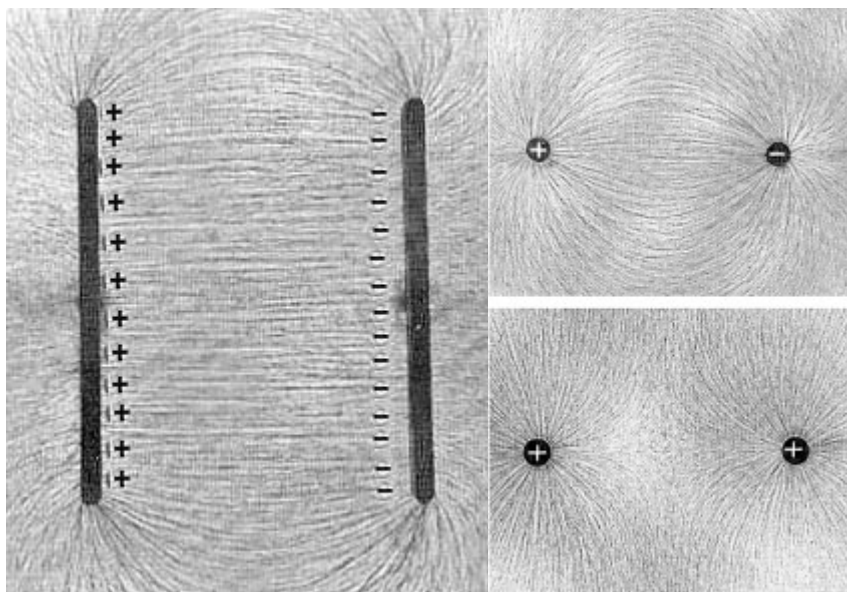


# Elektrostatické pole

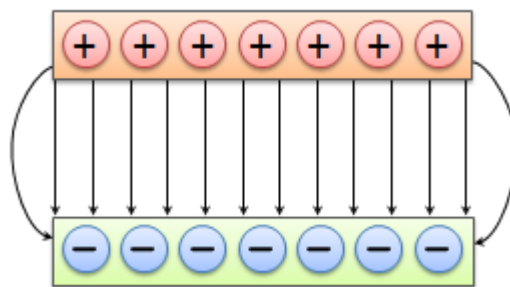
## Vznik a zobrazení elektrostatického pole

**Elektrostatické pole** vzniká kolem nepohyblivých těles, které mají **elektrický náboj**. Tento **náboj** mohl vzniknout například **přivedením elektrického napětí** ze zdroje na **vodivé elektrody** nebo **třením** dvou různých **nevodivých materiálů**, kdy elektrony z povrchu jednoho materiálu získaly třením dostatek energie, aby **přestoupily** na povrch druhého materiálu a tím na něm navýšily záporný náboj, zatímco na povrchu původního materiálu zůstaly atomy bez elektronů s kladným nábojem tvořeným protony.

