

## 6. KURSSI: Sähkö

(FOTONI 6: PÄÄKOHDAT)

### 1. SÄHKÖVARAUS JA SÄHKÖVIRTA

#### 1.1. SÄHKÖVARAUS Q

- kappaleen varaus  $Q = \pm ne$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  varauksen yksikkö  $[Q] = C$  (= coulombi)
- alkeisvaraus  $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19} C$  (MAOL s. 71)
- *sähkövarauksen säilymlaki*: eristetyssä systeemissä positiivisten ja negatiivisten varausten summa on vakio

#### 1.2. SÄHKÖSTAATTINEN VUOROVAIKUTUS JA COULOMBIN LAKI

COULOMBIN LAKI:  $F = k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$   $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  (MAOL s. 71)

- väliaineessa:  $F = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$  ( $\epsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys eli sähkövakio)

- $\epsilon_r$  = väliaineen suhteellinen permittiivisyys (ks. MAOL s. 95 (92)), esim. ilma:  $\epsilon_r = 1,0006$ .

#### 1.3. SÄHKÖVIRTA JA VIRTAPIIRI

- sähkövirta = varausten liikettä, yksikkö: ampeeri (A)

= SI-järjestelmän perussuure (MAOL. S. 66).

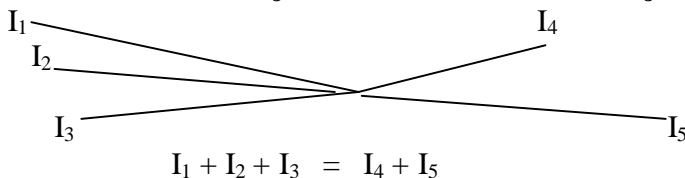
- varauksen yksikkö:  $[Q] = [I] \cdot [t] = \text{As} = C$  (coulombi)

VIRTAPIIRI

#### KIRCHHOFFIN LAIT:

##### **Kirchhoffin 1. laki:**

- **KI:**  $\sum I_{\text{tuleva}} = \sum I_{\text{lähtevä}}$  eli  $\sum \Delta I = 0$   
(tulevien virtojen summa = lähtevien virtojen summa)

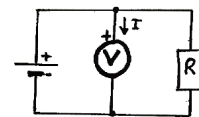


$$I = \frac{Q}{t}$$

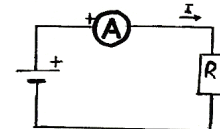
$$I = \frac{dQ}{dt}$$

DC = tasavirta, AC = vaihtovirta

**VOLTTIMITTARI (V)**  
KYTKETÄÄN **RINNAN**



**AMPEERIMITTARI (A)**  
KYTKETÄÄN **SARJAAN**



#### 1.4. POTENTIAALI JA JÄNNITE VIRTAPIIRISSÄ

**NAPAJÄNNITE** = JÄNNITELÄHTEEN NAPOJEN VÄLINEN JÄNNITE SULJETUSA VIRTAPIIRISSÄ (virta kulkee eli virtapiiriä kuormitetaan)

**LÄHDEJÄNNITE** = JÄNNITELÄHTEEN NAPOJEN VÄLINEN JÄNNITE AVOIMESSA VIRTAPIIRISSÄ (virta ei kulje eli virtapiiriä ei kuormiteta)

**U = JÄNNITE**, jännitteen yksikkö:  $[U] = V$  (= voltti)

Sähkökentän **potentiaali** pisteessä A on potentiaalienergian ja varauksen suhde:  $V_A = \frac{E_p^A}{Q}$ .

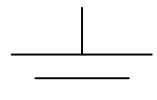
potentiaalin yksikkö:  $[V] = J/C = V$  (= voltti). Potentiaalikäyrä = potentiaali paikan funktiona

**JÄNNITE = POTENTIAALIERO:**  $U_{BA} = V_B - V_A$

maadoitus:  $V = 0$

##### **Kirchhoffin 2. laki:**

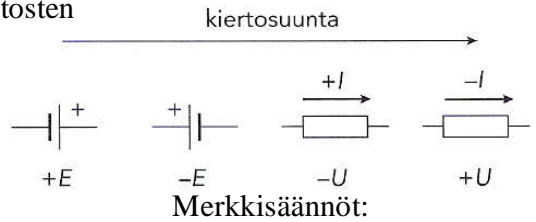
- **KII:**  $\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^n \Delta U_j$  eli  $\sum \Delta V = 0$ ,



(lähdejännitteiden summa = jännitehäviöiden summa eli suljetulla kierroksella potentiaali muutosten summa on nolla, kun muutosten suunnat otetaan etumerkeillä huomioon).

Tässä siis jännitehäviöiden

$$\text{summa on } \sum_{j=1}^n \Delta U_j = \sum_{j=1}^n R_j I.$$



### 1.5. RESISTANSSI, JOHTAVUUS JA OHMIN LAKI

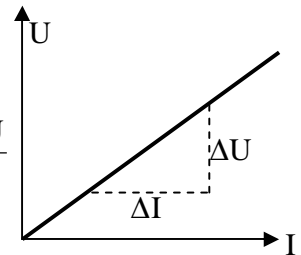
- OHMIN LAKI: vakio­lämpötilassa metallijohtimen päiden välinen jännite on verrannollinen johtimessa kulkevaan virtaan ( $U \sim I$ ). Verrannollisuuskerroin on johtimen

resistanssi  $R$ . Johtimen **resistanssi**  $R = \frac{U}{I}$ .

- resistanssi  $R$  on johtimen sähkövirtaa vastustava ominaisuus

- resistanssin yksikkö  $[R] = \frac{V}{A} = \Omega$  (= ohmi)

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



- Ohmin laki pätee metallijohtimille vakio­lämpötilassa.

- RESISTIIVISYYS ELI OMINAISRESISTANSSI =  $\rho$ :

- kuvaa johdinmateriaalin vaikutusta resistanssiin;  $R = \rho \frac{l}{A}$

-  $\rho$  = resistiivisyys,  $l$  = johtimen pituus,  $A$  = johtimen poikkipinta-ala

- yksikkö:  $[\rho] = \Omega m$  (ks.  $\rho$ : arvoja; MAOL. S. 93-95 (90-92))

- LÄMPÖTILAN VAIKUTUS RESISTANSSIIN:  $R = R_{20}(1 + \alpha \Delta t)$

- koska  $\rho = \frac{RA}{l}$ , pätee myös:  $\rho = \rho_{20}(1 + \alpha \Delta t)$

- *suprajohtavuus* = ilmiö, jossa eräiden aineiden resistiivisyys putoaa nolleen hyvin matalissa lämpötiloissa (ks. MAOL s. 95 (93)).

