

# SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIIKKA

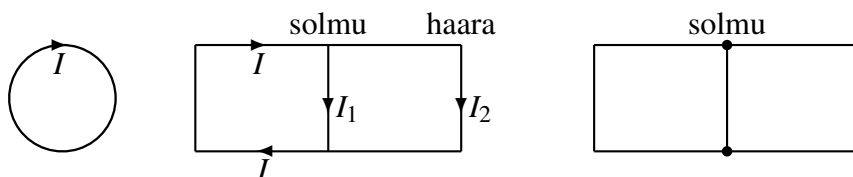
tXt-1 2017, Kimmo Silvonen

Osa I, 18.9.2017

## 1 Jännite, virta ja Kirchhoffin lait

### 1.1 Sähkövirta, haarat ja solmut

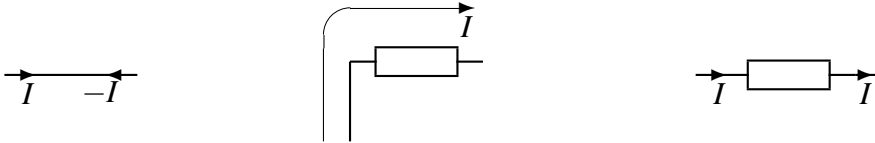
**Virtaa** voidaan verrata **letkussa** virtaavaan **veteen**, joka haarautuu eri reiteille letkujen liitos- eli solmukohdissa rakenneosien määräämissä suhteissa (kuva 1).



**Kuva 1.** Virta kulkee aina yhden tai useamman suljetun silmukan kautta. Solmupisteet eli solmut yhdistävät piirissä olevia haaroja, joista silmukat koostuvat (silmukkaan voi sisältyä useampia "ruutuja"). Solmu on usein merkitty selvyuden vuoksi täplällä. Yleensä myös liitäntäpisteeseen liittyvät johtimet luetaan samaan solmuun kuuluviksi. Laajassa merkityksessä solmun sisään voi jäädä jopa kokonaisia rakenneosia tai piirilohkoja.

Sähkövirta muodostuu varausten tai varauksenkuljettajien liikkeestä. Kansainvälisen sopimuksen mukaan virran kulkusuunta on korkeammasta potentiaalista matalampaan, vaikka negatiivisesti varautuneet elektronit liikkuvatkin vastakkaiseen suuntaan. Puolijohdekomponenteissa on tosin myös positiivisia varauksenkuljettajia (aukkoja), jotka liikkuvat siis virran suuntaan. Varausten liikkumisnopeus on hyvin pieni, mutta silti virta ja

siihen liittyvä sähkömagneettinen aalto etenevät johtimessa valon nopeudella; tästä kerrotaan lisää luvussa *Siirtojohdot*. On siis hieman epätarkkaa sanoa, että "virta kulkee valon nopeudella", mutta vielä hölmömpää on intää, että "virta ei kulje valon nopeudella". Toisin kuin piiriteoriassa puolijohdetekniikassa myös varausten liikkumisnopeus on oleellinen tieto.



**Kuva 2.** Virran suuntanuoli voidaan merkitä joko johtimeen tai sen vierelle. Johtimessa oleva nuoli on selkeämpi.

Letkun "alku-" ja "loppupää" ovat samassa pisteessä, eikä virran alkukohtaa voida siis määrittellä. Letkujen liitoskohtaa eli **solmua** voidaan verrata **säiliöön**, johon on liitetty **tulo-** ja **poistoletkuja**. Solmuun tuleva vesimäärä on yhtä suuri kuin pois lähtevä — muuten säiliössä alkaisi tapahtua kummia. Esimerkiksi indusoitu virta voisi tosin kulkea ikuisesti suprajohtavassa johdinsilmukassa, vaikka jännitelähdettä ei olisikaan. Virran suunta osoitetaan johtimessa olevalla suuntanuolella.

Kirjan kytkentäkaavioiden merkinnät perustuvat suurimmaksi osaksi **IEC:n** (*International Electrotechnical Commission*) standardiin. Nuolen suunnan kääntäminen muuttaa virran etumerkin (kuva 2). IEC:n standardin mukaan virtaa kuvaava nuoli voidaan piirtää myös komponentin eli rakenneosan tai johtimen viereen.

On hyvin monia rakenneosia, joissa jännite ja virta eivät "noudata" Ohmin lakia. Sen sijaan Kirchhoffin lait (huomaa oikeinkirjoitus: 2 h:ta ja 2 f:ää) luovat vahvan perustan monimutkaisemmille asioille. Myös vaihtovirralla Kirchhoffin lait pätevät virran ja jännitteen hetkellisarvoille ja siniaallon kompleksilukuvastineille, mutta tehollisarvoille tai huippuarvoille lait eivät päde!

## 1.2 Kirchhoffin virtalaki

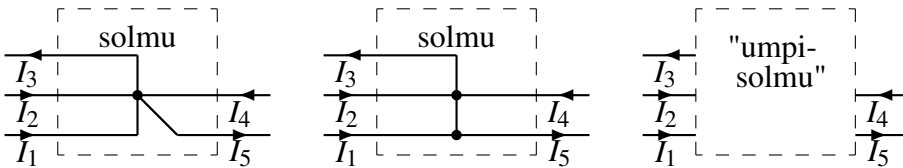
**Kirchhoffin** virtalain (KCL, *Kirchhoff's current law*) mukaan solmupisteeseen eli solmuun **tulevien** virtojen **summa** on **yhtä suuri** kuin siitä **lähtevien** virtojen summa (kuva 3). Kirchhoffin virtalaki eli K:n ensimmäinen

laki voidaan (kuulemma) lausua muodossa: "**piste ei paksune**"!

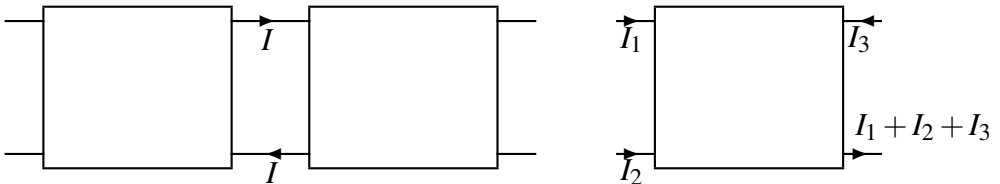
$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5 \quad (1)$$

Jos tulevat virrat valitaan positiivisiksi ja lähtevät virrat negatiivisiksi tai päinvastoin, on solmupisteeseen tulevien virtojen summa etumerkkeineen nolla. Tämä vastaa yhtälön toisella puolella olevien virtojen viemistä yhtäsuuruusmerkin toiselle puolelle, kuten seuraavassa on tehty:

$$I_1 + I_2 + I_4 - I_3 - I_5 = 0 \quad \text{eli} \quad \sum I = 0 \quad (2)$$



**Kuva 3.** Virran haarautuminen solmussa. Tulevia virtoja ovat  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_4$ , lähteviä virtoja taas  $I_3$  ja  $I_5$ . Solmu voidaan ymmärtää joko yhtenä liitoskohtana tai laajempänä alueena, jonka sisällä ei kuitenkaan (yleensä) ole varsinaisia rakennosia; Kirchhoffin virtalaki pätee kuitenkin, vaikka rajatun alueen sisään jäisikin komponentteja eli rakennosia.