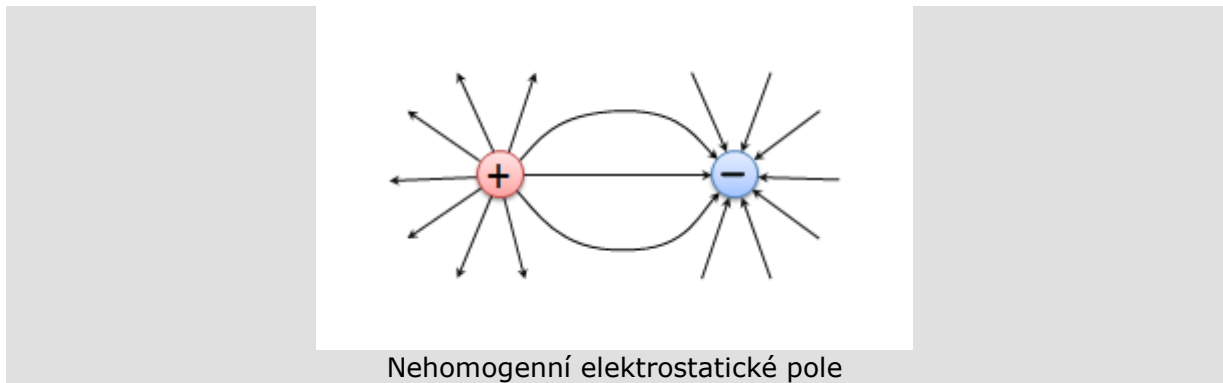


V **nevodivém prostoru** mezi takto nabitými tělesy je **elektrostatické pole**, které se projevuje **silovými účinky**. Zakreslujeme ho pomocí šipek představujících **siločáry** tohoto pole, přičemž šipky vystupují z kladného náboje a vstupují do záporného náboje, siločáry začínají a končí na povrchu těles a jsou kolmé k jejich ploše. Elektrostatické pole je nejsilnější v blízkosti nabitých těles a se vzdáleností od tělesa slábne. Uvnitř těles z **vodivých materiálů** se **elektrostatické pole nevytváří, náboj** je pouze na jejich **povrchu**.

Tyto **siločáry** lze vidět i ve skutečnosti, pokud do prostoru vyplněného elektrostatickým polem umístíte jemné částičky dielektrika.



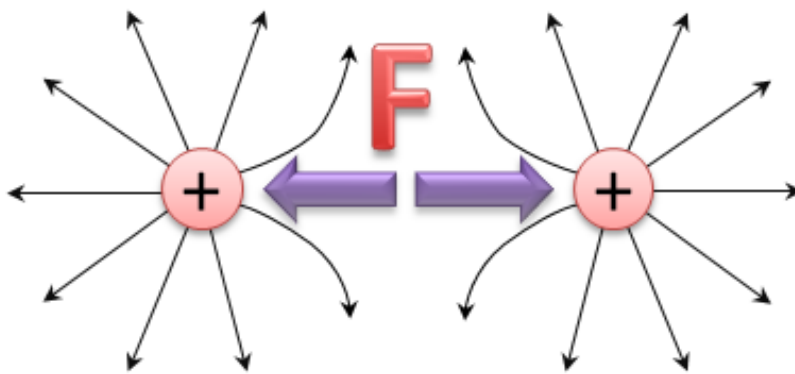
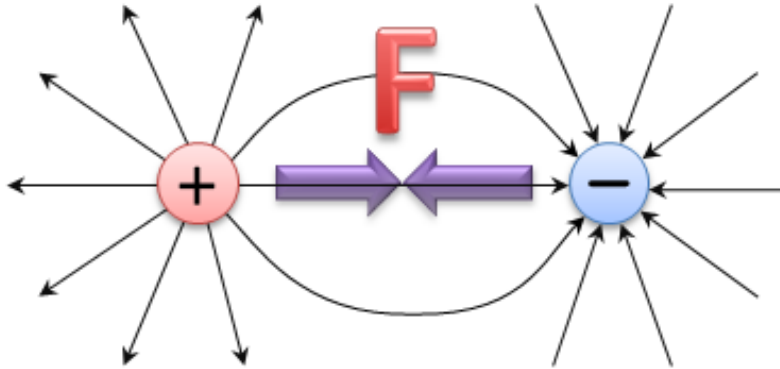
Homogenní elektrostatické pole



Pokud jsou siločáry **rovnoběžné** a rovnoměrně rozmístěné, jedná se o **homogenní elektrostatické pole** (například mezi dvěma deskami).

Pokud jsou **různoběžné**, nebo nepravidelně rozmístěné, jde o **nehomogenní elektrostatické pole** (u okrajů desek nebo kolem bodových nábojů).