### 1.6. VASTUSTEN KYTKENNÄT

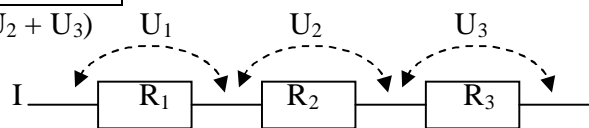
- vastus = laite, jolla on resistanssia

- vastuksia käytetään virtapiireissä säätämään ja muuttamaan sähkövirran suuruutta

- vastusten kytkennät: **1) sarjankytkentä**;  $R = \sum_{i=1}^n R_i$ , esim.

(sama  $I$ ,  $U = U_1 + U_2 + U_3$ )

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

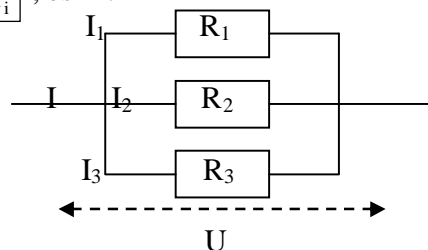


**2) rinnankytkentä**;  $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ , esim.

(sama  $U$ ,  $I = I_1 + I_2 + I_3$ )

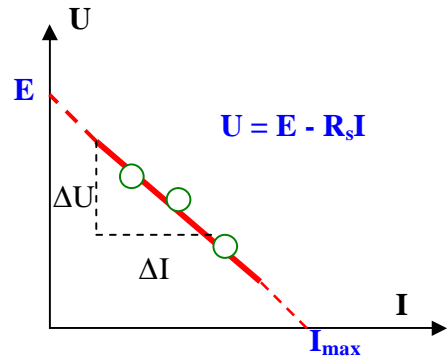
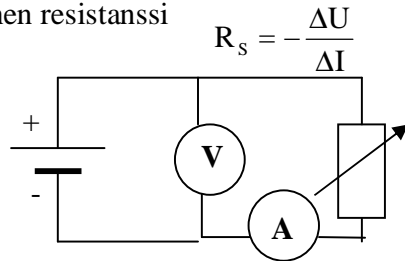
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$



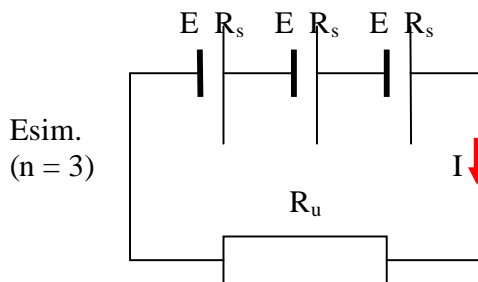
### 1.7. JÄNNITELÄHTEET JA LÄHDEJÄNNITE

- lähdejännite  $E$  = kuormittamattoman jännitelähteen jännite (piiri avoin:  $I = 0$ ;  $U = E$ )
- napajännite  $U$  = kuormitetun jännitelähteen jännite (virta kulkee);  $U < E$
- oikosulkuvirta  $I_{\max}$
- kuormitussuora  $U = E - R_s I$
- sisäinen resistanssi



### 1.8. JÄNNITELÄHTEIDEN KYTKENNÄT

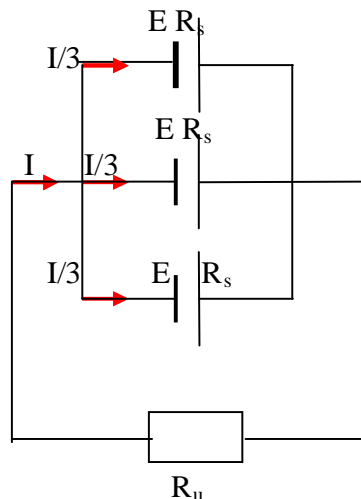
1) sarjankytkentä:  $E = \sum E_i$  ja  $R_s = \sum R_{s_i} \rightarrow \boxed{nE = nR_s I + R_u I}$



Esim.  
( $n = 3$ )

$$3E = 3R_s I + R_u I \rightarrow I = \frac{3E}{R_u + 3R_s}$$

2) rinnankytkentä:  $I = \sum I_i$  ja  $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} \rightarrow \boxed{E = \frac{R_s}{n} I + R_u I}$



Esim.  
( $n = 3$ )

$$E = \frac{R_s}{3} I + R_u I \rightarrow I = \frac{E}{R_u + \frac{R_s}{3}}$$

### 1.9. ENERGIAN TUOTTO JA KULUTUS VIRTAPIIRISSÄ (sähköenergia)

$$E = QU, Q = It \rightarrow E = UI t \rightarrow \text{sähkövirran teho: } P = \frac{E}{t} = UI \rightarrow E = Pt$$

- sähköenergian yksikkö  $[P] = [E] \cdot [t] = \text{Ws} = \text{J}$  (= joule)

**1 kWh = 3,6 MJ**

$$P = UI$$

$$U = RI$$

$$\rightarrow P = RI^2 \quad (\text{Joulen laki})$$

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

- tehon yksikkö  $[P] = VA = W$  (= watti)

- virtalähteen tuottama teho:  $P = EI$ , virtalähteen oma tehonkulutus  $P_s = R_s I^2$

## 2. SÄHKÖKENTTÄ $\vec{E}$

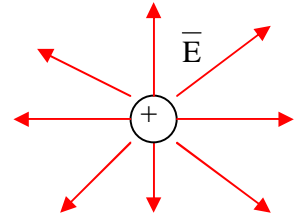
### 2.1. SÄHKÖKENTÄN VOIMAKKUUS

- Sähkökentän voimakkuus eli sähköinen kenttävoimakkuus

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_s}{q}$$

- yksikkö:  $[E] = \frac{N}{C}, \frac{V}{m}$

Sähköinen voima:  $\vec{F}_s = q\vec{E}$



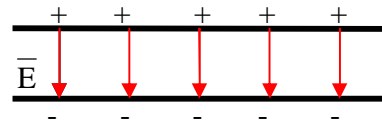
### 2.2. KENTTÄVIIVAESITYS

- sähkökenttää havainnollistetaan kenttäviivoilla, joiden suunta ilmaisee kentän suunnan ja tiheys kentän suuruuden

- sähkökentän suunta on positiivisesta varauksesta poispäin kohti negatiivista varausta.