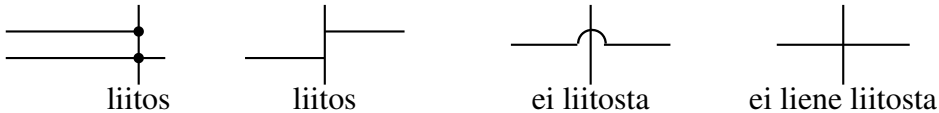


**Kuva 4.** Kirchhoffin virtalaki pätee myös laajemmille kokonaisuuksille kuin pelkät solmupisteet, vaikka laatikoiden sisällä olisi monimutkaisiakin piirejä. Kyllähän huoneestakin valuu sama vesimäärä ulos mitä sinne tulee sisään, vaikka vesipisteitä olisi yhdistetty toisiinsa letkuilla!

Samaan solmuun kuuluvat kaikki ne alueet, jotka ovat johtimilla yhteydessä toisiinsa. Solmujen välissä on **komponenttien** eli **piirielimien** muodostamia haaroja. Esimerkiksi kuvassa 3 katkoviivalla rajattu alue on kokonaisuudessaan yhtä solmupistettä. Johtimesta muodostetun solmun sisällä ei ole potentiaalieroja. Jännite joka kohdasta tällaisen solmun sisältä yhteiseen vertailupisteeseen nähden on sama. Erityisesti on huomattava,

että liitosta kuvaavat täplät eivät välttämättä yksinään ole (laajasti ymmärrettyjä) solmupisteitä, vaikka virtalaki tietysti pätee niillekin. Kirchhoffin **virtalaki** pätee myös kahden piirin osan tai kahden laitteen väliselle rajapinnalle sekä kokonaisille **piirilohkoille** riippumatta siitä, mitä niissä on sisällä (kuva 4). Esimerkiksi pesuhuoneessa voi olla useampia vesipisteitä viemärointeineen, mutta silti siellä ei normaalisti tulvi.

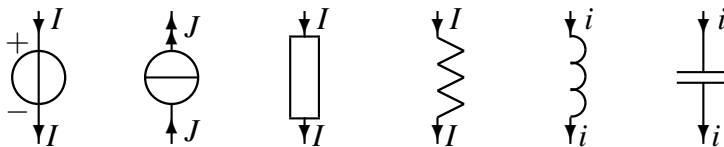
Jos liitos on yksikäsitteinen, voidaan solmupistettä kuvaava täplä jättää pois (esim. T-liitos). Jos halutaan korostaa, että risteävät johtimet eivät kosketa toisiaan, käytetään **hyppylangan** eli **jumpperin** (*juniper*) merkkiä. Pelkkä johtimien tasoristeys ei aina ole yksikäsitteinen; yleensä sillä tarkoitetaan kuitenkin toisistaan eristettyjen johtimien risteystä (kuva 5). Varsinkin laajemmissa kytkentäkaavioissa hyppylangat jätetään usein pois, koska ne hankaloittaisivat turhaan kaavion piirtämistä ja lukemista.



**Kuva 5.** Johtimien liitoskohdat ja risteykset; on typerää käyttää oikealla olevaa "tasoristeuksen" merkkiä kuvaamaan johtimien liitosta, koska merkintä tulkitaan yleensä eristetyksi risteykseksi.

### 1.3 Keskitetyt komponentit

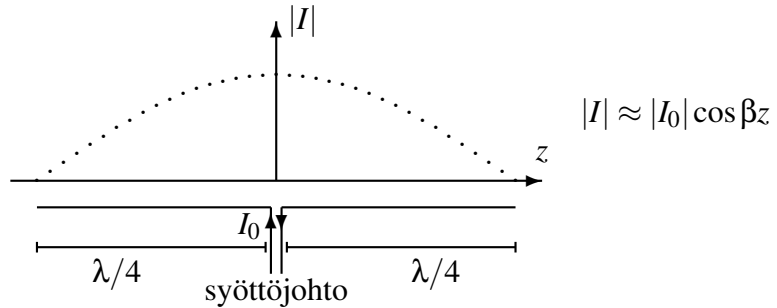
Jännite- ja virtalähteillä, kuten muillakin **keskitetyillä** (*lumped*) komponenteilla virta on molemmissa päissä sama (kuva 6). Samoin lyhyen johtimen joka kohdassa kulkee sama virta; myöhemmin käsiteltävä siirtojohtoteoria riitauttaa tämän säännön, mutta pientaajuusalueella siirtojohtoteorian merkitys on olematon — sitä paitsi siirtojohtoteoria on yhteensopiva keskitettyjen komponenttien hypoteesin kanssa.



**Kuva 6.** Keskitetyillä komponenteilla virta on tietyllä hetkellä molemmissa päissä sama. Myöhemmin käsiteltävälle siirtojohto-komponentille tämä ei päde.

Vastaavasti mekaniikassa keskitetyn massan ajatellaan sijaitsevan painopistees-  
sään.

Vastuksen tai muun komponentin läpi kulkiessaan virta ei siis muu-  
tu, ellei komponentin pituus ole aallonpituuden murto-osan (esim. kahdes-  
kymmenesosa) luokkaa tai pitempi, koska vasta tällöin virran aaltoluonne  
alkaa näkyä.



**Kuva 7.** Puoliaaltodipolin virtajakauma ei ole tasainen, kuten keskitetyissä kom-  
ponenteissa (vaihekerroin  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ ). Suurimmillaan virta on kummankin haaran  
alkupäässä ( $I = I_0$ ). Itseisarvomerkki tarkoittavat tässä virran tehollisarvoa.

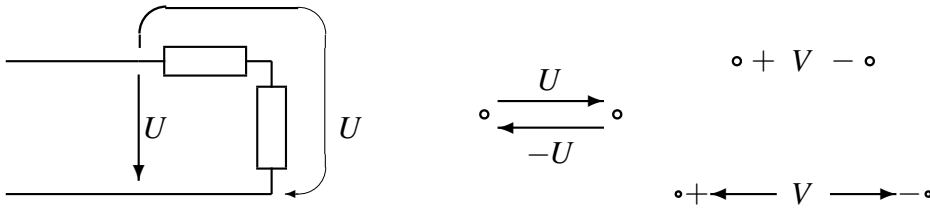
Siirtojohtoilla ja muilla "**jakautuneilla**" (*distributed*) komponenteilla  
virta on tietyllä hetkellä eri kohdissa eri suuri. Lyhytkin antennikaapeli tai  
satojen kilometrien mittainen voimalinja ovat jo niin pitkiä aallonpituuteen  
nähdessä, että virran aaltoluonne on otettava huomioon. Muuten komponentit  
oletetaan yleensä keskitetyiksi eli aallonpituuteen nähden lyhyiksi.

Puoliaaltodipolin (kuva 7) virta on syöttökohdassa (antennin keskellä)  
maksimissaan, mutta piiskojen kärjissä nolla, koska virta ei kulje avaruuteen.  
Antenni säteilee tai vastaanottaa kuitenkin sähkömagneettisten aaltojen  
kuljettamaa tehoa. Säteilähäviöiden takia virtajakauma ei todellisuudessa  
ole täsmälleen kosinimuotoinen.

## 1.4 Jännite eli potentiaaliero

**Jännite eli potentiaaliero**  $U$  voidaan tulkita letkun eri kohtien väliseksi  
**korkeuseroksi** (vrt. ero potentiaalienergiassa). Jotta vesi saadaan virtaamaan  
letkusilmukassa myös alhaalta ylöspäin, tarvitaan jännite- tai virtalähde:  
jännitelähde vastaa letkun päiden välistä korkeuseroa. Virtalähde on  
tavallaan pumppu, joka pumppaa tietyn määrän vettä sekunnissa (oikeastaan  
coulombeja sekunnissa). Letkusilmukan ympäri kierrettäessä on **ylä-**

**mäkeä aina yhtä paljon kuin alamäkeä.** Samoin virtapiirisilmukassa on potentiaalilin eli jännitteen muutoksia yhtä paljon positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan. Jännite määräytyy ainoastaan päätepisteidensä perusteella: **kahden pisteen välillä vaikuttaa aina sama jännite eli potentiaaliero tarkastelureitistä riippumatta.** Jännite ei "mene mistään läpi" toisin kuin virta. Jännitteen sanotaan vaikuttavan komponentin yli eli komponentin päiden välillä tai yleensä vain kahden pisteen välillä (kuva 8). Tämän voi helposti ymmärtää, jos osaa mitata jännitettä yleismittarilla.



