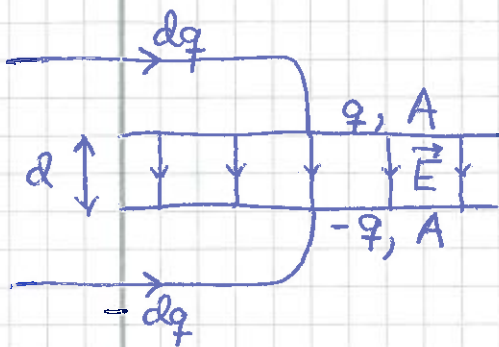


Energi i elektrisk felt [YF 24.3; LHL 20.4]

(85)

Opplading av en kondensator krever et arbeid og gir en økt potensiell energi U , som lagres i \vec{E} -feltet.



Økning av ladning fra $\pm q$ til $\pm (q + dq)$ gir økning i pot. energi

$$dU = v(q) dq = \frac{q}{C} dq$$

\Rightarrow Opplading fra $q=0$ til $q=Q$ gir pot. energi

$$U = \int dU = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C}, \text{ som med}$$

~~$C = \frac{Q}{V}$~~ alternativt kan skrives som $U = \frac{QV}{2} = \underline{\underline{\frac{1}{2} CV^2}}$

Med $C = \epsilon_0 A/d$ og $V = E \cdot d$ får vi

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{A}{d} (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \cdot (Ad)$$

Her er $A \cdot d =$ volumet mellom platene, der $E \neq 0$.

Konklusjon: Energien pr volumenheter (energitettheten) i det elektriske feltet er

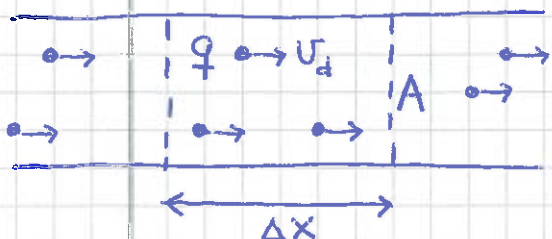
$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

som viser seg å gjelde generelt.

Elektrisk strøm [YF 25,26; LHL 21,22]

(86)

Strøm, strømledethet [YF 25.1; LHL 21.1]



Leder; n frie ladninger q pr volumenhet, med midlere driftshastighet v_d langs lederen.
[Null netto ladning!]

Strøm (strømstyrke) $\stackrel{\text{def}}{=} \equiv$ mengden ladning som passerer et tverrsnitt av lederen pr tidsenhet

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dQ}{dt}$$

$$\text{Enhet: } [I] = \text{C/s} = \text{A (ampere)}$$

I figuren ovenfor: Alle frie ladninger ΔN i volumet

$\Delta V = \Delta x \cdot A$ passerer tverrsnittet med areal A i løpet

av tiden $\Delta t = \Delta x / v_d$

$$\Rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{q \cdot \Delta N}{\Delta x / v_d} = \frac{q \cdot n \cdot \Delta x \cdot A}{\Delta x / v_d} = nq v_d A$$

Strømledethet $\stackrel{\text{def}}{=} \equiv$ strøm pr flateenhet

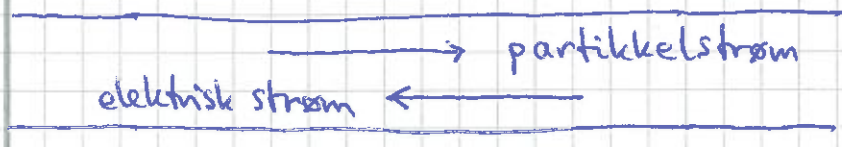
$$j = I/A, \quad [j] = \text{A/m}^2$$

Her: $j = nq v_d$; mer presist

$$\vec{j} = nq \vec{v}_d$$

Metall: Frie elektroner gir elektrisk strøm

$$\Rightarrow q = -e ; \quad j = -nev_d$$

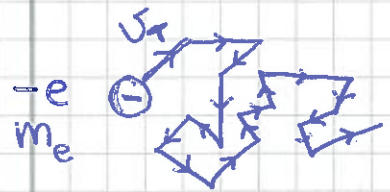


Ohms lov [YF 25.2, 25.6 ; LHL 21.2, 21.4]