- pistevarauksen sähkökenttä:  $E = k \frac{Q}{r^2}$

- homogeeninen sähkökenttä:  $\vec{E} = \text{vakio}$



### 2.3. JOHTEET JA ERISTEET

- aineilla on erilainen sähkönjohtavuus  $\rightarrow$  johteet, puolijohteet ja eristeet

#### I) JOHTEET

- johtavat sähköä (vapaita elektroneja), esim. metallit, hiili, ioneja sis. nesteet, elektrolyytit, ionisoituneet kaasut (plasma)

#### Johde sähkökentässä

- varaus  $Q$  kappaleen pinnalla

- johteen sisällä ei ole sähkökenttää  $\rightarrow$  Faradayn häkki (esim. auton kori)

- **sähköinen influenssi**: sähkövarauksen jakautuminen

#### II) ERISTEET

= aineita, joissa ei ole vapaita varauksenkuljettajia tai niitä on hyvin vähän

- esim. lasi, muovit, posliinit, epämetallit (ei grafiitti)

#### Eriste sähkökentässä

- polarisoituminen  $\rightarrow$  dipolit  $\rightarrow$  dipolit suuntautuvat  $\rightarrow$  ulkoinen kenttä pienenee

- väliaineen **suhteellinen permittiivisyys**  $\epsilon_r = \frac{E_u}{E_e}$

( $E_u$  = ulkoinen kenttä,  $E_e$  = kenttä eristeessä eli dipolien kenttä)

-  $\epsilon_r$  ilmaisee eristeen vaikutuksen ulkoiseen sähkökenttään  $E_u$  eli kuinka paljon eristeen kenttä  $E_s$  pienentää ulkoista kenttää

- mitä suurempi  $\epsilon_r$  sitä parempi eriste, esim. tyhjiö  $\epsilon_r = 1$ , ilma  $\epsilon_r = 1,0006$ , lasi  $\epsilon_r = 7$

- (ks. MAOL s. 95 (92)), eristeen permittiivisyys (= sähkövakio);  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

-  $\epsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys eli sähkövakio =  $8,85419 \cdot 10^{-12}$  F/m (MAOL s. 71)

#### III) PUOLIOHTEET

- johteiden ja eristeiden välimuoto, esim. Ge, Si, Se, ...

## 2.4. SÄHKÖKENTÄN POTENTIAALI

- sähkökentän potentiaali pisteessä A:  $V_A = \frac{E_p^A}{Q}$  ( $E_p^A$  = potentiaalienergia pisteessä A, Q = varaus)

- potentiaalın yksikkö: [V] = J/C = V (= voltti)

maadoitus:  $V = 0$

- varauksen Q potentiaalienergia pisteessä  $E_p(A) = QV(A)$

- **JÄNNITE** = POTENTIAALIERO:  $U_{BA} = V_A - V_B$

- Sähkökentän tekemä työ:  $W = -\Delta E_p = QV_A - QV_B = Q(V_A - V_B) = QU_{AB}$

→ varauksen siirtotyö A → B:  $W = QU$

- Sähkökentän siirtotyö:  $W = F \cdot x = QE \cdot x$  → hiukkasen potentiaalienergia  $E_p(x) = -QEx$

- Homogeenisen sähkökentän potentiaali  $V(x) = \frac{E_p(x)}{Q} = -Ex$ , kun normitetaan:  $V(0) = 0$ .

- Homogeenisen sähkökentän voimakkuus:  $E = -\frac{V(x)}{x}$ , yksikkö:  $[E] = \frac{V}{m} = \frac{N}{C}$ .

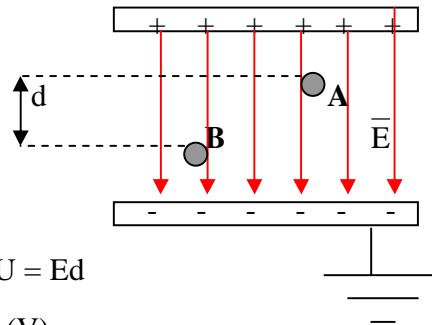
- Pisteiden A ja B välinen jännite  $U = V_A - V_B = Ed$ , missä d = pisteiden A ja B välinen etäisyys.

### HOMOGEENINEN SÄHKÖKENTTÄ

*Yleensä:*

Sähkökentän voimakkuus:  $E = \frac{U}{d}$  → jännite:  $U = Ed$

missä d = levyjen välimatka (m) ja U = jännite (V).



- **HUOM!** Yleensä laskuissa otetaan:  $Q > 0$ ,  $U > 0$ ,  $W > 0$ .

- tasapotentiaalipinta = sähkökentän pisteet, joilla on sama potentiaali

- pistevarauksen kentän potentiaali  $V = k \frac{Q}{r}$

- **KONDENSAATTORI**

= kaksi johdelevyä, joiden välissä on eriste

- kondensaattorilla varastoidaan sähkökentän energiaa

- esim. kameran salamavalolaite, auton sytytysjärjestelmä, sydämentahdistin, ukkospilvi ja maanpinta,

- **KAPASITANSSI** C = systeemin sähkönvarauskyky;  $C = \frac{Q}{U}$ , yksikkö:  $[C] = \frac{C}{V} = F$  (= faradi).