**Kuva 8.** Jännite  $U$  kahden pisteen välillä on kulkureitistä riippumatta sama. Tässä kirjassa jännitenuolet osoittavat plussasta miinukseen; varsinkin englantilaisissa kirjoissa nuolet ovat usein systemaattisesti toisinpäin. Amerikkalaisissa kirjoissa nuoli  $V$  on usein kaksipäinen tai puuttuu kokonaan. Huomaa, että jännitenuoli  $U$  ei tarkoita koskaan johdinta!

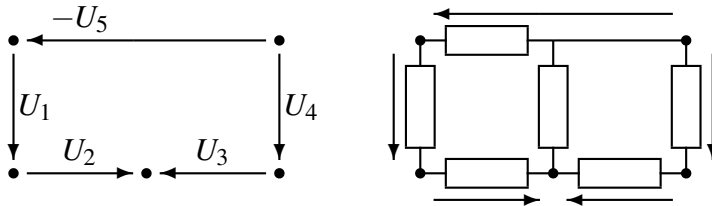
Jännitteen symboli on ulkomaisessa kirjallisuudessa yleensä  $V$ . Suomessa kirjain  $V$  tarkoittaa potentiaalia, joka on tosin käytännössä sama kuin jännite eli potentiaaliero. **Potentiaali** on yksinkertaisesti jännite tarkastelupisteen ja sovitun vertailu- eli referenssipisteen välillä. Jännitettä merkitään joskus  $+$  ja  $-$ -merkeillä tai kaksipäisellä nuolella, kuten kuvassa 8. Koska jännite voi olla lukuarvoltaan positiivinen tai negatiivinen, saattaa kyseisessä merkinnässä plusmerkki tarkoittaaakin yllättäen jännitteen negatiivista päätä.

Yleisin merkkisopimus määrittelee jännitteen suunnan siten, että potentiaali pienenee nuolen suunnassa. **Nuoli alkaa jännitteen "+"-päältä, ja nuolen kärki osoittaa "-"-päähän.** Mainitut merkit ovat kuitenkin vain suhteellisia (" $+$ " on korkeammassa potentiaalissa kuin " $-$ "), koska potentiaalilin nollassa on sopimuskysymys. IEC:n standardin suosittama jännitenuolen suunta on plussasta miinukseen kaikkialla muualla paitsi jännitelähteen vierellä, jossa nuolen pitäisi muka yllättäen osoittaa miinuksesta plussaan. Kirjallisuudessa näkee joskus käytettävän viime mainittua merkkisääntöä muuallakin, joten lukijan on oltava tarkkana. Esim. Iso-

Britannia ei (ainoana sivistysmaana) ole hyväksynyt kyseistä IEC:n standardia. **Kirjoissani ja muissa teksteissäni jännitenuolen suunta osoittaa plussasta miinukseen myös jännitelähteen vierellä!**

## 1.5 Kirchhoffin jännitelaki

**Kirchhoffin jännitelain (KJL, Kirchhoff's voltage law)** mukaan **silmukan jännitteiden summa** on etumerkit huomioon ottaen **nolla**. Lyhenne **KVL** ei ole Suomessa yksikäsitteinen: *voltage law* vai virtalaki? Silmukka on siis reitti, joka **alkaa ja päättyy samassa pisteessä** (kuva 9). Silmukka kulkee solmujen kautta, mutta sen ei jännitelaisissa tarvitse kulkea haaroja (komponentteja) pitkin! Englannin kielessä sana *loop* tarkoittaa silmukkaa yleensä ja sana *mesh* sellaista silmukkaa, joka ei koostu useammasta ikkunasta.



**Kuva 9.** Kirchhoffin jännitelakia sovelletaan silmukkaan eli jännitenuolista muodostuvaan yhtenäiseen ketjuun.

Kiertosuuntaan osoittavat jännitenuolet otetaan silmukkaa kierrettäessä yhtälöön positiivisina ja vastakkaisuuntaiset negatiivisina (tai molemmat päinvastoin). Matemaattisesti jännitelakia voidaan verrata vektorien yhteenlaskuun. Kun myöhemmin tarkastellaan jännitettä kompleksilukuna, on jännitteen ja vektorin yhtäläisyys vielä selvempi.

$$-U_1 - (-U_5) + U_4 + U_3 - U_2 = 0 \quad \text{eli} \quad \sum U = 0 \quad (3)$$

Tämäkin yhtälö voidaan muodostaa vaihtoehtoisella tavalla; yhtälön toiselle puolelle tulevat kiertosuuntaan osoittavat jännitenuolet ja toiselle puolelle kiertosuuntaa vastaan osoittavat jännitteet. Jokaisessa yhtälössä kiertosuunnan saa valita vapaasti.

$$U_1 + U_2 = U_5 + U_4 + U_3 \quad (4)$$

Kirchhoffin toinen laki voidaan tulkita siten, että "**ala- ja ylämäkeä on lenkillä yhtä paljon**"! Toisaalta kahden pisteen välillä vaikuttaa sama jännite mitä tahansa reittiä pitkin kuljettuna. Samoin kahden maastokohdan välillä on sama korkeusero kulkureitistä riippumatta. **Alaindeksien järjestys** kertoo jännitenuolen **suunnan** (kuva 10).



**Kuva 10.** Alaindeksien järjestys kertoo jännitenuolen suunnan:  $U_{ba} = -U_{ab}$ . Etumerkki kuuluu aina oleellisena osana jännitteen ja virran arvoon.

$$U_{ab} = U_a - U_b \qquad U_{ba} = U_b - U_a \qquad (5)$$

Yllä oleva alaindeksien järjestys on standardin mukainen, mutta jostain syystä IEC määritteli jännitelähteessä alaindeksitkin väärinpäin — tähän ei voi olla muuta syytä kuin perustavaa laatua oleva väärinkäsitys!

Yhtälöiden kirjoittamista varten **joudut** usein merkitsemään kytkentäkaavioon virtoja ja jännitteitä. Ne saa **nimetä vapaasti** ja nuolien **suunnatkin voi valita** mielensä mukaan. Lopputulokset ovat siten joko positiivisia tai negatiivisia. Negatiivinen virta kulkee todellisuudessa nuolta vastaan. Negatiivisen jännitteen korkeampi potentiaali on nuolen kärkipäässä. Myös vaihtovirtojen yhteydessä on nuolen suunnalla merkitystä: sen ja nollavaihekulman perusteella päätellään jännitteen tai virran suunta **tietyllä tarkasteluhetkellä**. **Vaihtovirralla** nuolen suunta **ei** siis välttämättä tarkoita virran tai jännitteen **suuntaa hetkellä nolla**.

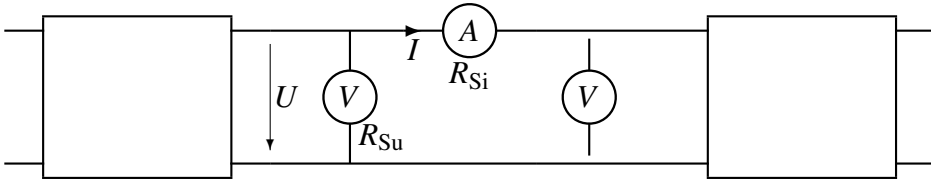
Jänniteyhtälöön KJL ei oteta mukaan muita jännitteitä kuin ne joiden kautta todellisuudessa kuljetaan. Samoin esimerkiksi pyörälengin kokonaispituuteen eivät vaikuta ne sivutiet, joita pitkin ei ajettu.

