

# 1 Sähköisesti varattujen kappaleiden välillä on vuorovaikutus

Sähkövaraus mikroskooppisena ilmiönä

- sähkövaraus on hiukkaseen tai kappaleeseen liittyvä ominaisuus
- varaus voi olla positiivinen tai negatiivinen
- varauksen tunnus on  $Q$
- sähkövarauksen yksikkö:  
 $[Q] = 1\text{C}$  (coulombi),  $1\text{C} = 1\text{As}$
  
- on olemassa pienin mahdollinen varaus, ns. ALKEISVARAUS  $e$ 
  - protonin varaus =  $+e$
  - elektronin varaus =  $-e$

$$1e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{As} \quad \text{ks. MAOL s. 70}$$

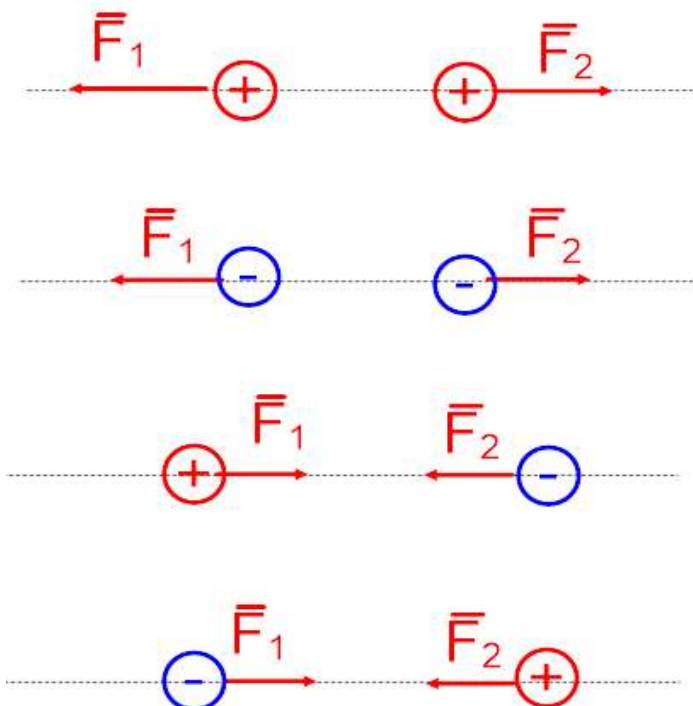
# Sähkövaraus makroskooppisena ilmiönä

Kappaleen kokonaisvaraus  $Q = \pm ne$ , missä  $n$  on (suuri) kokonaisluku.

Makroskooppisen kappaleen varaus muodostetaan **ELEKTRONIEN** avulla, koska elektroneja on helpompi liikutella kuin ytimen protoneja.

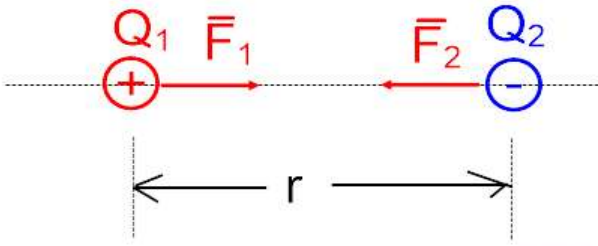
- negatiivinen varaus tarkoittaa sitä, että elektroneja on **LIIKAA**
- positiivinen varaus tarkoittaa sitä, että elektroneja on **LIIAN VÄHÄN**

## 2 Sähköinen voima saadaan Coulombin laista



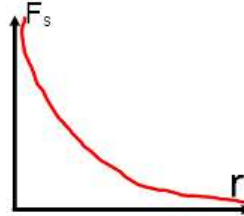
Coulombin voiman suunta riippuu varausten merkeistä.

Coulombin voiman suuruus tyhjiössä:



$$F_1 = F_2 = F_s = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}}_k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

eli 
$$F_s = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$



$k$  = Coulombin lain vakio

$$= 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

$\epsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys =  $8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$   
Ks. MAOL s. 70

Eristeväliaineessa Coulombin voima PIE-NENEE, koska vakio  $\epsilon_0$  korvataan tulolla  $\epsilon_0 \epsilon_r$  ja suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_r$  on aina vähintään ykkönen. Voiman suuruus eristeväliaineessa on silloin

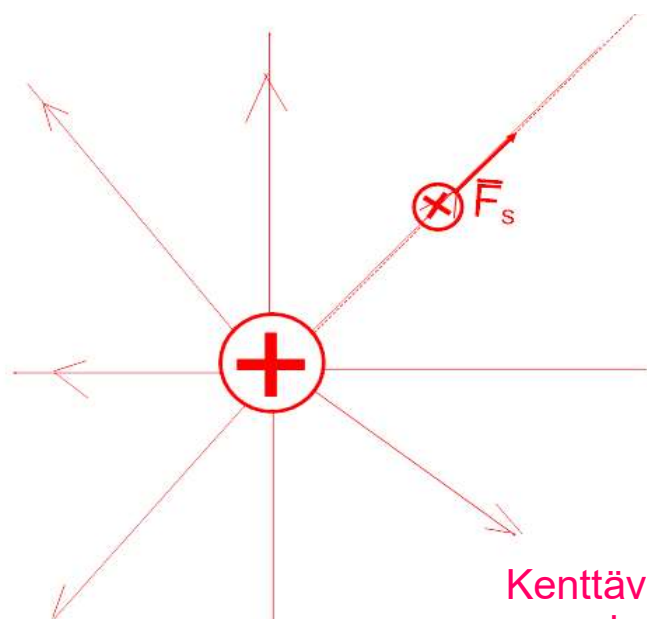
$$F_s = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{\epsilon_r} \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}}_{=k} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

### 3 Sähkövaraus synnyttää sähkökentän

#### Sähkökentän kenttäviivat

- kuvaavat Coulombin voiman SUUNTAA
- kyseessä on ajattelua tukeva MALLI

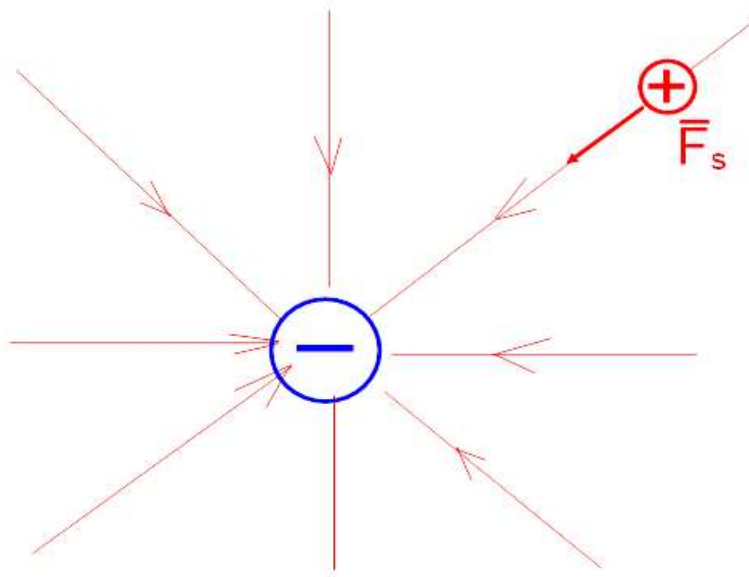
#### Positiivinen varaus



Kenttäviivan  
suunta =  
POSITIIVISEEN  
varaukseen  
kohdistuvan  
Coulombin voiman  
suunta

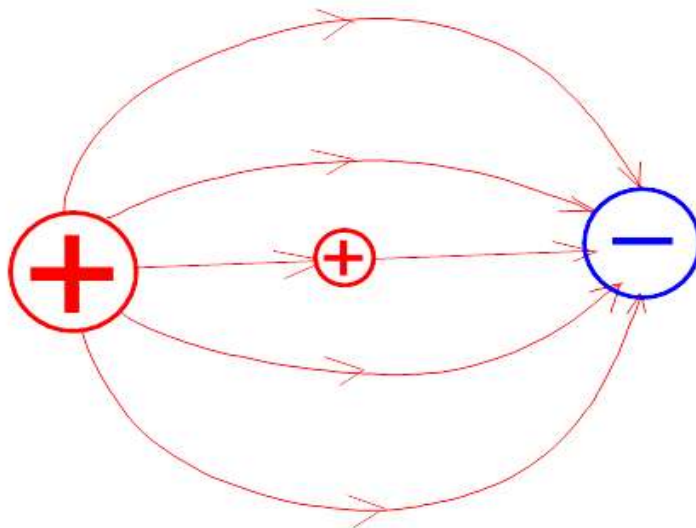
Kenttäviivat suuntautuvat positiivisesta  
varauksesta poispäin.

## Negatiivinen varaus

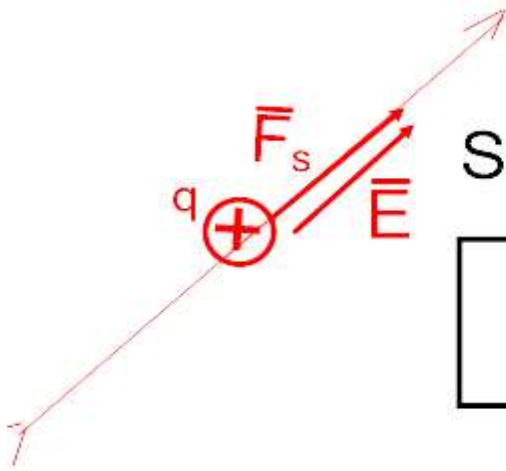


Suunta: KOHTI  
negatiivista  
varausta

## Varausparin (dipolin) kenttäviivat:



# Sähkökentän voimakkuus $\vec{E}$ = "Electric Field"



Sähkökentän voimakkuus

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_s}{q} \quad \text{eli} \quad \vec{F}_s = q\vec{E}$$

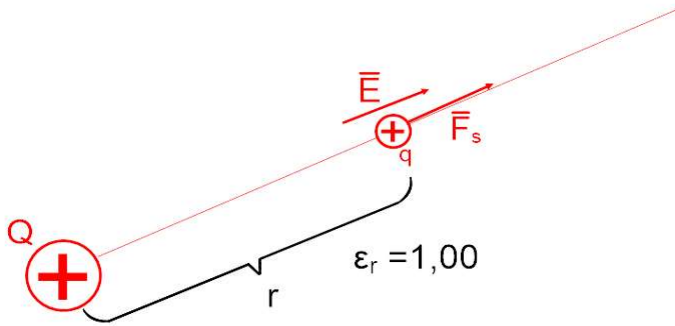
Vektorisuure!

$\vec{E}$ : n suunta = kenttäviivan tangentin suunta

$$[E] = \frac{[F_s]}{[q]} = \frac{1\text{N}}{1\text{C}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$\begin{aligned} \text{Toisaalta } [E] &= 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{Cm}} = \frac{1\text{J}}{\text{Asm}} = \frac{1\text{Ws}}{1\text{Asm}} \\ &= \frac{1\cancel{\text{VA}}\text{s}}{1\cancel{\text{A}}\text{sm}} = \underline{1 \frac{\text{V}}{\text{m}}}. \end{aligned}$$

# Pistevarauksen sähkökenttä



## Coulombin voiman suuruus

$$F_s = k \frac{Qq}{r^2}$$

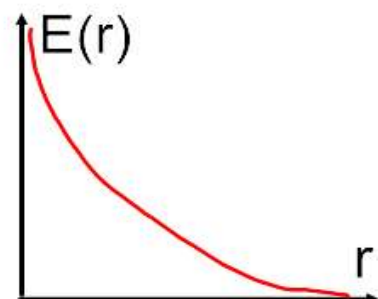
Pistevaraus  $Q$  tuottaa ympärilleen sähkökentän voimakkuuden

$$E = \frac{F_s}{q} = k \frac{Qq}{qr^2} = k \frac{Q}{r^2}$$

Siis

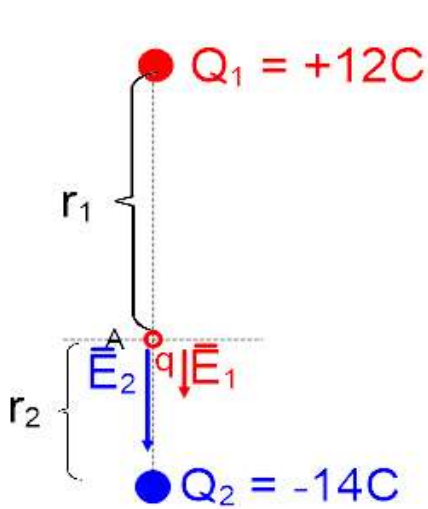
$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

MAOL s. 131



# ESIMERKKI 2 s. 33

## Ukkospilven malli



$r_1 = 2,0 \text{ km}$   
 $r_2 = 1,0 \text{ km}$   
 $\epsilon_r = 1,0006 \text{ (ilma)}$

Kenttävoimakkuudet:

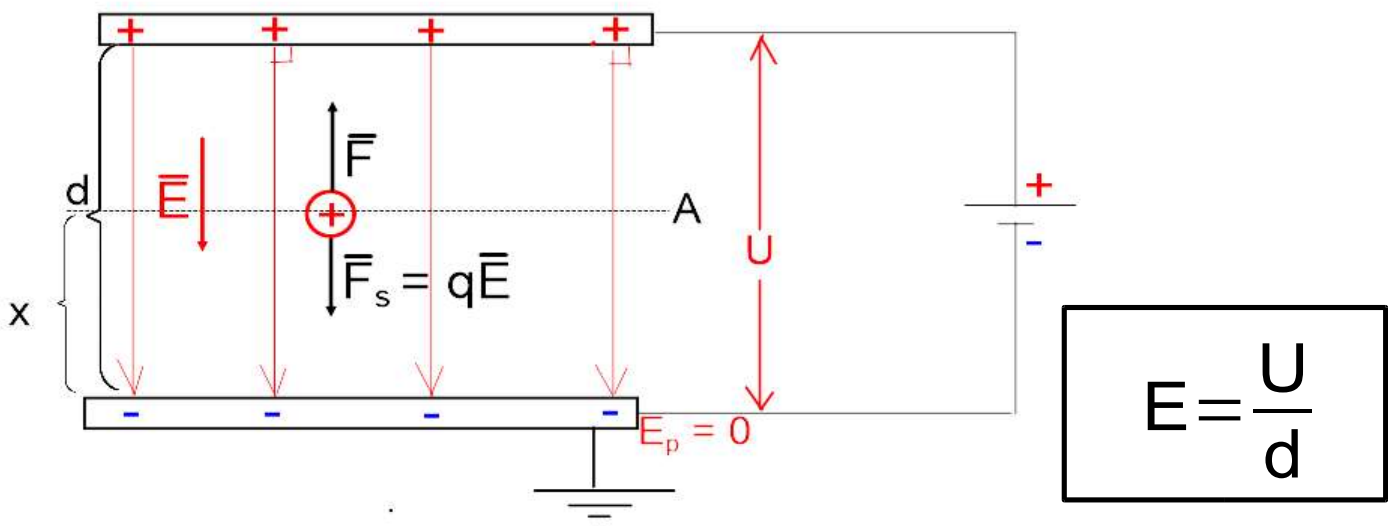
$$E_1 = \frac{F_{s1}}{q} = \frac{kQ_1q}{\cancel{q}\epsilon_r r_1^2} = \frac{kQ_1}{\epsilon_r r_1^2}$$