## 2.5. VARATTU HIUKKANEN SÄHKÖKENTÄSSÄ

$$\vec{F}_s = Q\vec{E}$$

$$Q > 0: \vec{F}_s \uparrow \uparrow \vec{E}$$

$$Q < 0: \vec{F}_s \uparrow \downarrow \vec{E}$$

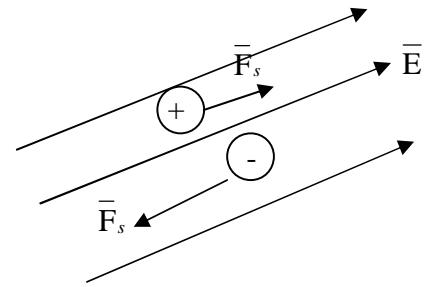
- homogeeninen sähkökenttä  $\vec{a} = \frac{\vec{F}_s}{m} = \frac{QE}{m} = \text{vakio}$

→ tasaisesti kiihtyvä liike:  $\begin{cases} v = at \\ s = \frac{1}{2}at^2 \end{cases}$

- PITKITTÄINEN SÄHKÖKENTTÄ: - lisätään nopeutta

- POIKITTAINEN SÄHKÖKENTTÄ: - muutetaan suuntaa (rata paraabeli)

-  $\frac{Q}{m}$  = ominaisvaraus Millikanin koe → alkeisvarauksen  $e$  määrittäminen



## 2.6. ENERGIAPERIAATE SÄHKÖKENTÄSSÄ: $QV_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = QV_B + \frac{1}{2}mv_B^2$

OL.  $v_A = 0$ ,  $v_B = v$ ,  $U = V_A - V_B$

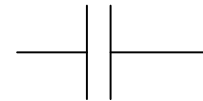
→ SCHUSTERIN KAAVA:  $QU = \frac{1}{2}mv^2$  ( $W = \Delta E_k$ )

$1 \text{ eV} = 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  (MAOL. S. 68,70)

- hiukkassuihkun ohjaaminen sähkökentän avulla: esim. oskilloskooppi

## 3. KONDENSAATTORIT

- kondensaattori = kaksi, johdekappaletta, joiden välissä on eriste
- kondensaattorilla varastoidaan sähkökentän energiaa
- esim. kameran salamavalolaite, auton sytytysjärjestelmä, sydämentahdistin, ukkospilvi ja maanpinta, ...



### 3.1. KONDENSAATTORIN KAPASITANSSI C

= kondensaattorin sähkönvarauskyky  $C = \frac{Q}{U}$  yksikkö:  $[C] = \frac{C}{V} = F$  (= faradi), pF, nF,  $\mu F$

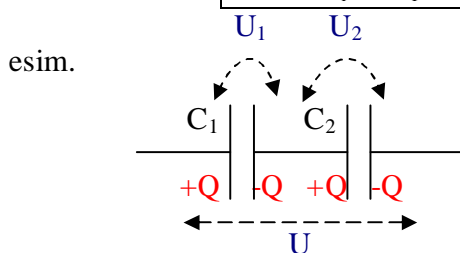
- levykondensaattori:  $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$  ( $\epsilon_r$  = väliaineen suhteellinen permittiivisyys)

(A = levyjen pinta-ala, d = levyjen välimatka,  $\epsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys)

- kondensaattorin läpilyöntikestävyys  $U_{\max}$  = suurin jännite, jonka kondensaattori kestää

### 3.2. KONDENSAATTORISYSTEEMIT

1) sarjakytkentä:  $C = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$   $U = \sum_{i=1}^n U_i$  (influenssi → sama Q)

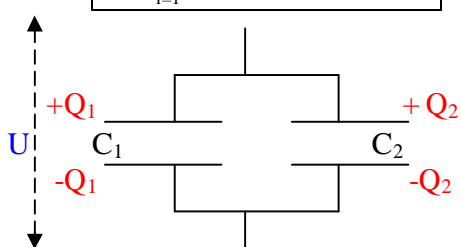


$$U = U_1 + U_2$$

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \quad | :Q$$

$$\rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

2) rinnankytkentä:  $C = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n$   $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$  (sama U)

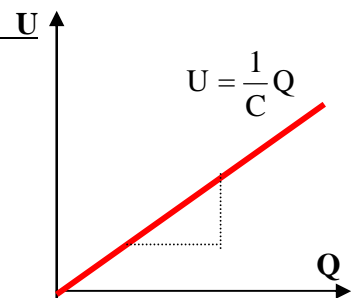
esim. 

$Q = Q_1 + Q_2$   
 $CU = C_1U + C_2U$   
 $\rightarrow C = C_1 + C_2$

### 3.3. KONDENSAATTORIN SÄHKÖKENTÄN ENERGIA

- kondensaattorin varaamistyö  $W =$  sähkökentän energia  $E_c$

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



## 4. TASAVIRTAPIIRIT

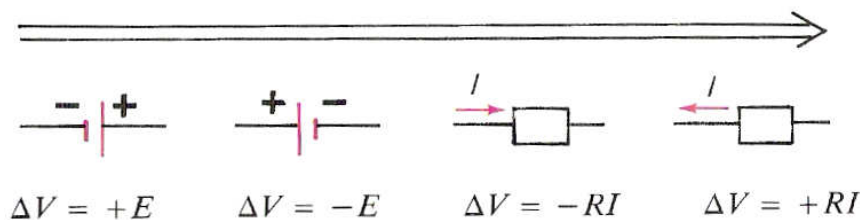
### 4.1. TASAVIRTAPIIRIN LASKENNALLINEN KÄSITTELY

- Kirchhoffin lait, Ohmin laki:  $U=RI$ , Joulen laki:  $P = RI^2$

#### VIRTAPIIRILASKUT: I, V, U, R, P = ?

- 1) Kytkentäkaavio
- 2) Sähkövirrat + suunnat
- 3) Lähdejännitteet: E (+ napaisuudet)
- 4) Resistanssit; R, R<sub>s</sub>
- 5) Kiertosuunta
  - sovitaan virtapiiriin tarkastelu suunta, valitaan lähtöpiste, esim. E tai  $V = 0$
- 6) Kirchhoffin lakien (KI ja KII) virtayhtälöt
  - yhtälöiden määrä = virtojen lukumäärä
- 7) Ratkaistaan virrat. Jos jollekin virralle saadaan negatiivinen arvo, virran suunta on päinvastainen kuin laskennallinen suunta.
- 8) Piirin tehonkulutus/tuotto
  - vastukset, jännitelähteet ( $P = UI$ ,  $P = RI^2$ )
- 9) Tarkistus
  - Kirchhoffin 2. lakia sovellettaessa otetaan huomioon