## 1.6 Jännitteen ja virran mittaaminen

Jännitemittarin sisäinen vastus on suuri (teoriassa ääretön), virtamittarin hyvin pieni (teoriassa nolla). Koska jännite tarkoittaa kahden pisteen välillä vaikuttavaa potentiaaliero, kytketään jännitemittari näihin pisteisiin.



**Jännitemittari** kytketään siis muun piirin **rinnalle**. **Virtamittari** on kytkettävä mitattavan piirin kanssa **sarjaan**, koska mitattavan virran täytyy kulkea mittarin läpi (kuva 11).

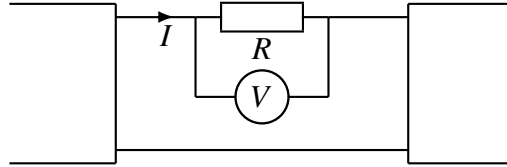


**Kuva 11.** Jännitemittarin V ja virtamittarin A kytkeminen piiriin. Jos mittarit ovat riittävän hyviä, näyttää jännitemittari samaa virtamittarin oikealla puolella. Jos A- ja V-mittarit taas vaihdettaisiin päikseen, estäisi jännitemittari virran kulun, mutta virtamittari oikosulkisi jännitteen  $U$ , mikä voisi saada aikaan tuhoa virtapiirissä tai mittarissa itsessään — Sähköpajalla jokaisesta yleismittarista on palanut virtamittauksen sulake!

Jännitemittarin suuri sisäinen vastus  $R_{Su}$  ottaa Ohmin lain mukaan piiristä pienen virran  $U/R_{Su}$ , mikä voi aiheuttaa virhettä mittaustulokseen muuttamalla mitattavaa jännitettä  $U$ . Samoin virtamittarin sisäinen vastus aiheuttaa pienen jännitehäviön  $R_{Si}I$ , mikä puolestaan voi muuttaa mitattavan virran suuruutta.

Käytännössä jännite- ja virtamittari ovat yleensä sama digitaalinen tai analoginen laite. Herkkä virtamittari, kuten **kiertokäänimittari**, voidaan muuttaa jännitemittariksi suurella sarjavastuksella. Elektroniikkaa sisältävät mittarit ovat yleensä pohjimmiltaan jännitemittareita.

Virran mittausta varten kytketään mittarin rinnalle **shuntti- eli ohitusvastus**. Varsinkin suuria virtoja mitattaessa suurin osa virrasta ohjataan shuntin kautta. Yleismittareissa on usein suurimmalle virta-alueelle (esim. 10 A) erillinen liitin, jotta suurta mitattavaa virtaa ei tarvitse kuljettaa kytkimen kautta. Tällöin mittarin jännitehäviö ei kasva tarpeettomasti eikä kytkintä tarvitse mitoittaa suurimman virta-alueen mukaan. Jännitemittarin herkkyys määrää syntyvän jännitehäviön (kuva 12).



**Kuva 12.** Virran mittaaminen jännitemittarilla ja hyvin pienellä shunttivastuksella. Myös oskilloskoopilla voidaan mitata virtaa tällä tavalla. On kuitenkin huomattava, että yleensä oskilloskoopin mittauskanavan toinen napa on kytketty sähköverkon maahan, mikä estää mittauksen, jos mitattava piiri on muuta kautta yhteydessä samaan maahan.

Yksinkertaiset digitaaliset mittarit ja vanhat kiertokäänimittarit näyttävät periaatteessa jännitteen tai virran keskiarvoa. Halvoissa yleismittareissa asteikko on korjattu kertoimella 1,11 näyttämään puhtaan siniaallon tehollisarvo oikein. Tarkemmissa mittareissa on elektronisesti toteutettu aito tehollisarvon osoitus, joka perustuu jännitteen hetkellisarvon neliön integrointiin.

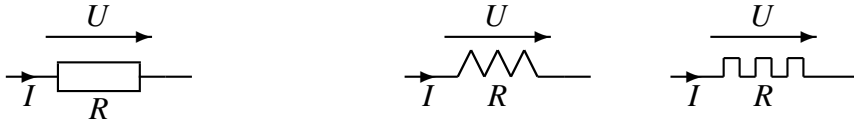
Yleismittarit eivät yleensä mittaa kovin suuria taajuuksia tasasuuntaajan rajoitetun taajuusvasteen takia. Suuremmilla taajuuksilla mittaus tehdään usein oskilloskoopilla, vaikkei se tarkkuudeltaan välttämättä olekaan yleismittarin tasoa. Oskilloskooppi antaa lisäksi tiedon aaltomuodosta ja tasajännitetasosta, mikä on oleellista mittaustuloksen tulkitsemisessa. Digitaalisissa oskilloskoopeissa on yleensä digitaalinen jännitemittari osana normaalia toimintaa; ainakin vanhemmissa malleissa tämän resoluutio on hyvin alhainen: numeronäyttö ei käytä kaikkia tiloja. Radiotaajuuksilla mitataan jännitteen ja virran sijasta usein tehoa, koska jännitteen ja virran mittaaminen tai edes niiden määrittely ei siirtojohdoissa aina ole yksikäsitteistä.

## 2 Vastus ja resistanssi

### 2.1 Ohmin laki

Vastuksella on kaksi piirrosmerkkiä (kuva 13). IEC:n standardi suosittelee "laatikkoo", mutta molemmat symbolit ovat yleisesti hyväksytyjä. Tyhjä laatikko tarkoittaa vaihtovirtapiireissä myös **impedanssia**. Siksak-viivalla

voidaan tarvittaessa korostaa sitä, että kyseessä on nimenomaan vastus eikä esimerkiksi kondensaattorin impedanssi.



**Kuva 13.** Vastuksen virran ja jännitteen määrittely Ohmin lakiin liittyen. Laatikko tai vino siksak-viiva ovat suositeltavimmat vastuksen piirrosmerkit.

Vastuksen eli resistanssin  $R$  jännitehäviö  $U$  voidaan lausua sen läpi kulkevan virran  $I$  funktiona **Ohmin lain** avulla.

$$U = RI \qquad I = \frac{U}{R} \qquad (6)$$

Erityisesti on huomattava, että  $U$  tarkoittaa **vastuksen päiden välillä olevaa jännitettä** — ei esimerkiksi vastuksen kanssa sarjassa olevaa lähdejännitettä. Usein toistuva lauseke  $E/R$  on lähtökohtaisesti **AINA VÄÄRIN**, koskaan missään todellisessa virtapiirissä virtaa ei voi laskea näin — ei edes pariston ja lampun rinnankytkennässä, koska millekään **lampulle ei epälineaarisuuden takia voi yleispätevästi määritellä resistanssia!** On oikeastaan väärin ajatella, että virta aiheuttaa vastuksessa jännitehäviön — pikemminkin vastuksen päiden välille muodostuva jännite pakottaa virran kulkemaan vastuksen läpi. Tämä jännite riippuu vastusarvon lisäksi siitä, mihin vastus on kytketty. Piiri hakeutuu automaattisesti ja reaaliaikaisesti Kirchhoffin lakien määräämään tasapainotilaan.

Virran yksikkö on ampeeri  $A$  yhdellä p:llä! Jännitteen yksikkö on voltti  $V$  ja resistanssin ohmi ( $1 \Omega = 1 V/A$ ). Useimpia sähkötekniikan yksiköitä merkitään isoilla kirjaimilla, mutta kokonaisena sanana ne alkavat pienellä alkukirjaimella, vaikka perustuvatkin yleensä erisnimiin (harmillisesti aina miesten nimiin!). Voltti määritellään fysikaalisesti mekaanisen tai sähköisen tehon avulla ( $1 W = 1 V \cdot A$ ); ampeerille on oma johtimien vetovoimaan perustuva määritelmänsä.

