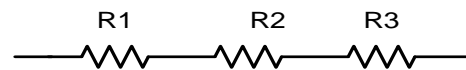
Ohms lov er en observasjon som viser at motstanden R har en **konstant** verdi for metaller - hvis temperaturen er konstant.)

$$R = \frac{U}{I} \quad U = R \cdot I \quad I = \frac{U}{R}$$

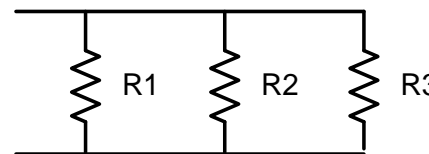
$U$  = Den elektriske spenningen i Volt

$R$  = Den elektriske motstanden i Ohm

$I$  = Den elektriske strømmen i Ampere



$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

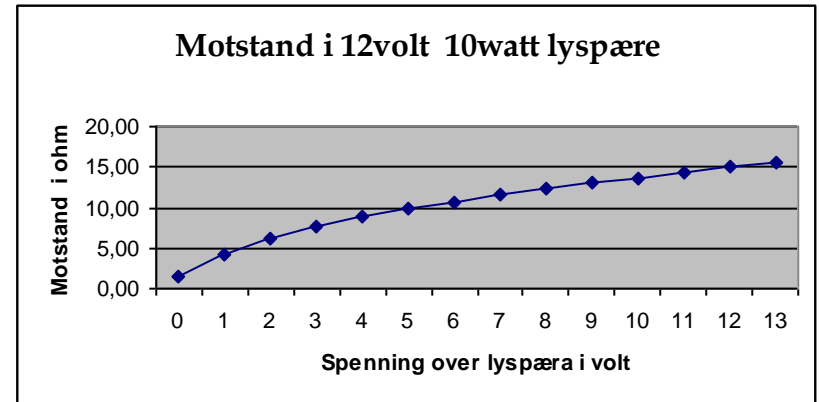
Fysiker George Simon Ohm ( 1787-1854 )

# Kretsteknikk – en gammel historie

Ohms observasjoner viste at resistansen  $R$  er konstant for metaller – bare hvis temperaturen er konstant.

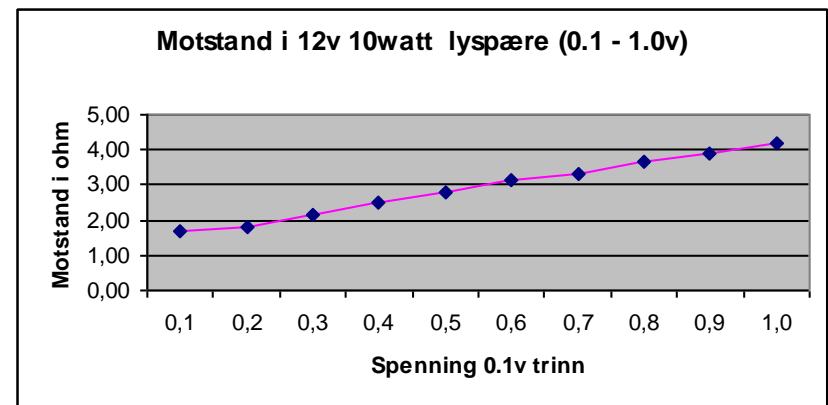
## Positiv temperaturkoeffisient

- Resistansen øker med temperaturen
- Eksempel:  
De fleste ledere - metaller



## Negativ temperaturkoeffisient

- Resistansen avtar med temperaturen
- Eksempel: De fleste halvledere og isolatorer



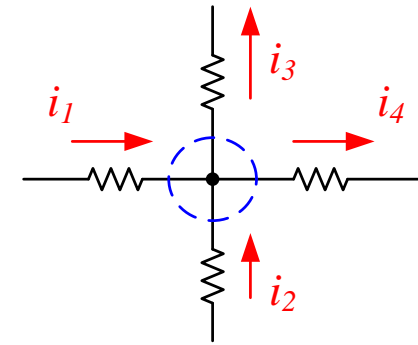
# Kretsteknikk – (Gustav Robert Kirchhoff – 1824 -1887)

## Kirchhoff's "lov" om strømmer

Summen av strømmene rundt et knutepunkt er null.

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

Strøm inn = strøm ut  $i_1 + i_2 = i_3 + i_4$

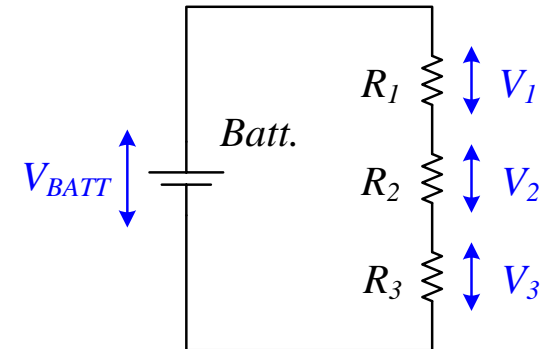


## Kirchhoff's "lov" om spenninger

Summen av alle spenninger i en lukket sløyfe – summert i en retning er null.

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

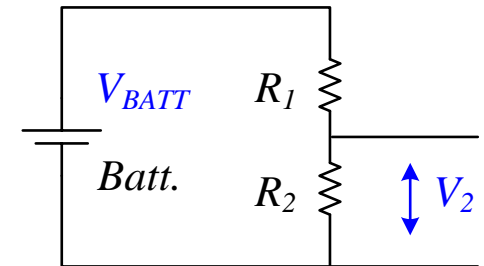
$$V_{BATT} + V_1 + V_2 + V_3 = 0$$



## Spenningsdeler

Spenningen fra en spenningsdeler bestemmes av størrelsesforholdet mellom motstandene  $R_1$  og  $R_2$

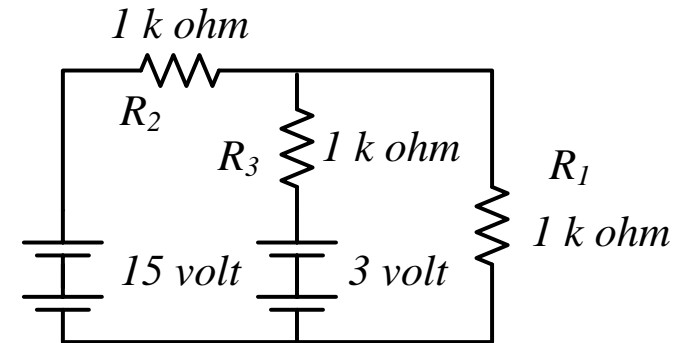
$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{BATT}$$



# Kretsteknikk –

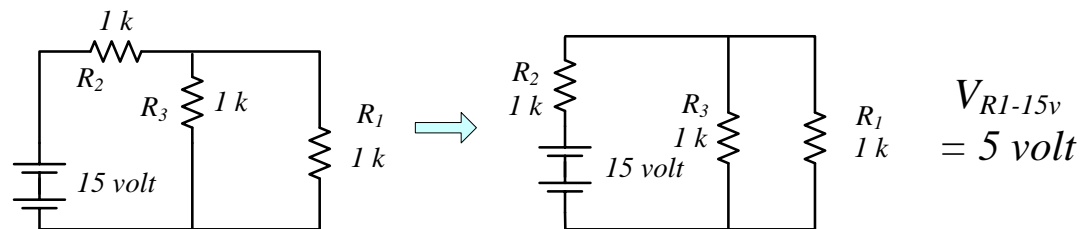
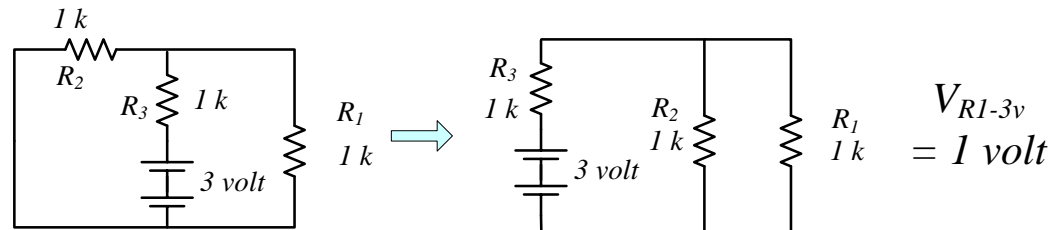
## Superposisjonsprinsippet

Skal du beregne spenningen over en enkel komponent - inne i et komplekst nettverk – Summer bidragene fra hver enkelt spenningskilde.



