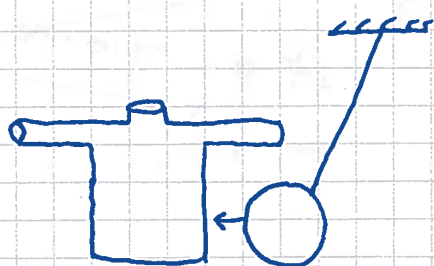


- Elektrisitet og magnetisme (17, 22, 23, 24)
- Elektrisk energiproduksjon (24)
- Lys og bølger (14, 15, 16)
- Termisk stråling og drivhuseffekt (13)

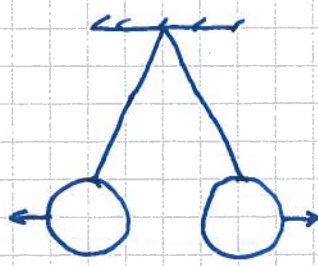
---

## ELEKTROSTATIKK (17, 22)

Ballongforsøk viser at vi har to typer ladning:



Tiltrekning

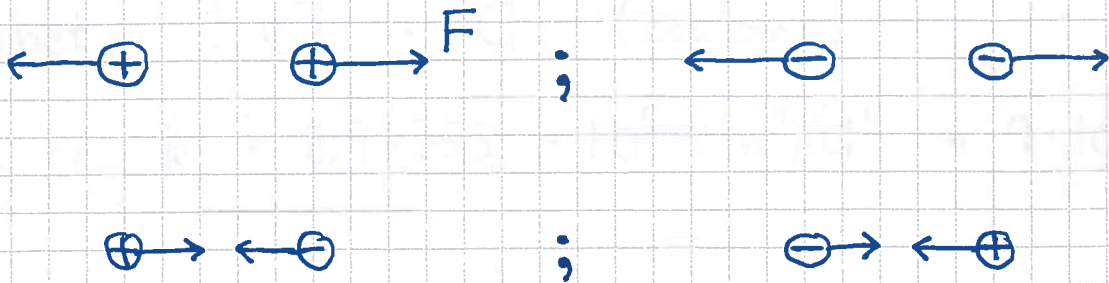


Frastøtning

⇒ Like ladninger frastøter hverandre  
Ulike — " — tiltrekker — " —

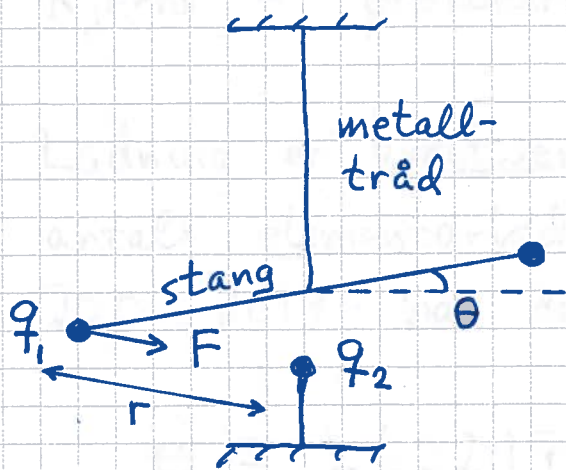
⇒ Naturlig å snakke om positiv og negativ Ladning.

(2)



## Coulombs lov

Exp. ca 1785 :



Metalltråden motsetter seg vridning; dreid vinkel  $\theta$  gir grunnlag for å bestemme kraften  $F$

Coulomb fant :

$$F = k_e \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

med  $\vec{F}$  rettet langs forbindelseslinjen mellom  $q_1$  og  $q_2$

Cavendish (1798) målte tyngdekrefter (gravitasjon) mellom blykuler på samme måte.

Newtons gravitasjonslov :

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

med  $G \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$

Enhet:  $[q] = C$  (coulomb)

(3)

Da er  $k_e = 8.98755... \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

## Materie og ladning

Materie = atomer

Atom = kjerne + elektroner

Kjerne = protoner + nøytroner = kjernepartikler

Ladning er kvantisert: Opptrer alltid i et helt antall elementærladninger  $e$ , som fra og med 20.05. 2019 har den eksakte verdien

$$e \equiv 1.602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Robert Millikan gjorde exp. med små, ladde oljedråper 1909-1913 og påviste at dråpene alltid hadde ladning  $q = \pm N \cdot e$  med heltallig  $N$ .  
Fikk nobelprisen i fysikk for dette i 1923.

---

| Partikkel | Symbol   | Ladning | Masse                                        |
|-----------|----------|---------|----------------------------------------------|
| Elektron  | $e, e^-$ | $-e$    | $m_e \approx 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ |
| Proton    | $p$      | $+e$    | $m_p \approx 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ |
| Nøytron   | $n$      | $0$     | $m_n \approx 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ |
| Foton     | $\gamma$ | $0$     | $m_\gamma = 0$                               |

Bohrs klassiske atommodell (mer i NAG014):

(4)

Elektroner i sirkelbaner rundt en svært liten kjerne.