## 2.2 Konduktanssi eli johtokyky

Joskus on käytännöllistä esimerkiksi laskukaavoissa käyttää kirjoitusasun parantamiseksi **resistanssin käänteislukua  $G$**

$$G = \frac{1}{R} \qquad (7)$$

jota nimitetään **konduktanssiksi**. Konduktanssin eli johtokyvyn yksikkö on siemens S. Kirjaimet  $G$  ja  $S$  ovat muuten  $\Omega\text{hmin}$  etunimien alkukirjaimet. Myös hauska keksittyjä yksiköitä  $\text{mho}$  ja  $\text{ohm}$  käytetään yleisesti. Viime mainittua käytti jo konduktanssi-käsitteen keksijä lordi Kelvin. Konduktanssin piirrosmerkki on tietysti sama kuin vastuksella. Ohmin laki on konduktanssin avulla lausuttuna muotoa

$$I = GU \quad (8)$$

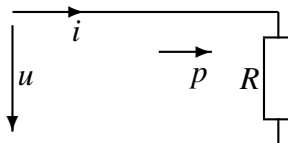
Kutsun tätä esitysmuotoa *Siemensin laiksi*.

Huomaa, että katkoksen konduktanssi on nolla ja oikosulun konduktanssi ääretön. Konduktanssi on käytännöllinen suure mm. vastusten rinnankytkennässä. Kirchhoffin virtalakiin perustuvassa solmumenetelmässä yhtälöissä esiintyvät jännitemuuttujien kertoimet ovat konduktanssimuotoisia, jolloin kerroin  $G$  on kätevämpi kuin  $\frac{1}{R}$ . Konduktanssi on siis yksinkertaisesti vastuksen käänteisluku.

## 3 Tasavirran teho ja energia

### 3.1 Tehon ja energiankulutuksen laskeminen

Sähkövirran kuljettama **hetkellinen** teho määritellään jännitteen ja virran tulona. Tämä ei kuitenkaan yleensä ole sama kuin keskimääräinen teho ja siksi esimerkiksi vaihtovirran (keskimääräistä) tehoa ei näin voi laskea. Tehon siirtoon tarvitaan virtapiireissä aina kaksi johdinta, joiden välillä vaikuttaa potentiaaliero (kuva 14). Tehon virtaussuunta on sama kuin virran suunta korkeammassa potentiaalissa olevassa johtimessa.



**Kuva 14.** Jännitteen ja virran kuljettama teho.

Teho siirtyy esimerkiksi resistanssiin sen kahta liitäntäjohdinta pitkin. Tehon siirtymistä voisi verrata **junaan**: tarvitaan kaksi kiskoja, että juna voi kulkea — juna ei jyskytä yhtä kiskoja pitkin asemalle ja toista takaisin. Todellisuudessa virtakaan ei tee niin, vaikka virtapiireissä joskus puhutaankin

meno- ja paluujohtimesta; meno- ja paluujohtimien virrat kulkevat kaapeleissa samanaikaisesti. Tällä tiedolla on merkitystä siirtojohtoteoriassa!

Tasavirroilla ja vaihtovirran hetkellisarvoilla pätee **Joulen laki**.

$$P = UI \quad p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (9)$$

Pienet kirjaimet  $u$  ja  $i$  tarkoittavat yleensä ajan  $t$  funktioita eli hetkellisarvoja. Koska  $u = Ri$  ja  $i = u/R$ , voidaan resistanssin kuluttama teho esittää vaihtoehtoisissa esitysmuodoissa

$$p = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (10)$$

Tämä teho muuttuu siis vastuksessa lämmöksi.

**Vaihtovirtapiireissä** tehon kaavat ovat **erilaiset**, mutta samantapaiset kuin edellä. Jännitteen ja virran hetkellisarvoilla esitettyä yhtälöä  $p = ui$  on täysin yleispätevä, mutta sitä ei paljon käytetä, koska tieto tehon hetkellisarvosta ei yleensä kiinnosta.

Tehon yksikkö on **watti** ( $W = VA$ ). Energia tai työ tietyllä aikavälillä  $t_1 \dots t_2$  määritellään tehon integraalina

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (11)$$

missä  $p = p(t)$  on teho ajan funktiona. Jos teho ei riipu ajasta, riittää kertolasku

$$W = Pt \quad (12)$$

Sähköenergiaa mitataan usein kilowattitunteina **kWh** tai pienempinä annoksina wattisekunteina:  $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MWs}$ . Kaavoista nähdään, että energian yksikkö joule on  $J = \text{Nm} = \text{Ws} = \text{VAs}$ . Teho ja energia toimivat siis siltana sähkötekniikan ja muiden fysikaalisten suureiden välillä. Jännite ei kuulu SI-järjestelmän perussuureisiin toisin kuin virta ja aika. Silti sillä on sähkötekniikassa keskeinen merkitys: kaikki muut piiriteorian suureet voidaan tulkita johdannaisiksi jännitteestä, virrasta ja ajasta. Voltti lausuttuna SI-järjestelmän perussuureiden avulla on  $V = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{A} \cdot \text{s}^3}$ . Jos varaus  $Q = 1 \text{ C}$  siirretään paikasta A paikkaan B, on tehty työ  $W = 1 \text{ J}$ , mikäli potentiaaliero  $V_B - V_A = 1 \text{ V}$ .

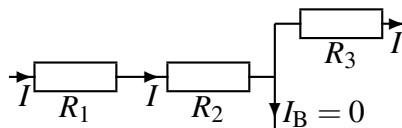
## 3.2 Hyötyteho ja tehohäviöt

Tehoa kuluu aina silloin, kun virta kulkee vastuksen eli resistanssin kautta. Tehon kuluminen näkyy vastuksessa jännitehäviönä. Resistanssin päiden välille muodostuu potentiaaliero, joka riippuu vastusarvosta ja virranvoimakkuudesta. Sähköteho muuttuu **lämmöksi** vastuksessa, **vääntömomentiksi** sähkömoottorissa, **valoksi** lampussa, **ääneksi** kaiuttimessa, jne. Kaijille edellä mainituille tapauksille on yhteistä se, että sähköisesti tarkasteltuna teho näyttää aina kuluvan vastuksessa, vaikka esimerkiksi moottorin tai kaiuttimen käämin resistanssi pyritään tekemään mahdollisimman pieneksi, ettei siinä hukkuisi tehoa. Joskus teho muuttuu lämmöksi jännite- tai virtalähteessä, mutta silloinkin lähde voidaan mallintaa positiivisena resistanssina. Tehoa luovuttaessaan lähteet voidaan nähdä negatiivisina resistansseina, joiden arvot tosin riippuvat virrasta ja jännitteestä.

Moottorissa ja kaiuttimessa mekaaninen kuormitus näkyy sähköisellä puolella resistanssina, jonka suuruus vaihtelee mekaanisen kuormituksen funktiona. Käämiresistanssien aiheuttamat tehohäviöt itsessään ovat pienet. Koska vastus kuluttaa tehoa, se kuormittaa virtapiiriä. Usein puhutaankin kuormavastuksesta tai lyhyesti **kuormasta** (*load*).