Hvor stor er spenningen over  $R_1$  ?

1. Kortslutt først batteriet på 15 volt - beregn bidraget fra 3 volt batteri.
2. Kortslutt batteriet på 3 volt – beregn bidraget fra 15 volt batteri
3. Summer bidragene -



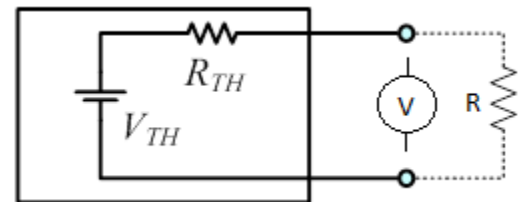
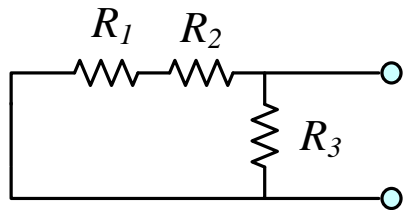
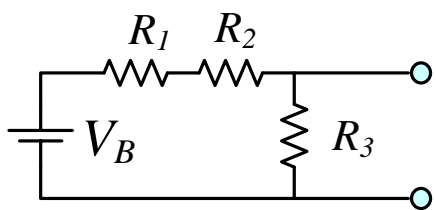
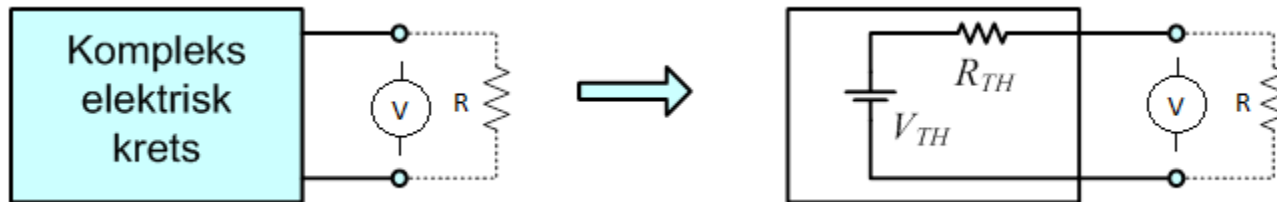
$$V_{R1} = 1 \text{ v} + 5 \text{ v} = 6 \text{ volt}$$



# Kretsteknikk – ( Helmholtz 1853 – Léon Charles Thévenin 1883 )

## Thévenin's teorem

*Ethvert lineært, topolet nettverk virker utad som om det bestod av en spenningsgenerator med en elektromotorisk spenning lik tomgangsspenningen over nettverkets klemmer, - og med en indremotstand lik den vi ser inn i nettverket (fra klemmene) når alle indre spenningskilder i nettverket er kortsluttet og alle indre strømkilder er brutt ...*



$$V_{TH} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_B$$

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

*Edward Lawry Norton - «Nortons teorem» - 1926  
 – en utvidelse av Thévenins teorem – strømkilde || motstand*

# Kretsteknikk – Spenningskilder - batterier

**Ideell spenningskilde** – eller perfekt spenningskilde.

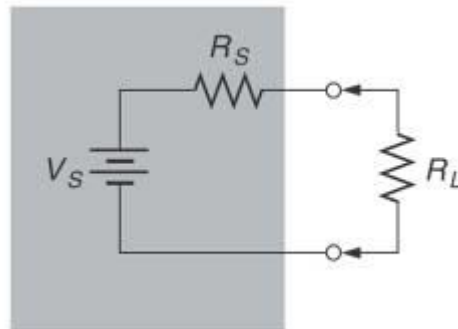
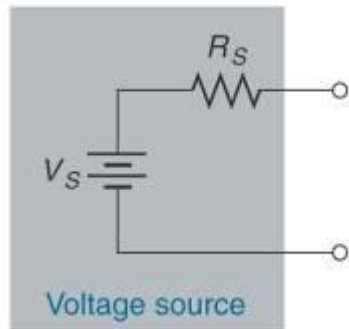
Leverer en utgangsspenning som er konstant –  
uansett hvor mye strøm den leverer..

**Reell spenningskilde** – utgangsspenningen vil variere med strømmen.

Alle spenningskilder har en indre motstand  $R_S$

( Batterier, antenner, signalgeneratorer og nerveceller

– alle har en indre motstand som vil påvirke strømmen ut fra kilden )



Ny batteriteknologi LiFePO4  
 $R_i \approx 0,008 \Omega$  (nanoteknologi)  
ca. 3000W/Kg -120A 10 sek.  
Brukt i CubeSTAR satellitten

**Lommelyktbatteri** –  $R_i \approx 1 - 10 \Omega$

**Bilbatteri** –  $R_i \approx 0,01 - 0,004$



Buckeye Bullet Electric Streamliner using A123 batteries sets world land speed record of 307.66 MPH

# Kretsteknikk –

## Maksimal effektoverføring

Lastmotstanden må tilpasses signalkildens indre motstand. Vi får maksimal effektoverføring når lastmotstanden  $R_L =$  kildens indre motstand  $R_I$

Dette har stor betydning når vi skal overføre signaler f.eks fra en TV-antenne til et fjernsynsapparat (dekoderboks) – kabel – 50, 60 ev. 240 ohm

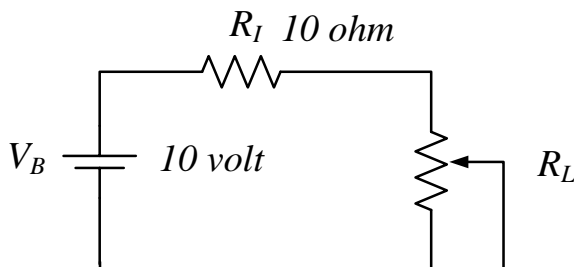
$$P = \frac{U^2}{R}$$

Et regneeksempel med Matlab/Excel –

10 volt batteri med indre motstand

$R_I = 10$  ohm – finn verdien til  $R_L$  som gir

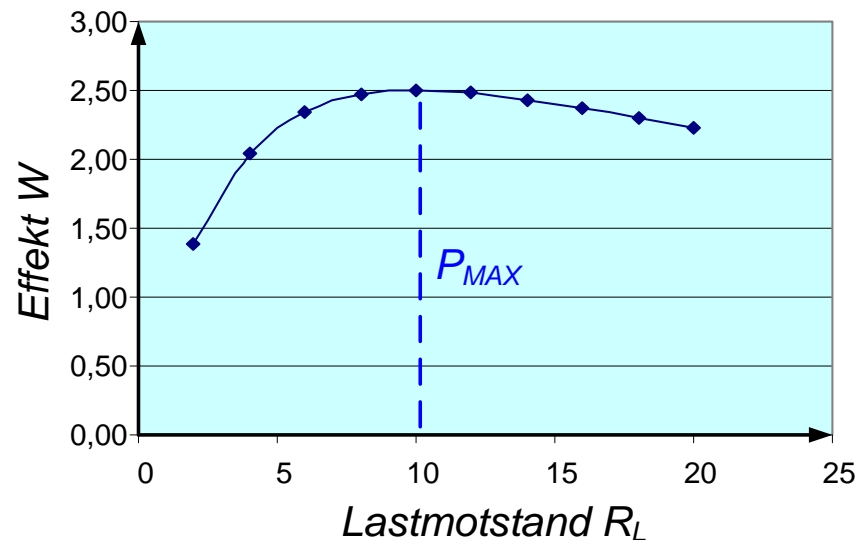
maksimal effektoverføring  $P_{RL\ MAX}$