Atommassen  $\approx$  Kjernens masse (siden  $m_p$  og  $m_n \gg m_e$ )

Nøytralt atom med atomnummer  $Z$ :

$Z$  protoner (og som regel ca  $Z$  nøytroner) i kjernen

$Z$  elektroner "omkring"

$$\Rightarrow Q = Z \cdot e - Z \cdot e = 0$$

Ioner: Atomer og molekyler med netto ladning

Eks:  $O^{2-}$  = oksygenatom med  $q = -2e$

$O_2^-$  = oksygenmolekyl med  $q = -e$

Ladningsbevarelse: Netto ladning i et lukket system er alltid bevart (dvs konstant).

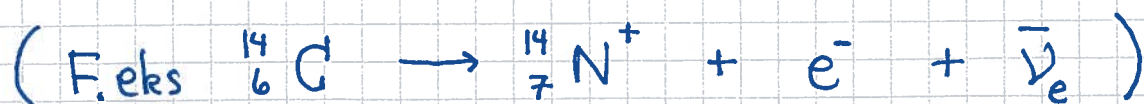
Men ladde partikler kan oppstå spontant!

Eks:  $\beta^-$  decay

↙ antineutrino ( $q=0$ )



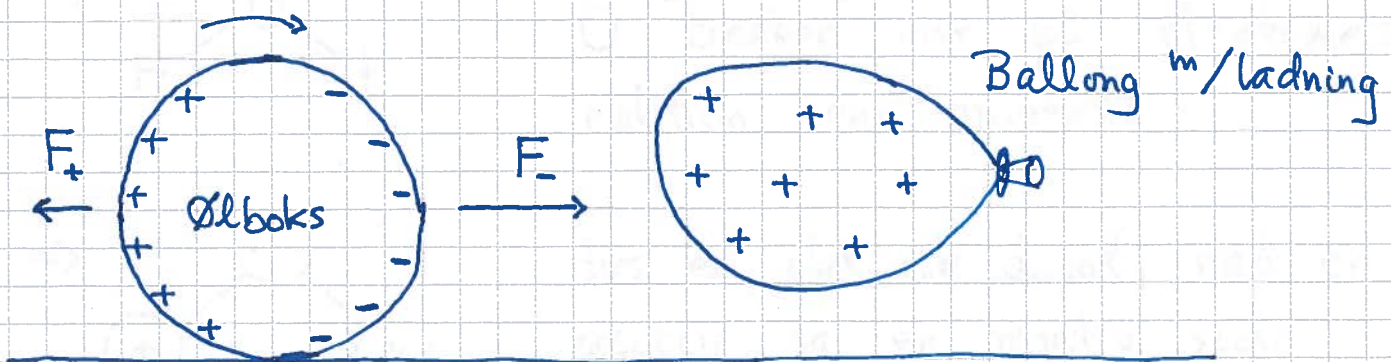
Ladning:  $0 \rightarrow e - e + 0 = 0 ; \text{ OK}$



## Metaller (Ledere) og isolatorer

Metaller har frie, "mobile" elektroner, typisk ett eller to pr atom. Disse vil flytte seg hvis de påvirkes av en ytre elektrisk kraft.

Eks:



- Ballong med (f.eks.) pos. ladd. trekker frie elektroner i ølboksen til seg.
- Ølboksen får overskudd av elektroner på høyre side, og dermed tilsvarende underskudd på venstre side.
- Netto tiltrekkende kraft ( $F_- > F_+$ ) pga kortere avstand fra ballongen til negativt ladd side.

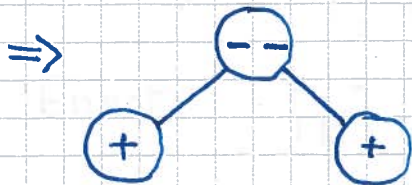
⑥

Isolatorer har ingen (eller svært få!) frie elektroner. Men hvert molekyl i isolatoren kan ha en "skjev" ladningsfordeling, slik at molekylet "orienterer seg" / rettes inn av en elektrisk kraft.

Eks: Vann og gnidd ballong

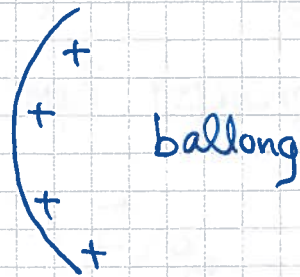
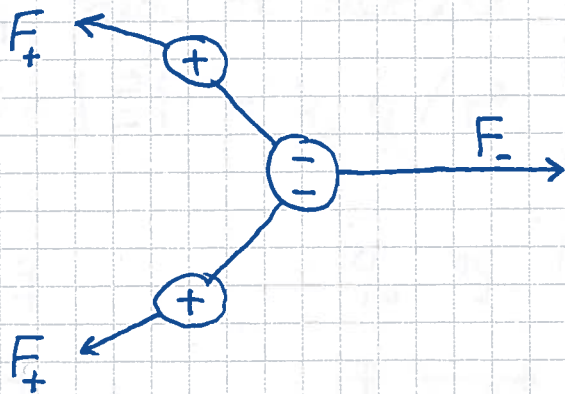


O "trekker" mer på H-atomets elektron enn omvendt



dvs en elektrisk dipol, med en positiv og en negativ side

Med ytre elektrisk kraft fra gnidd ~~g~~ ballong:

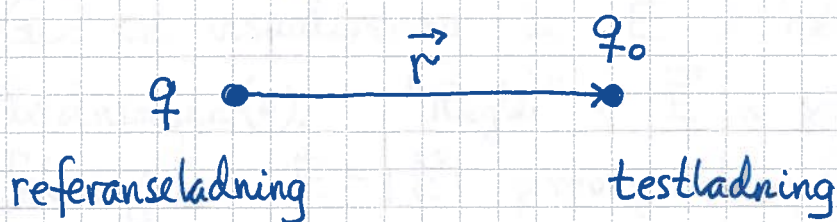


⇒ Netto tiltrekkende kraft, pga kortere avstand fra ballongen til molekylets negativt ladde side

Mange slike dipoler i en vannstråle, som tydelig tiltrekkes av ballongen.