Sijoitus:

$$E_1 = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot 12 \text{ C}}{1,0006 \cdot 2000^2 \text{ m}^2} \approx 26946 \text{ N/C}$$

## 4 Potentiaali on potentiaalienergia varausyksikköä kohti

### Homogeeninen sähkökenttä





Oleellista:  $\bar{E} = \text{vakio}$

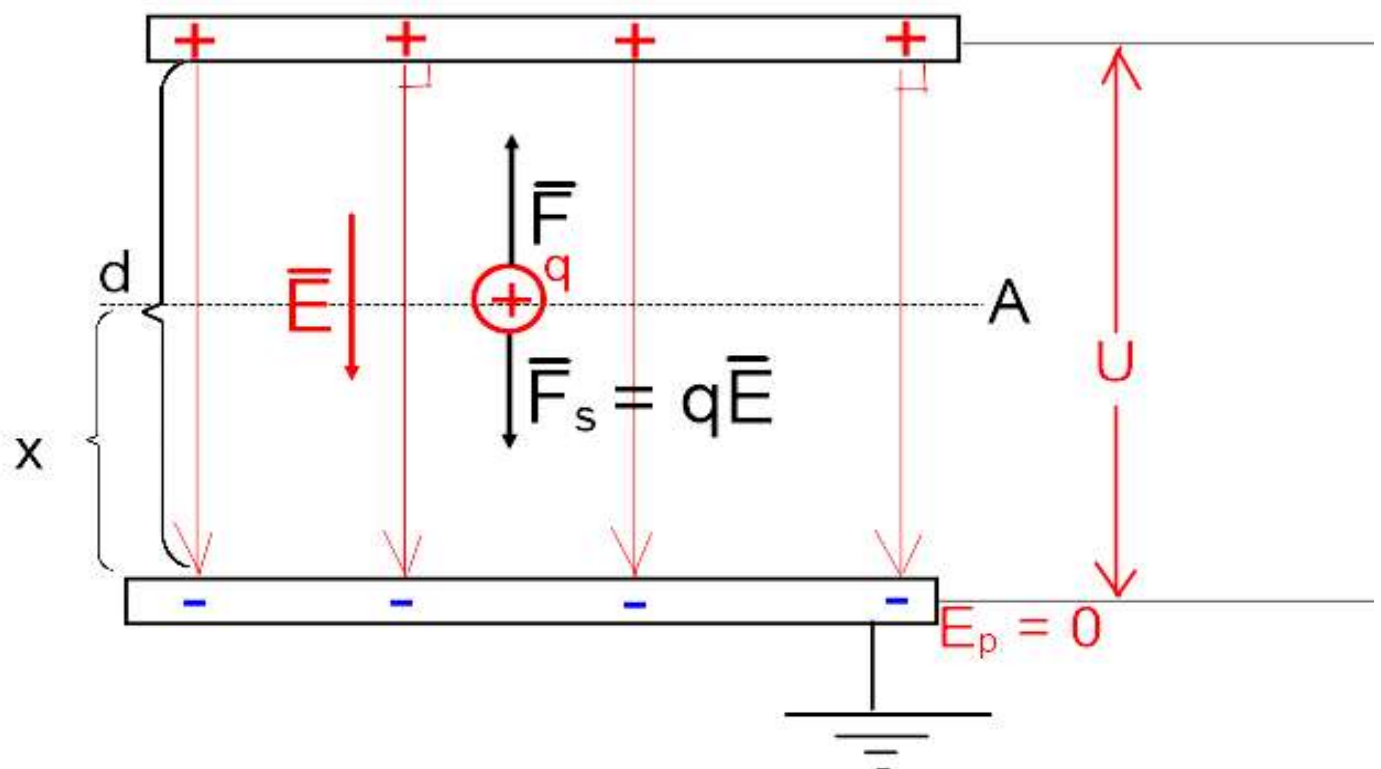
siis: sähkökentän suunta ja suuruus ovat vakioita

seuraus: kenttäviivat ovat YHDEN-SUUNTAISIA

Coulombin voima on helppo laskea:

$$\bar{F}_s = q\bar{E} \quad (= \text{vakio})$$

Potentiaalienergia



$$F = |\vec{F}| = |\vec{F}_s| = qE$$

Varatun hiukkasen potentiaalienergia

$$E_{p,A} = F \cdot x = qEx$$

Siis  $E_{p,A} = qEx$       Vrt.  $E_p = mgh$

## Määritellään SÄHKÖKENTÄN POTENTIAALI

$E_p = \text{VOIMA} \cdot \text{MATKA}$

$$V_A = \frac{E_{p,A}}{q} \quad \text{eli} \quad V_A = \frac{E_{p,A}}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$$

MAOL s. 131

Siis  $V_A = Ex$       Etäisyys  $x$  mitataan kenttäviivan suunnassa.

Potentiaalin yksikkö:

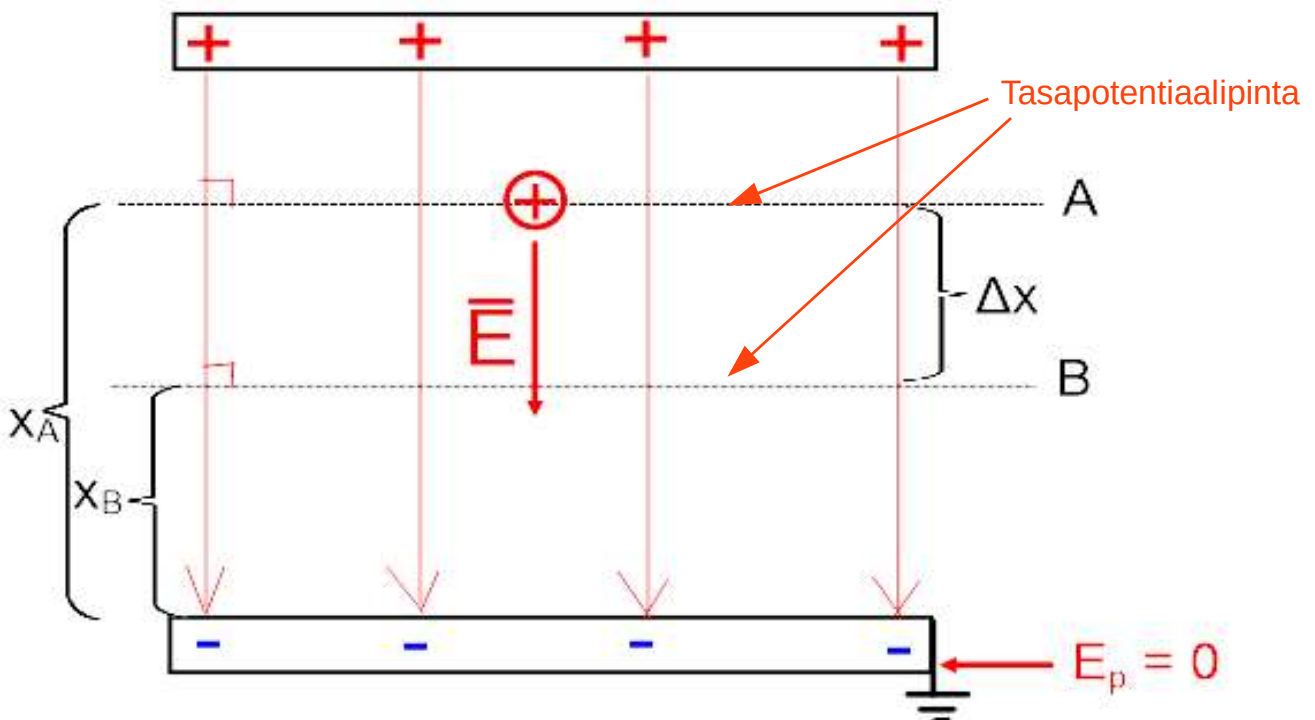
$$[V] = \frac{[E_p]}{[q]} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}} = \frac{1\text{Ws}}{1\text{As}} = \frac{1\text{VAs}}{1\text{As}} = 1\text{V (voltti)}$$

Potentiaalin määritelmästä saadaan sähkökentän voimakkuus:

$$V_A = Ex \text{ eli } E = \frac{V_A}{x}$$

Erityisesti  $E = \frac{U}{d}$

$U$  = levyjen välinen jännite  
 $d$  = levyjen välinen etäisyys



$$V_A = Ex_A \quad \text{ja} \quad V_B = Ex_B$$

## Potentiaaliero

$$\begin{aligned} U_{AB} &= V_A - V_B = Ex_A - Ex_B \\ &= E(x_A - x_B) = E\Delta x \end{aligned}$$


$$\Delta x$$

Sähkökentän tekemä työ siirtymässä A  $\Rightarrow$   
B:

$$\begin{aligned} W &= E_{p,A} - E_{p,B} = qV_A - qV_B \\ &= q(V_A - V_B) = qU_{AB} \end{aligned}$$


$$U_{AB}$$

Siis

$$W = qU$$

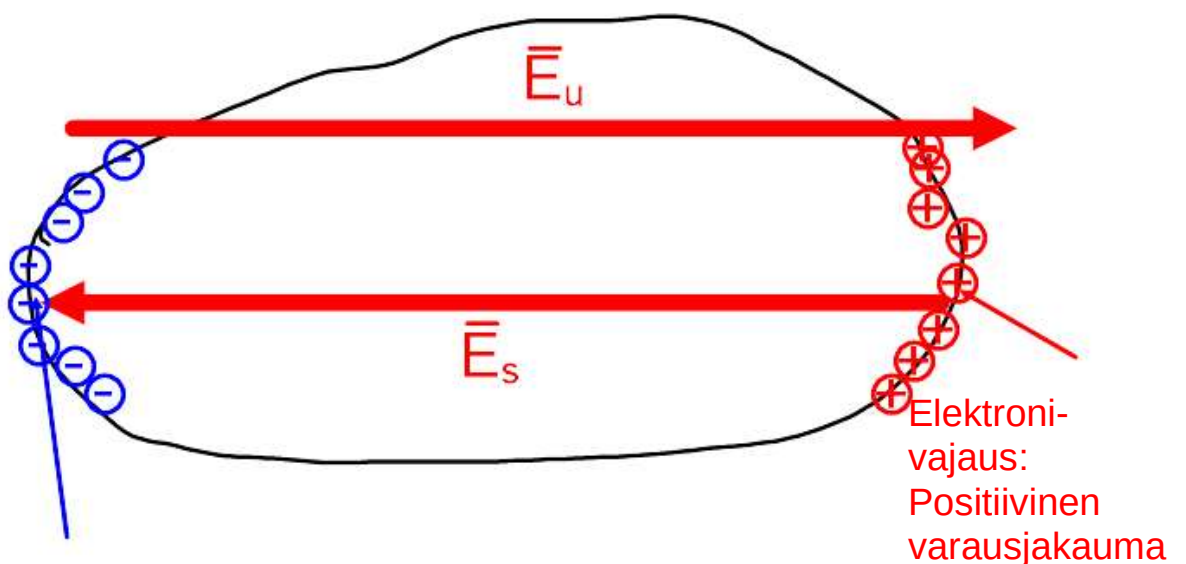
MAOL s. 131

Pätee myös, jos sähkökenttä on epähomogeeninen.

## 5 Sähkökenttä vaikuttaa aineeseen

### Johde sähkökentässä

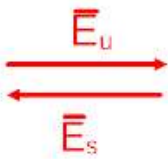
Johdeaineessa on HELPOSTI LIIKKUVIA varattuja hiukkasia, useimmiten elektroneja.



Elektronit siirtyvät:  
Negatiivinen varausjakauma

Varausjakaumista seuraa sisäinen sähkökenttä  $\bar{E}_s$ .

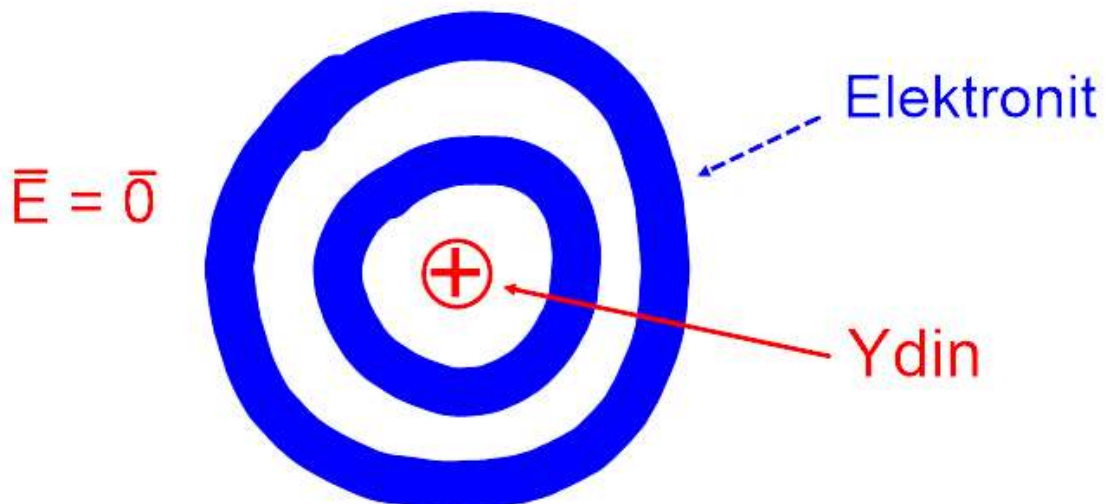
Lopputuloksena on tasapainotila:


$$\bar{E}_j = \bar{E}_u + \bar{E}_s = \bar{0}$$

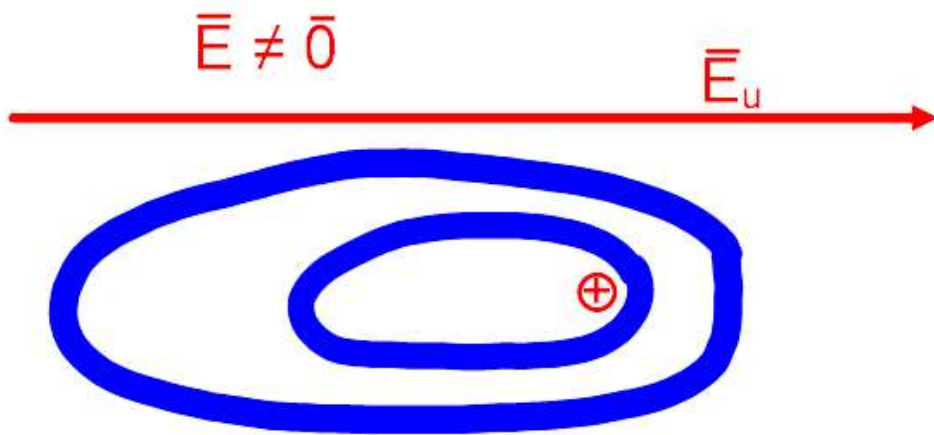
Johdekappaleen sisällä ei voi olla staattista sähkökenttää.