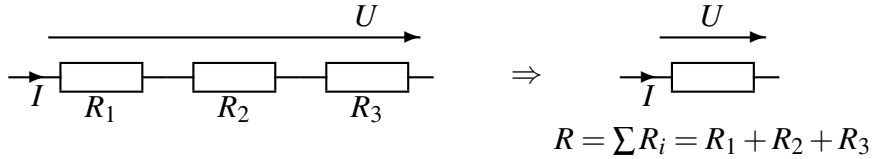
## 4 Virtapiirien peruskäsitteitä

Komponenttien sanotaan olevan sarjaankytkettyjä, jos ne ovat peräkkäin siten, että kaikkien läpi kulkee **sama virta**. **Sarjaankytkennässä** ei ole väliulosottoja, tai jos on, niiden kautta ei kulje virtaa. Kuvassa 15 vastukset  $R_1$  ja  $R_2$  ovat ilman muuta sarjassa, mutta myös  $R_3$  voidaan usein tulkita näiden kanssa sarjaankytketyksi, jos  $I_B = 0$ :



**Kuva 15.** Sarjaankytkettyjen osien virrat ovat samat — virrallisia haarautumiskohtia ei saa olla.

Sarjaankytkettyjen vastusten muodostama kokonaisresistanssi saadaan laskemalla **sarjassa** olevat **resistanssit yhteen** (kuva 16). Tuloksen voi helposti johtaa Kirchhoffin ja Ohmin lakien avulla.



**Kuva 16.** Vastusten sarjaankytkennän kokonaisresistanssi on osaresistanssien summa. Merkintä  $R_1 + R_2$  tarkoittaa yleensä kyseisten vastusten sarjaankytkentää.

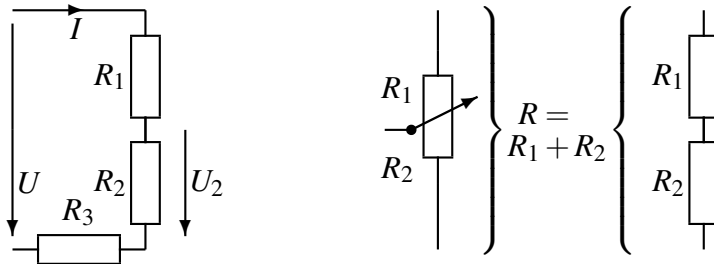
$$U = (R_1 + R_2 + R_3)I = RI \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{G} = \sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_3} \quad (14)$$

Konduktanssit  $G$  käyttäytyvät sarjassa samalla tavalla kuin vastukset rinnankytkennässä. Jänniteenjakaajassa **jännitteet** jakautuvat **vastusten suhteessa** (kuva 17).

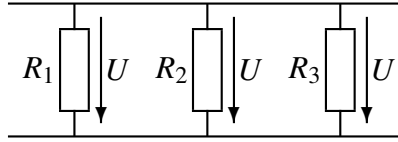
$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \quad U_a = \frac{R_a}{\sum R_i} \cdot U \quad (15)$$

Kaava ei ole voimassa, jos sarjaankytkennässä on virrallisia väliulosottoja. Nimittäjään tulee koko vastusketjun resistanssien summa ja osoittajaan se vastus, jonka jännitettä lasketaan.



**Kuva 17.** Jänniteenjakaaja eli potentiometri koostuu kahden tai useamman vastuksen sarjaankytkennästä. Yleensä kuitenkin potentiometriksi (potikka) sanotaan väliulosotolla varustettua säätövastusta; sen vastinkytkentä on juuri kaksi vastusta sarjassa. Potentiometrin lukuarvo on kyseisten vastusten summa.

**Rinnankytketyt** komponentit on kytketty **molemmista päistään yhteen** — siis molemmista! Tällöin jokaisen rinnankytketyn komponentin yli vaikuttaa **sama jännite**  $U$  (kuva 18). Rinnankytkentää voidaan merkitä seuraavasti:  $R_1 || R_2 || R_3$ .

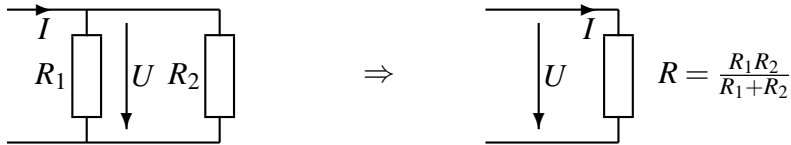


**Kuva 18.** Rinnankytketyt osat on kytketty molemmista päästään yhteen, jolloin niiden jännitteet ovat samat.

**Rinnankytkettyjen** vastusten konduktanssi saadaan laskemalla niiden **konduktanssit yhteen** (kuva 19). Vaihtoehtoisesti käytetään kahden rinnankytketyn resistanssin kaavaa.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

$$G = \frac{1}{R} = \sum G_i = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (17)$$



**Kuva 19.** Ylempää vastusten rinnankytkennän kaavaa saa käyttää vain kahdelle vastukselle kerrallaan. Merkintä  $R_{12}$  tai  $R_1 || R_2$  tarkoittaa yleensä vastusten  $R_1$  ja  $R_2$  rinnankytkentää; toki merkintä  $R_{12}$  voi merkitä myös sarjaankytkentää tai yhtä vastusta, jonka alaindeksi on 12.

Useamman kuin kahden vastuksen rinnankytkennässä konduktanssimuotoista kaavaa voidaan jatkaa.

$$G_{123} = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (18)$$

Rinnankytkennän kokonaisresistanssi on aina pienempi kuin pienin rinnankytketyistä resistansseista, esim.  $20 \Omega || 30 \Omega = 12 \Omega$ . Kahden yhtä suuren vastuksen rinnankytkennän resistanssi on puolet yhden vastuksen resistanssista:  $4 \Omega || 4 \Omega = 2 \Omega$ .

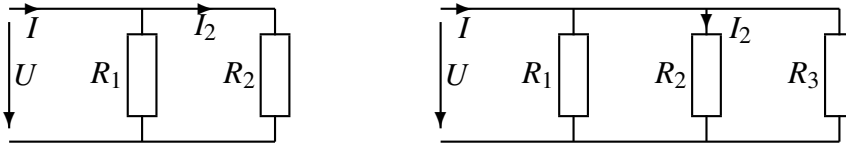
Vastusten rinnankytkennässä **virrat** jakautuvat **konduktanssien suhteessa** (kuva 20).

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{R_{12} I}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \cdot I \quad (19)$$



$$I_i = \frac{G_i}{\sum G_i} I \quad (20)$$

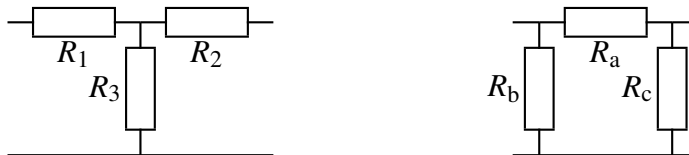
Vastuksen alaindeksi lausekkeiden (19) osoittajissa ei ole sama kuin konduktanssilla! Kaavat pätevät, *joss* (**jos ja vain, jos**) vastusten rinnalla ja niiden kanssa sarjassa ei ole muita komponentteja.



**Kuva 20.** Virta jakautuu resistanssien rinnankytkennässä eri haaroihin konduktanssien suhteessa. Konduktanssimuotoinen tulos on laajennettavissa myös kolmen tai useamman vastuksen tapaukseen, mihin resistanssiversio ei päde.

Erityisesti aloittelijat pyrkivät liiallisesti käyttämään vastusten sarjaan- ja rinnankytkennän kaavoja — lähes aina tilanteissa, joissa ne eivät toimi; monimutkaisempien piirien käsittelyssä niistä ei edes ole apua! Sarjaan- ja rinnankytkentä ovat piirirakenteina erikoistapauksia — useimmat piirirakenteet ovat aivan muita.