# Coulombův zákon



**Charles-Augustin de Coulomb** v roce 1785 změřil působení elektrostatických nábojů na speciálním přístroji a poté definoval **Coulombův zákon**, který udává jakou **silou na sebe působí** dva nepohyblivé **bodové náboje**. Mají-li náboje opačnou polaritu, touto silou se přitahují, mají-li stejnou polaritu, touto silou se odpuzují. Síla má **daný i směr**, jedná se tedy o **vektorovou veličinu**. Síla s rostoucí vzdáleností nábojů **r** klesá velmi rychle.

$$\vec{F} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$$(N; N^{-1} \cdot m^{-2} \cdot C^2, C, C, m)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (N^{-1} \cdot m^{-2} \cdot C^2)$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \quad (N^{-1} \cdot m^{-2} \cdot C^2)$$

**Permitivita** nevodivého prostředí (dielektrika)  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  vyjadřuje schopnost tohoto prostředí vázat náboj svou **polarizací**. Čím má dielektrikum **větší permitivitu**, tím **víc náboje** z okolí je schopno na sebe vázat a také tím **menší silou** na sebe budou náboje působit.

**Permitivita** se v praxi udává v odvozených jednotkách  $F \cdot m^{-1}$ .

Relativní permitivita  $\varepsilon_r$  různých materiálů je bezrozměrná - je vztažena k **permitivitě vakua**  $\varepsilon_0$  a je vždy **větší než 1** (například vzduch má relativní permitivitu 1,00054; papír 4,5; sklo až 7; voda 80).

## Základní veličiny elektrostatičkého pole

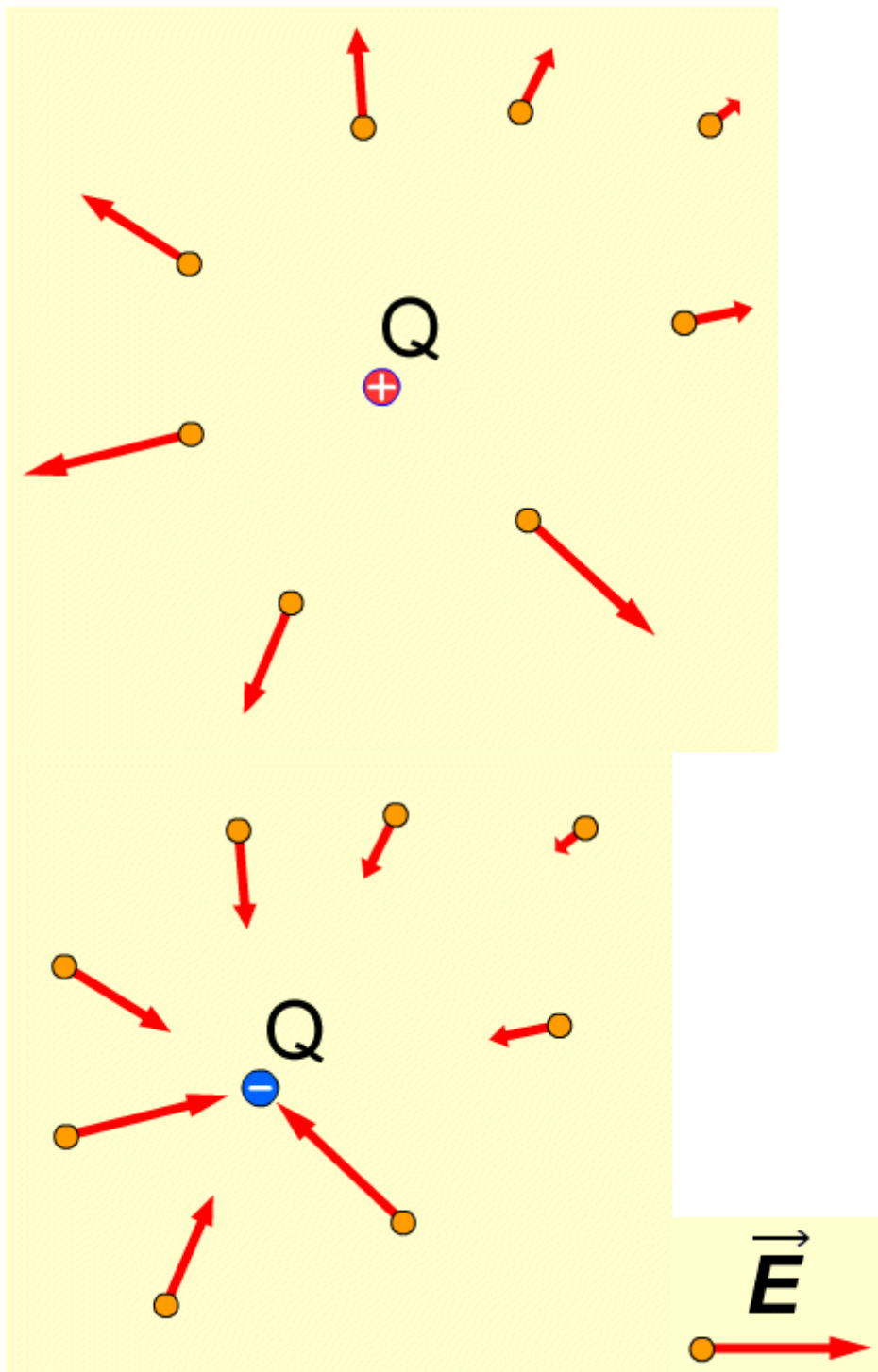
Základní veličiny umožňují popsat působení elektrostatičkého pole vytvořeného elektrickým nábojem.