Uten kollisjoner ("friksjon") ville frie ladninger få konstant akselerasjon i et konstant elektrisk felt:

$$q\vec{E} \stackrel{N^2}{=} m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E} \Rightarrow \vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \frac{q}{m}\vec{E} \cdot t$$

Men frie elektroner kolliderer (ustanselig!) i metallet:



$$\begin{aligned} &\rightarrow \vec{v}_d \\ &\leftarrow \vec{j} = -nev_d \end{aligned}$$

\leftrightarrow
 d = midlere avstand mellom kollisjoner

$\tau = d/v_T$ = midlere tid — " —

v_T = midlere elektronhastighet ved temperatur T

$$\vec{v}_d \approx \vec{a} \cdot \tau = -\frac{e}{m_e} \vec{E} \cdot \tau$$

[Paul Drude, ca 1900]

$$\Rightarrow \boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

OHMS LOV

med $\sigma = ne^2\tau/m_e$ = materialets konduktivit
(kalles også elektrisk ledningsevne)

Tallverdi (estimator):

(88)

Ekvipartisjonsprinsippet sier at ved (absolutt) temperatur T bidrar hvert kvadratiske ledd i energien med $\frac{1}{2} k_B T$. Her er $k_B \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K; Boltzmanns konstant.

[$R = k_B \cdot N_A \approx 8.314$ J/mol·K; gasskonstanten.

$N_A \approx 6.022 \cdot 10^{23}$ (partikler pr mol); Avogadros konstant]

Dermed:

$$\langle K_e \rangle = \left\langle \frac{1}{2} m_e (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \right\rangle = \frac{1}{2} m_e v_T^2 = \frac{3}{2} k_B T$$

$$\Rightarrow v_T = \sqrt{3k_B T / m_e} \sim 10^5 \text{ m/s} \quad \text{ved } T = 300 \text{ K}$$

d = midlere fri veikengde \sim avstand mellom atomene $\sim 10^{-9}$ m

$$\Rightarrow \tau = \frac{d}{v_T} \sim 10^{-14} \text{ s} \quad (\text{midlere tid mellom kollisjoner})$$

Kobber (Cu): $m_{\text{Cu}} \approx 63$ g/mol; massetetthet 8.96 g/cm³

$$\Rightarrow 8.5 \cdot 10^{28} \text{ Cu-atomer pr m}^3$$

Anta ett fritt elektron pr Cu-atom,

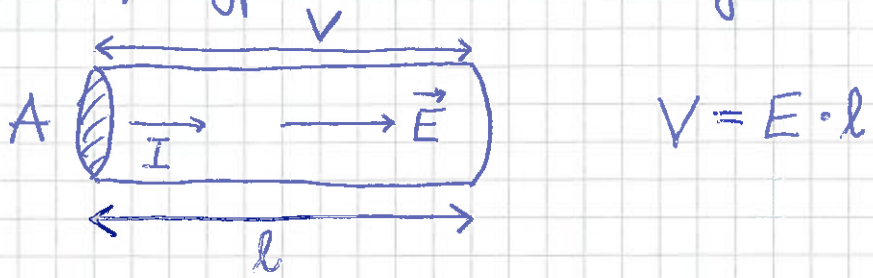
$$\text{dvs } n = 8.5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{Drude}}^{\text{Cu}} = n e^2 \tau / m_e \approx 2.4 \cdot 10^7 \frac{\text{A}}{\text{V}\cdot\text{m}}$$

(mens $\sigma_{\text{Exp}}^{\text{Cu}} \approx 6 \cdot 10^7 \frac{\text{A}}{\text{V}\cdot\text{m}}$ ved 20°C)

$$v_d \approx e \tau E / m_e \sim 10^{-6} \text{ m/s} \quad \text{hvis } E = 1 \text{ mV/m}$$

