

# Ellära

Uppdaterad: 191022

Har jag använt någon bild som jag inte får använda? Låt mig veta så tar jag bort den.  
christian.karlsson@ckfysik.se

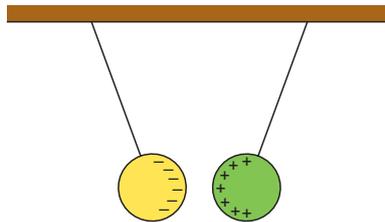
- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| [1] Elektrisk laddning               | [15] Potential                                     |
| [2] Gnidningselektricitet            | [16] Potential                                     |
| [3] Jordning                         | Från parallella plattor till enkel elektrisk krets |
| [4] Olika ämnen har olika ...        | [16] Spänningskällor /                             |
| [5] Laddningsmätning                 | [17] Ström   |
| [6] Elektriska krafter /             | [18] Mätning av spänning och ström                 |
| [7] Elektriska fält                  | [19] Resistans                                     |
| [8] Elektriska fält                  | [20] Resistivitet /                                |
| [9] Elektriska fält - några typfall  | [21] Serie- och parallellkoppling                  |
| [10] Filosofiska rutan /             | [22] Ersättningsresistans                          |
| [11] Elektrisk energi                | [23] Mätning av spänning och ström /               |
| [12] El. energi och grav.lägesenergi | [24] Kirchhoffs lagar                              |
| [13] Elektrisk spänning              | [25] Allmänt om fysik                              |
| [14] Elektrisk spänning /            | [26] Elektrisk effekt /                            |



[7]

## Elektrisk laddning

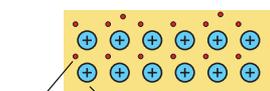
Ex: Laddade ballonger



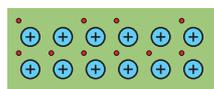
Överskott av elektroner  
(negativt laddad)

Underskott av elektroner  
(positivt laddad)

Schematiskt:



elektron  
atomkärna  
(ej rörlig)



(Egentligen omges varje kärna större än väte av flera elektroner.)



1

[1]

- 1) - + attraktion
- 2) + + repulsion
- 3) - - repulsion

# Gnidningselektricitet



<http://phet.colorado.edu/en/simulation/travoltage>



[2]

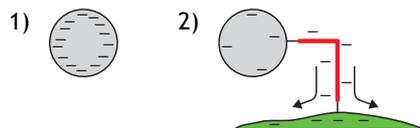
+
Glas
Människohår
Nylon
Ull
Silke
Papper
Bomull
Trä
Gummi
Rayon (kläder)
Polyetylen (förpackningar)
PVC
Teflon (stekpannor)
-

[3]

# Jordning

Jordning: anslutning till jordytan

Föremål kan laddas ur genom jordning:

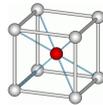


[3a]

# Olika ämnen har olika elektriska egenskaper

**Ledare:** Ämnen i vilka laddningar kan förflyttas

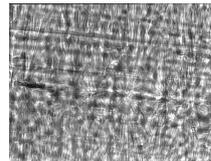
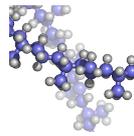
Metaller är goda ledare (har fria ledningselektroner)



[4]

**Isolatorer:** Ämnen i vilka laddningar *inte* kan förflyttas

Plaster är i allmänhet isolatorer



[5]

**Halvledare** (t.ex. Si, Ge, GaAs): Isolatorer i kristallin, ren form.

Dopning förändrar ledningsförmågan.

Utbyte av några Si-atomer mot t.ex. B- eller P-atomer.

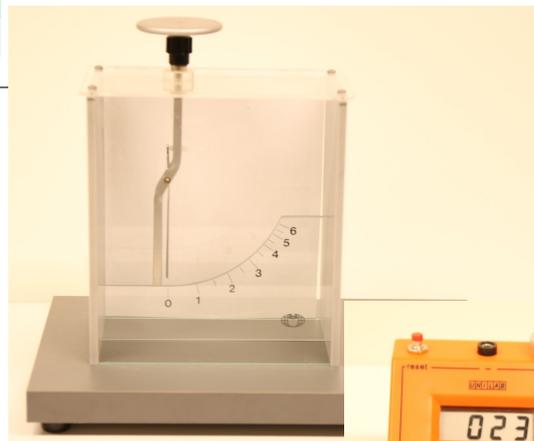
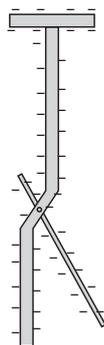


[6]

Q  
C

# Laddningsmätning

Elektroskop



Elektrisk laddning ( $Q, q$ ) mäts i SI-enheten coulomb (C)

En elektron ( $e^-$ ) har laddningen  $q = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ( $= -e$ )

Huvudurladdningen i en blix: 5 C

elementarladdningen  
(laddningen hos en proton)

Elektrisk laddning är *kvantiserad*  
(förekommer bara i bestämda mängder)

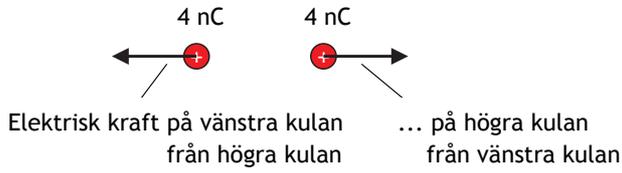


[7]

Q	F
C	N

# Elektriska krafter

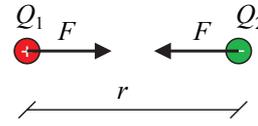
Elektriskt laddade partiklar/föremål påverkas av elektriska krafter



Krafterna är lika stora, motsatt riktade!