### Intenzita elektrostatičkého pole



**Intenzita elektrostatičkého pole  $E$**  udává jak **velkou silou** by pole v **daném místě** působilo na **jednotkový elektrický náboj**.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad (N \cdot C^{-1}; N, C)$$

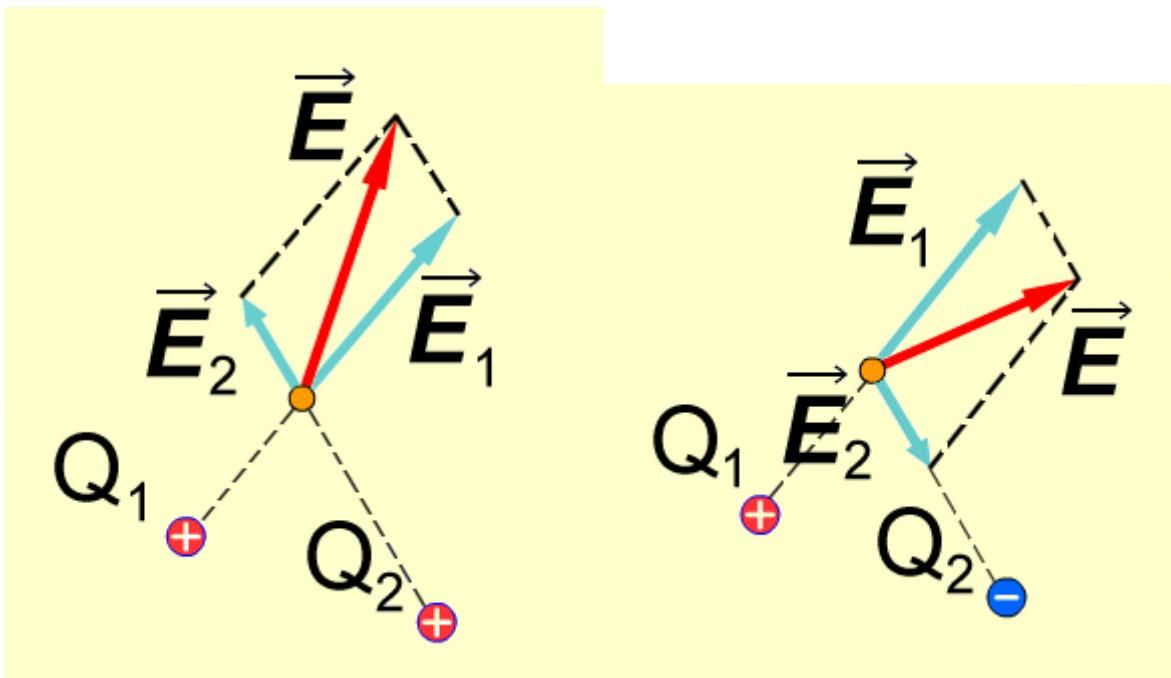


Intenzita je vektor a má **stejný směr jako síla** se stejnými pravidly jako siločáry (vystupuje z kladného náboje; vstupuje do záporného náboje). **Se čtvercem vzdálenosti** od náboje intenzita **rychle klesá**.

Pokud za sílu dosadíme z **Coulombova zákona** (neboli náboj  $Q_2=1$ ), získáme vztah udávající intenzitu elektrického pole vytvořeného nábojem **Q** ve vzdálenosti **r**:

$$\vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

$$(N \cdot C^{-1}; N \cdot m^{-2} \cdot C^2, C, m)$$



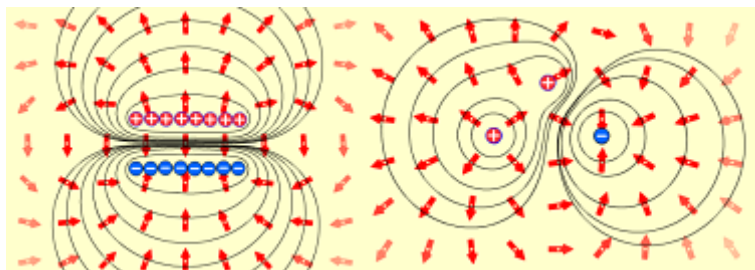