Samme effekt med f.eks. papirbiter.

# Elektrisk felt



Kraft på  $q_0$  fra  $q$ :  $F = k_e \frac{qq_0}{r^2}$

Vi definerer nå elektrisk felt  $\vec{E}$  som el.kraft  $\vec{F}$  pr ladningsenhet:

$$\vec{E} = \vec{F}/q_0 ; \quad E = \frac{F}{q_0} = k_e \frac{q}{r^2}$$

Enhet:  $[E] = N/C$

Siden uttrykket for  $E$  inneholder bare ref.ladn.  $q$ , og avstanden  $r$  fra denne, kan vi si at ladn.  $q$  omgir seg med et elektrisk felt  $\vec{E}$ , med feltstyrke

$E = |\vec{E}| = k_e q/r^2$ . Hva med retningen?

| $q$ | $q_0$ og $\vec{F}$  | $\vec{F}/q_0$     |
|-----|---------------------|-------------------|
| +   | + $\longrightarrow$ | $\longrightarrow$ |
| +   | $\longleftarrow$ -  | $\longrightarrow$ |
| -   | $\longleftarrow$ +  | $\longleftarrow$  |
| -   | - $\longrightarrow$ | $\longleftarrow$  |

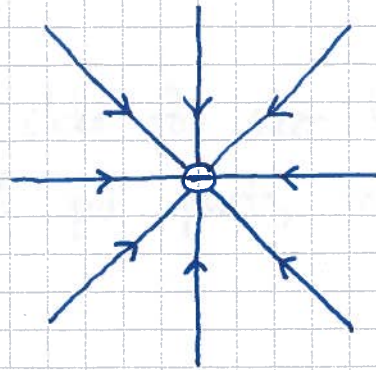
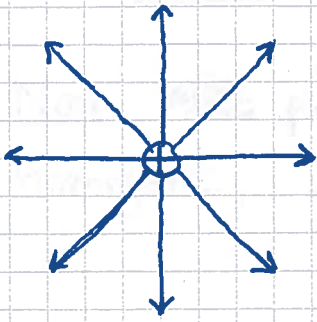
$\Rightarrow$   $\vec{E}$  radielt bort fra positiv ladning  
 $\vec{E}$  —||— inn mot negativ —||—

## Feltlinjer for $\vec{E}$

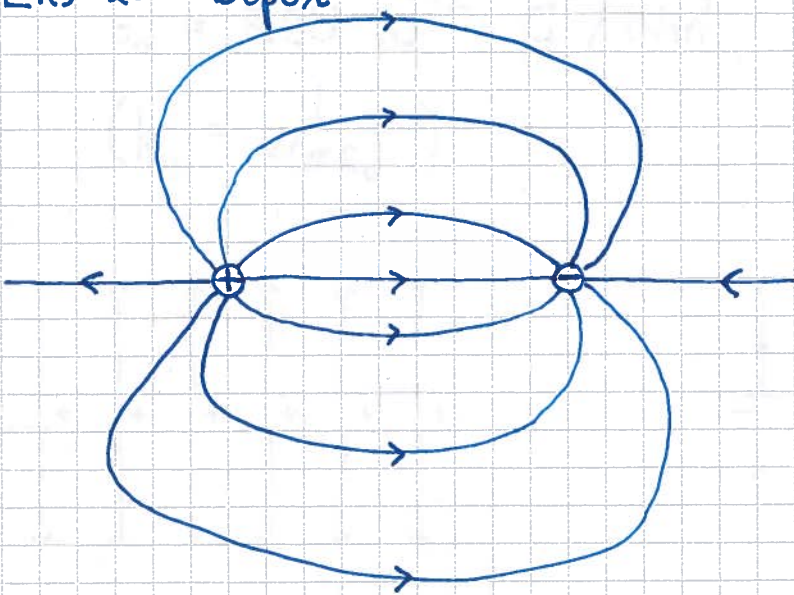
8

Gir en visualisering av  $\vec{E}$  i hele området omkring ladningen(e). "Regler":  $\vec{E}$  i samme retning som feltlinjene.  $E = |\vec{E}|$  proporsjonal med tettheten av feltlinjer.

### Eks 1: Punktladning



### Eks 2: Dipol

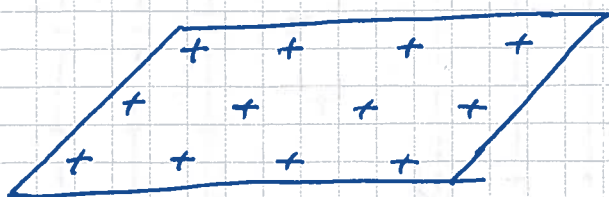


Vi ser at feltlinjene starter på pos. ladn.  
og ender på neg. ladn.