$$P_{RL} = \frac{(U_{RL})^2}{R_L}$$

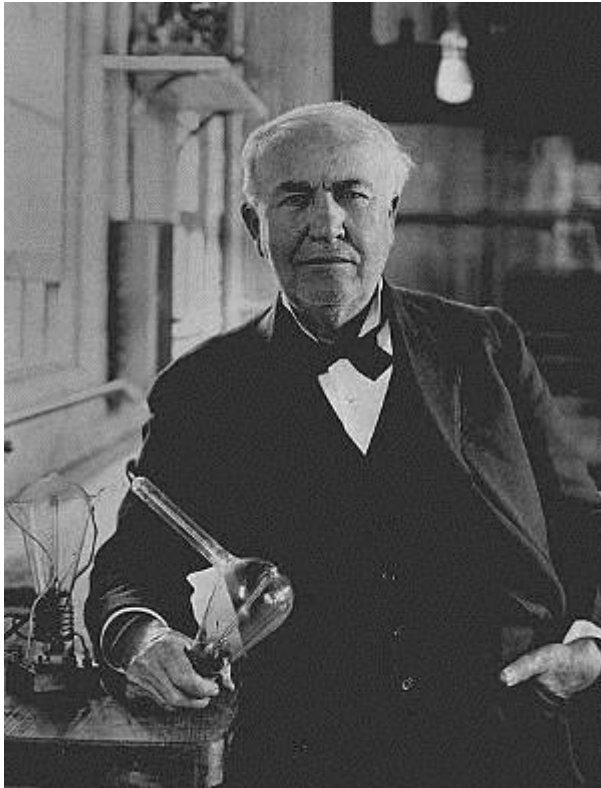
$$U_{RL} = \frac{R_L}{R_L + R_I} \cdot V_B$$

Avgitt effekt over lastmotstanden  $R_L$



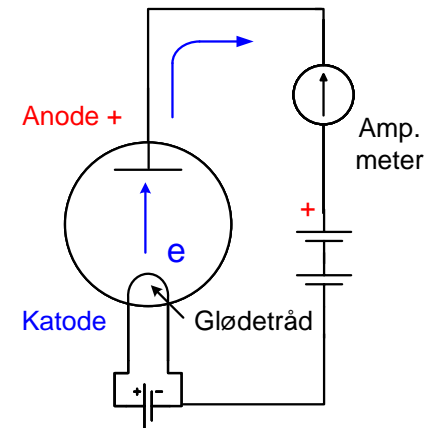
# Hvem "fant" elektronet ? – ( UiO har innført obligatorisk lab-journal )

Innovasjonsåret 2013



13. februar 1880 - Thomas A. Edison arbeider med forbedringer av lyspæra. ( .. vi har labjournalen . !. )  
Problem : Glasset i lyspæra blir svart pga. kullpartikler som sendes ut fra glødetråden

*Edison : --- if the carbon particles are charged, - it should be possible to draw them to a separate electrode, - away from the glass. -- Furthermore, - it should be possible to measure the electric current to this electrode. - February 13, 1880*



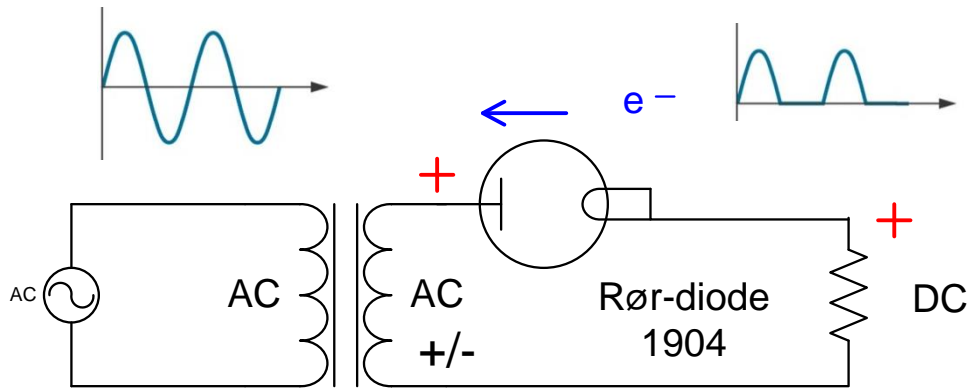
Lampeglasset forble svart – men Edison observerer : når elektroden (anoden) er tilført positiv spenning går det en strøm gjennom den ytre kretsen. Det betyr , - en negativt ladet partikkel må bevege seg fra glødetråden til Anoden.

Fenomenet får navnet "Edison effekt" og blir patentert av Edison i 1883– men man fant ingen direkte anvendelser hvor man kunne bruke dette kommersielt i 1880 – 85. Patentet blir lagt tilside og "glemt" ...

( Elektronet blir først «påvist» av J.J. Thomson i 1897 )

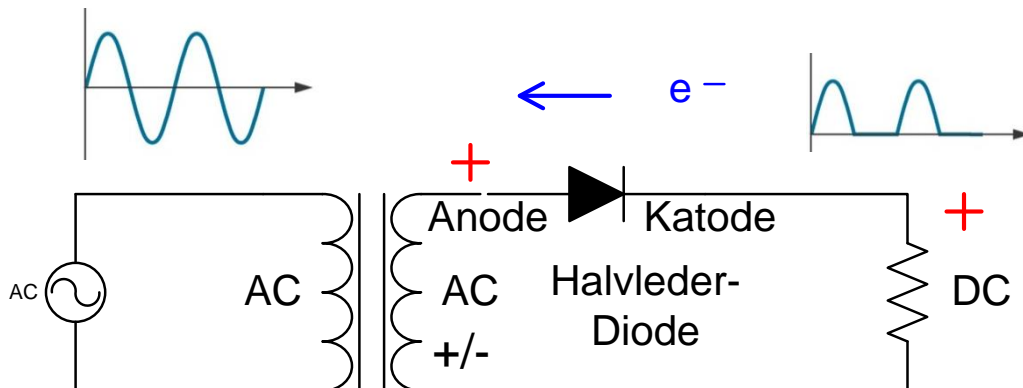
# Elektronikk – teknologitviking i 100 år

20 år etter Edison - i 1904 - J.A. Fleming patenterer sin "rectifying valve".



En vekselspanning tilføres Anoden – på Katoden gjenfinnes bare de positive komponentene i signalet

I dag erstattes Flemings "rectifying valve" med en *halvleder-diode*

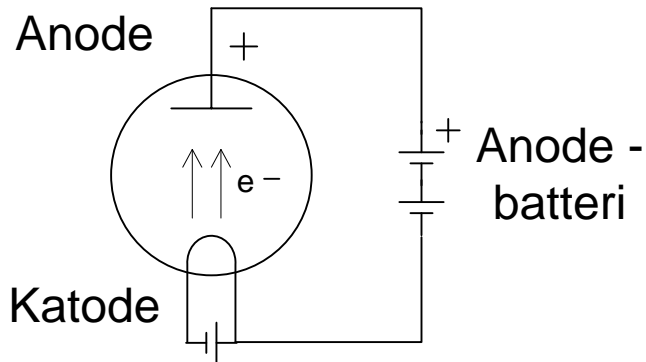


Dioden slipper igjennom de positive halvperiodene av signalet



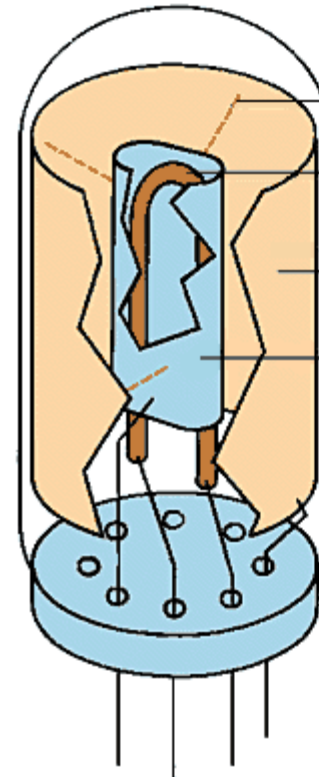
# Elektronikk – teknologitviking i 100 år