Zkoumáme-li intenzitu v daném místě, kolem kterého je **více nábojů**, jednotlivé intenzity se **sčítají vektorově**.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Pro intenzitu elektrostatického pole lze odvodit i druhou v praxi často používanou jednotku  $V \cdot m^{-1}$

V elektrostatickém poli lze změřit mezi dvěma body v prostoru elektrické napětí. Intenzitu pak můžeme určit jako **spád napětí** na určitou vzdálenost:

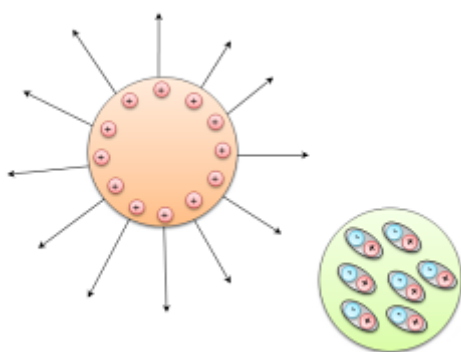
$$\vec{E} = \frac{U}{l} \quad (V \cdot m^{-1}; V, m)$$



**Místa v prostoru**, která mají vůči místu s nábojem **stejnou hodnotu napětí** se nazývají **ekvipotenciální hladiny** a pokud tato místa spojíme křivkou, můžeme posuzovat rozložení intenzity pole v prostoru. **Vektory (siločáry) intenzity elektrostatického pole** jsou k těmto ekvipotenciálním hladinám **vždy kolmé**.