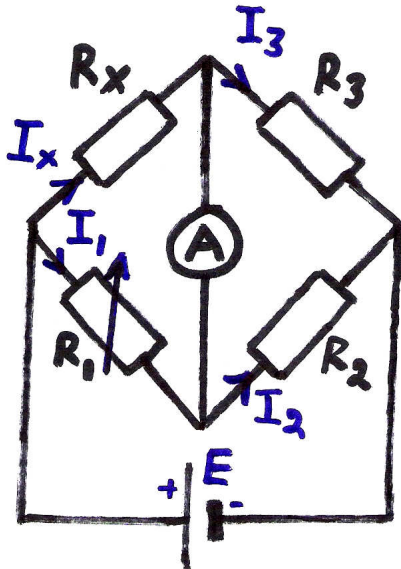
POTENTIAALIEN MUUTOKSIEN ETUMERKIT:  
tarkastelu suunta



## 4.2. JÄNNITTEEN, VIRRAN JA RESISTANSSIN MITTAAMINEN

### Wheatstonen silta

- tuntemattoman vastuksen  $R_x$  resistanssin määrittäminen



- säätetään säätövastuksen resistanssia  $R_1$  kunnes **virtamittarin A läpi ei kulje sähkövirtaa** (silta on tasapainossa:  $I_A = 0$  A)

→ vastusten  $R_x$  ja  $R_1$  jännitteet ovat yhtä suuret:  $U_x = U_1$ , samoin vastusten  $R_2$  ja  $R_3$  jännitteet:  $U_2 = U_3$ .

Lisäksi virroille pätee:  $I_x = I_3$  ja  $I_1 = I_2$ .

$$\rightarrow \begin{cases} R_x I_x = R_1 I_1 \\ R_3 I_3 = R_2 I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_x I_3 = R_1 I_1 \\ R_3 I_3 = R_2 I_1 \end{cases}$$

- jaetaan yhtälöt puolittain, jolloin saadaan:

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

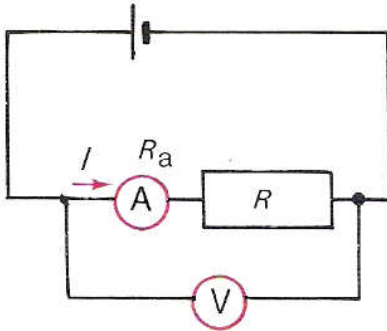
→ **tuntematon resistanssi:**  $R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$

### Virran ja jännitteen samanaikainen mittaaminen:

- virtamittari eli ampeerimittari kytketään sarjaan (pieni sisäinen resistanssi  $R_a$ )
- jännitemittari eli volttimittari kytketään rinnan (suuri sisäinen resistanssi  $R_v$ )

#### Tapa 1.

- jännitemittari V mittaa jännitehäviön vastuksessa R ja virtamittarissa A yhteensä.



- suuren resistanssin mittaaminen

$$U = (R + R_a) \cdot I$$

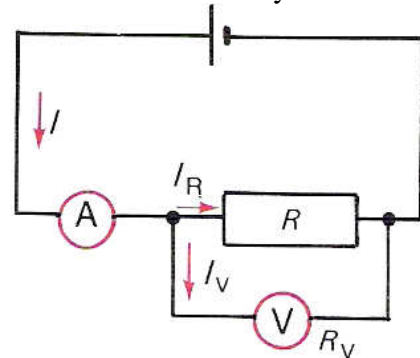
$$R = \frac{U}{I} - R_a$$

Kun  $R_a$  on pieni ( $R_a \ll R$ ), niin

$$R \approx \frac{U}{I}$$

#### Tapa 2.

- virtamittari A mittaa koko virran piirissä eli vastuksen kautta kulkevan virran ja jännitemittarin kautta kulkevan virran yhteensä.



- pienen resistanssin mittaaminen

$$I = I_R + I_V$$

$$I = \frac{U}{R} + \frac{U}{R_v}$$

Kun  $R_v$  on suuri ( $R_v \gg R$ ), niin

$$R \approx \frac{U}{I}$$

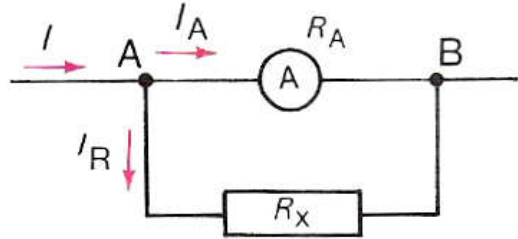


Mittarin käyttöalueen laajentaminen:

Virtamittari: mittarin ( $R_A$  pieni), rinnalle kytketään pieni sivuvastus jonka kautta tietty osa sähkövirrasta kulkee

$$U_{AB} = R_X I_R = R_A I_A$$

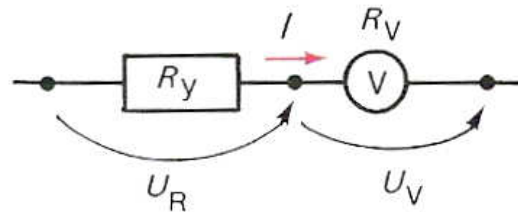
$$R_X = \frac{R_A I_A}{I_R}$$



Jännitemittari: mittarin ( $R_V$  suuri) kanssa sarjaan kytketään etuvastus, jossa tapahtuu halutun suuruinen jännitehäviö

$$U = U_R + U_V = R_Y I + R_V I$$

$$R_Y = \frac{U - R_V I}{I}$$



#### 4.3. VIRTAPIIRIN TEHON KULUTUS

- johtimessa kuluva teho on Joulen lain mukaan:

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

- vastuksen lämpöteho:  $P = RI^2$
- virtalähteen tuottama teho:  $P_E = EI$

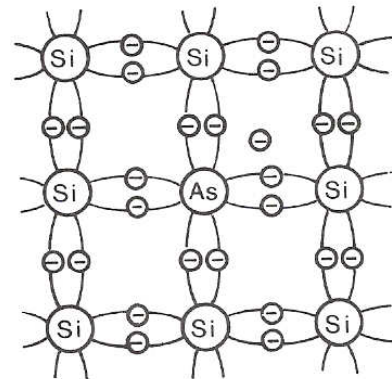
## 5. PUOLIJOHTEET

### 5.1. n-tyypin- ja p-tyypin puolijohdeet

- puolijohdeet ovat aineita, jotka johtavat sähköä huonommin kuin johteet, mutta paremmin kuin eristeet (= eristeen ja johteen välimuotoja)
- resistiivisuudet huoneenlämpötilassa ovat välillä  $10^{-5} \Omega\text{m} \dots 10^7 \Omega\text{m}$ .
- puolijohdeet ovat aineita, joissa pieni ulkoinen energia (esim. valo, lämpö tai ulkoinen sähkökenttä) irrottaa elektroneja sähkön kuljetukseen
- virrankuljettajina voivat toimia joko elektronit tai ”aukot”, mikä tarkoittaa elektronin puuttumista jostakin kohtaa rakennetta.