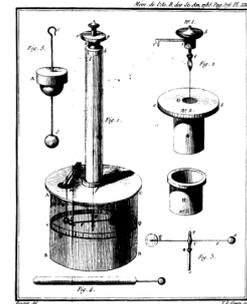


(mellan två punktformiga laddade föremål)  
Elektriska kraftens storlek:



$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{Coulombs lag})$$

$$k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$



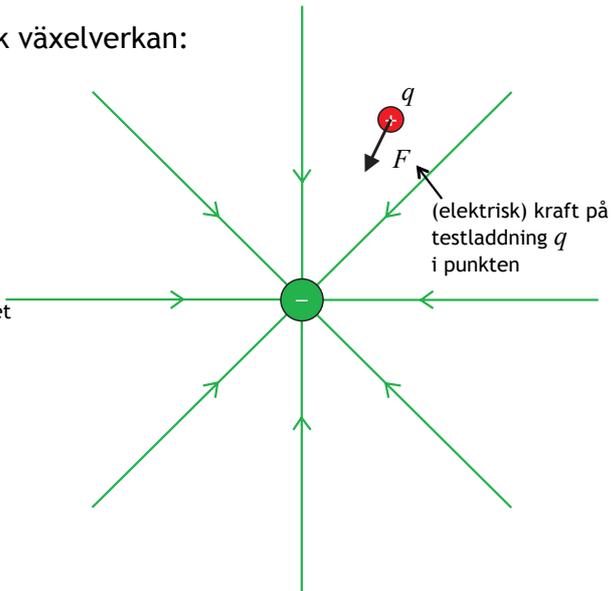
[9b]

$Q$	$F$	$E$
$C$	$N$	$N/C$
		$V/m$

# Elektriska fält

Ett sätt att förstå beskriva elektrisk växelverkan:

- 1) Ett föremål med laddning ger upphov till och omges av ett **elektriskt fält**.
- 2) Ett annat föremål med laddning i fältet påverkas av en **elektrisk kraft**.



**Elektriska fältstyrkan** i en punkt:

$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow F = qE$$

SI-enhet: 1 N/C

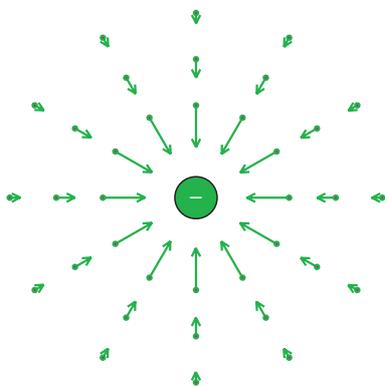
(Egentligen:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ )

- Elektriska fält kan åskådliggöras genom att rita fältlinjer.
- Elektriska fältlinjer anger riktningen för elektriska kraften på en positiv laddning för elektriska fältstyrkan ( $E$ ).

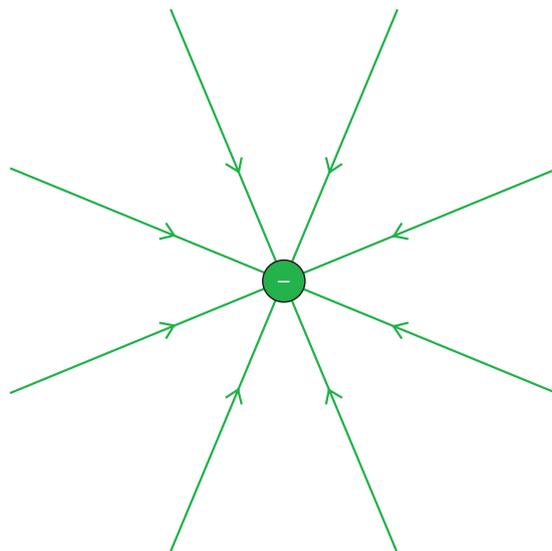
$Q$	$F$	$E$
$C$	$N$	$N/C$
		$V/m$

# Elektriska fält

Två olika sätt att åskådliggöra elektriska fält:

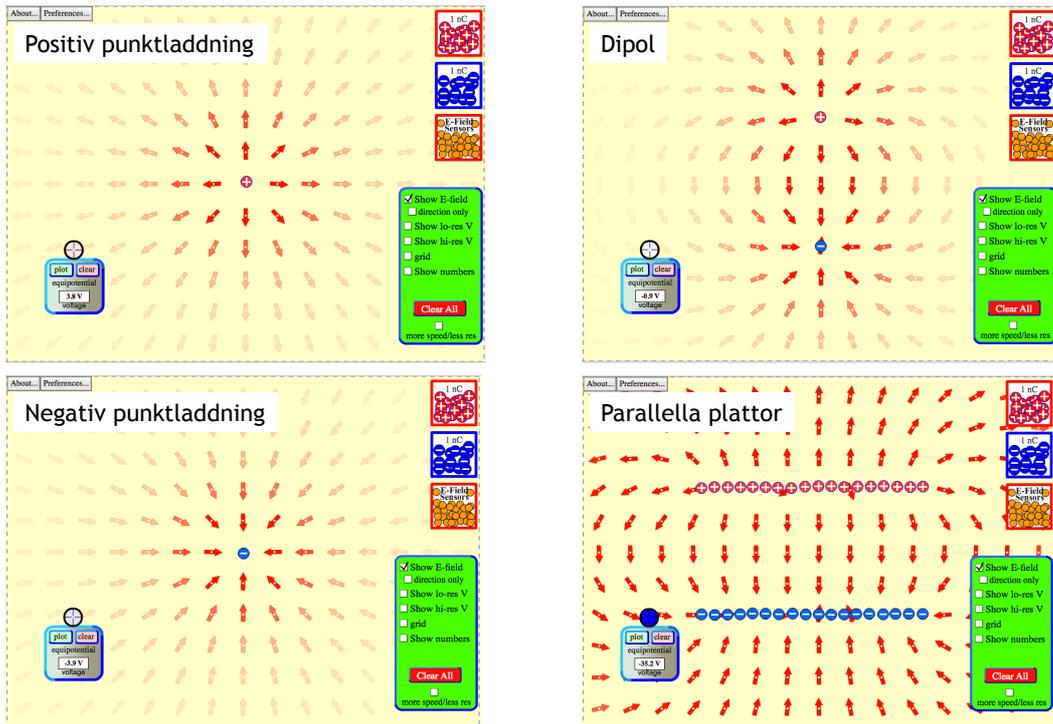


Genom att rita elektriska fältstyrka-vektorer



Genom att rita (elektriska) fält-linjer

# Elektriska fält - några typfall



<http://phet.colorado.edu/en/simulation/charges-and-fields>

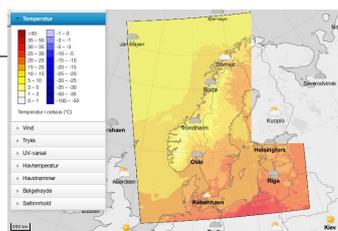
## Filosofiska rutan



Finns elektriska fält?

(för det första, vad menar vi med "finns"?)

Det kan man nog diskutera länge om man vill, men jag rekommenderar följande hållning:



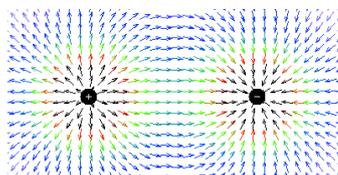
[11]

Precis som **materia** finns (och kan beskrivas med storheter som massa, temperatur, etc.) finns **elektriska fält** (och kan beskrivas med storheten elektrisk fältstyrka)

(kan beskrivas matematiskt med temperaturfält)

Alltså: Svar JA!

(kan beskrivas matematiskt med ~~elektrisk fältstyrka-fält~~ elektriska fält)

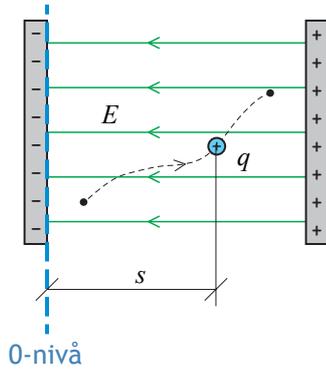


[12]

$Q$	$F$	$E$	$W_e$
C	N	N/C	J

# Elektrisk energi

En partikel med laddning i ett elektriskt fält har olika stor elektrisk (läges-) energi beroende på var den är.



Elektriska (läges-) energin för partikel med laddning  $q$  i **homogent** elektriskt fält:

$$W_e = \pm qEs$$

$s$  ← avståndet från vald 0-nivå  
 $E$  ← elektriska fältstyrkan  
 tecken beror på om lägesenergin är större (+) eller mindre (-) än vid 0-nivån

# Elektrisk energi och gravitationslägesenergi

Partikel med massa i ett gravitationsfält har olika stor (gravitations-) lägesenergi beroende på var den är.

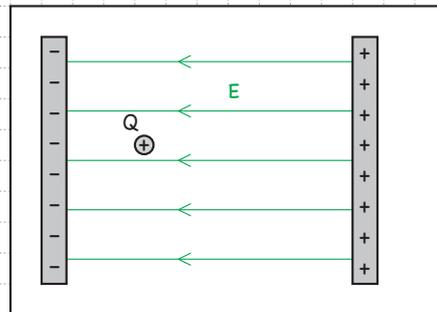
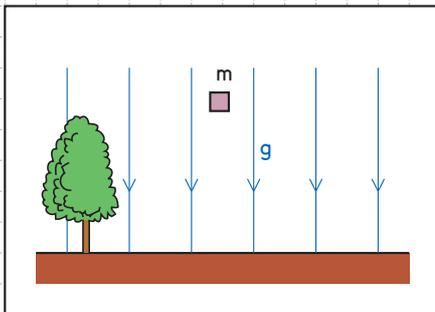
Partikel med laddning i ett elektriskt fält har olika stor elektrisk (läges)energi beroende på var den är.