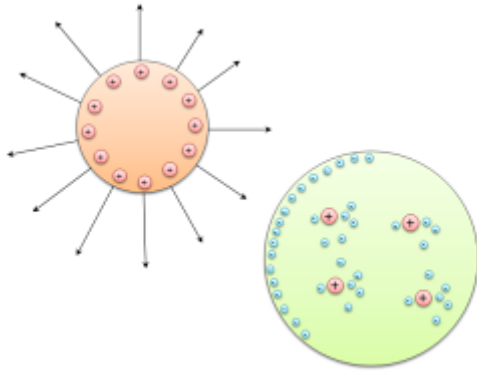
## Elektrická indukce

Pokud se do elektrostatického pole **nabitého tělesa** přiblíží jiné **nenabitě těleso** z vodivého nebo dielektrického materiálu, dojde k ovlivnění elektrické rovnováhy tohoto tělesa **indukcí**.



U **tělesa z nevodivého dielektrického materiálu** buď dojde k **atomové** nebo **molekulové polarizaci** dielektrika.





U **tělesa z vodivého materiálu** dojde k **přesunu volných elektronů** vlivem přitažlivých nebo odpudivých sil k povrchu tělesa a vytvoření povrchového náboje.

**Elektrická indukce** je úměrná **intenzitě elektrostatického pole** a pro určení její velikosti pro jednotkovou plochu platí tento vztah:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (C \cdot m^{-2}; N^{-1} \cdot m^{-2} \cdot C^2, N \cdot C^{-1})$$

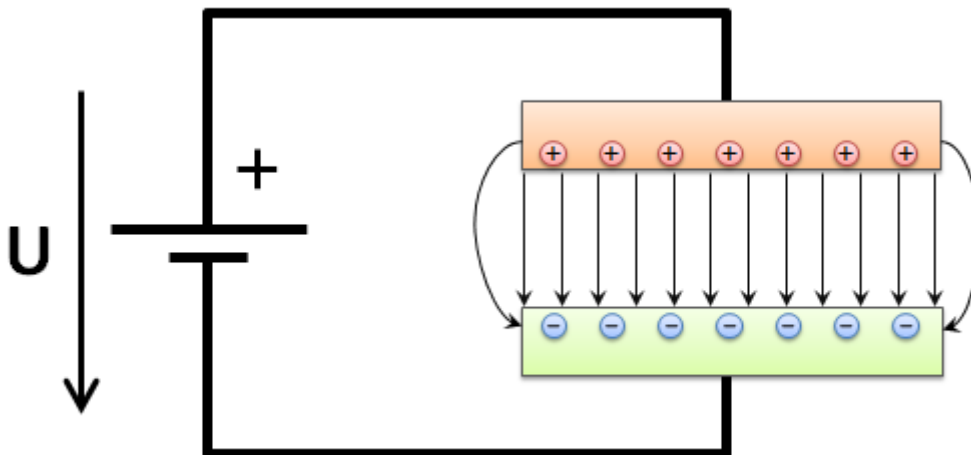
Čím větší bude permitivita prostředí, tím větší náboj se na tělese umístěném v elektrostatickém poli indukce.

Velikost indukovaného náboje na vodivé destičce o ploše **S** vložené do **homogenního** elektrostatického pole **kolmo k siločárám**:

$$Q = D \cdot S \quad (C; C \cdot m^{-2}, m^2)$$

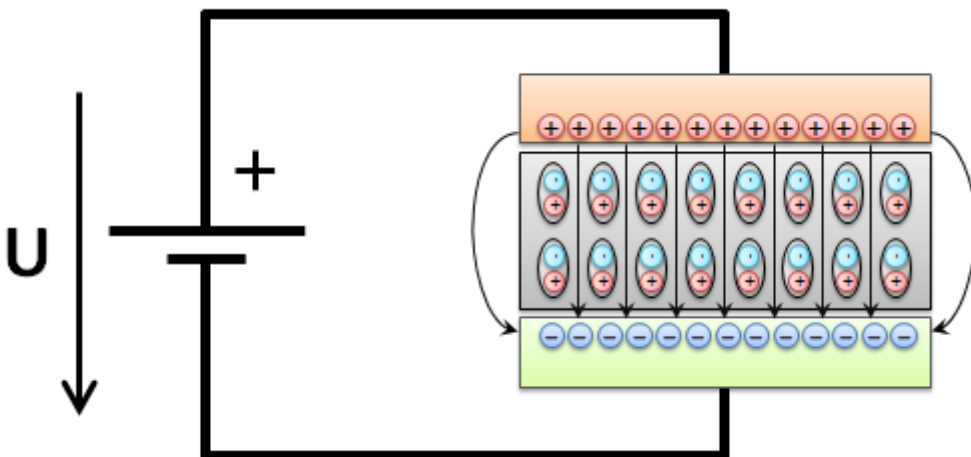
To, že se elektrický náboj přenáší indukci z nabitěho tělesa na tělesa v jeho blízkosti a jaký je mezi nimi vztah, popisuje **Gaussova věta**, která říká, že **indukční tok** (který přenáší náboj) vycházející z **uzavřené plochy** je dán **celkovou velikostí náboje**, který se nachází **v prostoru omezeném touto plochou**.

# Kondenzátory



Připojíme-li na **dvě rovnoběžné vodivé destičky** oddělené vzduchovou mezerou elektrické napětí ze zdroje, na deskách se nahromadí náboje a mezi deskami se vytvoří **homogenní elektrostatické pole**.

[Animace nabíjení kondenzátoru](#)



Pokud mezi destičky vložíme **dielektrikum**, **zvětší se množství náboje** na destičkách úměrně **permitivitě dielektrika**. Dielektrikum váže víc nábojů na deskách (zeslabuje elektrické pole). **Polarizované dielektrikum** přitahuje svojí kladnou stranou elektrony do záporně nabitě desky a zápornou stranou elektrony odpuzuje, čímž zvyšuje náboj kladně nabitě desky.

[Simulace funkce kondenzátoru.](#)

Takovéto uspořádání vodivých destiček a dielektrika se nazývá **Kondenzátor** (kapacitor). Dosazením z předchozích vztahů můžeme odvodit:

$$Q = \mathbf{D} \cdot S \quad \mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$$

$$Q = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \cdot S \quad \mathbf{E} = \frac{U}{l}$$

$$Q = \varepsilon \cdot \frac{U}{l} \cdot S \quad C = \varepsilon \cdot \frac{S}{l}$$

$$Q = C \cdot U \quad (C; F, V)$$

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{l} \quad (F; F \cdot m^{-1}, -, m^2, m)$$

Kde **C** je kapacita kondenzátoru, která udává jeho schopnost **hromadit elektrický náboj** po připojení na zdroj napětí a udává se v jednotkách **Farad (F)**.

**Dielektrikum kondenzátoru** by mělo mít velkou permitivitu a zároveň dostatečnou **odolnost** vůči destrukci elektrostatickým polem, která se udává se jako **elektrická pevnost dielektrika** a zjišťuje se empiricky (testováním), kdy mezi dvě elektrody vložíme dielektrikum, na elektrody přivedeme napětí, které postupně zvyšujeme, dokud nedojde k proražení.

$$E_P = \frac{U_P}{d} \quad (V \cdot m^{-1}; V, m)$$



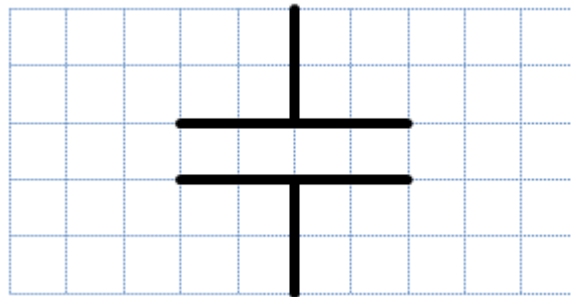
Test elektrické pevnosti oleje.