Useimmat kytkentätavat eivät siis käytännössä suinkaan ole rinnan- tai sarjaankytkentöjä, vaan esimerkiksi **tähti**- eli T- tai **kolmio**- eli  $\pi$ -kytkentöjä (kuva 21). Tähti- ja kolmiokytkennän tunnuksina käytetään joskus merkkejä Y ja  $\nabla$  (tai  $\Delta$ , D). Tähtikytkennässä kolme komponenttia tai joskus useampiakin on liitetty tähtipisteeseen (Y:n tai T:n keskipiste). Kolmiokytkennässä kolme osaa on liitetty pareittain yhteen — jokaiseen liitäntäpisteeseen liittyy siis kaksi komponenttia. Tähti- ja kolmiokytkentä ovat luonnollisesti yleensä osana laajempaa piiriä.

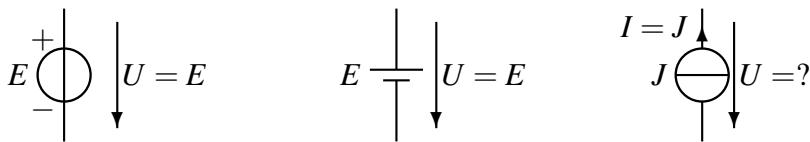


**Kuva 21.** Tähti- eli T- ja kolmio- eli  $\pi$ -kytkentä (pii-kytkentä) liittyvät muuhun piiriin kolmen liitäntäpisteen kautta; kuvassa alajohdin muodostaa yhden liitäntäpisteen. Kolme eri tai yhtä suurta vastusta (impedanssia) voidaan muuntaa tähti–kolmio tai kolmio–tähti -muunnoksella T- ja Y-kytkentöjen välillä niin, että piiri näyttää ulospäin samalta; T-kytkennän keskipisteeseen ei saa olla kytkettyä mitään.

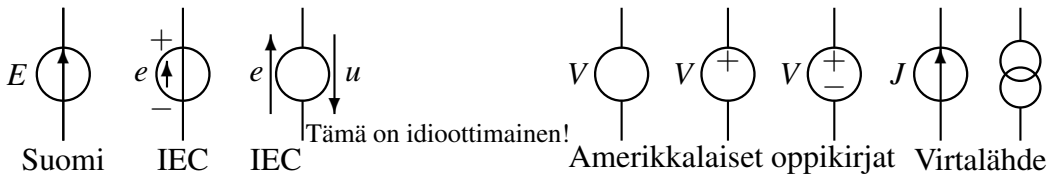
## 5 Jännite- ja virtalähteet

### 5.1 Piirrosmerkit

Jännite- ja virtalähteet toimivat virtapiireissä energianlähteinä. Piirrosmerkit eivät ole täysin vakiintuneita; tässä käytetään seuraavia IEC:n standardin mukaisia merkkejä (kuva 22). Muita piirrosmerkkejä on kuvassa 23.



**Kuva 22.** Jännite- ja virtalähteiden suositeltavat piirrosmerkit. Kaksi ensimmäistä on jännitelähteitä, oikealla virtalähde. Lähdesuureen  $E$  tai  $J$  lukuarvo voi olla myös negatiivinen. Keskimmäistä merkkiä käytetään, kun halutaan korostaa lähteen olevan tasajännitelähde. Joskus tasajännitelähteen kennoja piirretään useampia sarjaan kuvaamaan esimerkiksi pari(stoj)en sarjaankytkentää. Reunimaiset merkit ovat yleispäteviä ja sopivat siis mille tahansa aaltomuodolle.



**Kuva 23.** Muita jännite- ja virtalähteiden piirrosmerkkejä. Jännitenuolen suunta ( $e$ ) on IEC:n piirrosmerkeissä väärin päin! Ei ihme, että lähteiden etumerkit aiheuttavat opiskelijoillekin vaikeuksia!

Kuvassa 23 vasemmalla oleva symboli on ollut Suomessa yleisesti jännitelähteen merkinä. Sitä käytetään kuitenkin monissa ulkomaisissa oppikirjoissa nimenomaan virtalähteen piirrosmerkinä. IEC:n standardi taas suosittelee samaa merkkiä galvanometrini eli herkän virtamittarin merkiksi. Standardin mukaisessa jännitelähteen piirrosmerkissä ei yleensä ole nuolta sisällä; jos siinä on nuoli, se ei ole keskellä.

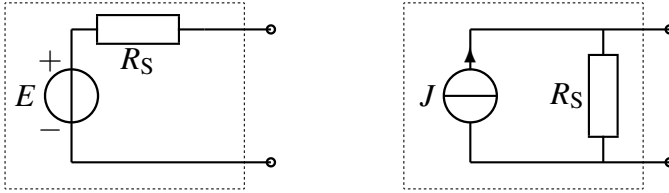
## 5.2 Jännite- ja virtalähteen ero

Jos et ymmärrä jännitteen ja virran eroa (ks. KJL ja KCL), et ymmärrä tätäkään! Ideaalinen (**vakio**)**jännitelähde**  $E$  pitää **jännitteensä vakiona** riippumatta kuormitusvirrasta. **Lähdejännitettä** sanotaan joskus lähteen **sähkömotoriseksi voimaksi** (SMV eli **EMF**, *electromotive force*). Virran suuruus ja suunta määräytyvät muiden jännitelähteeseen kytkettyjen komponenttien perusteella. Lähteen (napa)jännitteen suunta on kuitenkin aina sama.

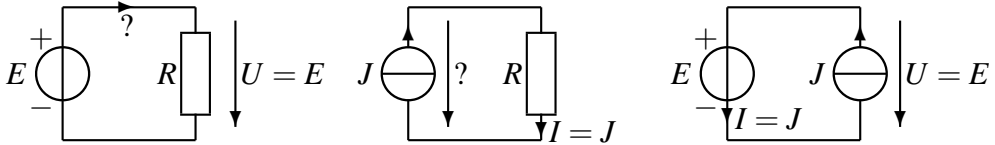
Tasajännitelähdettä, jossa on vain yksi pariston kenno (esim. 1,5 V) sanotaan (**sähkö**)**pariksi**. **Paristo** on varsinaisesti usean parin sarjaankytkentä (esim. 9 V). Eri paristo- tai akkutyypeissä on erilainen nimellisjännite, jota ei yleensä voida muuttaa muuta kuin parien eli kennojen määrää muuttamalla.

Ideaalinen (**vakio**)**virtalähde** syöttää mihin tahansa piiriin saman virran, **lähdevirran**  $J$ . Virtalähteen jännitteen suuruus ja suunta riippuvat siitä, mihin se kytketään. Nuolen suunta kuvaa kuitenkin aina virran suuntaa; sitä ei saa jättää piirrosmerkistä pois. Puhekielessä ja suomenkielises- sä kirjallisuudessa käytetään nimitystä virtalähde myös tavallisista jännitelähteistä puhuttaessa — englannin kielessä taas jännitelähde on joko *voltage source* tai käytännön laitteissa usein *power supply*. Suomen kielessäkin sana *teholähde* tarkoittaa lähes aina piiriteorian jännitelähdettä.

Jännitelähteessä sisäinen vastus voidaan ajatella sarjaankytketyksi ideaalisen lähteen kanssa. Virtalähteen sisäinen vastus taas on sen rinnalla (kuva 24). Kun jännitelähdettä kuormitetaan, kulkee kuormavirta sarjavastuksen  $R_S$  läpi, jolloin jännite pienenee. Virtalähteen sarjavastus ei vaikuttaisi kuormittavan piirin toimintaan, koska se ei muuta lähdevirtaa. Virtalähteen sisäisen vastuksen onkin oltava lähteen rinnalla, jolloin osa lähdevirrasta "vuotaa" kuorman ohi. Monissa käytännön sovelluksissa sisäiset vastukset voidaan olettaa merkityksettömiksi. Kirjoissani sisäisiä vastuksia ei oteta huomioon, ellei niitä ole erikseen piirretty näkyviin; sama koskee mm. käämien sarjavastuksia ja muita vastaavia epäideaalisuuksia.