#### n-tyypin puolijohdeet

- kun IV-pääryhmän aineeseen (Esim. Si) lisätään V-pääryhmän atomeja (esim. As, Sb), joilla on yksi valenssielektroni enemmän kuin isäntäatomeilla, saadaan n-tyypinpuolijohde, joissa elektronit toimivat varauksenkuljettajina

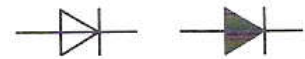


### p-tyypin puolijohde

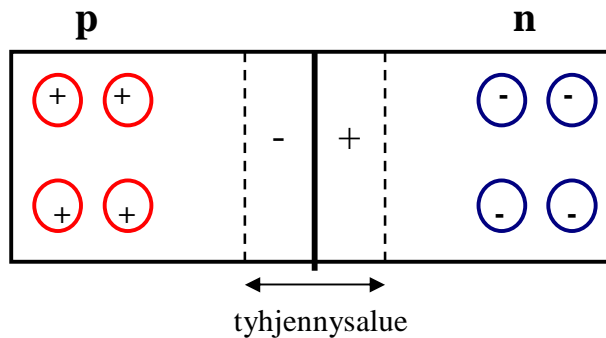
- kun IV-pääryhmän aineeseen (Esim. Si) lisätään III-pääryhmän atomeja (esim. B, In), joilla on yksi valenssielektroni vähemmän kuin isäntäatomeilla, saadaan p-tyypinpuolijohde.
- kunkin seosatomien kohdalle sidoksiin syntyy elektronivajaus, **positiivinen aukko**, joka toimii varauksenkuljettajana kuten positiivinen varaus.
- elektroniikassa käytetyimpiä alkuainepuolijohdeita ovat pii (Si), germanium (Ge) sekä III- ja V-ryhmien alkuaineet.

### 5.2. PUOLOJOHDEDIODI

- muodostuu yhteen liitetystä p-tyypin ja n-tyypin puolijohdeista
- p-tyypin puolijohdeissa virtaa kuljettavat positiiviset aukot ja n-tyypin puolijohdeissa elektronit



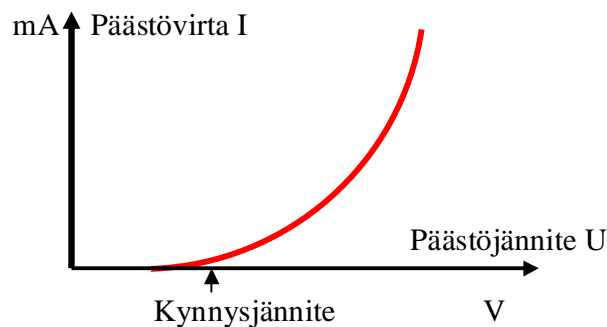
Kun p-tyypin ja n-tyypin puolijohdemateriaalit yhdistetään, rajapintaan syntyy *tyhjennysalue* johtuen varausten jakautumisesta.



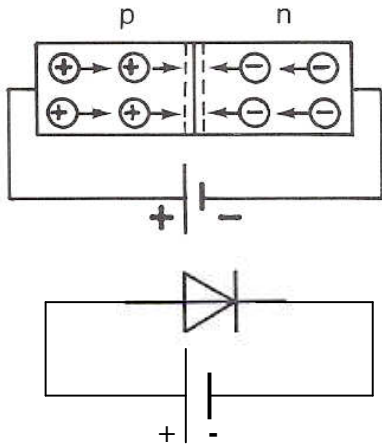
Varauksenkuljettajat kulkevat liitoskohdan läpi lämpöliikkeen vaikutuksesta. P-tyypin puolijohdeesta siirtyy aukkoja n-tyypin puolijohdeeseen ja elektroneja vastakkaiseen suuntaan rajapinnan yli. Tällöin n-tyyppiseen aineeseen johtuneet aukot täyttyvät elektroneilla ja p-tyyppiseen aineeseen siirtyneet elektronit yhtyvät aukkoihin (rekombinaatio). Rajapinnan läheisyydessä ei ole enää vapaita varausten kuljettajia, joten on muodostunut kapea tyhjennysalue. Tässä alueessa on n-tyypin puolijohdeessa pieni positiivinen varaus ja p-tyypin puolijohdeessa pieni negatiivinen varaus.

Tällöin rajapintaan syntyy sähkökenttä ja **kynnysjännite**. Rajapinnan ylittämiseksi varausten kuljettajilla on oltava riittävästi energiaa, jotta ne voisivat ylittää kynnysjännitteen n-tyypin piidiodilla (Si) kynnysjännite on noin 0,7 V ja p-tyypin germaniumdiodilla (Ge) 0,3 V.

### **Diodin ominaiskäyrä**

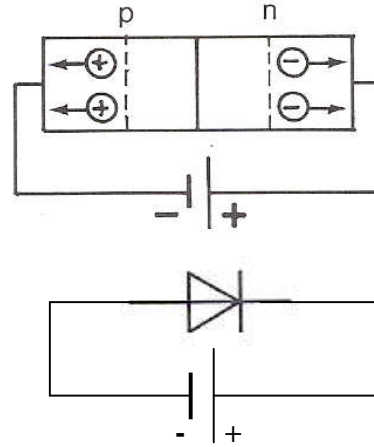


### Diodi päästösuunnassa



- sähkövirta kuljettaa jatkuvasti elektroneja ja aukkoja rajapintaa kohti, jossa ne rekombinoituvat (yhtyvät) ja sähkövirta kulkee pn-suunnassa aukkoja.
- diodi johtaa sähköä vain, jos sen päiden välinen jännite ylittää kynnsjännitteen.
- jännitteen ylitettyä kynnsjännitteen sähkövirta alkaa kasvaa nopeasti (vrt. diodin ominaiskäyrä)

### Diodi estosuunnassa



- jännitelähteen positiivinen napa vetää puoleensa n-tyyppisen alueen elektroneja ja negatiivinen napa p-tyyppisen alueen elektroneja ja aukot kauemmas toisistaan ja pn-rajapinnasta. Virta ei kulje ja diodi on kytketty estosuuntaan.