(nära jordytan)

(mellan två laddade metallplattor)

Homogent gravitationsfält:

Homogent elektriskt fält:



$$W_p = \pm mgh$$

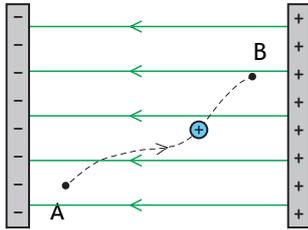
$h$  är avståndet från vald 0-nivå  
 + om högre lägesenergi än vid 0-nivån,  
 - om lägre lägesenergi än vid 0-nivån

$$W_e = \pm QEs$$

$s$  är avståndet från vald 0-nivå  
 + om högre lägesenergi än vid 0-nivån,  
 - om lägre lägesenergi än vid 0-nivån

$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$
C	N	N/C	J	V
				J/C

# Elektrisk spänning



Ex: Laddningen  $Q = 10 \text{ nC}$  flyttas från A till B.  
 Antag att elektriska energin ökar med  $\Delta W = 4,0 \text{ nJ}$ .  
 Spänningen mellan A och B är då

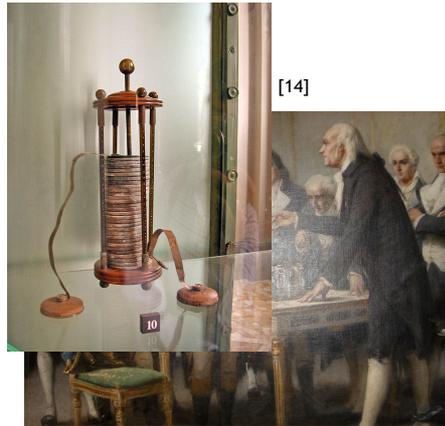
$$U = \frac{\Delta W}{Q} = \frac{4,0 \text{ nJ}}{10 \text{ nC}} = 0,40 \text{ V}$$

(energimängden  $W$  omvandlas)

Om förändringen i elektrisk energi är  $\Delta W$  när laddningsmängden  $Q$  flyttas från A till B så är **spänningen mellan A och B**

$$U = \frac{\Delta W}{Q} = \frac{W}{Q} \quad (\Rightarrow \Delta W = QU)$$

SI-enhet:  $1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$  (volt)

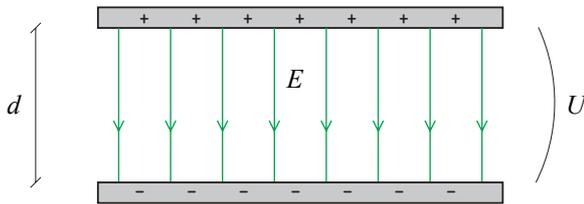


$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$
C	N	N/C	J	V
		V/m		J/C

# Elektrisk spänning

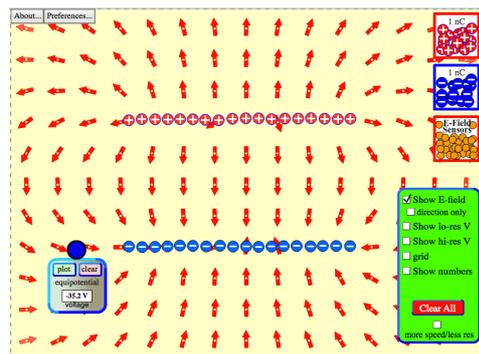
## Ett behändigt samband

Homogent fält mellan två stora, parallella plattor



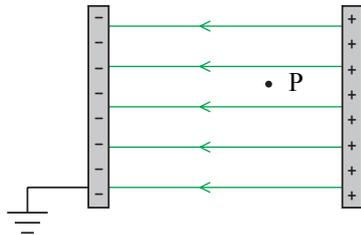
Då gäller

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



$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$
C	N	N/C	J	V	V
		V/m		J/C	

# Potential



Vänstra plattan är jordad (i kontakt med jorden)

Ex:  $s = 0,020\text{m}$   
 $Q = 10\text{nC}$   
 $E = 15\text{V/m}$

Elektrisk energi i P (med jord som 0-nivå):  
 $W_p = QEs = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 0,020\text{J} = 3,0 \cdot 10^{-9}\text{J}$

Potentialen i P:  
 $V_p = \frac{W_p}{Q} = \frac{3,0 \cdot 10^{-9}\text{J}}{10 \cdot 10^{-9}\text{C}} = 0,30\text{V} \quad (= \frac{QE_s}{Q} = E_s)$

## Potentialen i en punkt:

$$V_p = \frac{W_p}{Q}$$

elektriska lägesenergin för positiv testladdning  $Q$  i punkten (med jord som 0-nivå)

SI-enhet:  $1\text{ J/C} = 1\text{ V}$

$$V_B - V_A = \frac{W_B}{Q} - \frac{W_A}{Q} = \frac{W_B - W_A}{Q} = \frac{\Delta W}{Q} = U_{BA}$$

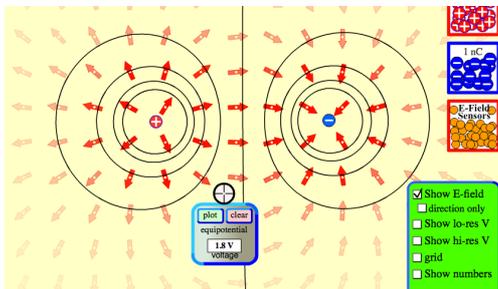
spänningen mellan två punkter = potentialskillnaden

$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$
C	N	N/C	J	V	V
		V/m		J/C	

# Potential

## Vad säger potentialen?

Potential är en egenskap hos det elektriska fältet.