Diode



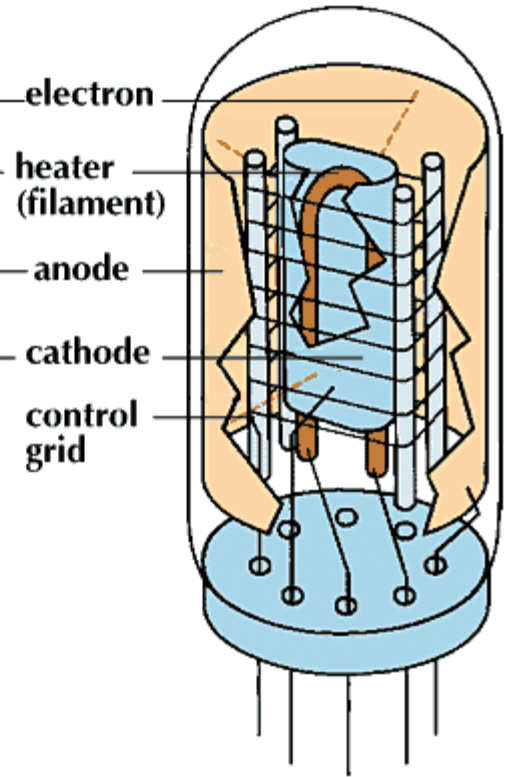
Fleming 1905

DIODE

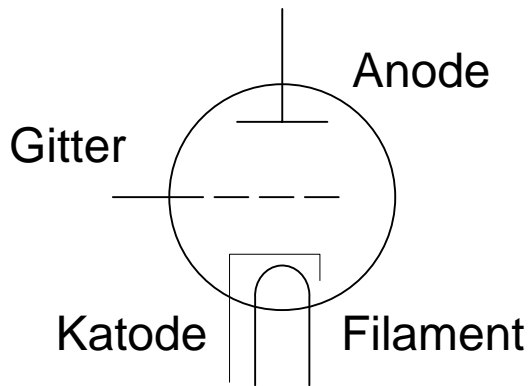


Lee de Forest 1907 / 08

TRIODE



Triode



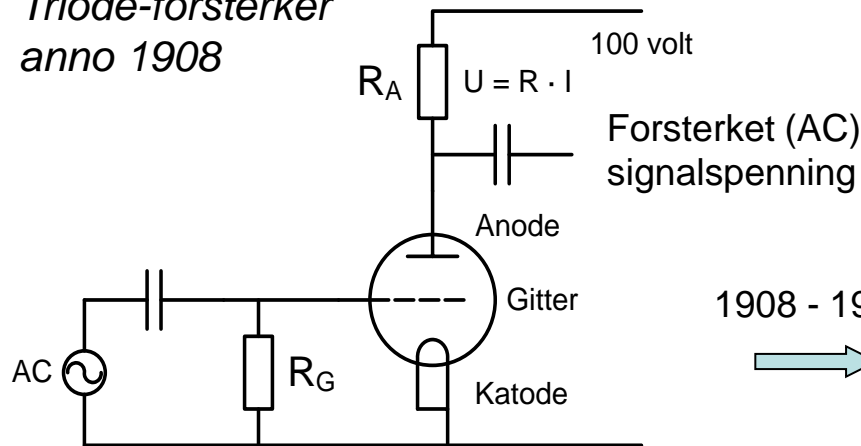
# Elektronikk – teknolog utvikling i 100 år

1908 ( TRIODEN, Lee de Forest )

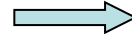
– fram til ca 1945 utvikles det meste av det vi i dag kaller ”moderne” kretsteknikk og signalbehandling

1948 ( TRANSISTOREN, William Shockley, Walter Brattein - Nobellprisen 1956 )

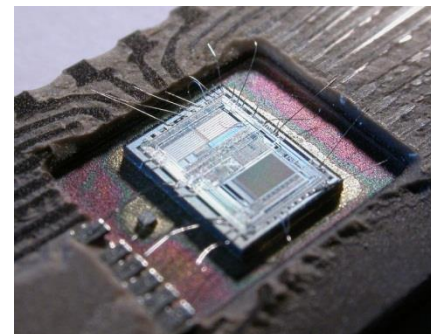
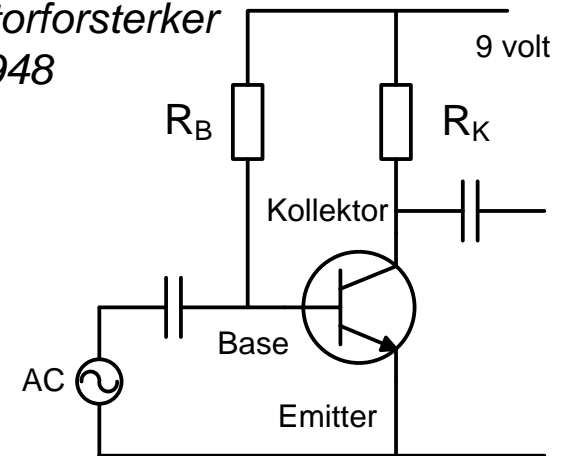
Triode-forsterker  
anno 1908



1908 - 1948



Transistorforsterker  
anno 1948



1958 – 1978  
Integrerte kretser  
– «Jack Kilby» - TI



1978 -2008 ---  
mikroelektronikk

En liten signalspenning (AC) sendes inn på gitter – som styrer en stor strøm gjennom røret til Anoden.

Strømmen gir en forsterket signalspenning over anodemotstanden  $R_A$  .

$U = R \cdot I$  (Ohms lov)

# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

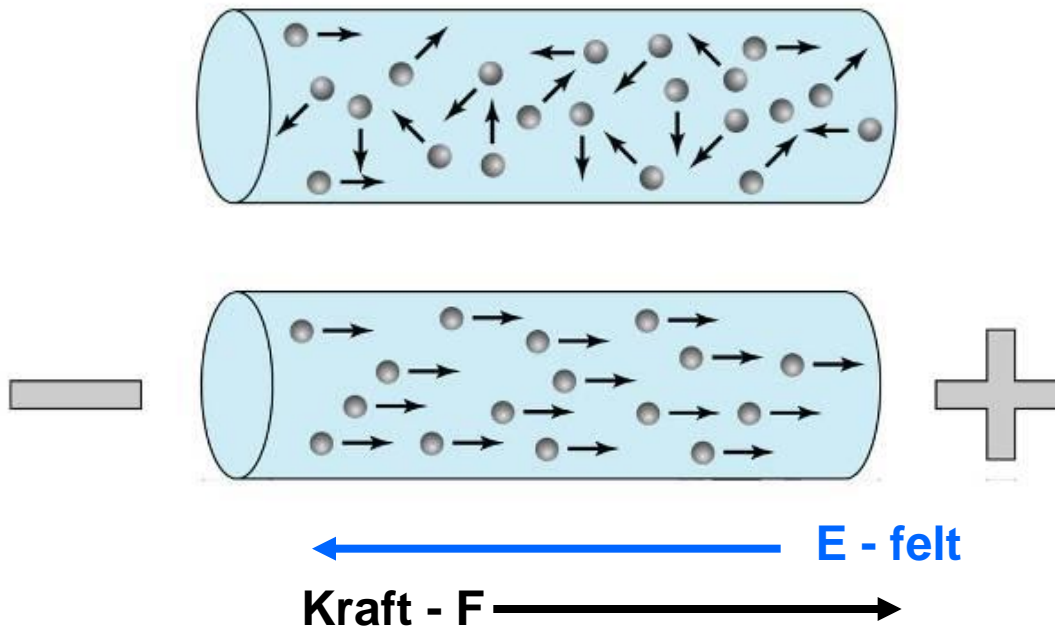
- elektriske ledere – halvledere – isolatorer

Elektrisk strøm (current)

- en rettet strøm av ladningsbærere gjennom en ledning

$$1 \text{ Ampere} = 6,28 \cdot 10^{18} \text{ elektroner pr. sekund}$$

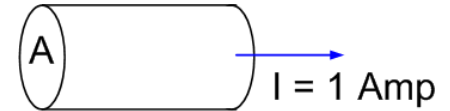
- Termisk energi (varme) frigjør elektroner i en elektrisk leder
- Elektronbevegelsen er tilfeldig – inntil vi utsetter lederen for et elektrisk felt



## Elektronikk – litt fysikalsk elektronikk - DC / AC

DC – direct current – strømtetthet – drifhastighet for elektroner

1 Amp går gjennom en aluminiumsledning med diameter 1,0 mm. Hva blir drifhastigheten til elektronene ?



*Aluminium - elektrontetthet*  $n_e = 6,0 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$