## Eriste sähkökentässä

Vapaa atomi on lähes pallosymmetrinen varausjakauma:

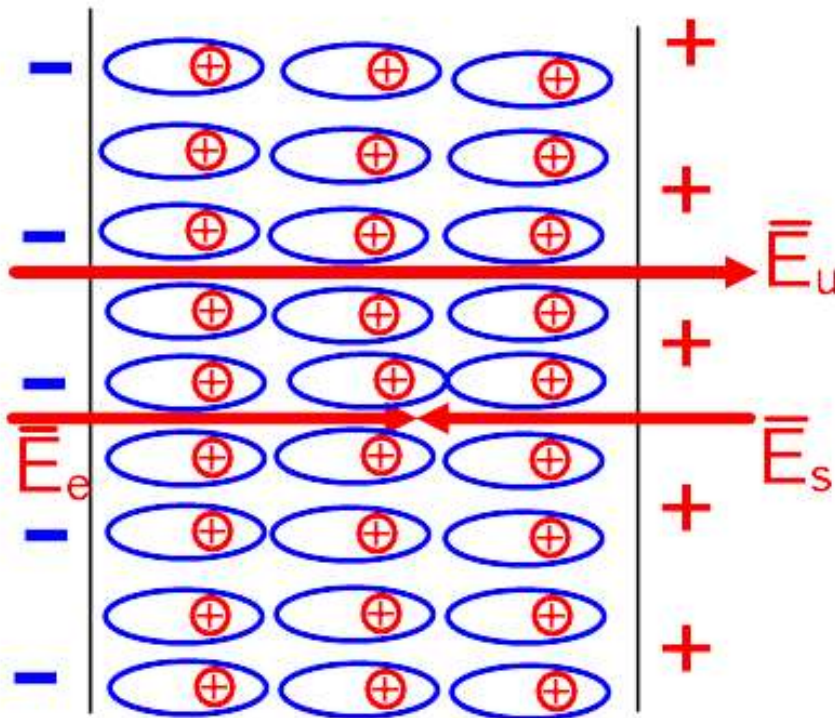


# Sähkökentässä...

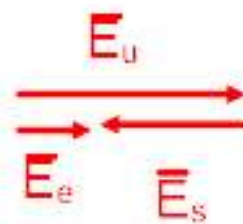


... pallosymmetrisestä atomista tulee POOLINEN eli se POLARISOITUU

Eristemateriaalissa KAIKKI atomit polarisoituvat:



Rajapinnoille  
syntyy PINTAVARAUS,  
ja samalla syntyy  
SISÄINEN  
SÄHKÖKENTTÄ  $\vec{E}_s$ .



Sisäinen kenttä pienentää ulkoista kenttää,  $\bar{E}_s$  ja  $\bar{E}_u$  ovat vastakkaisuuntaisia ja kokonaiskenttä eristeväliaineessa on

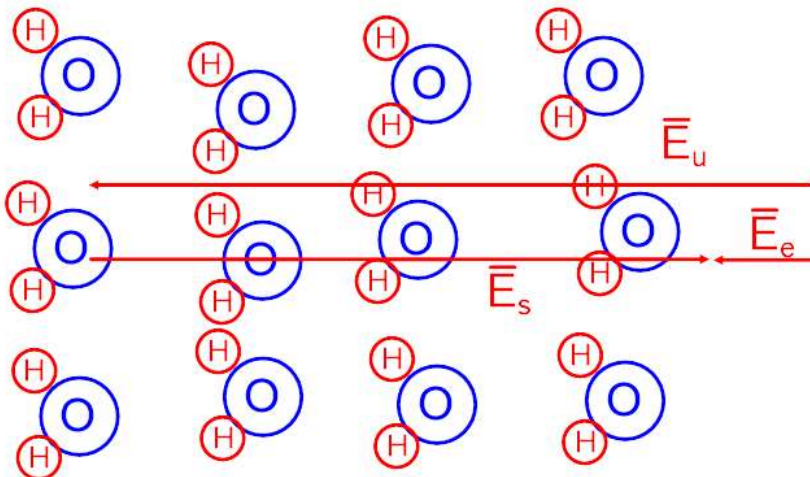
$$\bar{E}_e = \bar{E}_u + \bar{E}_s$$

Kokonaiskenttä voidaan laskea suhteellisen permittiivisyyden  $\epsilon_r$  avulla: Ks. MAOL s. 96

$$\bar{E}_e = \frac{\bar{E}_u}{\epsilon_r}$$

**Sähkökenttä siis PIENENEÄ eristeessä.**

Pooliset nesteet reagoivat ulkoiseen sähkökenttään voimakkaasti eli niiden suhteellinen permittiivisyys on suuri. Molekyylien ei tarvitse polarisoitua, vaan ne ainoastaan kiertyvät ulkoisen kentän vaikutuksesta:





Vastaavasti

$$E_2 = \frac{F_{s2}}{q} = \frac{kQ_2q}{q\epsilon_r r_2^2} = \frac{kQ_2}{\epsilon_r r_2^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot 14\text{C}}{1,0006 \cdot 1000^2 \text{m}^2}$$

$$\approx 125750 \text{N/C}$$

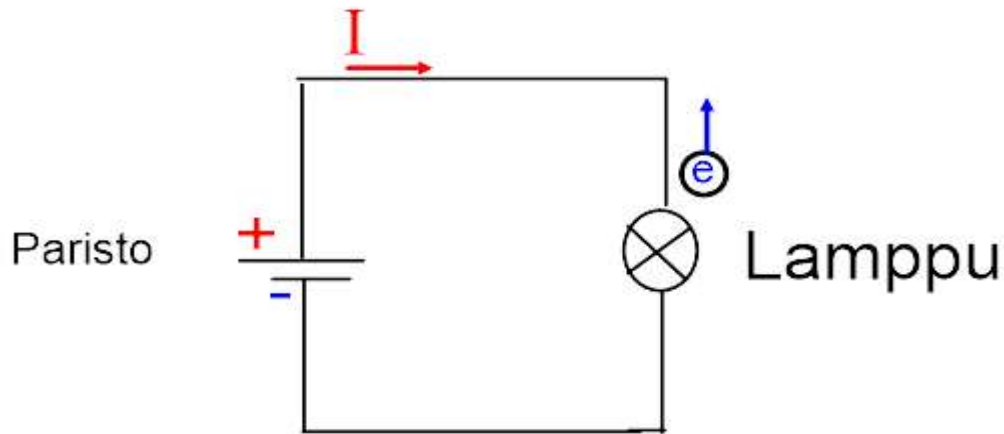
Kokonaiskenttä ( $\vec{E}_1 \uparrow \uparrow \vec{E}_2$ )

$$E = E_1 + E_2 = 26496 \text{ N/C} + 125750 \text{ N/C} \\ \approx 150 \text{ kN/C} = 150 \text{ kV/m. Suunta: ALASPÄIN.}$$

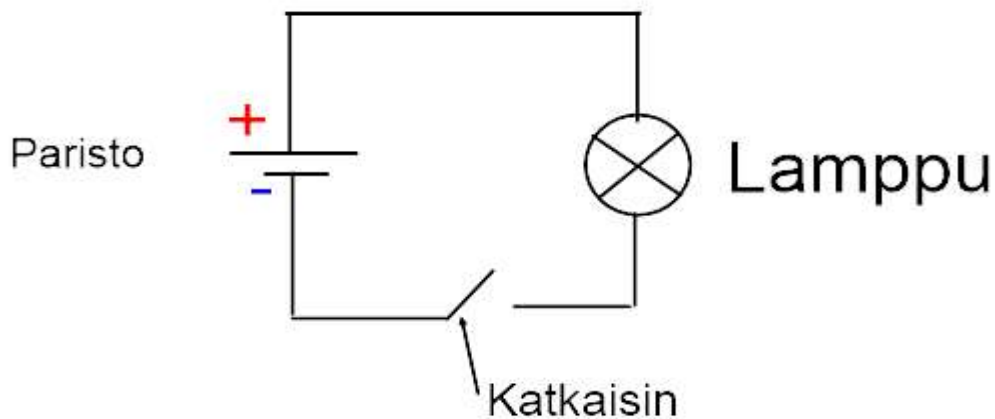
## 6 Kaikissa sähkölaitteissa on yksi tai useampi virtapiiri

Sähkövirta syntyy, kun VARATUT HIUKKASET LIIKKUVAT.

Jotta varatut hiukkaset pystyvät liikkumaan, tarvitaan SULJETTU VIRTAPIIRI:



Jos virtapiiri on AVOIN, sähkövirta ei kulje:



$$\text{Sähkövirta} = \frac{\text{Siirretty sähkövaraus}}{\text{Käytetty aika}}$$

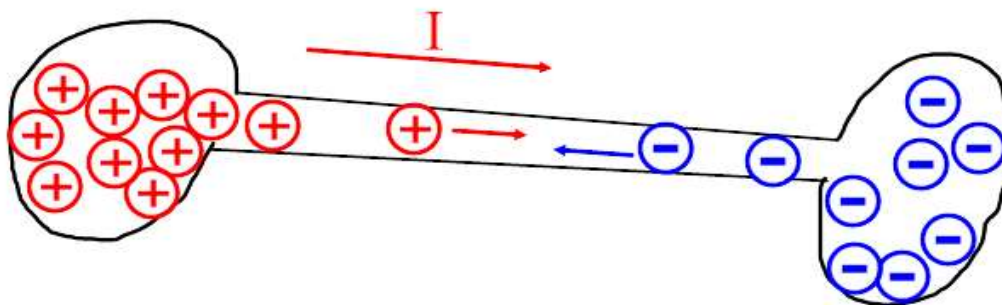
Kaava:  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$

[I] = 1A (ampeeri)

[ $\Delta Q$ ] = 1C (coulombi), 1C = 1As

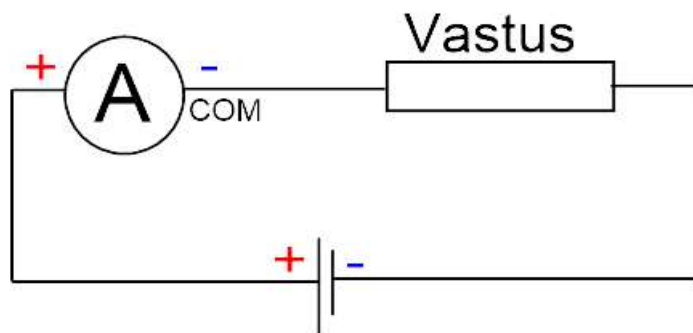
[ $\Delta t$ ] = 1s (sekunti)

Sähkövirran suunta...



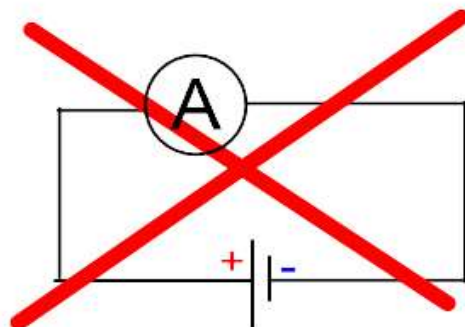
= POSITIIVISEN VARAUKSEN LIIKESUUNTA (silloinkin kun virran kuljettajat ovat elektroneja)

Sähkövirtaa mitattaessa virtamittari kytketään SARJAAN:



-virtamittari ei saa häiritä virtapiirin toimintaa (eli se ei saa rajoittaa sähkövirran kulkua)

-virtamittaria EI SAA kytkeä suoraan jännitelähteeseen:



# Sähkönjohtavuus

## Sähkövirtaa kuljettavat

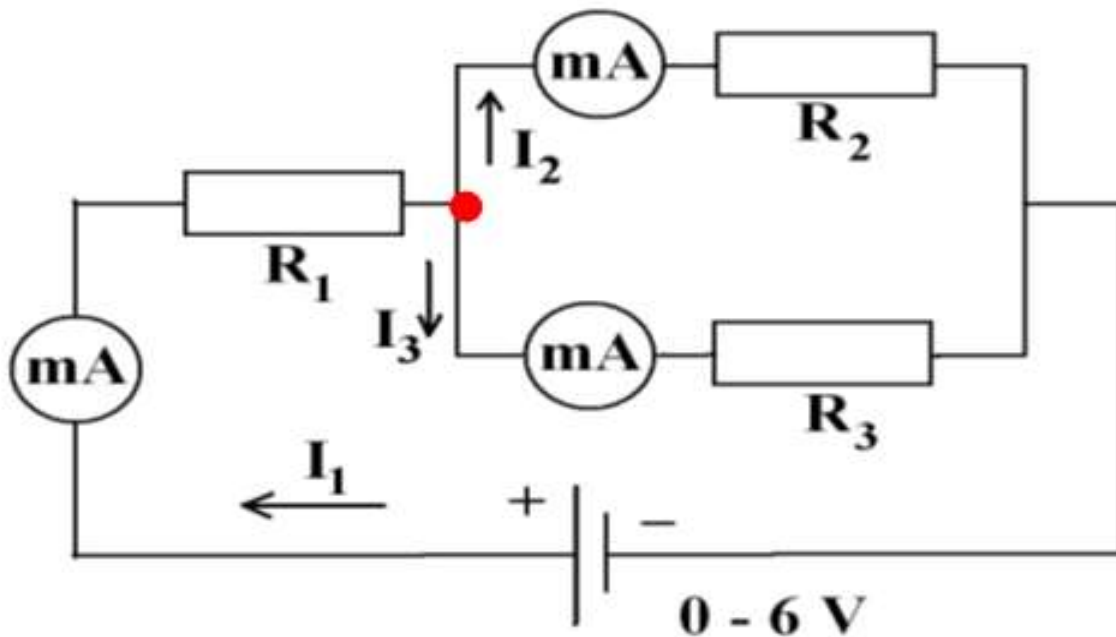
- kiinteässä aineessa (metalleissa) elektronit
- nesteissä (vesiliuoksissa) ionit
- harvassa kaasussa ionit ja elektronit

Aineet voidaan luokitella sähkönjohtokyvyn mukaan

- johteisiin (johtavat hyvin)
- puolijohteisiin (johtavat melko huonosti) ja
- eristeisiin (johtavat erittäin huonosti)

# Kirchhoffin 1. laki

KytKentä:

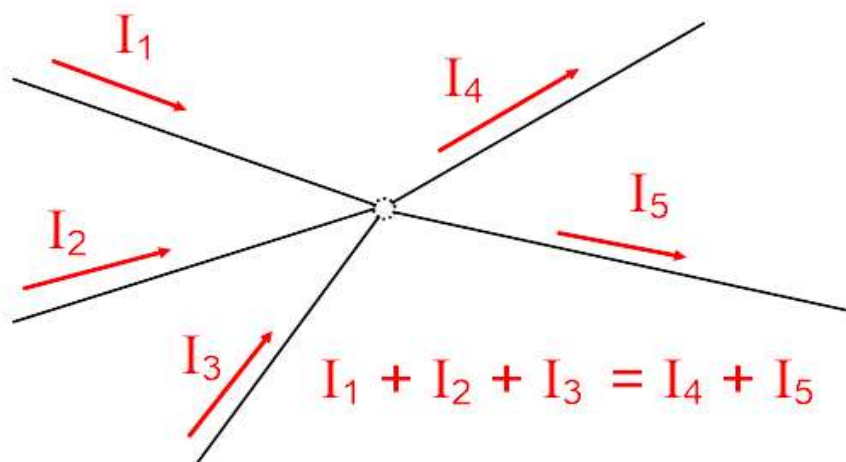


Mittaus n:o	$I_1$ (mA)	$I_2$ (mA)	$I_3$ (mA)	$I_2 + I_3$ (mA)
1	1,79	1,22	0,57	1,79
2	4,13	2,81	1,32	4,13
3	6,66	4,54	2,13	6,67
4	9,28	6,32	2,96	9,28
5	11,88	8,09	3,80	11,89
6	14,67	10,00	4,69	14,69

Johtopäätös: Mittaustarkkuuden rajoissa

$$I_1 = I_2 + I_3$$

## Yleistys: Kirchhoffin 1. laki



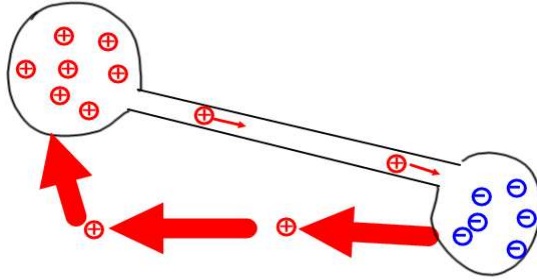
eli  $\boxed{\Sigma I_{\text{Tulo}} = \Sigma I_{\text{Lähtö}}}$  K I

Sähkövirralla on

- lämpövaikutus (sähköenergia muuttuu lämmöksi)
- magneettinen vaikutus (liikkuvien varattujen hiukkasten välillä on ns. MAGNEETTINEN voima)
- kemiallinen vaikutus (pakotetut hapetus-pelkistysreaktiot)

# 7 Potentiaal muutokset ja Kirchhoffin II laki

-jännite on sähkövirtaa ylläpitävä ominaisuus



Jännite pitää yllä varausjakaumaa esim. kemiallisen energian avulla.