<http://phet.colorado.edu/en/simulation/charges-and-fields>

(här är 0-nivån vald oändligt långt bort) (d.v.s. testladdningens elektriska lägesenergi är 0 när testladdningen är väldigt långt bort från de två laddningarna som orsakar fältet)

Om vi vet potentialen i en punkt kan vi bestämma den elektriska lägesenergin för en laddad partikel i punkten:

$$V_p = \frac{W_p}{Q} \Rightarrow W_p = QV_p$$

Om vi vet elektriska fältstyrkan i en punkt kan vi bestämma den elektriska kraften på en laddad partikel i punkten:

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

# Från parallella plattor till enkel elektrisk krets

Demoblod

## Från parallella plattor till enkel elektrisk krets

- En elektron flyttas från A till B (i vakuum).

0,24 aJ elektrisk energi omvandlas till rörelseenergi (som sedan omvandlas till inre energi när elektronen krossas in i plattan vid B).

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- En elektron flyttas från A till B (i en ledare där elektronen krockar längs vägen och lämnar av energi).

0,24 aJ elektrisk energi omvandlas till inre energi och strålningsenergi.

(Från och med nu tänker vi oss att elektroner som lämnar minusplattan omedelbart ersätts av nya utifrån, och att elektroner som kommer till plusplattan omedelbart förs bort\*)

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- En elektronladdning flyttas från A till B (i en ledare med ett hav av elektroner som krockar längs vägen och lämnar av energi).

0,24 aJ elektrisk energi omvandlas till inre energi och strålningsenergi.

Observera att en elektronladdning kan flyttas från A till B utan att ett och samma elektron gör hela resan!

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- Ändra form på ledaren.

\*Nyggvärmen\* av fria elektroner (elektronhav)

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- Ändra form på ledaren. Så länge elektroner tillförs utifrån vid minusplattan och bortförs vid plusplattan (och flyttas därmed till) kommer E-fältet att följa ledaren tack vare små ytladdningar som sätter sig på ledarens ytor (ej utritade).

E-fältet knuffar elektronhavet från - till +, och laddning flyttas därmed från A till B. När en elektronladdning flyttas från A till B omvandlas energimängden 0,24 aJ.

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$

Demoblod

- Ändra form på ledaren.

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- Ändra form på ledaren.

Precis som innan: E-fältet knuffar elektronhavet från - till +, och laddning flyttas därmed från A till B.

När en elektronladdning flyttas från A till B omvandlas energimängden 0,24 aJ.

$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- Byt ut en del av ledaren mot sämre ledare (elektroner krockar oftare).

E-fältet i den ledaren blir som det blir tack vare att ytladdningar sätter sig på ledarens ytor.

\*Tillförsel och bortförsel av elektroner vid "plattformarna" sker tack vare kemiska reaktioner i ett batteri.

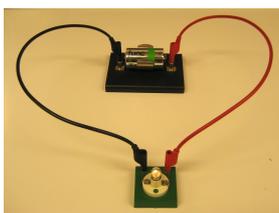
$U_{AB} = 1,5 \text{ V}$
- Det vi har i (8) kan ses som en enkel modell för till exempel en glödlampa ansluten till ett batteri.

Ofta ritas man en sådan krets så här:

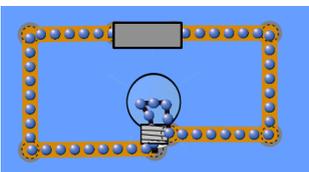
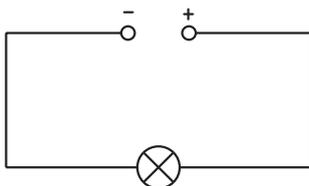
$U = 1,5 \text{ V}$

Nu är vi redo för elektriska kretsar!

# Spänningskällor



$U = 1,5 \text{ V}$



## Batteri: "Laddningspump"

När laddningsmängden  $Q$  pumpas runt omsätts energimängden  $W = UQ$

batteriets polspänning

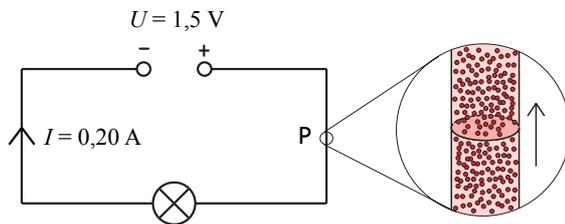
- 1 C pumpas runt:  $1,5 \text{ V} \cdot 1 \text{ C} = 1,5 \text{ J}$
- 1 elektronladdning:  $1,5 \text{ V} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



Observera att det finns andra spänningskällor än batterier, t.ex. solceller.