*1 Ampere = 6,28 · 10<sup>18</sup> elektroner pr. sekund*

$$J = \text{Strømtetthet} = \frac{I}{A} = n_e e \cdot v_d \quad n_e e = \text{antall elektroner} \quad v_d = \text{drifhastigheten}$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{\pi \cdot r^2} = \frac{1.0 \text{ Amp}}{\pi \cdot (0,0005 \text{ m})^2} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ A} / \text{m}^2$$

$$v_d = \frac{J}{n_e e} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \text{s} = 1,3 \text{ mm} / \text{s}$$

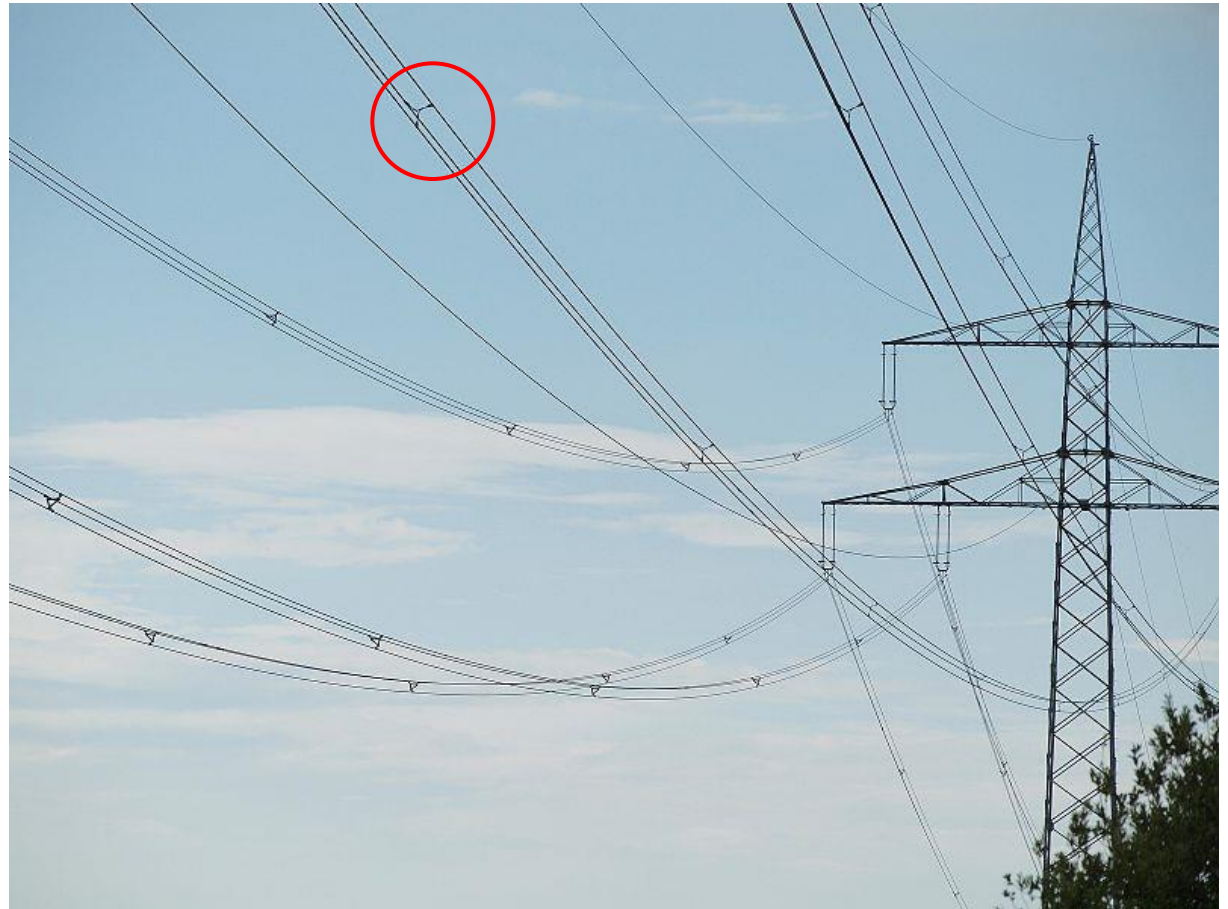
Elektronene har en drifhastighet på 1,3 mm / s

# Elektronikk – litt fysikalsk elektronikk

AC – alternating current

Kraftoverføring hvor man «bundler» sammen 3 ledere.

Hvorfor ikke en tykk ledning på hver av fasene ?



## Elektronikk – litt fysikalsk elektronikk - skin effect

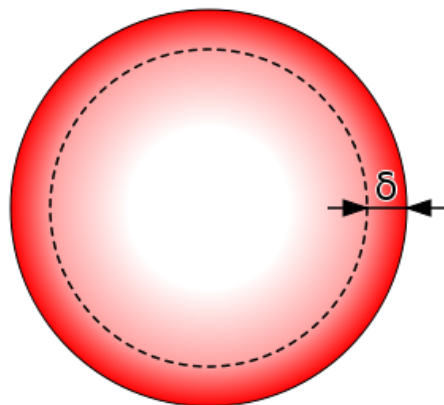
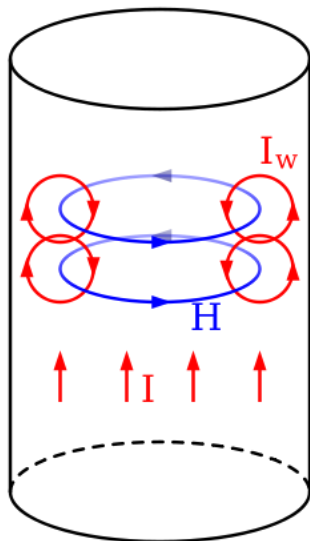


*skin depth  $\delta$  50Hz  
8 -10 mm*

3 ledninger koples sammen i kraftledninger som en leder – fordi :

En enkelt leder bestående av samme mengde metall / km vil gi langt større tap pga. "skin effect". Denne effekten får AC-strømmer til å presses ut mot lederens overflate. Den effektive delen av lederen som leder strøm er gitt av *skin depth  $\delta$* . Denne egenskapen skyldes sirkulerende '*eddy currents*' som blir generert av det skiftende H-feltet inne i lederen.

Strømtettheten  $J$  i en AC-leder avtar eksponentielt fra sin maksimale verdi  $J_s$  på overflaten