# Homogent (Uniformt) elektrisk felt

9

Kan lage homogent elektrisk felt med stort og jevnt ladet plate:



Areal  $A$

Ladning  $Q$

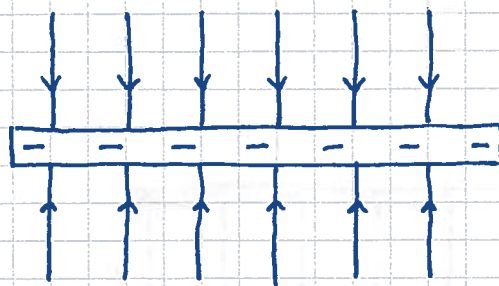
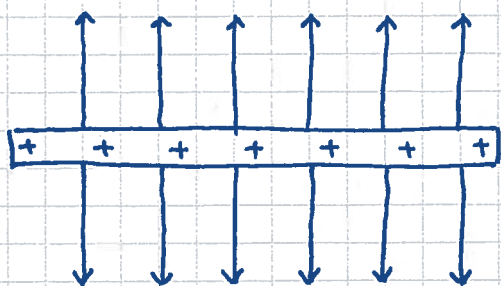
Nær ~~plata~~ plata (og ikke for nær kanten) er  $\vec{E}$  homogent, og vinkelrett på plata, med feltstyrke

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

der  $\sigma = Q/A =$  platas ladning pr flateenhet

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \quad (\text{en naturkonstant})$$

$$(k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0})$$



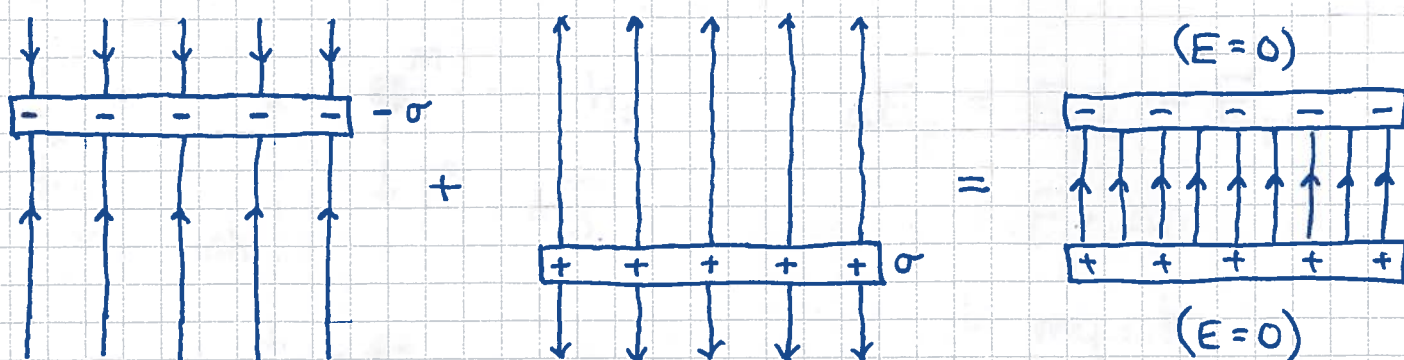
Eks: Med  $A = 10 \text{ cm}^2$  og  $Q = 2.5 \mu\text{C}$  blir

$$E = (2.5 \cdot 10^{-6} \text{ C} / 10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2) / (2 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2)$$

$$= \underline{1.4 \cdot 10^8 \text{ N/C}}$$

(10)

Med to motsatt ladde plater får vi et uniformt felt med feltstyrke  $\sigma/\epsilon_0$  mellom platene, og  $E=0$  utenfor:

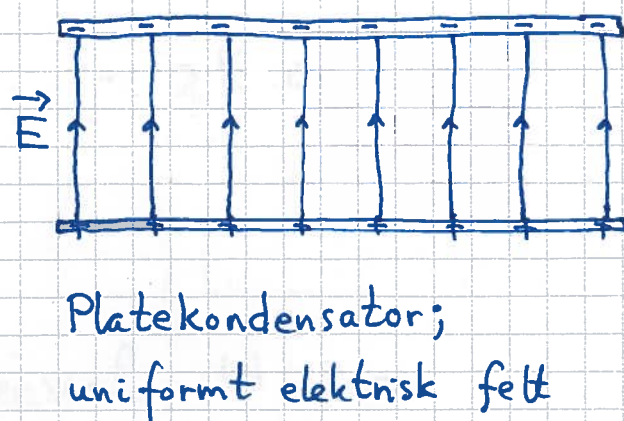
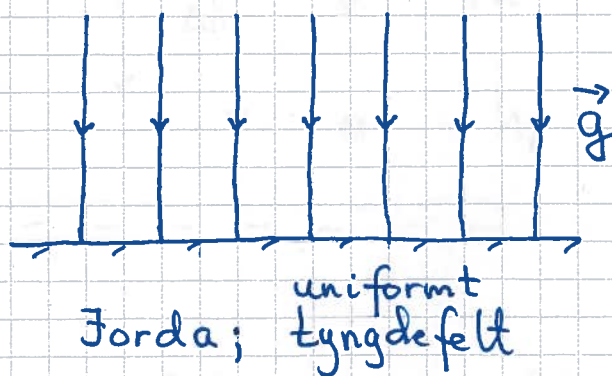