$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets	$I$
$C$	$N$	$N/C$	$J$	$V$	$V$		$A$
		$V/m$		$J/C$			$C/s$

## Ström



Ex: Laddningen  $Q = 12\text{ C}$  passerar ett tvärsnitt vid P på tiden  $t = 60\text{ s}$ .  
Strömmen i ledaren (genom P) är då

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{12\text{ C}}{60\text{ s}} = 0,20\text{ A}$$

Om laddningsmängden  $Q$  passerar ett tvärsnitt av en ledare på tiden  $t$  så är **strömmen** i ledaren:

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

SI-enhet:  $1\text{ C/s} = 1\text{ A}$  (ampere)



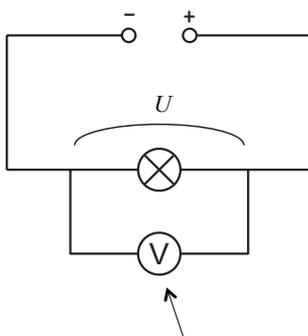
[16]

Obs! Ström går från + till - (men  $e^-$  rör sig från - till +)  
(strömriktningen är den riktning i vilken positiv laddning rör sig)

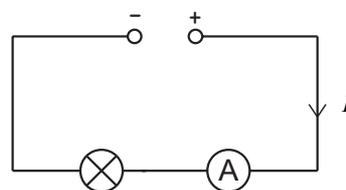
$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets	$I$
		$J/C$	$J$	$V$	$V$		$A$
		$V/m$		$J/C$			$C/s$

## Mätning av spänning och ström

Se upp vid inkoppling av mätinstrument!



**Voltmeter**  
Mäter spänningen **över** lampan.  
Kopplas **parallellt** med mätobjektet.



**Amperemeter**  
Mäter strömmen **genom** lampan.  
Kopplas **i serie** med mätobjektet.

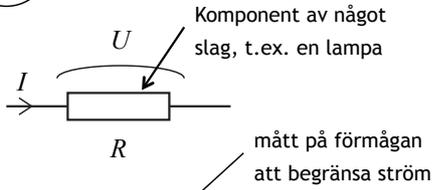
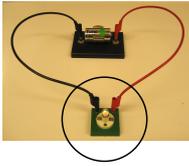
**Koppla aldrig in en amperemeter parallellt.**



$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets
$C$	$N$	$N/C$	$J$	$V$	$V$	
		$V/m$		$J/C$		

$I$	$R$
$A$	$\Omega$
$C/s$	

# Resistans



En komponents **resistans**:

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

spänningen över komponenten (pointing to U)  
strömmen genom komponenten (pointing to I)

SI-enhet:  $1 \text{ V/A} = 1 \Omega$  (ohm)

Om spänningen är given avgör resistansen hur stor strömmen blir!  $I = \frac{U}{R}$

Om en komponents resistans är konstant sägs komponenten följa **Ohms lag**.  
Då gäller  $U = RI$ , där  $R$  konstant.

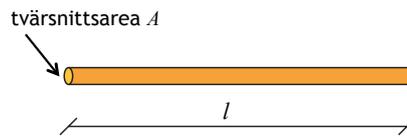


$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets
$C$	$N$	$N/C$	$J$	$V$	$V$	
		$V/m$		$J/C$		

$I$	$R$
$A$	$\Omega$
$C/s$	

# Resistivitet

En metalltråd med längden  $l$  och tvärsnittsarean  $A$  har resistansen



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

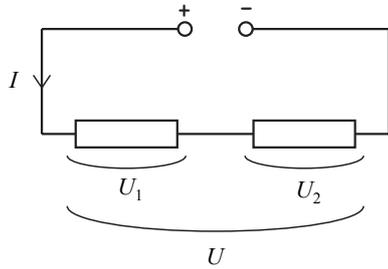
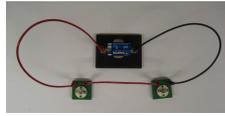
trådmaterialets **resistivitet** (materialkonstant)

Metaller	Ämne	Resistivitet vid 20 °C ( $10^{-6} \Omega \cdot m$ )	Temperaturkoefficient ( $10^{-3}/K$ )
Metaller	Aluminium	0,026	4,29
	Bly	0,21	4,22
	Guld	0,022	3,98
	Järn	0,096	6,57
	Kadmium	0,074	4,26
	Kalcium	0,034	4,0
	Koppar	0,017	4,33
	Kvicksilver	0,96	0,99
	Magnesium	0,044	4,2
	Molybden	0,053	4,7
	Nickel	0,069	6,75
	Platina	0,105	3,92
	Silver	0,0159	4,10
	Tenn	0,126	4,63
	Vismut	1,16	4,45
	Volfram	0,053	4,83
	Zink	0,059	4,2
Metallegeringar	Durahuminium	0,40	2,8
	Invar	0,10	2
	Kanthal A 1	1,45	0,03
	Konstantan	0,50	$\pm 0,03$
	Kromnickel	1,1	
	Manganin	0,43	
	Mässing	0,06	
Stål			

$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets	$I$	$R$
	N	N/C	J	V	V		A	$\Omega$
			V/m	J/C			C/s	

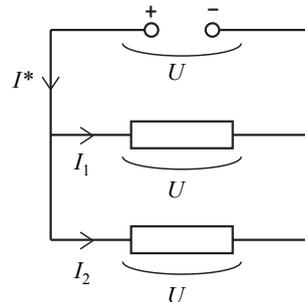
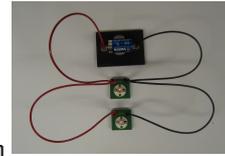
## Serie- och parallellkoppling