$$J = J_s e^{-d/\delta}$$

Hvor *skinndybden*  $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$

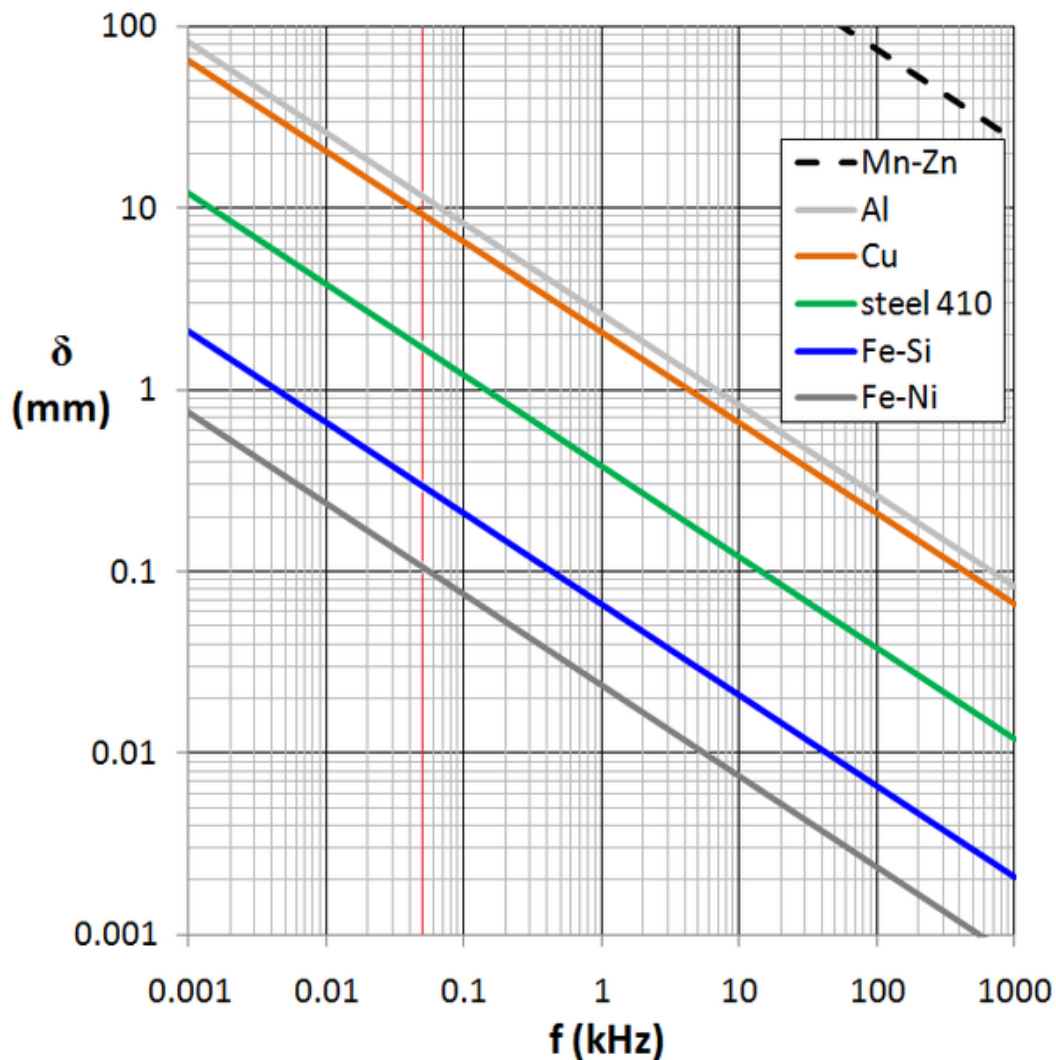
$\rho$  = lederens resistivitet

$\omega$  = strømmens vinkelfrekvens

$\mu$  = absolutt magnetisk permeabilitet



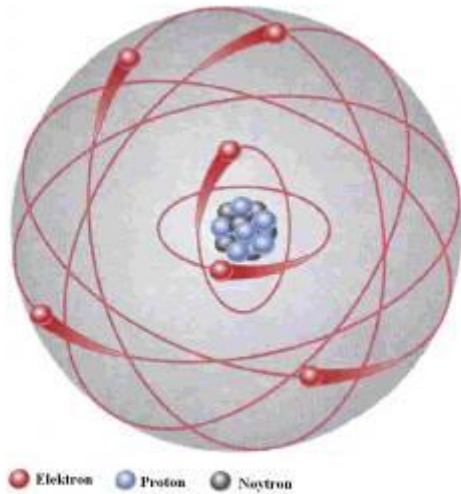
## Elektronikk – litt fysikalsk elektronikk - skin effect



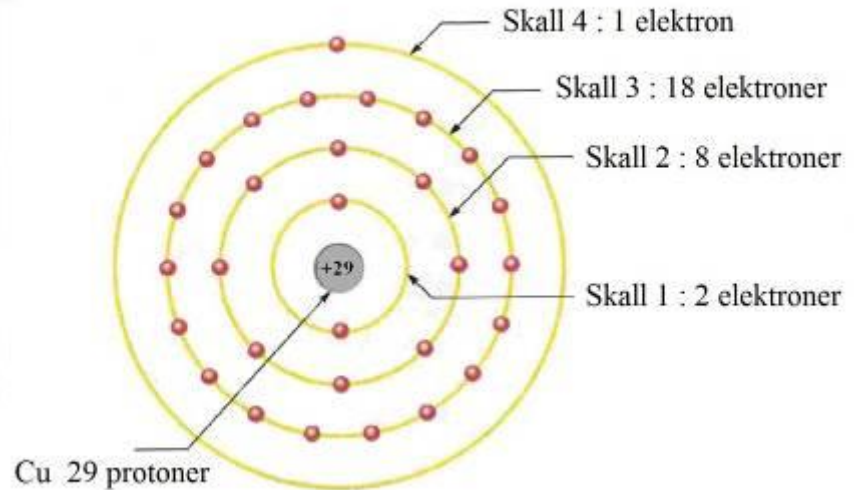
Ved høye frekvenser kan skinn-  
dybden bli meget liten. For å  
redusere AC-motstanden kan man  
bruke vevd koppetråd – ‘*litz wire*’  
Da det indre av en tykk leder ikke  
deltar i strømtransporten bruker  
man ofte hule ledere (rør) når man  
overføre store effekter AC.  
Hvis man i tillegg *forsølver*  
overflaten av lederen kan man få  
fult utnyttet den gode  
konduktiviteten til sølv.  
Denne teknikk brukes spesielt  
ved VHF og mikrobølger – hvor  
skinndybden er meget liten. Da  
kreves et megt tynnt lag av  
sølv/gull.

# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

- elektriske ledere – halvledere – isolatorer



Niels Bohrs klassiske atommodell fra 1913.

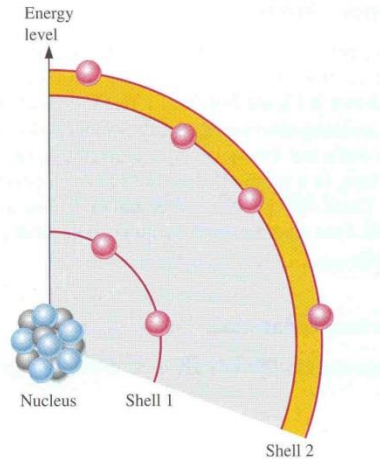


Kobberelektronene legger seg i "energi-skall"

Det enslige elektronet i ytterste "skall" er svakt bunnet til kjernen.  
Ved "normal" temperatur finner vi ca 1 fritt elektron pr. atom  
 $10^{23}$  elektroner /  $\text{cm}^3$

# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

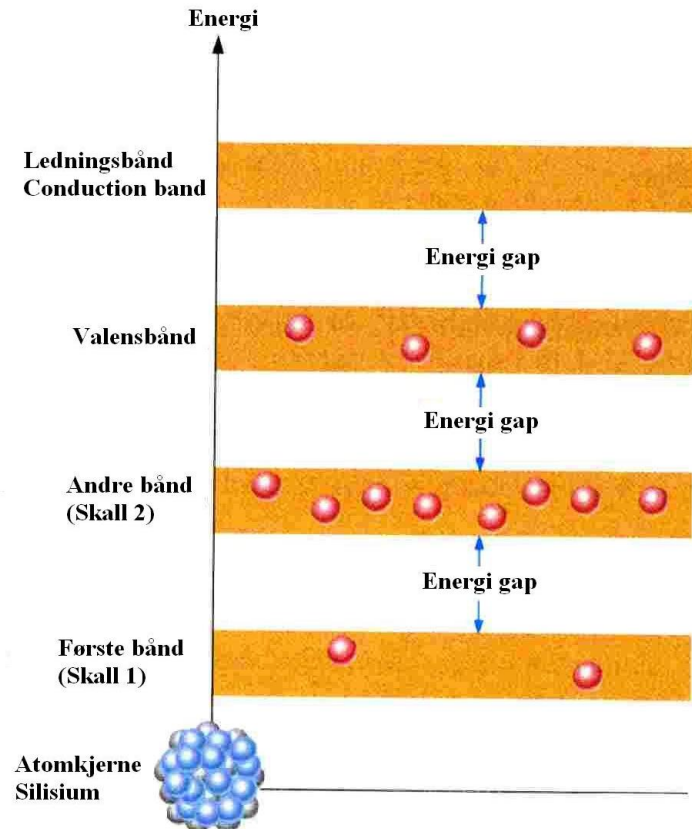
## Elektriske ledere - metaller



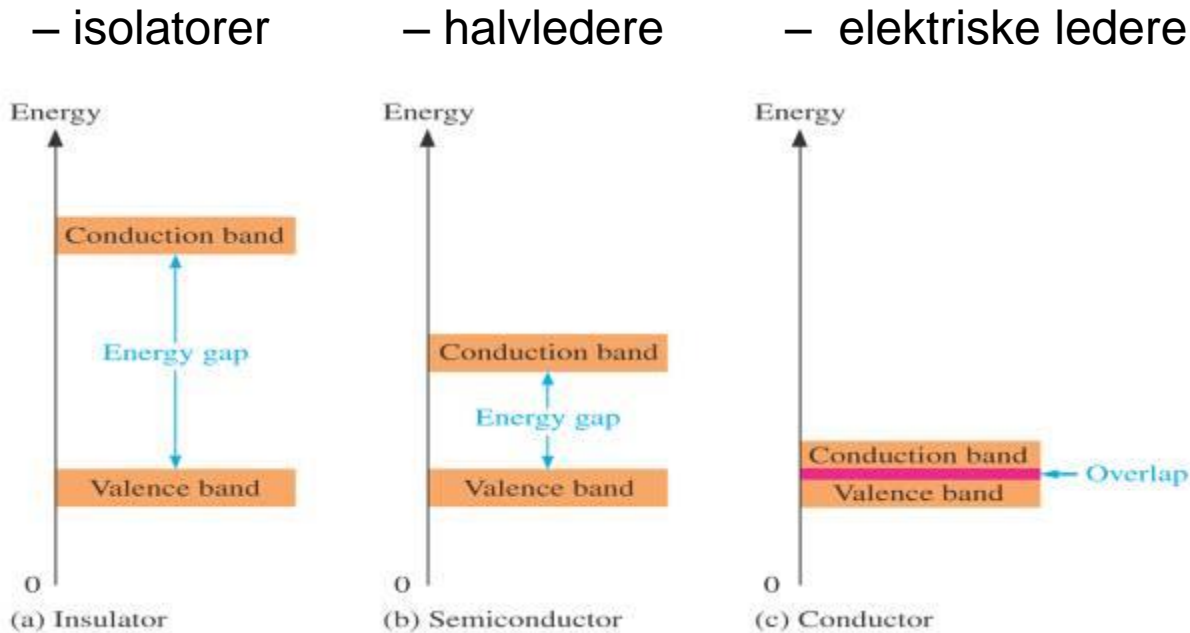
I metallene er "energi-gapet" mellom valensbåndet og ledningsbåndet minimalt. Ved normal temperatur vil det være overlapp mellom ledningsbånd og valensbånd

Båndene er tegnet med tykke linjer – det er gjort for å markere at elektronet kan ha flere mindre diskrete enegi-tilstander innenfor hver bånd – mer om dette i

## Elektronene legger seg i "energi-skall"



# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk



Antall "frie" elektroner i ledningsbåndet

Elektrisk leder (metall)	: ca $10^{23}$ elektroner / $\text{cm}^3$
Halvleder	: ca $10^8 - 10^{14}$ elektroner / $\text{cm}^3$
Isolatorer	: ca 10 elektroner / $\text{cm}^3$

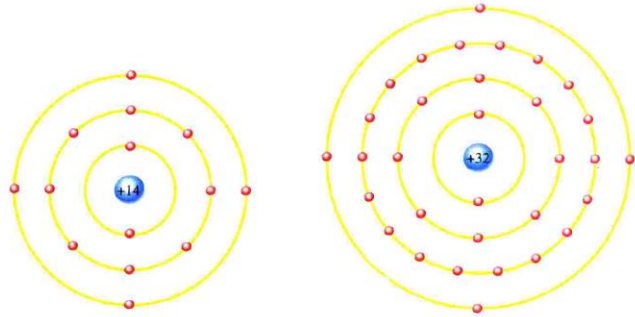
Antall elektroner i ledningsbåndet varierer med temperaturen.

For Silisium (Si)  $25^\circ \text{C} = 2 \cdot 10^{10}$  elektr. /  $\text{cm}^3$  ved  $100^\circ \text{C} - 2 \cdot 10^{12}$  elektr. /  $\text{cm}^3$

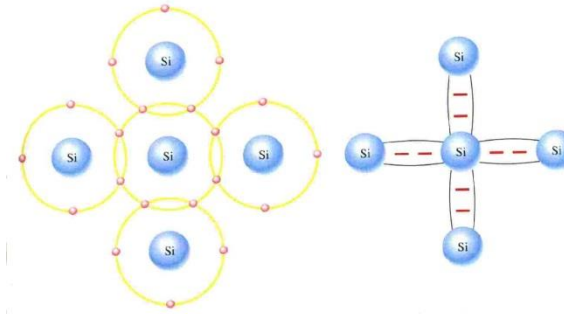
*Husk : 1 Ampere =  $6,28 \cdot 10^{18}$  elektroner pr. sekund*

# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

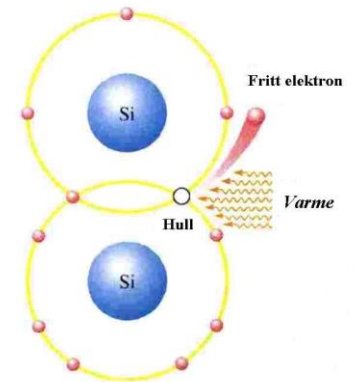
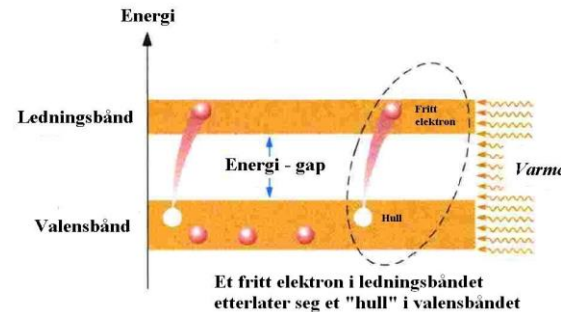
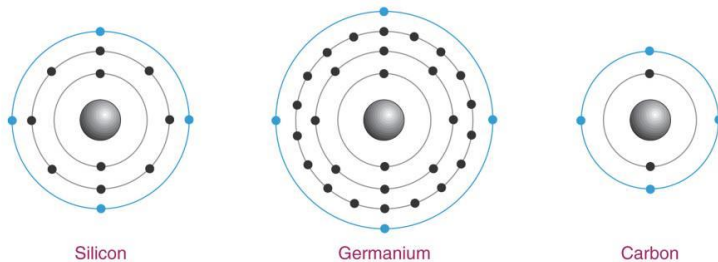
Silisium (Si) og Germanium (Ge) er halvledere



Valenselektronene til Ge ligger i fjerde skall. For Si ligger de i tredje skall.



Kovalent binding – diamantstruktur  
Hvert atom utveksler elektroner med 4 naboatomer  
Konfigurasjon med 8 elektroner i ytre skall.



## Ioniseringsenergi

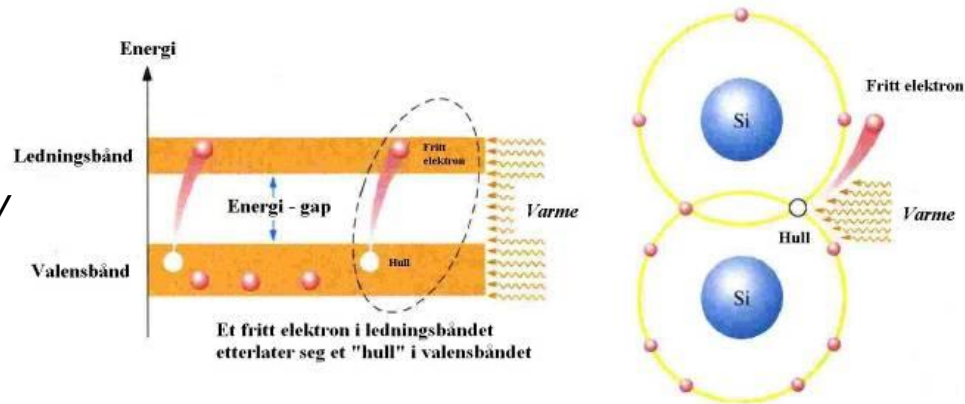
C	= 11 eV
Si	= 1,1 eV
Ge	= 0,7 eV

## Smeltepunkt

Karbon	3500 °C
Silisium	1414 °C
Germanium	938 °C

## Halvledere - Silisium (Si)

Båndgap Si = 1,1 eV



**Ladningstransport i en ren (intrinsic) halvleder forårsakes av "termisk" eksiterte elektroner til ledningsbåndet. - Hva skjer hvis vi eksponerer Si for lys ?**

$$\text{Planck } w = h \cdot f \quad h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$w_g(\text{Si}) = 1,1 \text{ eV} \quad h \cdot f > w_g \quad f = c/\lambda$$

$$\lambda < \frac{h \cdot c}{w_g} \quad \lambda < 1100 \text{ nm} \quad (\text{synlig lys} \cong 380 - 740 \text{ nm})$$