Helt analogt kan vi si at en tyngdekraft pr masseenhet tilsvarer et tyngdefelt (gravitasjonsfelt), f.eks. ved jordas overflate:

$$\vec{F} = G \frac{M}{R^2} \cdot m = g \cdot m$$



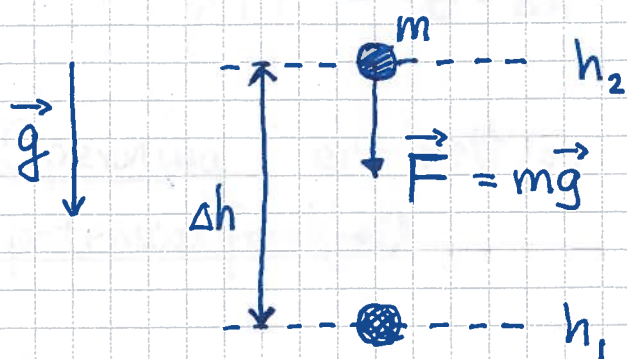
$$\Rightarrow g = \frac{F}{m} = G \frac{M}{R^2} \approx 9.81 \text{ m/s}^2$$



En masse  $m$  vil få konstant akselerasjon  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{m\vec{g}}{m} = \vec{g}$  i det uniforme tyngdefeltet. En partikkel med ladning  $q$  og masse  $m$  får konst. aks.  $\vec{a} = \vec{F}/m = q\vec{E}/m$  i det uniforme elektriske feltet  $\vec{E}$ .

# Potensiell energi og elektrisk potensial. Spenning

Pot. energi i tyngdefeltet (NAG011):

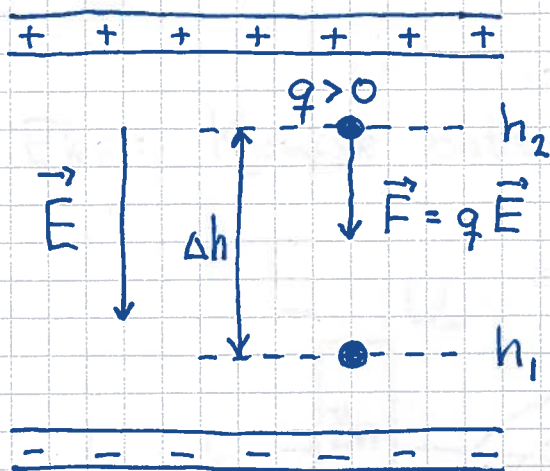


$$\begin{aligned}\Delta E_p &= E_{p2} - E_{p1} \\ &= F \cdot \Delta h \\ &= mg \Delta h\end{aligned}$$

$\vec{F}$  har retning mot lavere pot. energi  $E_p$

Kun endringer / forskjeller i  $E_p$  har fysisk betydning.

Pot. energi for ladning  $q$  i homogent elektrisk felt  $\vec{E}$ :



$$\begin{aligned}\Delta E_p &= E_{p2} - E_{p1} \\ &= F \cdot \Delta h \\ &= qE \Delta h\end{aligned}$$

Vi definerer nå elektrisk potensial  $U$  som pot. energi  $E_p$  pr. ladningsenhet:

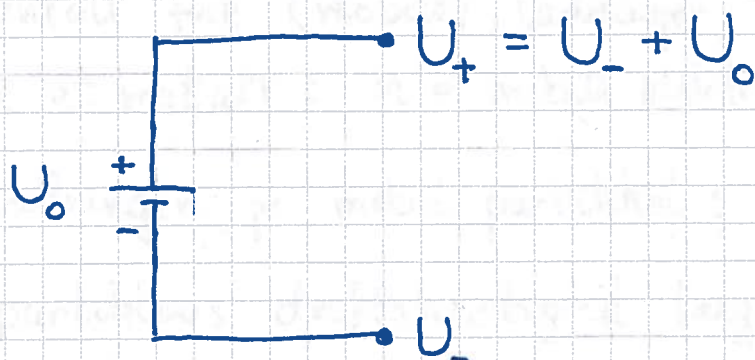
$$\Delta U = \frac{\Delta E_p}{q} ; \text{ enhet } [U] = \frac{J}{C} = V \text{ (volt)}$$

Med homogent el. felt  $\vec{E}$  blir potensialforskjellen mellom posisjonene  $h_2$  og  $h_1$  ganske enkelt