### Seriekoppling



- Samma  $I$
- $U = U_1 + U_2$

### Parallellkoppling



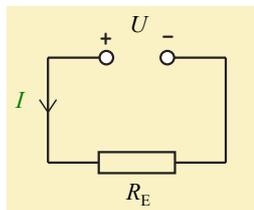
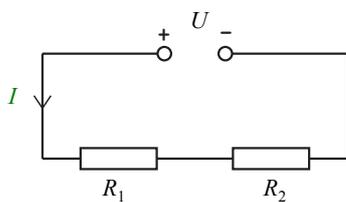
- $I^* = I_1 + I_2$
- Samma  $U$

$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets	$I$	$R$
C	N	N/C	J	V	V		A	$\Omega$
			V/m	J/C			C/s	

## Ersättningsresistans

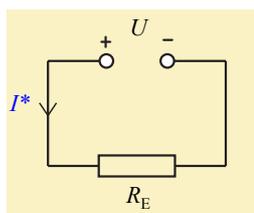
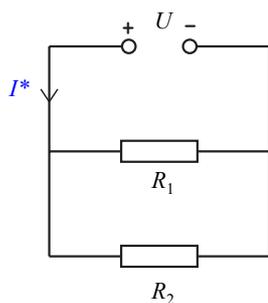
- 1) totala resistansen
- 2) den resistans som ensam ger samma ström (om  $U$  samma)

Ersättningsresistans för ett antal motstånd (i en krets)



$$R_E = R_1 + R_2$$

(seriekoppling)



$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

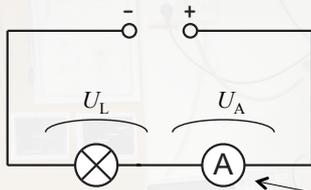
(parallellkoppling)

Användbart vid problemlösning: 1) Bestäm  $R_E$  för samtliga motstånd.

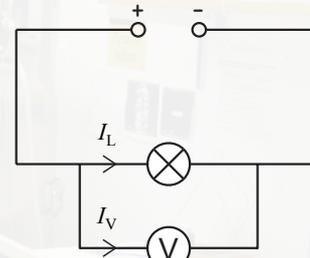
2) Bestäm huvudström  $I$ . 3) Bestäm delspänningar.

# Mer om mätning av spänning och ström

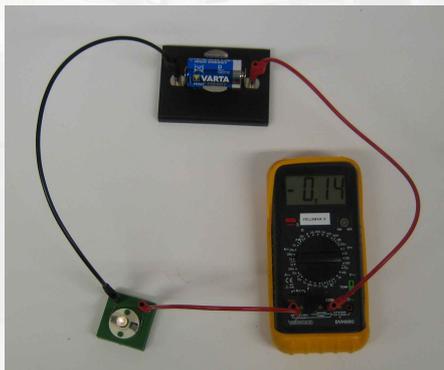
Mätinstrument ska helst inte märkas!



En bra **amperemeter** har **liten** resistans (så att  $U_A \approx 0$ )



En bra **voltmeter** har **stor** resistans (så att  $I_V \approx 0$ )



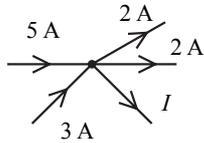
Vid alla typer av mätningar:  
Mäter jag verkligen det som jag tror att jag mäter?

Q	F	E	W <sub>c</sub>	U	V <sub>p</sub>	Från parallella plattor till elektrisk krets
C	N	N/C	J	V	V	
			V/m	J/C		

I	R
A	Ω
C/s	

# Kirchhoffs lagar

1. I en förgreningspunkt: “ $\Sigma(\text{ström in}) = \Sigma(\text{ström ut})$ ”

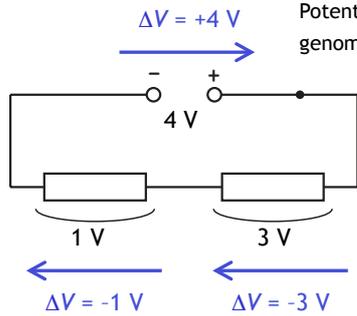


$I = 4 \text{ A} \quad (= 8 \text{ A} - 2 \text{ A} - 2 \text{ A})$



[17]

2. I en sluten strömkrets är summan av alla potentialändringar, räknade med tecken, lika med 0.



Potentialen ökar när vi går från minuspol till pluspol genom en spänningskälla (ökningen = polspänningen).

$-3 \text{ V} - 1 \text{ V} + 4 \text{ V} = 0$  Stämmer!

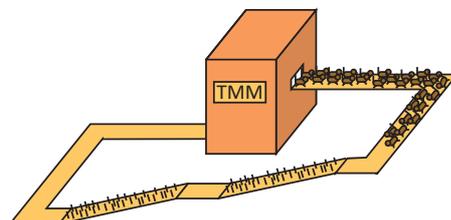
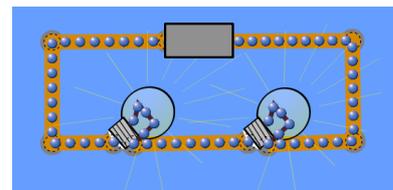
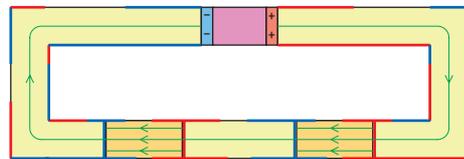
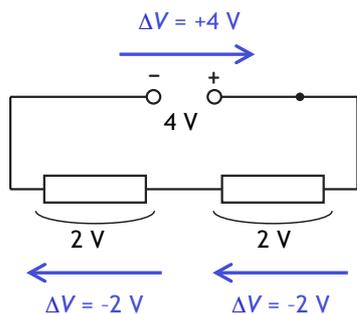
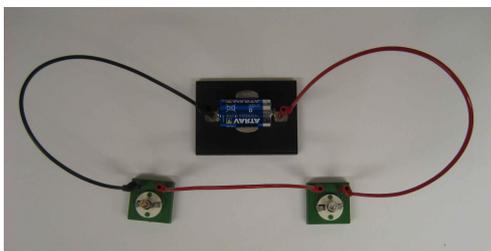
Potentialen minskar när vi går i strömriktningen genom ett motstånd (minskningen = spänningen över motståndet).