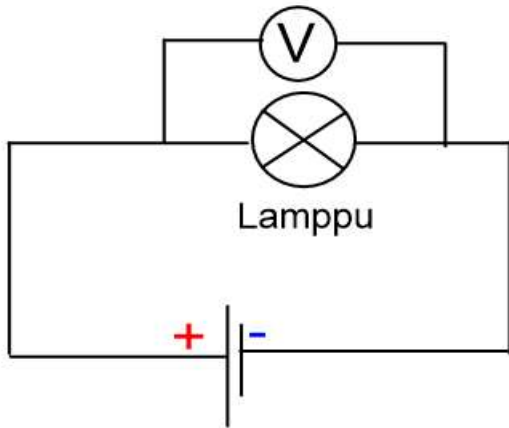
## Jännitelähde

Jännitelähde voi toimia esim.

- kemiallisella energialla
- aurinkoenergialla
- magneettiseen voimaan perustuvalla energialla



# Jännitteen mittaaminen



Virtapiirin täytyy toimia, vaikka jännitemittari irroitetaan.

Jännitemittari kytketään tutkittavan laitteen RINNALLE.

## Potentiaali

### Pisteen potentiaali

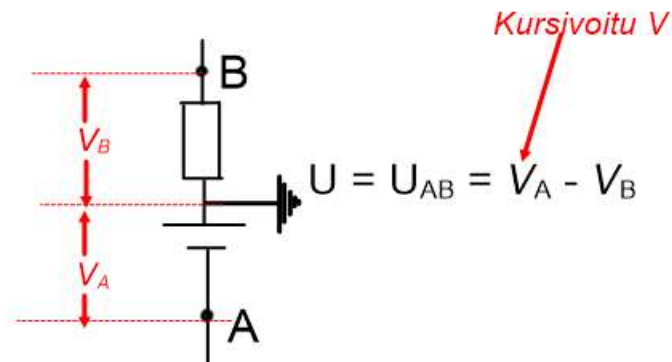
Virtapiirin potentiaali tarkoittaa jännitettä johonkin sovittuun nollakohtaan verrattuna. Potentiaalin nollakohta merkitsee varatun hiukkasen potentiaalienergian nollakohtaa.

Potentiaalin nollakohta merkitään maadoitusmerkillä:








# Jännite

Kahden virtapiirin pisteen välinen jännite on sama kuin vastaava potentiaaliero:

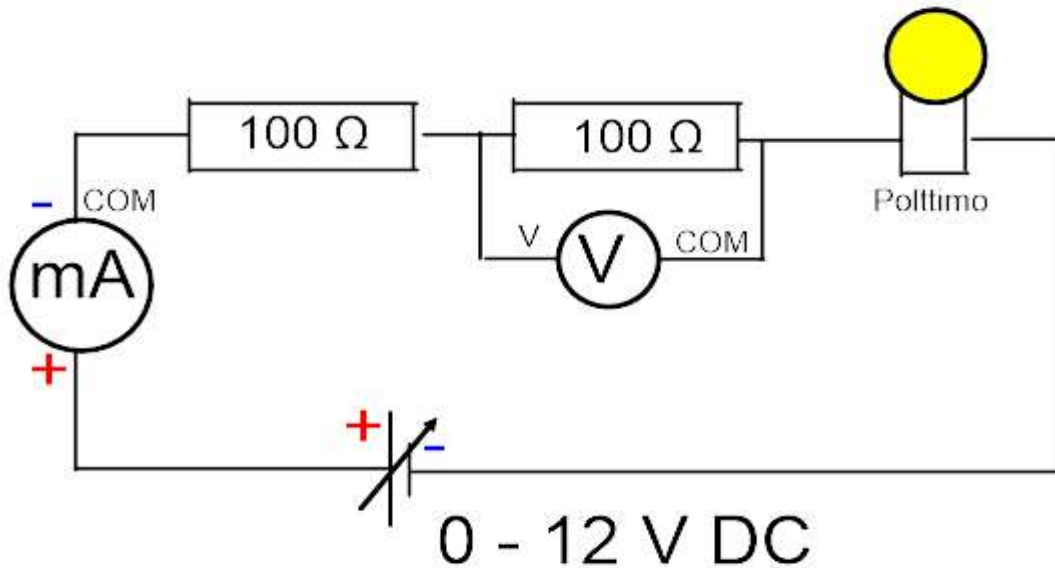


Potentiaalın merkisäännöt:

Tarkastelusuunta: 			
			
$\Delta V = +E$	$\Delta V = -E$	$\Delta V = -RI$	$\Delta V = +RI$

# 8 Resistanssi kuvaa komponentin kykyä vastustaa sähkövirtaa

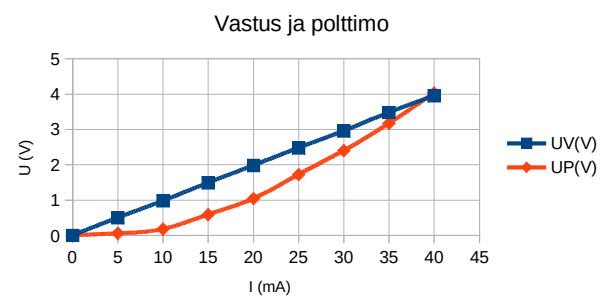
KytKentä:



$I(\text{mA})$	$U_V(\text{V})$	$U_P(\text{V})$
0,0	0,00	0,00
5,0	0,50	0,06
10,0	0,98	0,18
15,0	1,49	0,59
20,0	1,98	1,04
25,0	2,48	1,72
30,0	2,96	2,40
35,0	3,48	3,17
40,0	3,95	4,03

$U_V(\text{V})$  = vastuksen jännite

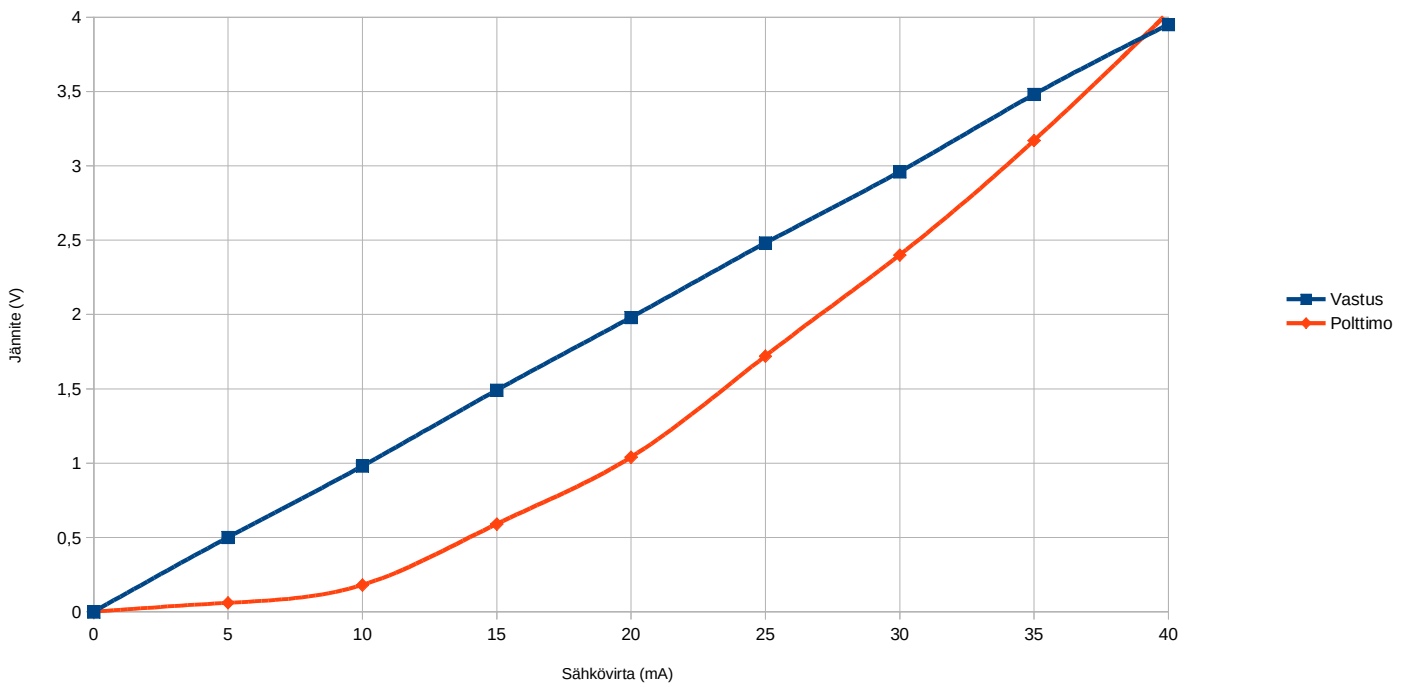
$U_P(\text{V})$  = polttimon jännite



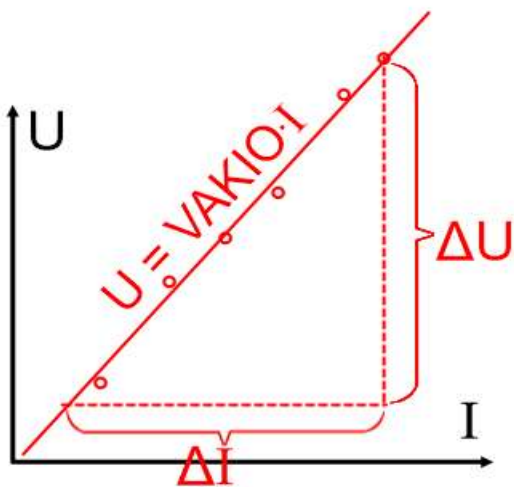
Mitattu 16.08.2021

## Ohmin lain mittausta

Vastus ja polttimo



Tulokset:  
Vastus



Johtopäätös:

$$U = \text{VAKIO} \cdot I$$

eli

$$U = R \cdot I$$

$R$  = johtimen resistanssi

$R = \text{VAKIO}$ , kun lämpötila on vakio

Toisaalta  $R$  on suoran fysikaalinen kulma-kerroin eli

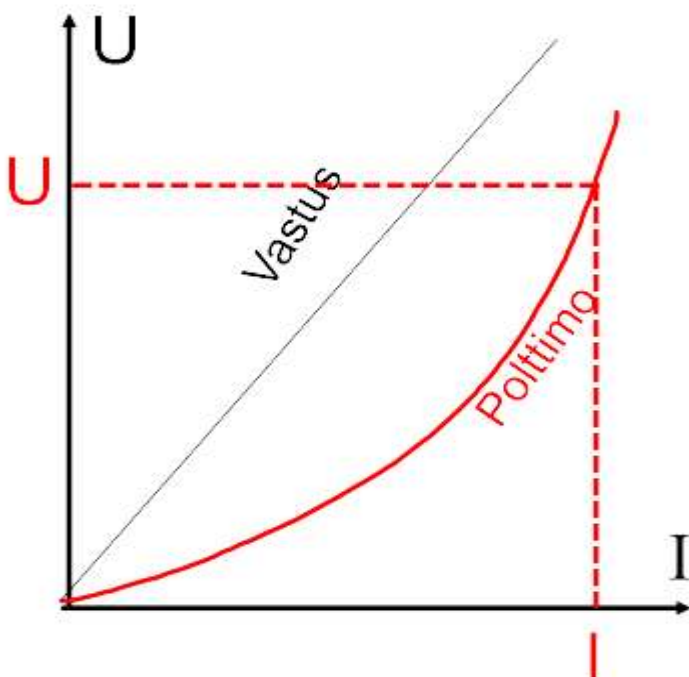
$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \dots = 100\text{V/A} = 100\Omega.$$

Resistanssin yksikkö:

$$[R] = \frac{[\Delta U]}{[\Delta I]} = \frac{1\text{V}}{1\text{A}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1\Omega. \text{ (ohmi)}$$

"Omega"

Polttimo



**LANKA LÄMPENEE!**

Oleellista on, että polttimon jännitteen kuvaaja EI OLE SUORA.

Nytkin voidaan määritellä, että  $U = RI$  eli.

$$R = \frac{U}{I},$$

mutta  $R$  ei ole vakio, vaan resistanssi kasvaa sähkövirran kasvaessa (eli lämpötilan kohotessa).

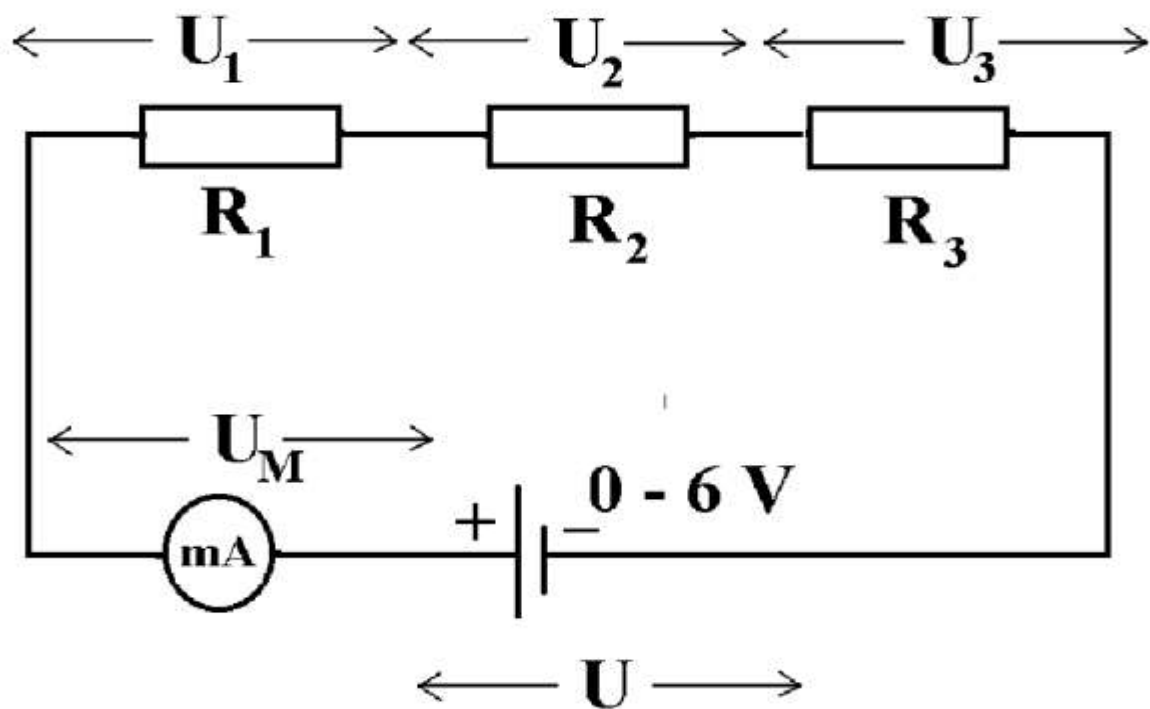
Metallilangan resistanssi siis KASVAA lämpötilan kohotessa.