En motstand er en komponent med tverrsnitt A og lengde l , typisk med liten ledningsevne σ :



$$j = \frac{I}{A} = \sigma E = \sigma \frac{V}{l}$$

$$\Rightarrow I = \frac{\sigma A}{l} V = G V$$

$$V = \frac{l}{\sigma A} I = R I$$

$$G = \frac{\sigma A}{l} = \text{lederens } \underline{\text{konduktans}}$$

$$R = G^{-1} = \frac{l}{\sigma A} = \rho \frac{l}{A} = \text{lederens } \underline{\text{resistans/motstand}}$$

$$\rho = \sigma^{-1} = \text{materialets } \underline{\text{resistivitet}}$$

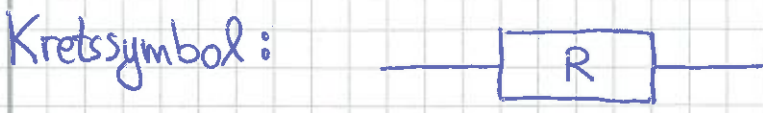
Enheter:

$$[R] = \frac{V}{A} = \Omega \text{ (ohm)} ; [G] = \Omega^{-1} (= S, \text{ siemens})$$

$$[\rho] = \Omega m ; [\sigma] = \Omega^{-1} m^{-1} (= S/m)$$

Merk: σ, ρ er materialegenskaper

G, R er også avhengige av lederens dimensjoner



(evt.)

Resistivitet og temperatur [YF 25.2; LHL 21.2, 21.5]

90

Drudemodellen: $\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau}$, dvs $\rho \sim \frac{1}{n \cdot \tau}$

Metaller:

- stor n , påvirkes lite av økt T
- økt T gir hyppigere kollisjoner, dvs redusert τ , dvs større resistivitet ρ

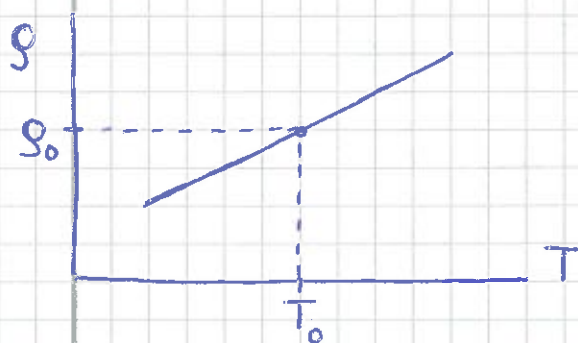
Empirisk:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\alpha_{Al} \approx \alpha_{Cu} \approx \alpha_{Ag} \approx 0.004 \text{ K}^{-1}$$

$$[T] = \text{K (kelvin)}$$

$$\Rightarrow \tau \sim 1/T$$



Halvledere: (Si, Ge, GaAs, GaN [blå LED; NNP2014], organiske, ...)

- isolator ved $T=0$ ($n \approx 0$)
- økt T gir (sterk!) økning i n , dvs redusert ρ



$$\tau \sim \frac{1}{T}, \quad n \sim e^{-T_g/T}$$

$$\Rightarrow \rho(T) \sim T e^{T_g/T}$$

Energigap (båndgap): $E_g = 2k_B T_g$ = påkrevd energi for å løsrive elektroner fra "moderatomet" = energi til utsendt foton når fritt elektron "fanges inn" igjen av et atom

Eks:

	Halvleder	Si	GaAs	GaN	AlGaAs	InGaN
E_g (eV)		1.12	1.43	3.44	1.4-2.2	2-3.4
λ (nm)		(1100)	870	360	560-870	360-620

(91)

Foton: $E = hf = hc/\lambda$

$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js = Plancks konstant

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s = lyshastigheden i vakuum (og luft)

Elektromagnetisk spektrum:

$\lambda > 700$ nm : IR (infrarødt)

700 nm $> \lambda > 400$ nm : synlig lys (R-O-G-G-B-I-F)

400 nm $> \lambda$: UV (ultrafiolett)

⇒ LED med rødt/gult lys med AlGaAs (f.eks.)

— " — blått/fiolett — " — InGaN (f.eks.)

Superledere:

- normalt metall for $T > T_c$
- $\rho = 0$ for $T < T_c$ = materialets kritiske temperatur
- 1911 : Hg, $T_c = 4.2$ K
- 2015 : H₃S (?), $T_c = 203$ K (høyt trykk, $p = 150$ GPa)