**Kuva 24.** Jännite- ja virtalähteen sisäinen vastus. Ideaalisen jännitelähteen sisäinen vastus on nolla; ideaalisen virtalähteen sisäinen vastus puolestaan ääretön.



**Kuva 25.** Jännitelähde määrää sen rinnalla olevan vastuksen jännitteeksi  $U = E$ . Virtalähde pakottaa vastuksen läpi kulkevaksi virraksi  $I = J$ . Osapuolet tietävät roolinsa, vaikka ne liitettäisiin toisiinsa (oikealla), mutta kummalla on tukalamppaa? Nyt  $E$  joutuu nielemään  $J$ :n syöttämän tehon.

Kuvassa 25 on esimerkkejä jännite- ja virtalähteiden aiheuttamista virroista ja jännitteistä, kun ne yhdistetään vastukseen tai toisiinsa. Huomaa, että jännitelähteen virta tai virtalähteen jännite voi toisen lähteen vaikutuksesta kääntyä näennäisesti väärinpäin.

Klassinen virhe on olettaa, että virtalähteessä ei ole jännitettä, koska se on *virtalähde*. Jos ostat kaupasta litran jäätelöä, siinä ei ole yhtään kiloa tai grammaa, koska jäätelöä on vain tuo *litra*! Menikö oikein?

### 5.3 Käytännön jännite- ja virtalähteitä

Käytännössä sähköenergian lähteet ovat yleensä luonnostaan lähempänä jännitelähteitä kuin virtalähteitä. Esimerkiksi verkkojännite tai akut ja paristot ovat selviä jännitelähteitä. Myös hifivahvistimen kaiutinliitettä on hyvä jännitelähde (sisäinen vastus on alle  $0,1 \Omega$ ) — jos kuormana on esim. 4 tai 8 ohmin vastus, jännite ei juuri alene, mutta virran suuruuteen kuormavastus vaikuttaa. Taulukkoon 1 on koottu eräiden tyyppisten jännitelähteiden lähdejännitteitä.

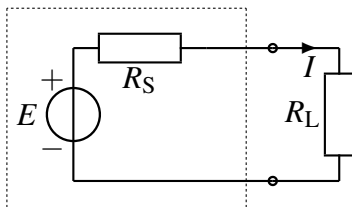
Tavallisimpia 1,5 voltin paristoja (pareja) ovat: LR03, LR6, LR14 ja suurin LR20 eli AAA (*micro*), AA (*mignon*), C (*baby*) ja D (*mono*) sekä

9 voltin LR61 (6LF22, *e-block*). Näistä ehkä yleisin LR6 on kooltaan noin 14,5 mm x 50 mm. NiMH-akkuina näiden tyypilliset kapasiteetit ovat suunnilleen 0,8; 2,6; 3,0; 5,0 ja 0,2 Ah, NiCd-akuilla jopa puolet pienemmät. Ensimmäinen kirjain L viittaa alkali-paristoon ja C litium-paristoon; ilman alkukirjainta kyseessä ovat vanhat sinkkikloridi-paristot. Harvinaisemmat 23A ja 27A ovat pieniä 12 V paristoja. Tietokoneiden emolevyissä BIOS-asetukset on tallennettu paristovarmennettuun muistiin, missä tavallisin paristo on CR 2032 (halkaisija 20 mm, paksuus 3,2 mm, 3 V, 170 mAh). Tavallisin auton akun jännite on nykyisin 12 V, mutta sähköisten toimintojen tehonkulutuksen lisääntyessä se ehkä tulevaisuudessa korotetaan 48 volttiin.

**Taulukko 1.** Eräiden jännitelähteiden lähdejännite eli kuormittamaton napajännite.

Jännitelähde	Jännite (V)	Jännitelähde	Jännite (V)
verkojännite (Eur.)	230	hopeaoksidipari	1,55
hifi-vahvistin (100 W)	$20 (\sqrt{PR})$	tavallinen ja alkalipari	1,5...1,6
auton akku	12	elohopeapari	1,35
9 voltin paristo	9	NiMH- tai NiCd-akku	1,24
litium-ioni-akku	3,6...3,7	CD-soittimen signaali	noin 1,0
litiumpari	3	oikosulku	0

Vakiovirtalähteen voi toteuttaa elektroniikkapiiriinä. Yksinkertaistettuna sen voi ajatella koostuvan hyvin suuresta jännitelähteestä, jonka sisäinen vastus on suuri ( $R_S \gg R_L$ , kuva 26).



$$I = J = \frac{E}{R_S + R_L} \approx \frac{E}{R_S} = \text{vakio}$$

**Kuva 26.** Virtalähteen periaatteellinen toteuttaminen korkealla jännitteellä  $E$  ja suurella sarjavastuksella  $R_S$ . Käytännössä virtalähteet ovat yleensä kuitenkin elektroniikkapiirejä.

Transistorit ja fetit ovat jo itsessäänkin (ohjattuja) virtalähteitä. Virtalähteitä tarvitaan lisäksi mm. NiMH- (nikkeli–metalli-hydridi) ja NiCd- (nikkeli–kadmium) akkujen lataukseen; vakiojännitteellä ladattaessa olisi

virta aluksi liian suuri, mutta silti pian sen jälkeen kennojännitteen noustessa niin pieni, ettei akku enää latautuisi. Tyypillisesti latausvirta on kymmenesosa Ah-määrästä; tällä virralla ladataan sitten noin 14 tuntia, koska latauksessa syntyy tehohäviötä (tunnet sen kädelläsi lämpönä); pikalatauksessa virta on luonnollisesti suurempi, mutta kaikki akut eivät tätä kunnolla kestä — käyttöikä lyhentyy.

Kun akkua ladataan, se näyttää vastukselta. Täyteen varauduttuaan NiCd- ja NiMh-akun jännite notkahtaa hieman. Muisti-ilmiön takia akku menettää kapasiteettiaan, jos sitä ladataan jatkuvasti tyhjentämättä akkua kunnolla välillä. Uusimmissa akkutyypeissä muisti-ilmiö ei vaivaa yhtä pahasti kuin ennen, mutta liian ahkera lataaminen saattaa lyhentää akkujen elinikää. Toisaalta monet akut eivät kestä juuri lainkaan syväpurkausta. Litium-polymeeriakut eivät kestä myöskään varastointia täyteen ladattuna. Järkevillä lataus-purkaus -sykleillä akkujen käyttöikä voidaan pidentää. Eri-ikäisiä akkuja ei pitäisi käyttää sekaisin, koska heikoimman akun napaisuus voi jopa kääntyä sarjaankytkennässä. Itsepurkauksen takia akkuja on varsinkin lämpimässä ladattava uudestaan myös silloin, kun ne ovat viikkoja käyttämättä.

**Hyytelö- ja lyijyakut** (esim. auton akku) ladataan puolestaan vakiojännitteellä — latausvirta saa pienentyä hiljalleen latauksen kuluessa. Ne kestävät myös jatkuvaa latausta. Esimerkiksi huoltovapaan 12 V Yuasa-akun latausjännite on normaalissa syklisessä käytössä 15 V. Jatkuvassa latauksessa suositeltava jännite on 13,8 V; tällöin akku on tarkoitettu varavoiman lähteeksi esim. verkkojännitteelle.

Tehokas, mutta erittäin vaurioherkkä litium-ioni-kenno, jonka nimellisjännite on 3,6 ... 3,7 V ladataan noin 4,2 voltin vakiojännitteellä — korkeampi jännite räjäyttää akun taivaan tuuliin! Myös oikosulku voi posauttaa akun kuin akun.