## Jännitehäviö

1. Mittaa yleismittarilla kytkentälevyllä olevien vastusten resistanssit  $R_1$ ,  $R_2$  ja  $R_3$ .

Tulokset:  $R_1 \approx 10 \Omega$ ,  $R_2 \approx 22 \Omega$ ,  $R_3 \approx 33 \Omega$ .

## 2. Rakenna seuraava kytkentä:



Valitse jännitelähteestä erilaisia jännitteitä ja mittaa sähkövirta  $I$  sekä jännitteet  $U$ ,  $U_M$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  ja  $U_3$ .

Vaihda rohkeasti yleismittarin paikkaa. Taulukointi:

$I(\text{mA})$	$U(\text{V})$	$U_M(\text{V})$	$U_1(\text{V})$	$U_2(\text{V})$	$U_3(\text{V})$
10,1	0,715	0,037	0,101	0,227	0,341
19,8	1,365	0,073	0,195	0,439	0,657
29,7	2,04	0,109	0,292	0,654	0,980
40,7	2,80	0,152	0,400	0,898	1,343
49,8	3,42	0,185	0,488	1,097	1,642
59,8	4,12	0,240	0,585	1,316	1,967

Johtopäätökset?

Mitattu 20.08.2019

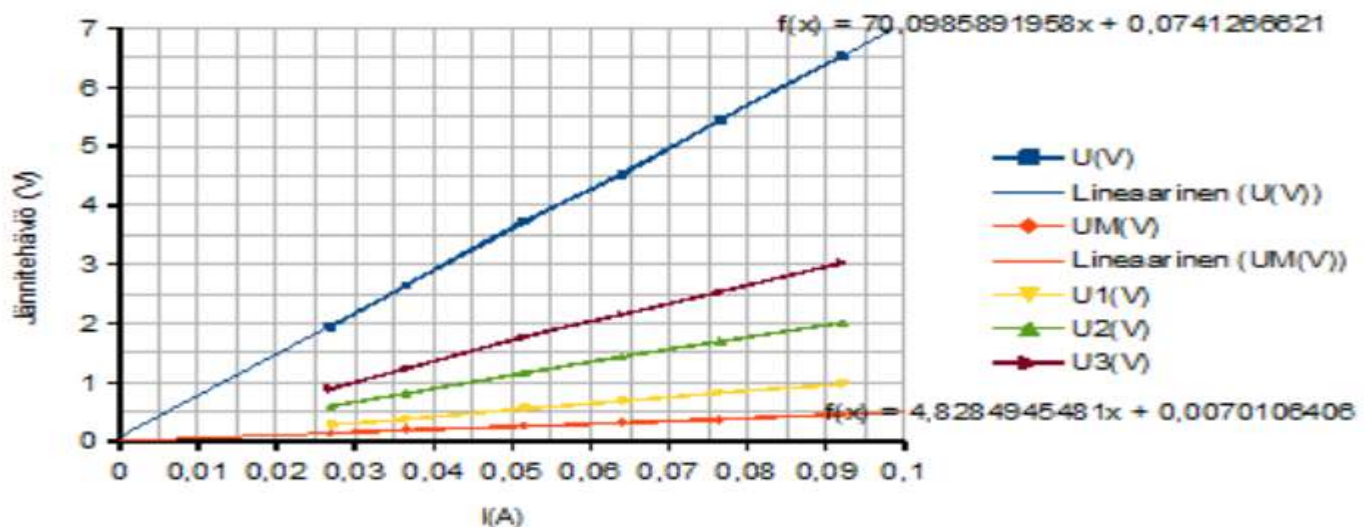
## Johtopäätökset:

- mittaustarkkuuden rajoissa jokainen komponentti toteuttaa Ohmin lakia eli  $U_1 = R_1 I$ ,  $U_2 = R_2 I$  jne.
- mittaustarkkuuden rajoissa kokonais-jännite on osiensa summa eli  $U = U_1 + U_2 + U_3 + U_M$

## Kirchhoffin II laki:

KII: Virtapiirissä lähdejännitteiden summa = jännitehäviöiden summa.

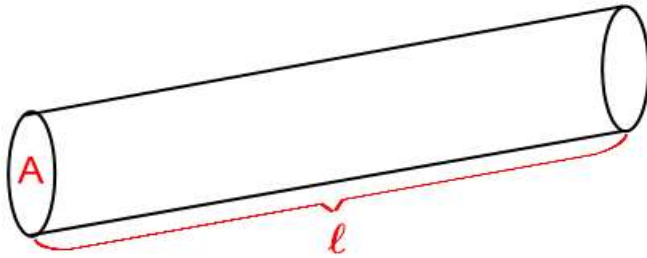
Taulukon perusteella voidaan piirtää seuraavat kuvaajat





# 9 Resistiivisyys on aineen ominaisuus

## Resistanssin riippuvuudet



Metallijohtimen resistanssi riippuu

- materiaalista
- johtimen pituudesta ja
- poikkipinta-alasta (tasapaksu johdin)

Resistanssin lauseke:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

MAOL s. 131

← "rho"

$\rho$  = resistiivisyys (riippuu metallista,  $[\rho] = 1\Omega\text{m}$ )

$l$  = johtimen pituus,  $[l] = 1\text{m}$ ,

$1\Omega = 1\text{V/A}$

$A$  = johtimen poikkipinta-ala,  $[A] = 1\text{m}^2$

**Johtimen poikkipinta-ala on muunnettava neliömetreiksi!**

# Resistiivisyys riippuu aineesta ja lämpötilasta

Aineet voidaan luokitella sähkönjohtokyvyn mukaan

- johteisiin (johtavat hyvin)
- puolijohteisiin (johtavat melko huonosti) ja
- eristeisiin (johtavat erittäin huonosti)

Resistiivisyyden erot näiden aineryhmien välillä ovat huikean suuria:

Aine	$\rho(10^{-8} \Omega\text{m})$
Kupari	1,678
Pii	$1,0 \cdot 10^{11}$
Polyeteeni	$3,0 \cdot 10^{23}$

ESIMERKKI: Kuparijohdin

$$A = 1,0 \text{ mm}^2 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$R = 1,0 \text{ } \Omega$$

$$\rho = 1,687 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$$

$$l = ?$$

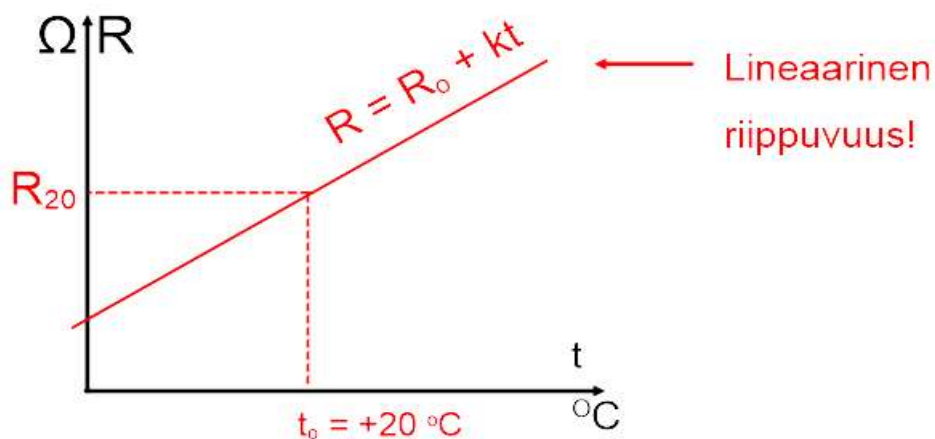
Kaava:  $R = \frac{\rho l}{A}$ , joten

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{1,0 \cancel{\Omega} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \cancel{\text{m}^2}}{1,687 \cdot 10^{-8} \cancel{\Omega\text{m}}}$$

$$\approx 59,59\text{m} \approx 60 \text{ m.}$$

## Lämpötilan vaikutus resistanssiin

Metallijohtimien resistanssi KASVAA lämpötilan kohotessa:



Kuvaajan matemaattinen malli:  $R = R_0 + kt$

Sähkötekniikassa resistanssin lämpötila-riippuvuus määritellään seuraavasti:

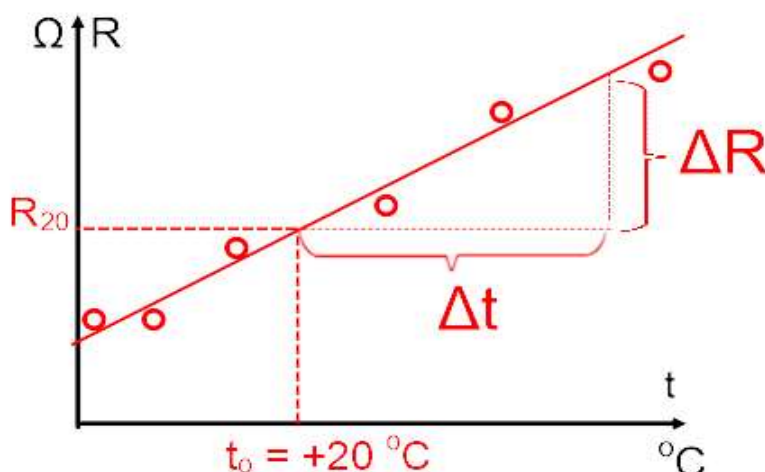
$$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t) = R_{20}(1 + \alpha(t - t_0)), t_0 = +20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Tietyn materiaalin resistiivisyyden muutoksia kuvaa RESISTIIVISYYDEN LÄMPÖTILA-KERROIN  $\alpha$ ,  $[\alpha] = 1/^\circ\text{C}$ . Ks. MAOL s. 94, 131

$\alpha$  kertoo, kuinka paljon resistiivisyys muuttuu suhteellisesti, kun lämpötila muuttuu yhdellä asteella.

Miten  $\alpha$  määritetään?

- mitataan kyseisestä materiaalista tehdyn johtimen resistansseja eri lämpötiloissa
- piirretään kuvaaja:



- määritetään kuvaajalta normitusresistanssi  $R_{20}$  ja kulmakerroin  $k = \frac{\Delta R}{\Delta t}$
- lasketaan  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_{20} \Delta t}$$

Miksi?

Tiedetään:  $R = R_0 + kt = \text{VAKIO}_1 + \text{VAKIO}_2 \cdot t$

ja toisaalta  $R = R_{20}(1 + \alpha(t - t_0))$  eli

$R = R_{20} + R_{20}\alpha(t - t_0)$  eli

$R - R_{20} = R_{20}\alpha(t - t_0) \quad | : (t - t_0) \quad$  eli  $R_{20}\alpha = \underbrace{\frac{R - R_{20}}{t - t_0}}_k$

Siis  $R_{20}\alpha = k$  eli  $R_{20}\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t}$  eli

$\alpha = k/R_{20}$  eli

$$\alpha = \frac{1}{R_{20}} \frac{\Delta R}{\Delta t}$$

# 10 Sähkölaitteet muuntavat energiaa muodosta toiseen

Sähkölaitteen teho  $P = UI$  Pätee tasavirtapiireissä.

Tehon yksikkö:

$$[P] = [U][I] = 1V \cdot 1A = 1VA = 1W \text{ (watti).}$$

$$\text{Toisaalta } 1W = 1J/s = 1 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^3}.$$

Sähkölaitteen toimintaan liittyy Ohmin laki  $U = RI$ . Silloin  $P = UI = RI \cdot I = RI^2$ .

$$\text{Lisäksi } I = \frac{U}{R}, \text{ joten } P = UI = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}.$$

Koonti:  $P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$

Sähköenergia = TEHO · AIKA eli

$$E = Pt = UIt$$

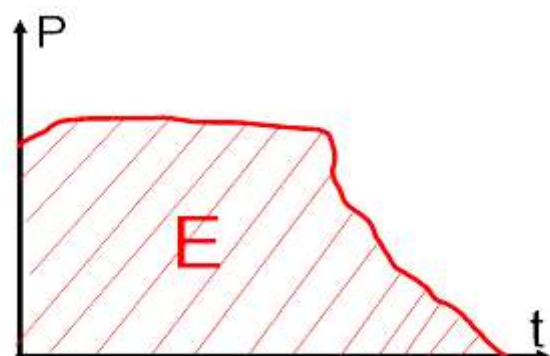
Sähköenergian yksikkö:

$$[E] = [P][t] = 1W \cdot 1s = 1J/s \cdot 1s = 1J.$$

Kun teho on vakio:



Muuttuva teho, pinta-  
alatulkinta:



Käytännön yksikkö sähköenergialle on  
KILOWATTITUNTI:

$$\begin{aligned}1 \text{ kWh} &= 1\text{k}\cdot 1\text{W}\cdot 1\text{h} \\ &= 1000\cdot 1\text{J/s}\cdot 3600\text{s} \\ &= 3600\cdot 1000\text{J} \\ &= 3600000\text{J} = 3,6\text{MJ}.\end{aligned}$$

Yksi kilowattitunti sähköenergiaa maksaa noin 10 -  
15 senttiä.

10.16.  $t = 30\text{min} = 1800\text{s}$   
 $V = 15\text{m}^3$   
 $m = 15000\text{kg},$   
 $h = 15\text{m}$   
 $U = 395\text{V}$   
 $I = ?$   
 $\eta = 0,65$

$$P_{\text{tuotto}} = P_{\text{otto}} = \eta UI \text{ eli } E_{\text{tuotto}} = P_{\text{tuotto}} \cdot t = \eta UIt$$

$$\text{Toisaalta } E_{\text{tuotto}} = \Delta E_p = mgh$$

$$\text{Siis } \eta UIt = mgh \quad | : \eta Ut$$

$$I = \frac{mgh}{\eta Ut} = \frac{15000\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 15\text{m}}{0,65 \cdot 395\text{V} \cdot 1800\text{s}}$$

$$\approx 4,776\text{A} \approx \underline{4,8\text{A}}$$

$$[I] = \frac{[m][g][h]}{[U][t]} = \frac{1\text{kg} \cdot 1\text{m/s}^2 \cdot 1\text{m}}{1\text{V} \cdot 1\text{s}} = \frac{1\text{J}}{1\text{Vs}}$$

$$= \frac{1\text{Ws}}{1\text{Vs}} = \frac{1\cancel{\text{V}}\text{As}}{1\cancel{\text{V}}\text{s}} = 1\text{A}$$

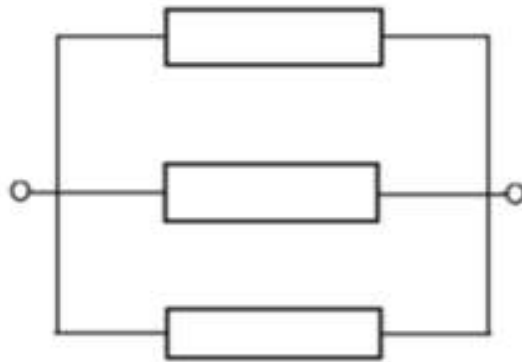
## 11 Vastukset rajoittavat sähkövirtaa

### Vastusten sarja- ja rinnankytkentä

1. Tutustu käytössä olevaan yleismittariin ja etsi siitä resistanssin mittaustoiminto.
2. Tarkista, kuinka hyvin käytössäsi olevien vastusten ilmoitetut resistanssit pitävät paikkaansa.