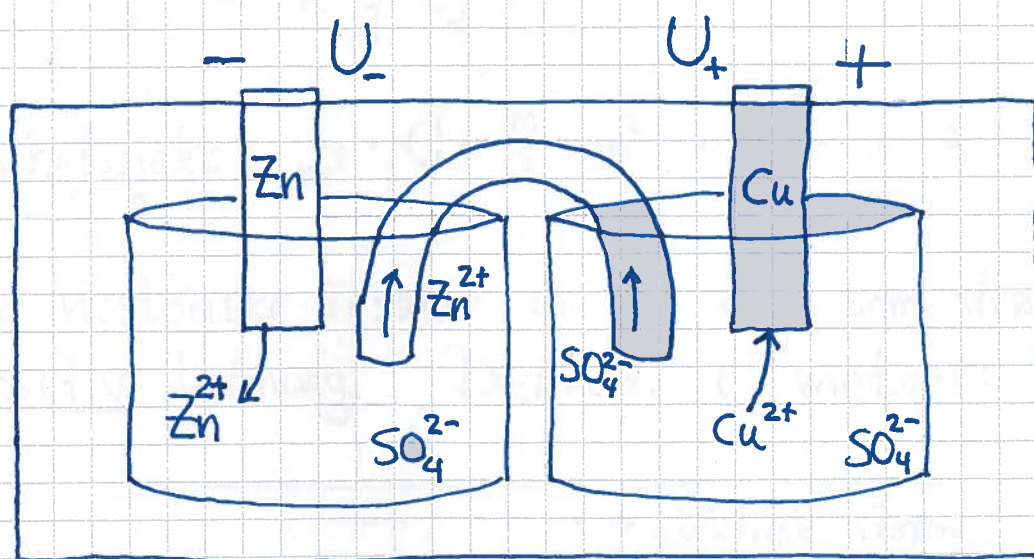
$$\Delta U = E \cdot \Delta h \quad ; \quad \Delta h = h_2 - h_1$$

Spennning er rett og slett et enklere navn på potensialforskjell.

Likespenningskilde: "Innretning" som sørger for en konstant spenning  $U_0$  mellom polene.



Eks: Kjemisk batteri [Elektrokjemi i NA6013]



Svakere bindinger i metallisk Zn enn i metallisk Cu er her hovedgrunnen til potensialforskjellen  $U_0 = U_+ - U_-$

Elektrisk strøm

Vi definerer strøm  $I$  som mengden ladning som passerer et tverrsnitt av en leder pr tidsenhet:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Enhet:  $[I] = C/s = A$  (ampere)

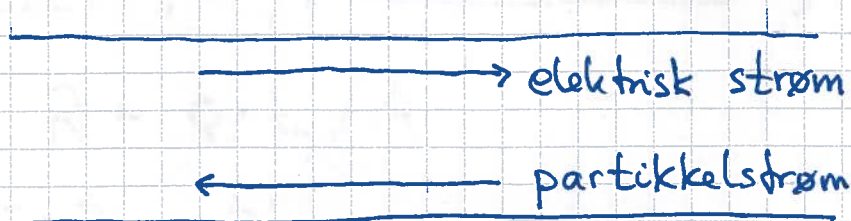
Strømstyrken må avhenge av (og øke proporsjonalt med)

- antall frie (mobile) ladninger pr volumenhet i ledere; i et metall:  $n$  = mobile elektroner pr volumenhet
- ladningen pr mobil partikkel;  $q = -e$  i metall
- partiklenes driftshastighet langs ledere  $v_d$
- lederens tverrsnitt  $A$

$$\Rightarrow I = n q v_d A$$

$$\text{Enhetssjekk: } \frac{1}{m^3} \cdot C \cdot \frac{m}{s} \cdot m^2 = \frac{C}{s} = A ; \text{ OK!}$$

Av historiske årsaker er  $I$  def. som strøm av positiv ladning. Dermed, i metall:



## Ohms lov

En spenning  $U$  over en lederbit med lengde  $L$  innebærer et elektrisk felt  $E = U/L$  i lederen, og dermed en elektrisk kraft  $F = e \cdot E$  som vil drive frie elektroner gjennom lederen.

Vi får en strøm! Kraften  $F$  vil akselerere elektronene, men pga ustanselige kollisjoner med de faststående atomene (ionene) i metallet, oppnår elektronene bare en bitteliten driftshastighet  $v_d$  langs lederen, proporsjonal med  $F$  og dermed  $E$ .

Resultatet blir en strøm  $I$  proporsjonal med spenningen  $U$ , eller omvendt

$$U = R \cdot I$$

Ohms lov

Her er  $R$  lederbitens motstand, med enhet

$$[R] = \frac{V}{A} = \Omega \quad (\text{ohm})$$

Verdien av  $R$  øker med lederbitens lengde  $L$ , avtar med tverrsnittet  $A$ , og avhenger ellers av type materiale, gitt ved resistiviteten  $\rho$ :

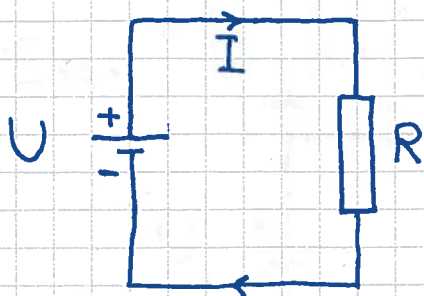
$$R = \rho \cdot L / A$$

der  $[\rho] = \Omega \cdot m$

Vanlig symbol for motstand i elektriske kretser:



Enkleste eksempel:



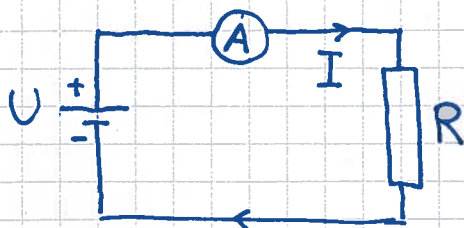
Likespenningskilden sørger for konstant spenning  $U$  "over" motstanden; Ohms lov gir da

$$\underline{I = U/R}$$

Måling av strøm og spenning

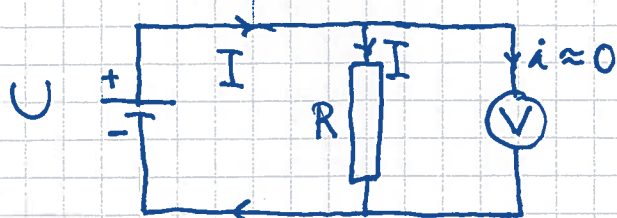
Bruker i dag ofte et multimeter.