Q	F	E	W <sub>c</sub>	U	V <sub>p</sub>	Från parallella plattor till elektrisk krets
C	N	N/C	J	V	V	
			V/m	J/C		

I	R
A	Ω
C/s	

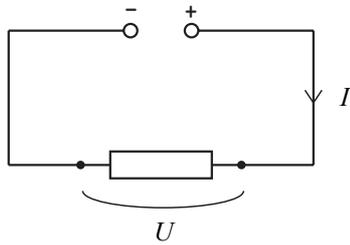
# Allmänt om fysik

Komplicerade fenomen kan förstås på olika nivåer



$Q$	$F$	$E$	$W_c$	$U$	$V_p$	Från parallella plattor till elektrisk krets	$I$	$R$	$P$	26
$C$	$N$	$N/C$	$J$	$V$	$V$		$A$	$\Omega$	$W$	
			$V/m$	$J/C$			$C/s$	$J/s$		

# Elektrisk effekt



Ex: Antag  $I = 0,5 \text{ A}$  och  $U = 6 \text{ V}$ . På tiden  $t = 60 \text{ s}$  passerar då laddningsmängden

$$Q = It = 0,5 \cdot 60 \text{ C} = 30 \text{ C}$$

genom motståndet. Energiomsättningen i motståndet är

$$\Delta W = UQ = 6 \cdot 30 \text{ J} = 180 \text{ J}$$

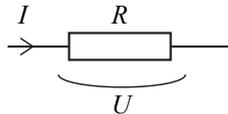
Utvecklad effekt:

$$P = \frac{\Delta W}{t} = \frac{180 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 3 \text{ W} \quad \left( = \frac{UQ}{t} = \frac{U \cdot It}{t} = UI \right)$$

I motståndet: Elektrisk lägesenergi  $\rightarrow$  inre energi, strålningsenergi

Utvecklad effekt (i motstånd eller annan komponent):

$$P = UI \leftarrow \begin{array}{l} \text{strömmen genom komponenten} \\ \text{spänningen över komponenten} \end{array}$$



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

$$P = UI = \left\{ I = \frac{U}{R} \right\} = \frac{U^2}{R}$$

## Källor

Ej färdigt!

- [1] PSSC Coulomb's law (<https://www.youtube.com/watch?v=o1kKGeLE1xI>)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Static\\_electricity](https://en.wikipedia.org/wiki/Static_electricity)
- [2b] <https://i2.wp.com/www.heyuguys.com/images/2017/10/paddington-2.jpg?w=1392&ssl=1>
- [2c] <https://www.tumblr.com/search/paddington%20gifs>  
[https://66.media.tumblr.com/c647cc11ee83ac6bbc5a83b7b2a663df/tumblr\\_p07vo6Skpr1vmu4bvo3\\_400.gif](https://66.media.tumblr.com/c647cc11ee83ac6bbc5a83b7b2a663df/tumblr_p07vo6Skpr1vmu4bvo3_400.gif)
- [3] *Blixt och åska Så fungerar naturens fyrverkeri* av V. Cooray (Hallgren & Fallgren, 2003)
- [3a] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground\\_\(electricity\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_(electricity))
- [3b] Smileys tagna från <http://findicons.com/search/smiley#ajax>
- [3c] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>
- [3d] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:European\\_honey\\_bee\\_extracts\\_nectar.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:European_honey_bee_extracts_nectar.jpg)
- [4] [https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/\\_Innerer\\_Aufbau/\\_Struktur](https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Innerer_Aufbau/_Struktur)  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Iron>
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene> (alla tre bilderna)
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon> (alla fyra bilderna)
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>
- [9b] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin\\_Coulomb](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_Coulomb)
- [10] Bild tagen från *There's Treasure Everywhere* av B. Watterson (Warner Books, 1996)  
(Se också <http://www.gocomics.com/calvinandhobbes/1985/11/22>)
- [11] <http://www.yr.no/kart/#lat=64.5&lon=22.5&zoom=3&laga=temp&baseid=PunktUtlandet%3A2711537&proj=3575>
- [12] [http://vnatsci.ltu.edu/s\\_schneider/physlets/main/efield.shtml](http://vnatsci.ltu.edu/s_schneider/physlets/main/efield.shtml)
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta)
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tempio\\_Voltiano](https://en.wikipedia.org/wiki/Tempio_Voltiano)
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Battery\\_\(electricity\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_(electricity))
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie\\_Amp%C3%A8re](https://en.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie_Amp%C3%A8re)