2. Kytke vastuksia RINNAKKAIN ja mittaa kytkennän kokonaisresistanssi. Koeta keksiä sääntö, jonka avulla voidaan laskea rinnakkain kytkettyjen vastusten kokonaisresistanssi.



3. Kytke seuraavaksi vastuksia SARJAAN. Miten kokonaisresistanssi nyt käyttäytyy?

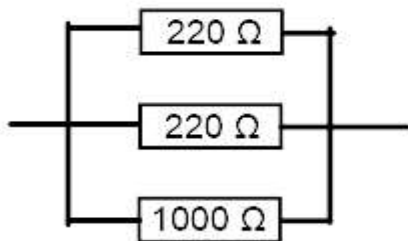


4. Sovellus: Rakenna annetuista vastuksista kytkentä, jonka resistanssi on mahdollisimman tarkasti

- a) 100 ohmia      b) 200 ohmia  
c) 300 ohmia      d) 400 ohmia

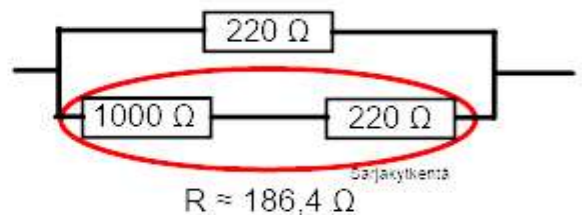
Ratkaisut:

a): 100  $\Omega$

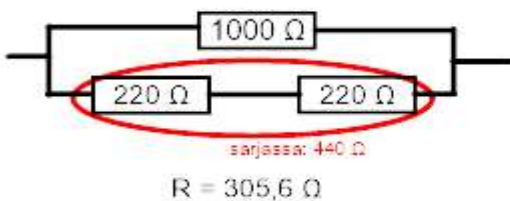


Tarkka tulos:  
 $R \approx 99,1 \Omega$

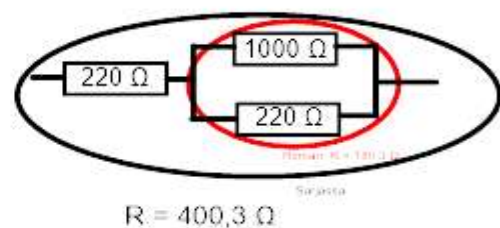
b): 200  $\Omega$



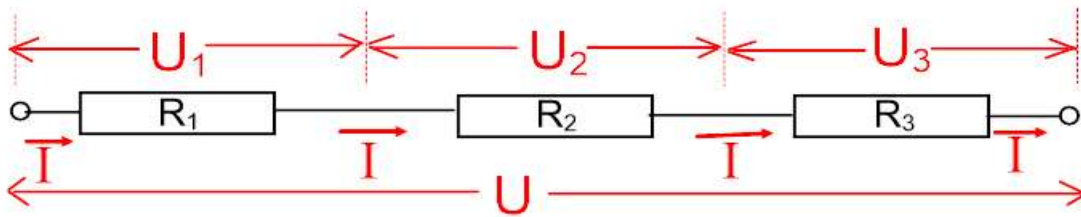
c): 300  $\Omega$



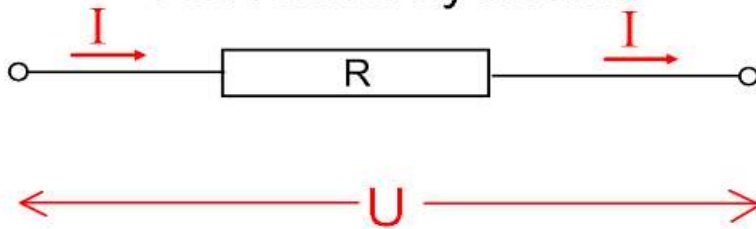
d): 400  $\Omega$



## Sarjakytkentä



Korvaava kytkentä:



IDEA: Sama sähkövirta kulkee kaikkien vastusten läpi.

Kokonaisjännite

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 \quad | \quad U_i = R_i I \\ &= R_1 I + R_2 I + R_3 I \\ &= (R_1 + R_2 + R_3) I \end{aligned}$$

Toisaalta  $U = RI$ .

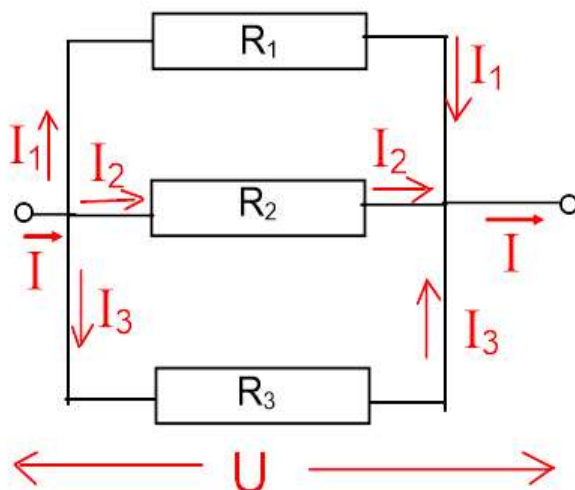
Johtopäätös:  $R = (R_1 + R_2 + R_3) \parallel I$

eli  $R = R_1 + R_2 + R_3$  MAOL s. 132

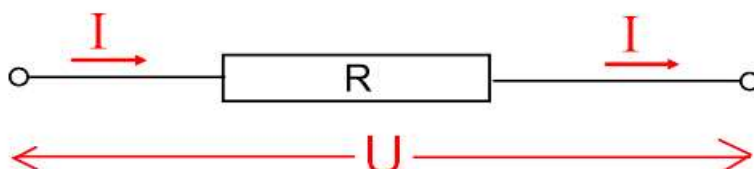
Yleistys: n kpl vastuksia sarjassa:

$$R = \underbrace{R_1 + R_2 + \dots + R_n}_{n \text{ kpl}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

## Rinnankytkentä



Korvaava kytkentä:



IDEA: Kaikkien vastusten jännitehäviö = U.  
Kokonaisvirta

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad | I_i = \frac{U}{R_i}$$
$$= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U$$

Toisaalta  $I = \frac{U}{R} = \left( \frac{1}{R} \right) U$

Siis  $\left( \frac{1}{R} \right) U = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U \quad | :U$

eli  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$  MAOL s. 132

Yleistys: n kpl vastuksia rinnakkain:

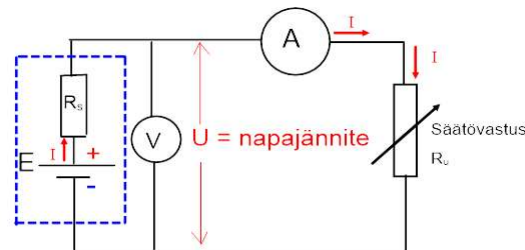
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

n kpl

# 12 Paristolla on sisäinen resistanssi

## Pariston napajännite ja lähdejännite

KytKentä:



$R_s$  = pariston sisäisen vastuksen resistanssi

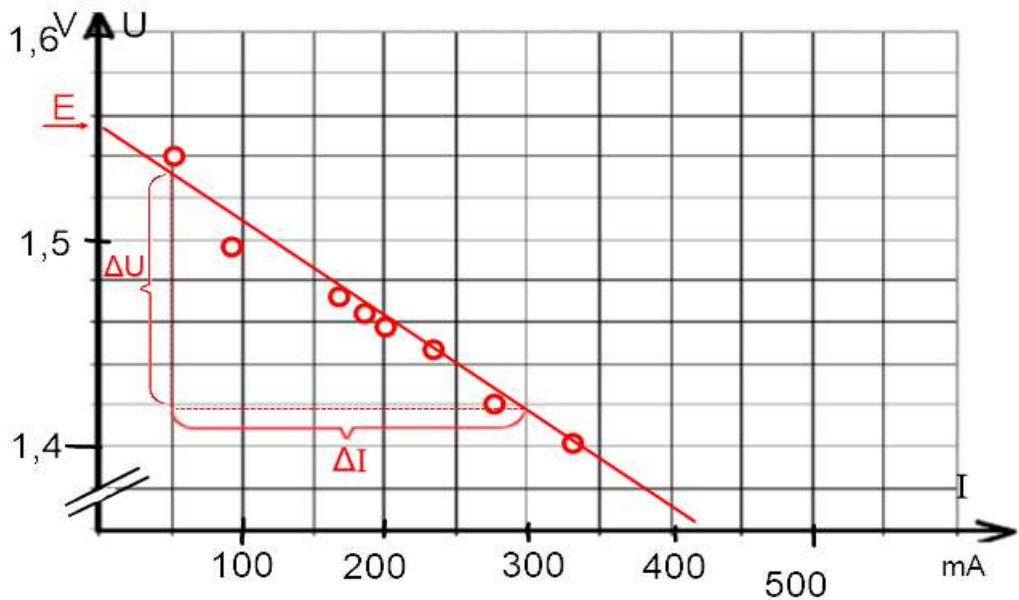
$E$  = pariston lähdejännite = kuormittamattoman pariston napajännite

Kuormitusmittaus:

$I$  = paristosta otettava virta

$U$  = pariston napajännite

I(A)	U(V)
0,049	1,538
0,093	1,486
0,169	1,475
0,179	1,464
0,203	1,458
0,234	1,448
0,274	1,422
0,333	1,395

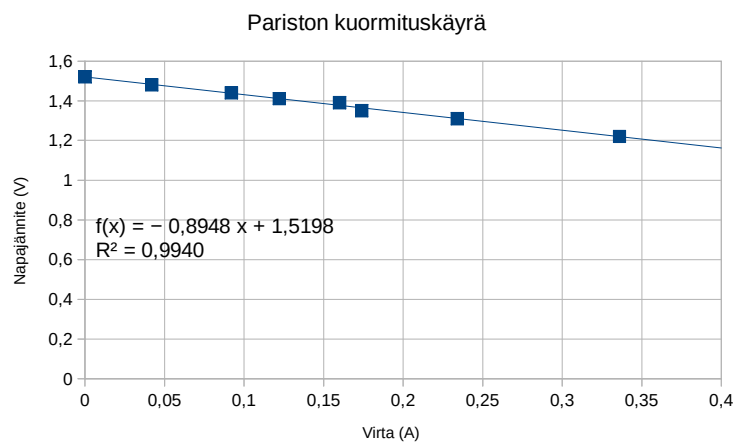


Mitattu oppitunnilla 290817

Sovitukset:

$$E = 1,546\text{V}, R_s = 0,4454\Omega$$

I(A)	U(V)
0,000	1,52
0,042	1,48
0,092	1,44
0,122	1,41
0,160	1,39
0,174	1,35
0,234	1,31
0,336	1,22



Mitattu oppitunnilla 31.8.2021

Sovitukset:  $E \approx 1,52\text{ V}$ ,  $R_s \approx 0,89\ \Omega$

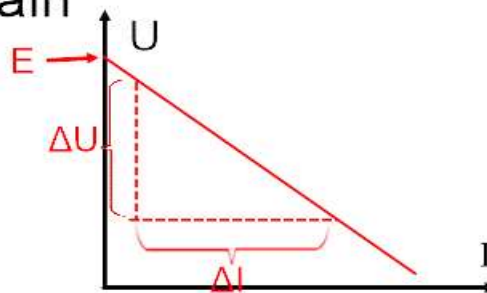
Tulkinta Kirchhoffin II lain avulla:

$$E = R_s I + R_u I$$

$$E - R_s I = R_u I$$

= U = napajännite

$$\text{eli } U = E - R_s I$$



E = suoran yhtälön vakiotermi

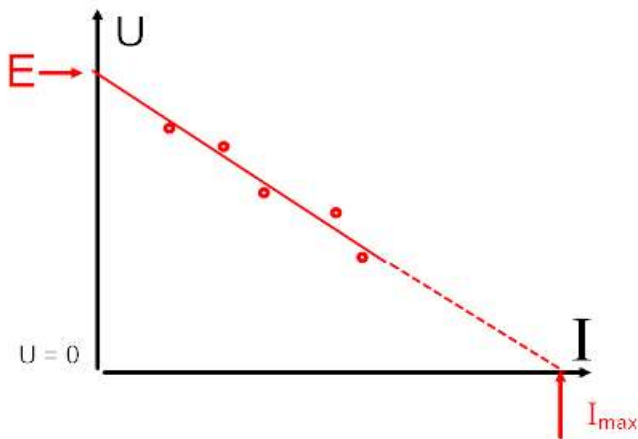
Miinusmerkki: LASKEVA SUORA

Sisäinen resistanssi saadaan kulmakertoimen itseisarvona:

$$R_s = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| \approx 0,89 \Omega.$$



Sisäinen resistanssi määrää suurimman sähkövirran, joka paristosta voidaan saada:



Laskennallinen tulkinta:

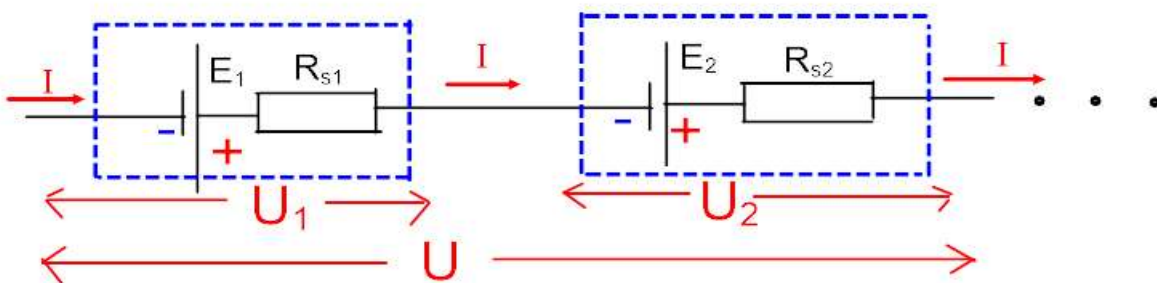
$$U = 0 \text{ eli } E - R_s I = 0$$

$$R_s I = E, \text{ josta}$$

$$I = I_{\max} = \frac{E}{R_s}$$

## Paristojen kytkennät

Sarjakytkentä ("Lisää jännitettä")



$$\begin{aligned}
 U &= U_1 + U_2 = E_1 - R_{s1}I + E_2 - R_{s2}I \\
 &= \underbrace{E_1 + E_2}_E - \underbrace{(R_{s1} + R_{s2})}_{R_s}I = E - R_s I.
 \end{aligned}$$

Yleistys: Jos n kpl paristoja kytketään sarjaan, kytkennälle on voimassa ehdot

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} + \dots + R_{sn}$$

Sarjakytkentä antaa suuremman jännitteen!