Som amperemeter: Settes i serie med kretsen, slik at  $I$  går gjennom amperemeteret. (Mer om prinsippet senere.)



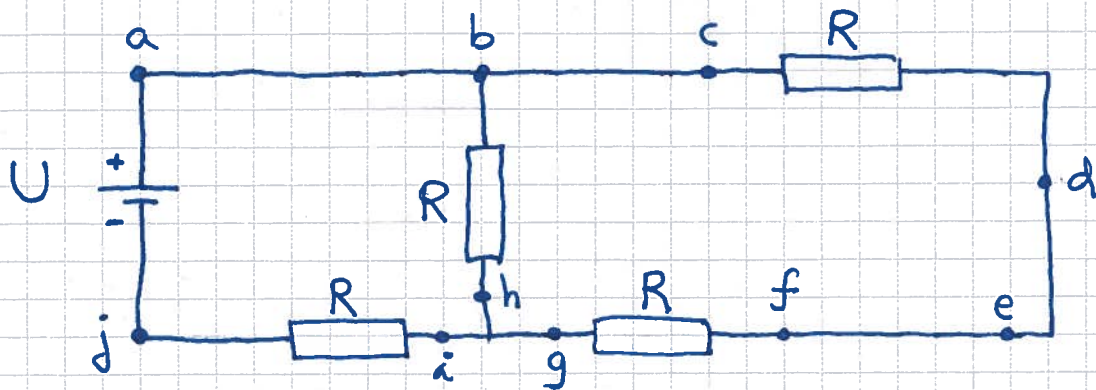
Ⓐ må ha liten motstand som ikke påvirker strømmen  $I$

Som voltmeter: Settes i parallell med komponenten vi skal måle spenningen over. Er i praksis en stor motstand som i liten grad endrer strømmen totalt sett.



Merk at metall-ledninger i en elektrisk krets typisk har svært liten motstand, sammenlignet med "de egentlige" motstandene i kretsen. Da er potensialet praktisk talt konstant i en gitt sammenhengende metall-ledning, inklusive eventuelle forgreninger.

Eks:



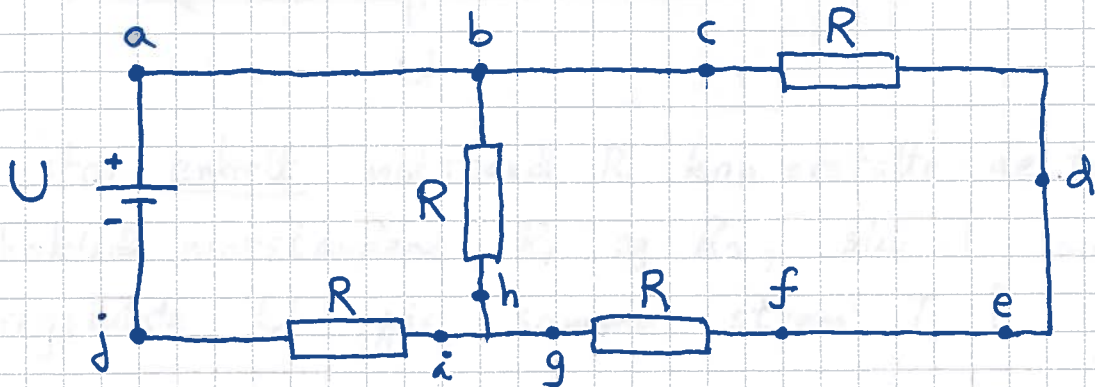
Likt potensial i  $a, b, c$ .

— " —  $d, e, f$ .

— " —  $g, h, i$ .

Merk at metall-ledninger i en elektrisk krets typisk har svært liten motstand, sammenlignet med "de egentlige" motstandene i kretsen. Da er potensialet praktisk talt konstant i en gitt sammenhengende metall-ledning, inklusive eventuelle forgreninger.

Eks:



Likt potensial i  $a, b, c$ .

—— " ——  $d, e, f$ .

—— " ——  $g, h, i$ .