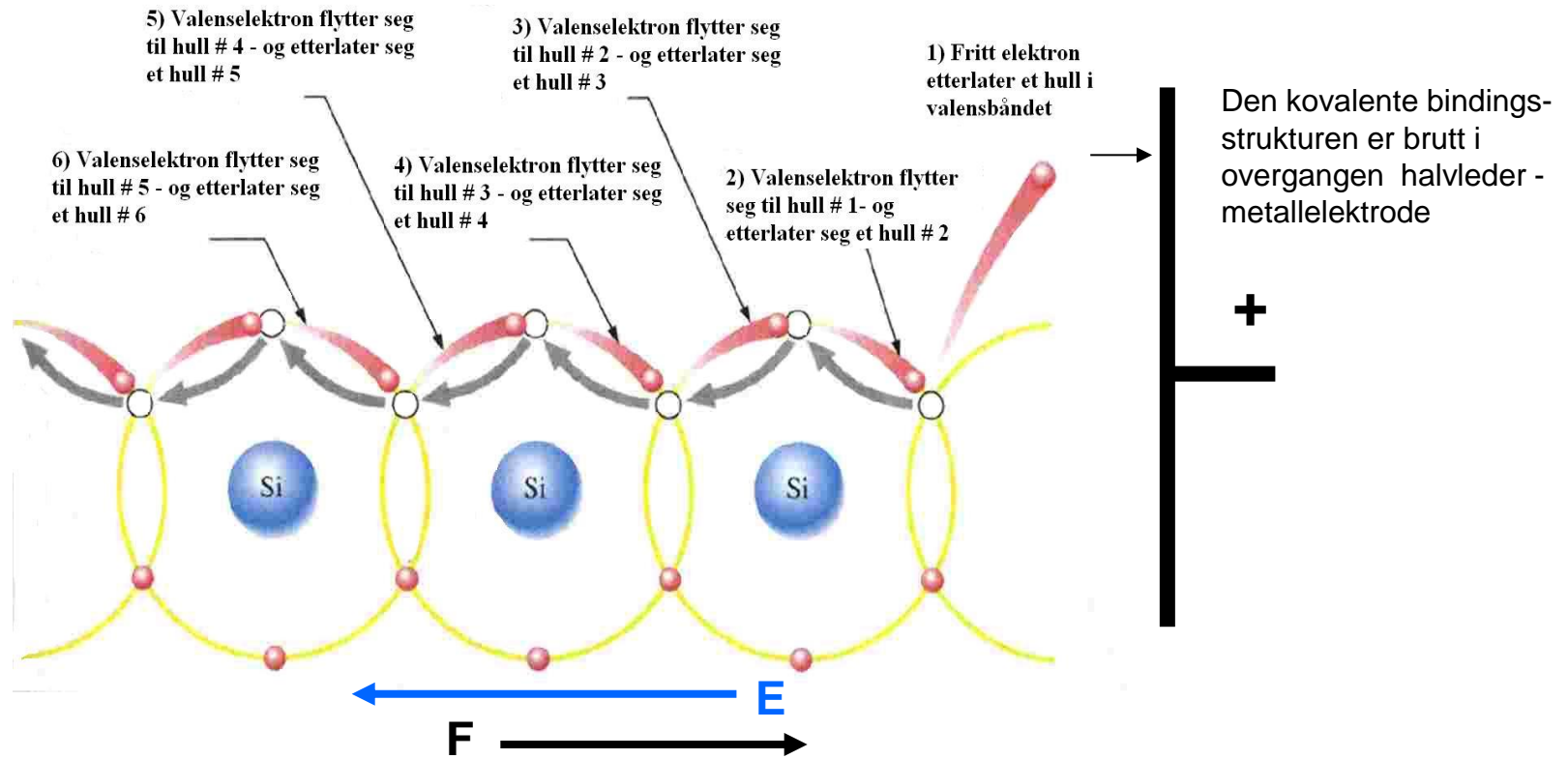
Lys vil rive løs elektroner i silisiumkrystallen – løfte elektroner opp i ledningsbåndet. Denne effekten brukes i solceller, fotodetektorer, digitale kamera osv.

I krystaller av materialer med høyre båndgap - f.eks ZnO ( 3,5 eV ) vil lys ikke klare å eksitere elektroner – det betyr at krystallen er gjennomsiktig for lys (som glass) – Kan P-dopes og brukes som elektriske ledere på solceller.



# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

## Transport av ladning – elektronstrøm – ”hullstrøm” (?)



**Elektronstrøm** – strøm av frie elektroner i ”ledningsbåndet”

**Hullstrøm** – ”elektronhopp” mellom atomer i valensbåndet



# Elektronikk – introduksjon – litt fysikalsk elektronikk

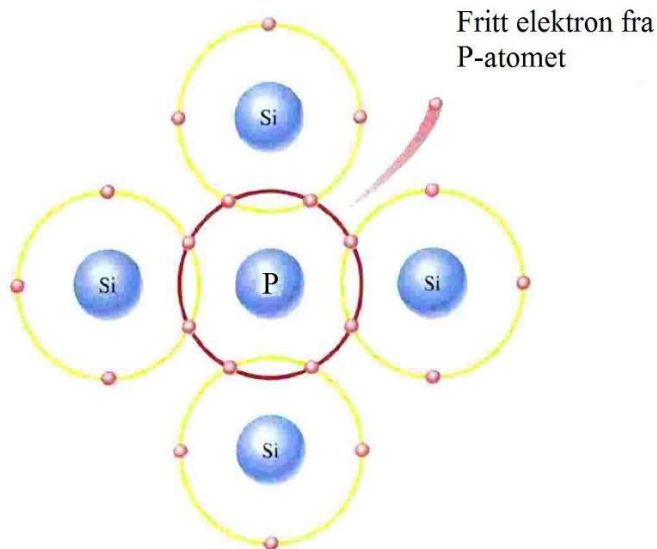
Doping = tilførsel av ”fremmedelementer”

Antall doping-atomer er lav. ca. 1 pr.  $10^6$  Si atomer

**N-dopet med donor-atom**

*5 elektroner i valensbåndet –*

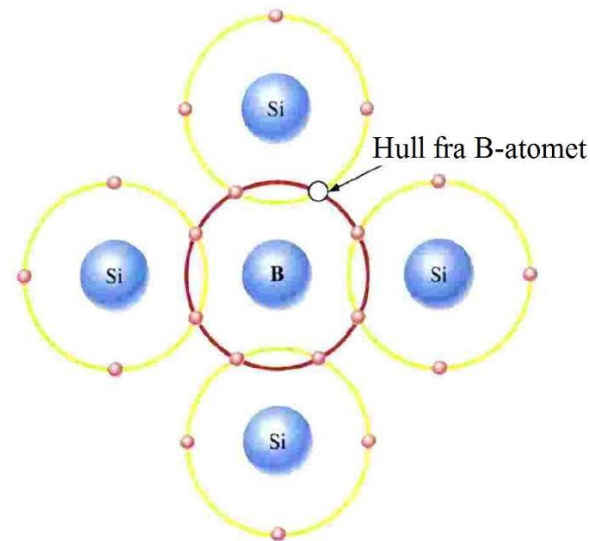
*Fosfor (P) Arsenikk (As) Antimon (Sb)*



**P-dopet med akseptor-atom**

*3 elektroner i valensbåndet*

*Aluminium (Al) Gallium (Ga) Bor (B)*



Ioniseringsenergien ca. 0,05 eV for det ekstra ”frie” elektronet fra donor-atomet