Rinnankytkentä

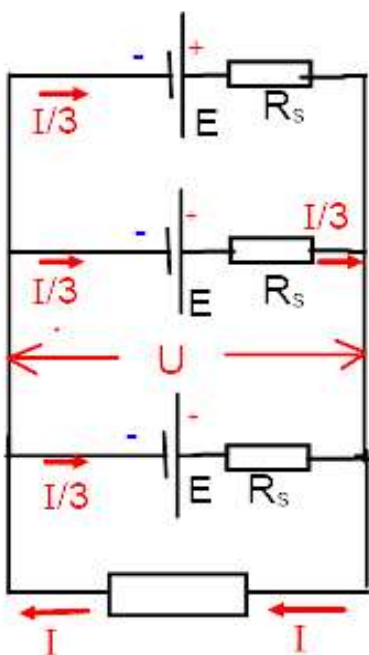
Rinnankytkentä on mielekäs vain jos komponentit ovat identtisiä.

Napajännite:

$$U = E - R_s \frac{I}{3} = E - \frac{1}{3} R_s I$$

$$= E - \underline{R_{s,kok}} I$$

$$\text{eli } R_{s,kok} = \underline{\frac{R_s}{3}}$$



Säännöt identtisten paristojen rinnan-kytkentään (n kpl paristoja rinnakkain):

$$R_{s,kok} = \frac{R_s}{n}$$

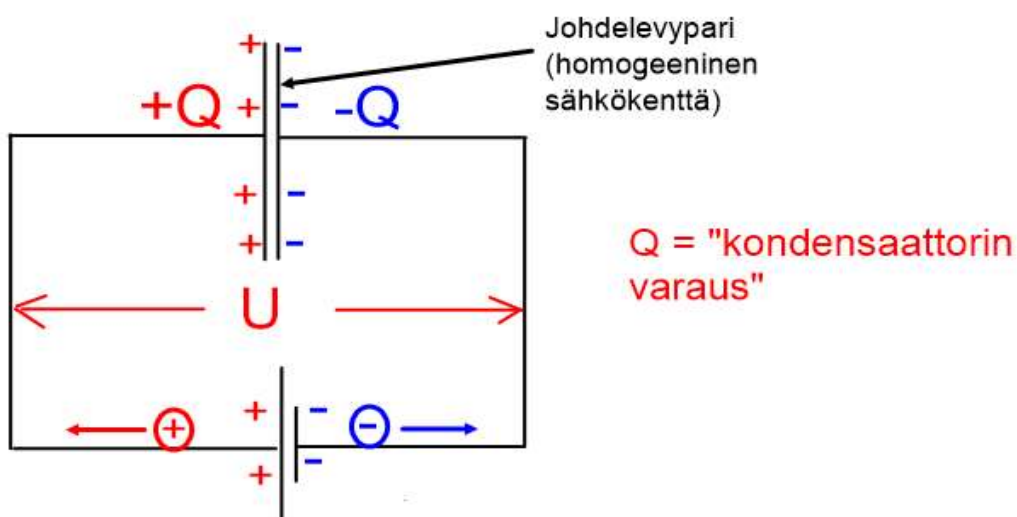
$$U = E - R_{s,kok} I = E - \frac{R_s}{n} I$$

Rinnankytkennästä saadaan enemmän sähkövirtaa.

Lisäksi systeemi toimii, vaikka yksi paristo lakkaisi toimimasta.

### 13 Kondensaattoriin voi varastoida energiaa

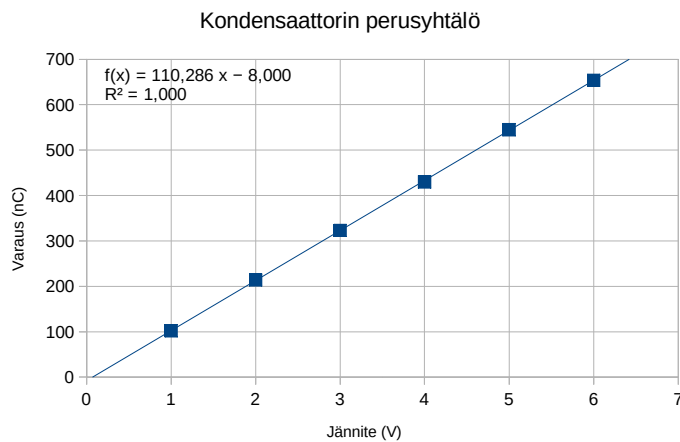
Kondensaattori on laite, johon voidaan ladata sähkövirtaa:



# Varauksen ja latausjännitteen välinen riippuvuus

-mitataan varaus Q ja jännite U

U(V)	Q(nC)
1,0	102
2,0	214
3,0	323
4,0	430
5,0	545
6,0	654



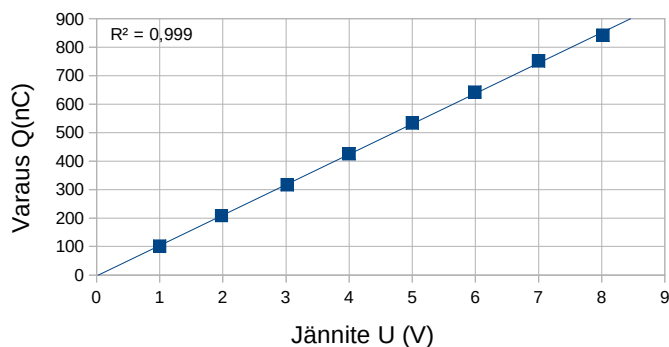
Johtopäätös:

$$Q = \text{vakio} \cdot U \text{ eli } Q = CU$$

# Varauksen ja latausjännitteen välinen riippuvuus

-mitataan varaus Q ja jännite U

U(V)	Q(nC)
1,00	101
1,98	208
3,02	317
4,00	426
5,00	534
5,99	642
7,00	752
8,02	842



Johtopäätös:

$$Q = \text{vakio} \cdot U \text{ eli } Q = CU$$

Tämä mittaus löytyy myös Pedanetistä FY3-kansiosta:  
Kondensaattorin latauskäyrä.ods

Kondensaattorin perusyhtälö:

Varaus  $Q$  riippuu latausjännitteestä  $U$

$$Q = CU$$

$C$  = kondensaattorin KAPASITANSSI

Kapasitanssin yksikkö:

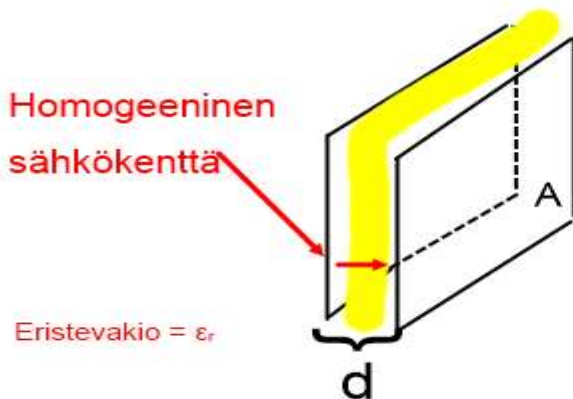
$$Q = CU, \text{ jolloin } C = \frac{Q}{U} \quad \text{ja}$$

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{1C}{1V} = 1 \frac{C}{V} = 1F \text{ (faradi)}$$

Yleensä kapasitanssit ovat pieniä  
(suuruusluokkaa 1pF - 1mF).

# Levykondensaattori

- kaksi lähekkäistä johdepintaa
- välissä mahdollisimman hyvä ja ohut eriste



Levykondensaattorin kapasitanssi

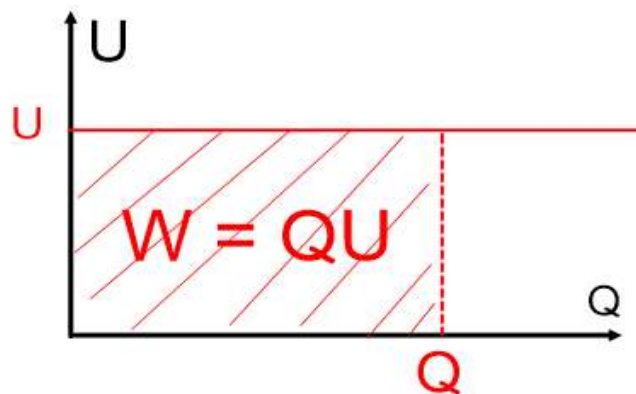
$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

MAOL s.131

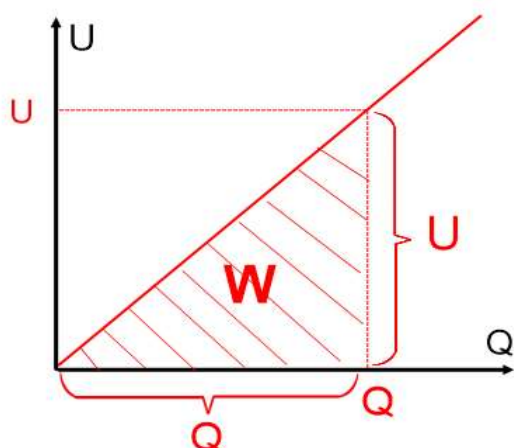
## Kondensaattorin energia

Vakiojännitteen tekemä työ

$$W = QU$$



Yleistys: pinta-alatulkinta:



$$Q = CU \Rightarrow U = \frac{1}{C} \cdot Q$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot QU$$

Kondensaattorin energia on siis

$$E = E_c = \frac{1}{2}QU.$$

Toisaalta perusyhtälön nojalla

$$Q = CU, \text{ joten}$$

$$E_c = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU \cdot U = \frac{1}{2}CU^2.$$

$$\text{Lisäksi } U = \frac{Q}{C}, \text{ joten}$$

$$E_c = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}Q \cdot \frac{Q}{C} = \frac{Q^2}{2C}$$

Siis

$$E_c = \frac{1}{2}QU = \underline{\frac{1}{2}CU^2} = \frac{Q^2}{2C}$$

MAOL s. 131

## Purkautuvan kondensaattorin jännite

1. Lataa käyttämäsi kondensaattori noin viiden voltin jännitteellä. Kytke punainen johdin jännitelähteen plusnapaan ja musta johdin miinusnapaan.
2. Kytke varattu kondensaattorisysteemi yleismittariin. Ole tarkkana plus- ja miinus-napojen kanssa, jotta ne tulisivat oikein päin.

3. Siitä hetkestä alkaen, kun molemmat johtimet on kytketty mittalaitteeseen, kondensaattorin varaus ja samalla sen jännite alkavat pienentyä. Miksi?

4. Mittaa ja kirjaa kondensaattorisysteemin jännitettä esimerkiksi kahden minuutin välein. Voit käyttää kännykkää kellona.

Laadi taulukkomalli:

t(min)	t(s)	U(V)	ln U
0,0	0		
2,0	120		
4,0	240		
6,0	360		
8,0	480		
10,0	600		
12,0	720		
14,0	840		
16,0	960		
18,0	1080		
20,0	1200		



6. Piirrä kondensaattorin jännite  $U = U(t)$  ajan funktiona.

7. Kondensaattorin jännitteen lauseke on

$$U = U(t) = U_0 e^{-kt}, \text{ missä } U_0 = U_{(t=0)} \text{ ja}$$

$k = \text{vakio}$ . Piirrä pistejoukko  $(t, \ln U)$  ja totea, että saat suoran yhtälön.

8. Koska  $U = U_0 e^{-kt}$ , saadaan luonnollista logaritmi-funktiota käyttäen ehto

$$\ln(U) = \ln(U_0 e^{-kt}) = \ln U_0 - \underbrace{kt}_{1} \cdot \ln e = \ln U_0 - kt.$$

Voidaan osoittaa, että  $k = 1/RC$ , missä  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi ja  $R$  on jännitemittarin sisäinen resistanssi.

Määritä mittaustuloksista vakio  $k$  graafisesti (suoran kulmakertoimena) ja laske sen avulla kondensaattorin tarkka kapasitanssi, kun jännitemittarin sisäinen resistanssi  $R = 10,0\text{M}\Omega$ .

## Joskus tehty mittaus:

t(min)	t(s)	U(V)	ln U
0,0	0	4,00	1,386
2,0	120	3,24	1,175
4,0	240	2,63	0,967
6,0	360	2,15	0,765
8,0	480	1,75	0,560
10,0	600	1,43	0,358
12,0	720	1,17	0,157
14,0	840	0,96	-0,041

Tämä mittaus löytyy myös Pedanetistä FY3-kansiosta:  
Kondensaattorin purkukäyrä.ods

### Käsin tehty suorasovitus:

$k \approx 0,00167 \text{ 1/s}$  ja  $R = 10,0 \cdot 10^6 \Omega$ , jolloin  $C \approx 60 \mu\text{F}$ .

### PNS-sovitus:

$k \approx 0,0016975$  ja  $R = 10,0 \cdot 10^6 \Omega$ , jolloin  $C \approx 58,9 \mu\text{F}$ .

Tietokoneohjelmilla (esim. Libre Calc) voidaan tehdä myös eksponentti-funktiosovitus  $U = U_0 e^{-kt}$ , josta vakio  $k$  saadaan suoraan.

## 14 Akku on energiavarasto

- akku on sähkökemiallinen virtalähde, jota voi ladata
- yleensä akkua ei saisi päästää purkautumaan liian tyhjäksi

Yleisimpiä akkuja:

- Lyijyakku ("käynnistysakku")
- Nikkelikadmiumakku (mm. porakoneissa)
- Litiumioniakku (kännyköissä ja autoissa)

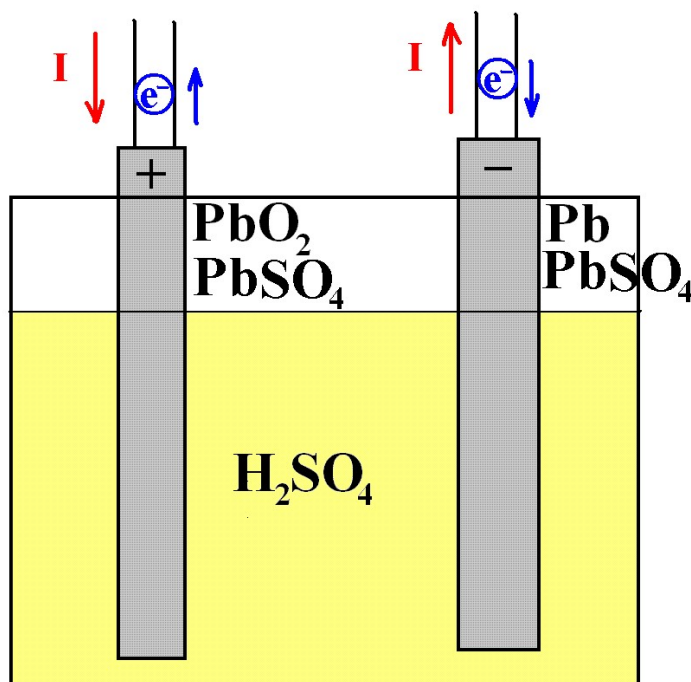
Lyijyakun latauspiiri on yksinkertainen

- Ladataan vakiojännitteellä
- Latausvirta pienenee itsestään, kun akku alkaa olla täyteen ladattu

Erityisesti litiumioniakku vaatii ohjatun latauspiirin

- Latausvirtaa on ohjausjärjestelmän avulla pienennettävä, kun akku alkaa olla täyteen ladattu

Lyijyakun rakenne:

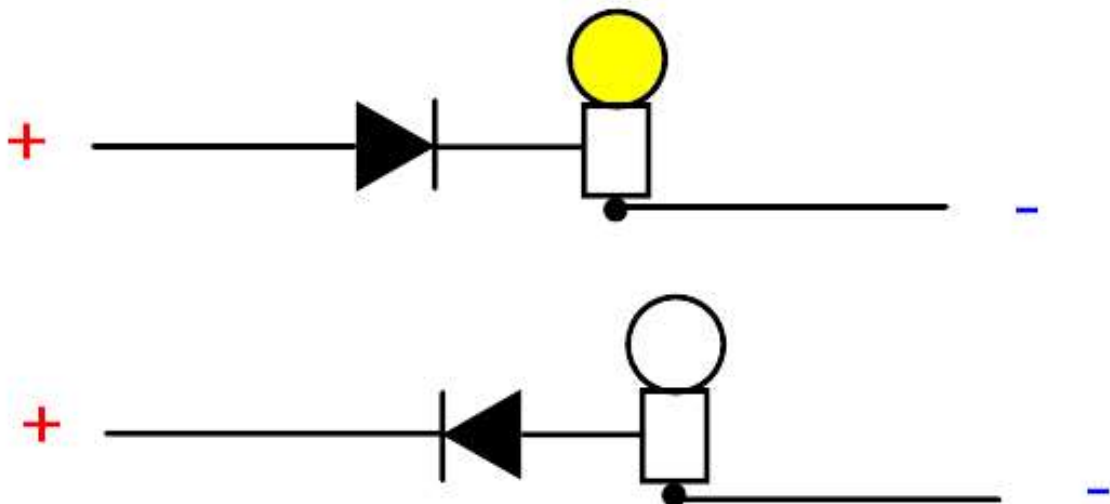


## 15 Diodi on puolijohdekomponentti

Aineiden jako sähkönjohtavuuden perusteella:

- Johteet (johtavat hyvin sähköä)
- Puolijohteet (johtavat huonosti)
- Eristeet (eivät johda sähköä)

Puolijohdekomponentti voi johtaa sähköä vain toiseen suuntaan:



# Puolijohteet

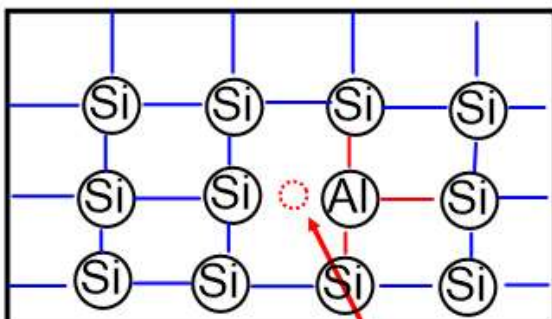
- Si, Ge, GaAs
- johtavat sähköä heikosti

Aine	$\rho(10^{-8} \Omega\text{m})$
Kupari	1,678
Pii	$1,0 \cdot 10^{11}$
Polyeteeni	$3,0 \cdot 10^{23}$

- puolijohdemateriaaleilla on ATOMIHILA eli sidokset ovat kovalenttisia
- helposti liikkuvia elektroneja on hyvin vähän
- puolijohteiden sähkönjohtavuus paranee lämpötilaa kohottamalla tai lisäämällä puolijohdeaineeseen epäpuhtausatomeja

## p-tyypin puolijohteet

-epäpuhtautena Al, Ga, In (III pääryhmän alkuaineita)

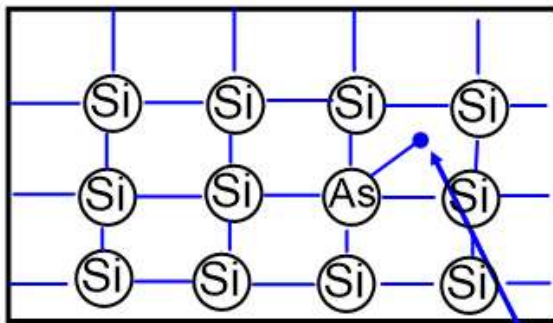


Positiivinen aukko

p-tyypin puolijohteen johtavuus perustuu POSITIIVISIIN AUKKOIHIN.

## n-tyypin puolijohteet

- epäpuhtautena P, As, Sb (V pääryhmän alkuaineita)

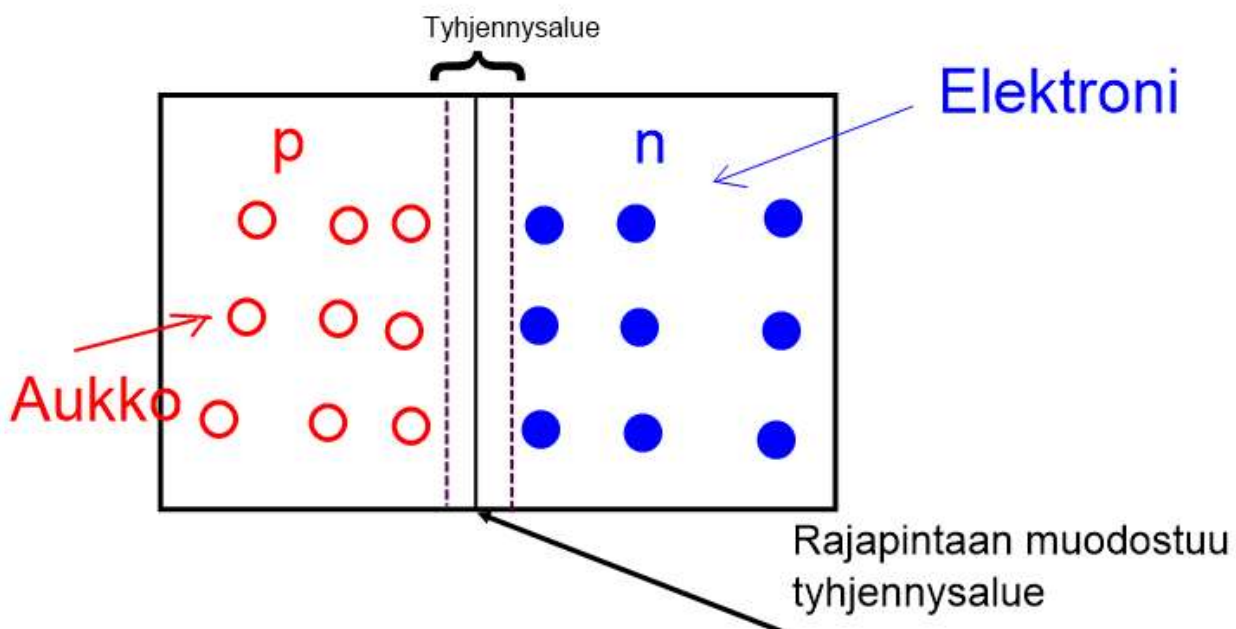


Ylimääräinen elektroni

- n-tyypin puolijohteen johtavuus perustuu ylimääräisiin elektroneihin

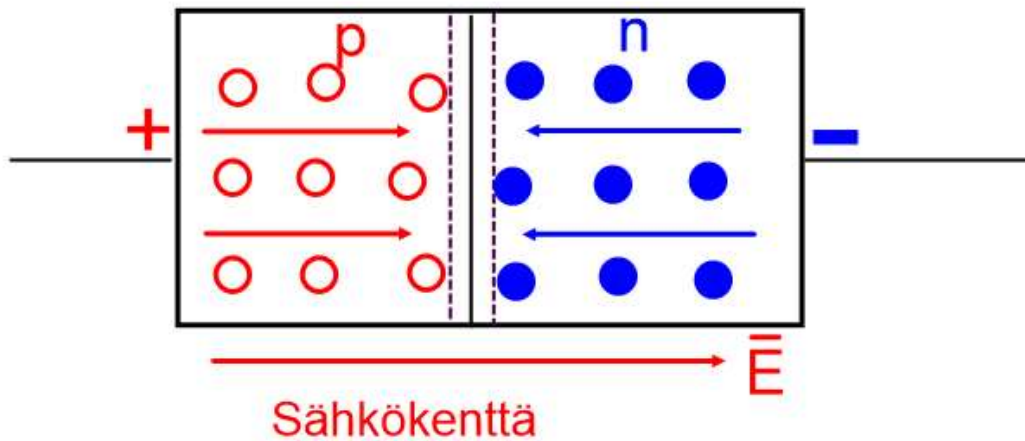
## Diodi (pn-liitos)

- liitetään yhteen kaksi puolijohdepintaa, jotka ovat p- ja n-tyyppisiä



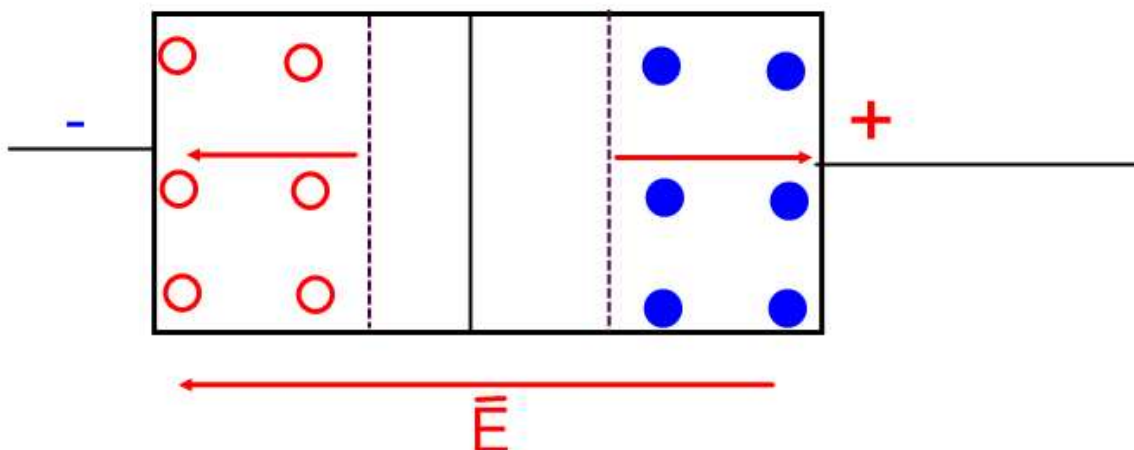
## Diodi johtaa päästösuuntaan

- sähkökenttä ajaa varauksia rajapintaan
- tyhjennysalue pienenee ja diodi johtaa sähköä



## Diodi ei johda sähköä estosuuntaan:

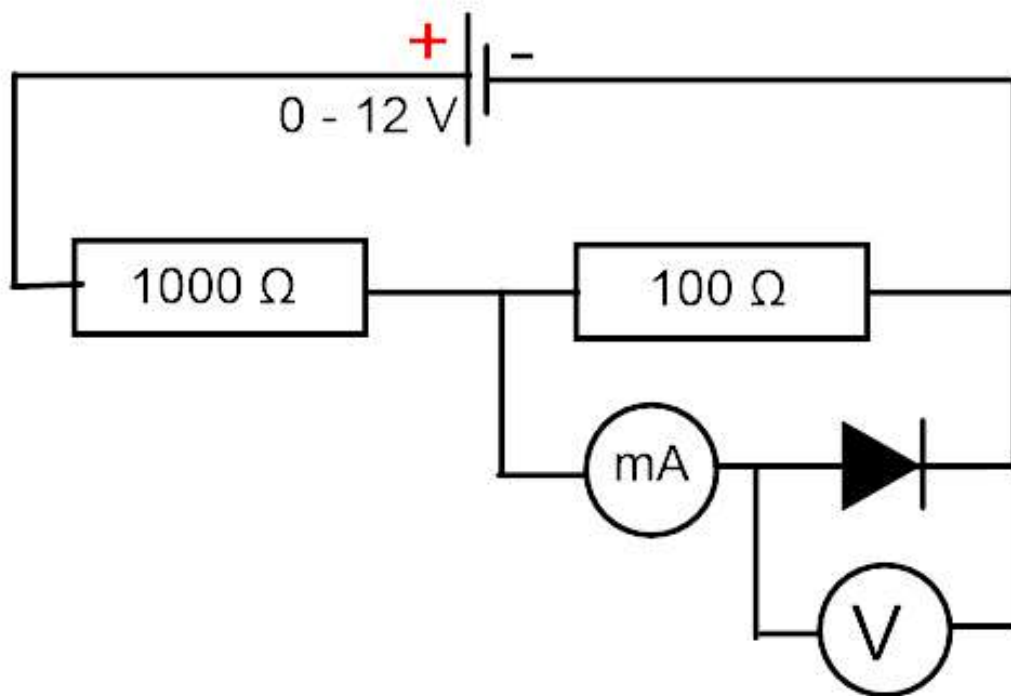
- tyhjennysalue levenee eivätkä varaukset liiku rajapintaan päin





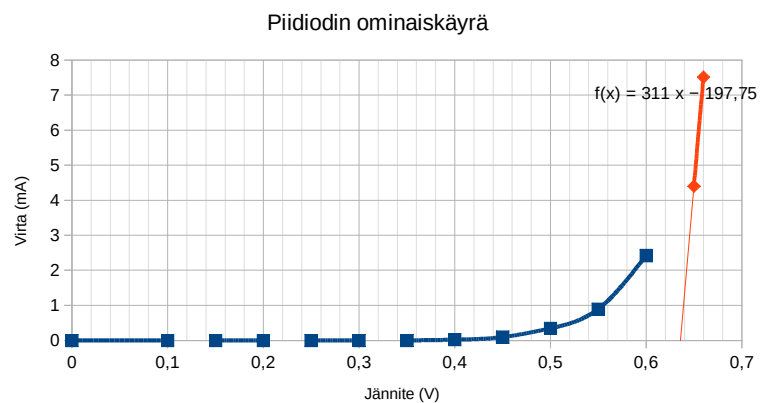
# Diodin ominaiskäyrän mittaaminen

KytKentä:



Mittaukset ja kuvaaja:

U (V)	I (mA)
0,00	0,00
0,10	0,00
0,15	0,00
0,20	0,00
0,25	0,00
0,30	0,00
0,35	0,00
0,40	0,02
0,45	0,09
0,50	0,34
0,55	0,89
0,60	2,42
0,65	4,40
0,66	7,51



Kuvan mukaisesti piidiodin kynnysjännite on noin 0,64 V.

# **16 Perehdy sähköturvallisuuteen**

Sähkölaitteiden suojausluokat

**Luokka 0:** Peruseristys

**Luokka I:** Peruseristys + suojamaadoitus

**Luokka II:** Suojaeristys

**Luokka III:** Matalajännitelaitteet

## **Matala jännite on yleensä turvallinen**

Pienjännitelaitteissa jännite saa olla enintään 50 V vaihtojännitettä tai 120 V tasajännitettä.

## **Korkea jännite on aina vaarallinen**

Suurjännitteeksi kutsutaan yli 1000 voltin jännitteitä.

Suurjännite voi aiheuttaa läpilyöntejä eristeissä tai se voi aiheuttaa vaarallisen suuren ( $> 1$  A) sähkövirran ihmisen kudosten läpi.

Ihmisen kehon resistanssi on noin 1000 ohmia ”kädestä käteen”.

# Kotia ja sähkölaitteita suojellaan sulakkeilla

**Sulake** estää liian suuren sähkövirran kulkemisen virtapiirissä.

Sulake voidaan toteuttaa joko resistiivisenä vastuslankana tai ns. automaattisulakkeena, joka voidaan resetoida vian löytämisen jälkeen.

**Vikavirtasuojia** laukeaa, jos laitteesta lähtevä ja takaisin tuleva sähkövirta poikkeavat merkittävästi toisistaan. Suoja voi lauetta jo noin 10 mA vikavirrasta.