Puolijohdediodi päästää virtaa lävitseen vain toiseen suuntaan.

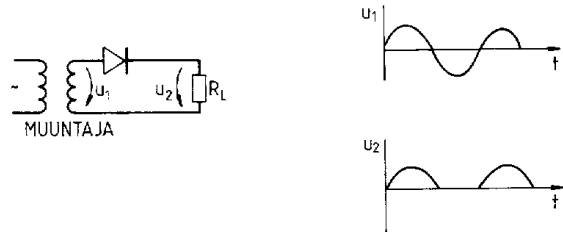


### Diodin käyttö:

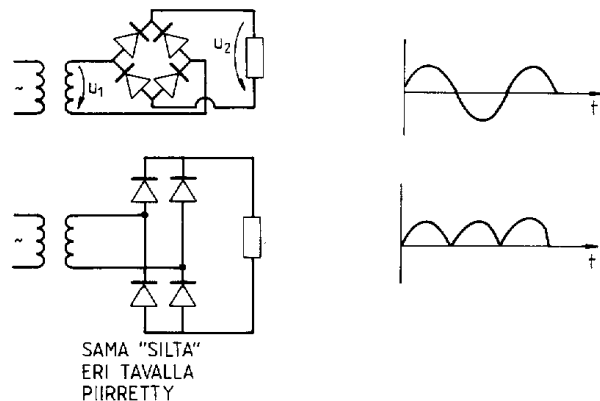
- vaihtovirran tasanuuntaus
- kytkimenä
- ilmaisimena, joka erottaa suuritaajuisesta kantaallosta pienitaajuisen signaalin

### Esimerkkikytkentöjä

#### a) Puoliaaltotasasuuntaaja



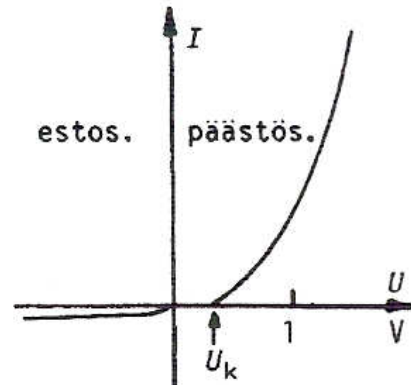
#### b) Kokoaaltotasasuuntaaja



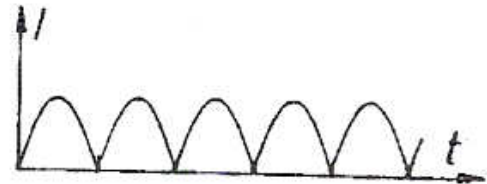
## YO-K96-14

- Piirrä ja selitä puolijohdediodin tyypillinen ominaiskäyrä**
- Mitä tarkoitetaan kokoaaltotasasuuntauksella?**
- Esitä kytkentä, jolla saadaan aikaan kokoaaltotasasuuntaus.**
- Selosta, millä tavoin sykkivän tasasuunnatun jännitteen vaihtelua voidaan tasata.**

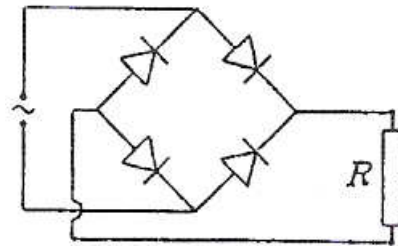
- Puolijohdediodissa on tasasuuntaava pn-liitos. Virta kulkee, kun diodi on kytketty päästösuuntaan eli p-puoli korkeampaan potentiaaliin. Päästösuunnassakin virta kulkee vasta, kun jännite ylittää ns. kynnyksijännitteen  $U_k$  (0,2 – 0,6 V). Estosuunnassa kulkee hyvin pieni, itseisjohtumisesta aiheutuva vuotovirta.



- Tasasuuntauksessa vaihtojännitteellä synnytetään yhteen suuntaan kulkevaa virtaa. Kokoaaltotasasuuntauksessa jännitteen kumpikin puolijakso aiheuttaa piiriin samansuuntaisen virran.



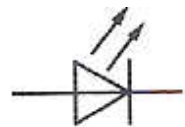
- Kokoaaltotasasuuntaus saadaan aikaan diodisillalla (ks. kuvio). Tasasuunnattu jännite saadaan vastuksen R navoista.



- Tasasuunnatun jännitteen vaihtelua voidaan tasata kytkemällä vastuksen R rinnalle suodatinkondensaattori.

### 5.3. LED

LED (Light Emitting Diode) eli **hohtodiodi** (loistediodi) eli ledi on puolijohdekomponentti, joka synnyttää valoa, kun siihen johdetaan sähkövirtaa = pn-puolijohdeliitos, jossa pn-rajapinnassa osa p-aineen aukoista liikkuu n-tyyppisen aineen sisään ja osa n-aineen elektroneista liikkuu p-aineen sisään, jolloin nämä yhtyvät (rekombinoituvat) jatkuvasti tyhjennysalueella. Tällöin virta kulkee puolijohdediodinläpi. Elektronien kulkiessa rajapinnan läpi ja yhtyessä aukkoihin syntyy energiaa valon muodossa.