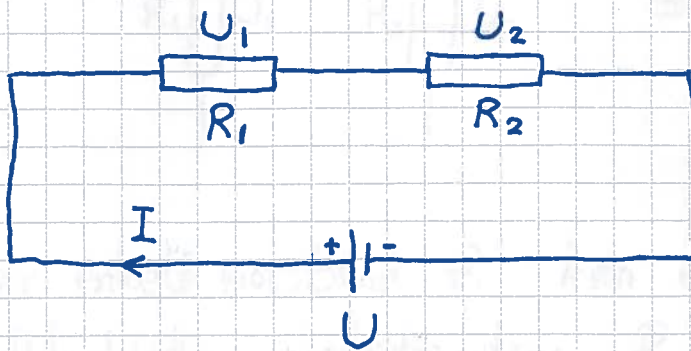
## Kirchhoffs regler / lover

Pga ladningsbevarelse er summen av strømmer inn mot et knutepunkt i en krets lik summen av strømmer ut av samme knutepunkt. (Kirchhoffs strømregel)

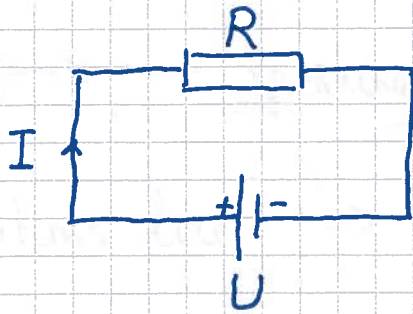
Pga energibevarelse er summen av alle potensialendringer (spenninger) rundt enhver lukket sløyfe i en krets lik null. (Kirchhoffs spenningsregel)

# Kobling av flere motstander

## Seriekobling:



Hvor stor enkelt motstand  $R$  kan erstatte de to seriekoblede motstandene  $R_1$  og  $R_2$ , slik at samme spenningskilde  $U$  gir samme strøm  $I$ ?



Her gir Ohms lov:  $U = RI$

Kirchhoffs strømregel  $\Rightarrow$  Lik strøm  $I$  gjennom  $R_1$  og  $R_2$

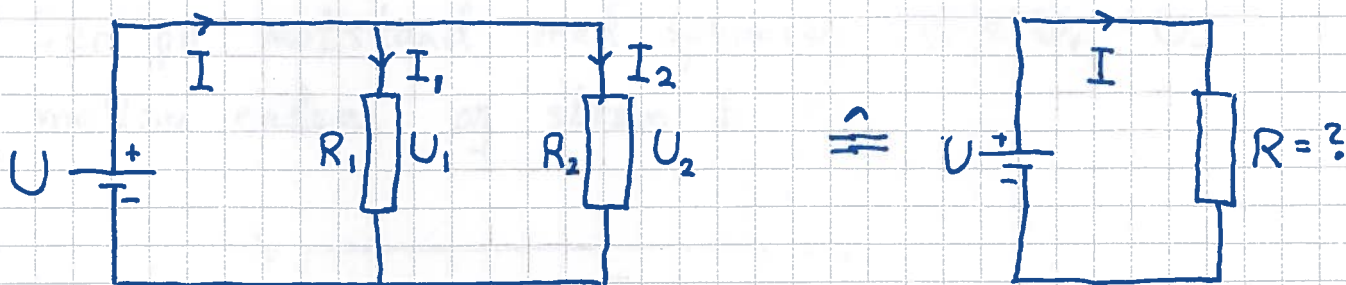
Kirchhoffs spenningsregel  $\Rightarrow U = U_1 + U_2$

Ohms lov  $\Rightarrow U_1 = R_1 I$  og  $U_2 = R_2 I$

Dermed:  $RI = R_1 I + R_2 I$

Dvs:

$$\boxed{R = R_1 + R_2}$$

Parallellkobling:

Hvor stor enkelt motstand  $R$  kan erstatte de to parallellkoblede motstandene  $R_1$  og  $R_2$  slik at samme spenningskilde  $U$  gir samme strøm  $I$ ?

Kirchhoffs strømregel  $\Rightarrow I = I_1 + I_2$

—||— spenningsregel  $\Rightarrow U_1 = U_2 = U$

Ohms lov  $\Rightarrow I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U}{R_1}$  og  $I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_2}$   
 og  $I = U/R$

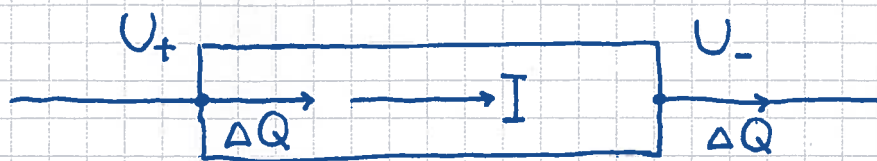
Dermed:  $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$

Dvs:  $\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$

$\left( \Rightarrow R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right)$

## Elektrisk effekt

Ser på motstand med spenning  $U = U_+ - U_-$  mellom endene og strøm  $I$  :



I løpet av tiden  $\Delta t$  kommer en ladning  $\Delta Q = I \cdot \Delta t$  inn i motstanden fra venstre; like mye ladning går ut av motstanden mot høyre.

$\Delta Q$  inn har høyere energi enn  $\Delta Q$  ut :

$$U_+ = \frac{\Delta E_p^{\text{inn}}}{\Delta Q}, \quad U_- = \frac{\Delta E_p^{\text{ut}}}{\Delta Q}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta E &= \Delta E_p^{\text{inn}} - \Delta E_p^{\text{ut}} = (U_+ - U_-) \Delta Q = U \cdot \Delta Q \\ &= \text{elektrisk energi tapt som varme i motstanden} \end{aligned}$$

Effekttap :

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = U \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = U \cdot I$$

Og hvis motstanden oppfyller Ohms lov :  $U = RI$

$$\Rightarrow P = U \cdot I = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$