*käyttö:*

- merkkivalona, valokilvissä, valaisimissa, kaukosäätimissä, valoantureissa,
- tietoliikenteen merkki- ja ohjausvaloissa,
- merenkulun merkkipoijuissa ja majakoissa
- konserttien ja joukkotapahtumien näyttöseiminä (LED-Screen)

### Fotodiodi (valokenno, aurinkopaisto)

= valolle herkkä estosuuntaan kytketty diodi, jossa virta saadaan kulkemaan, kun pn-rajapintaa valaistaan näkyvällä valolla

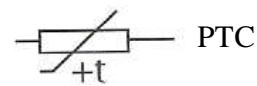


Muita puolijohdeita:

#### - termistorit eli puolijohdevastukset:

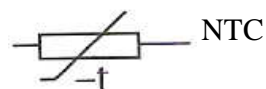
**PTC**-puolijohde (Positive Temperature Coefficient)

= puolijohde, jonka resistanssi kasvaa lämpötilan kasvaessa



**NTC**-puolijohde (Negative Temperature Coefficient)

= puolijohde, jonka resistanssi pienenee lämpötilan kasvaessa

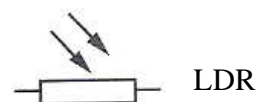


käyttö:

- termostaatit, palohälyttimet,

#### **LDR**-vastus (Light Dependent Resistor)

= valovastus, jonka resistanssi pienenee, kun valaistus kasvaa

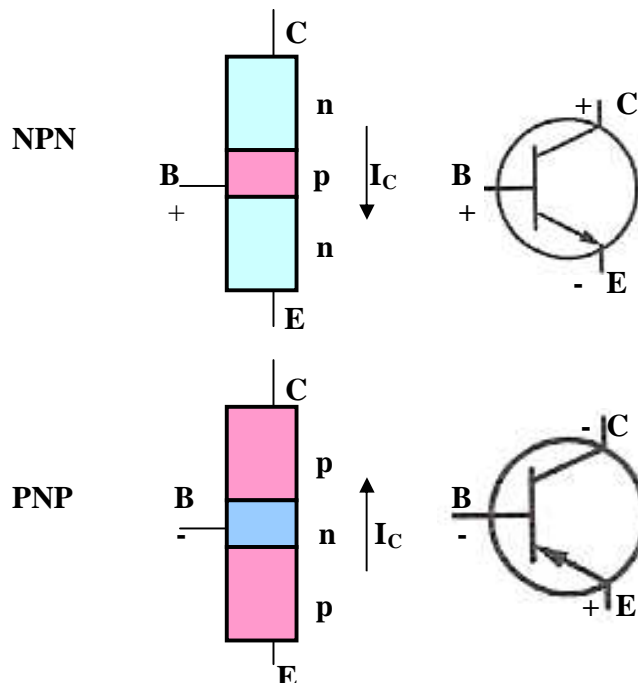


käyttö:

- mittaus- ja säätösystemit, varashälyttimet, hämäräkytkimet, ovien ja porttien avaamis- ja sulkemislaitteet, kappalelaskurit, kameroiden valotusmittarit, ...

## 5.4. TRANSISTORI

= puolijohdesysteemi, jossa on toisiinsa liitetty kolme puolijohdealuetta, jotka voivat olla järjestyksessä npn tai pnp → **nnp-transistori ja pnp-transistori**



**E = emitteri** (emitter)  
**C = kollektori** (collector)  
**B = kanta** (base)  
**I<sub>C</sub> = kollektorivirta**

- transistorissa on periaatteessa kaksi puolijohdediodia vastakkain, jossa äärimäiset osat ovat kollektori C ja emitteri E ja keskimäinen on kanta B.
- kollektori ja kanta kytketään aina samanmerkkiseen jännitteeseen

- koska transistorissa on aina kaksi pn-liitosta vastakkain, toinen liitoskohta on estosuunnassa
- emitterin (E) ja kannan (B) välillä on tavallisesti päästösuuntainen jännite, kun transistoria käytetään vahvistimena
- sähkövirran kuljettajat voivat siirtyä helposti kannan ja emitterin välisen pn-liitoksen yli, kun niiden välillä on päästösuuntainen jännite
- kantavirran muutokset vaikuttavat tietyllä kantavirran alueella lineaarisesti kollektorivirtaan
- transistorin käyttö vahvistimena perustu siihen, että pieni kantavirran muutos aiheuttaa suuren muutoksen kollektorivirtaan

→ pienellä kantavirralla ohjataan suurta kollektorivirtaa

Pelkässä kollektorissa ei kulje sähkövirtaa pientä vuotovirtaa lukuun ottamatta, mutta pienen kantavirran avulla vähennetään transistorin resistanssia kollektoripiirissä.

Transistorin toimintaa voidaan verrata vastukseen, jonka resistanssi voidaan muuttaa pienellä ohjausvirralla

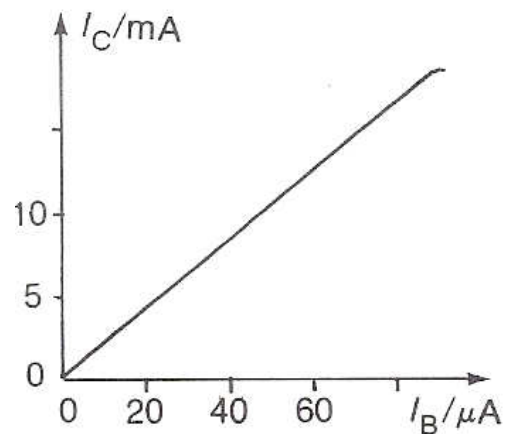
Kuva.  
Kollektorivirran  $I_C$  riippuvuus  
kantavirrasta  $I_B$ .

Kollektorivirran  $I_C$  ja emitterivirran  $I_E$  suhde

$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$  on transistorin **virranvahvistuskerroin**,

joka saadaan transistorin ominaiskäyrän suorasta osasta fysikaalisena kulmakertoimena.

(Lehto-Luoma: Fysiikka 5, Tammi, 5-8. p. 2003, s. 169).



käyttö:

- pienet virran vaihtelut kanta-emitteripiirissä (kantavirta  $I_B$ ) saavat aikaan suuria virran vaihteluita kollektori-emitteripiirissä (kollektorivirta  $I_C$ )
  - transistoria käytetään heikkojen virtojen vahvistamiseen; äänisignaalin vahvistus kaiuttimessa,
  - transistori kytkimenä; hämäräkytkin, palohälytin, ...

## 6. SÄHKÖTURVALLISUUDESTA

(ks. oppikirja, s. 161-167)

- sähkötekniisiä piirrosmerkintöjä (ks. MAOL s. 97-99 (94-96))
- sähköopin kaavat; MAOL s. 123-124 (118-119)