Překročením takto zjištěného maximálního napětí dojde k **proražení dielektrika** buď tepelně (shoří) nebo přeskočí jiskra (elektrický oblouk). V praxi se elektrická pevnost udává v upravených jednotkách:

$$E_p \text{ (} kV \cdot mm^{-1} \text{)}$$

Běžné hodnoty elektrické pevnosti: vzduch  $3kV \cdot mm^{-1}$ ; papír  $50kV \cdot mm^{-1}$ ; slída  $80kV \cdot mm^{-1}$

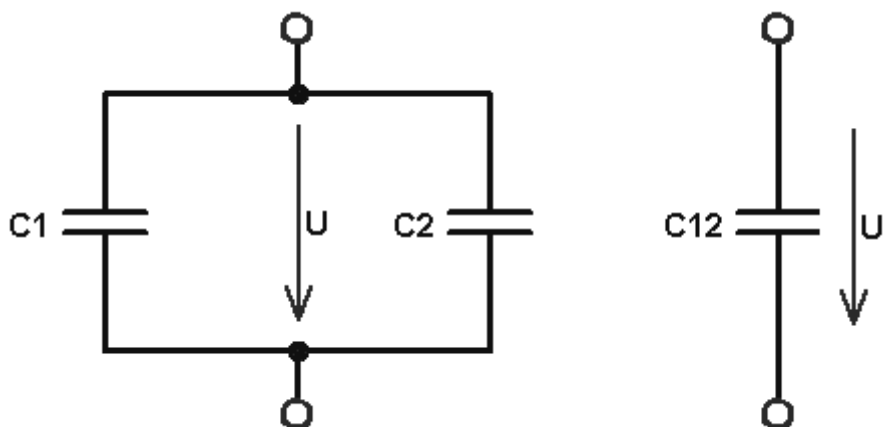
Kondenzátor se ve schématech zakresluje takovouto značkou:



## Spojování kondenzátorů

Obdobně jako rezistory i kondenzátory lze spojovat sériově či paralelně.

### Paralelní spojení kondenzátorů



Na obou kondenzátorech je **stejné napětí U**. Chceme-li je nahradit jedním kondenzátorem, musí do něj zdroj dodat celkový náboj odpovídající **součtu nábojů** obou kondenzátorů.

$$Q_{12} = Q_1 + Q_2$$

$$C_{12}U = C_1U + C_2U$$

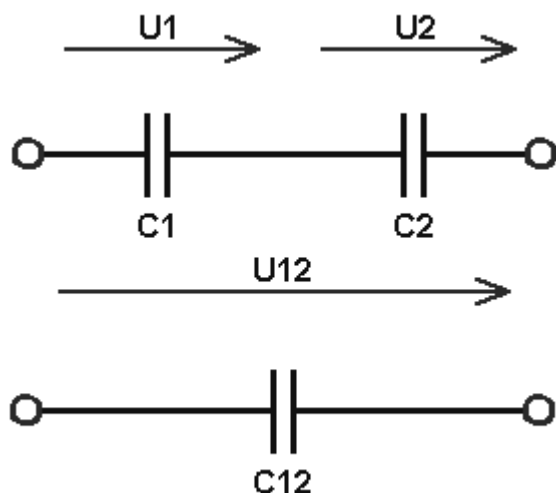
$$C_{12}U = U(C_1 + C_2)$$

$$C_{12} = C_1 + C_2$$

$$C_P = C_1 + C_2$$

$$C_P = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

## Sériové spojení kondenzátorů



Zdroj vytvoří **náboj Q** na vnějších deskách kondenzátorů, náboj na vnitřních deskách budou vytvořeny **indukcí** a tak oba kondenzátory budou nabity na **stejnou hodnotu náboje Q**. **Napětí** na obou kondenzátorech budou **různá**, chceme-li tyto kondenzátory nahradit jedním kondenzátorem, musí výsledné napětí být dáno **součtem dílčích napětí**.

$$U_{12} = U_1 + U_2$$

$$\frac{Q}{C_{12}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

$$\frac{Q}{C_{12}} = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

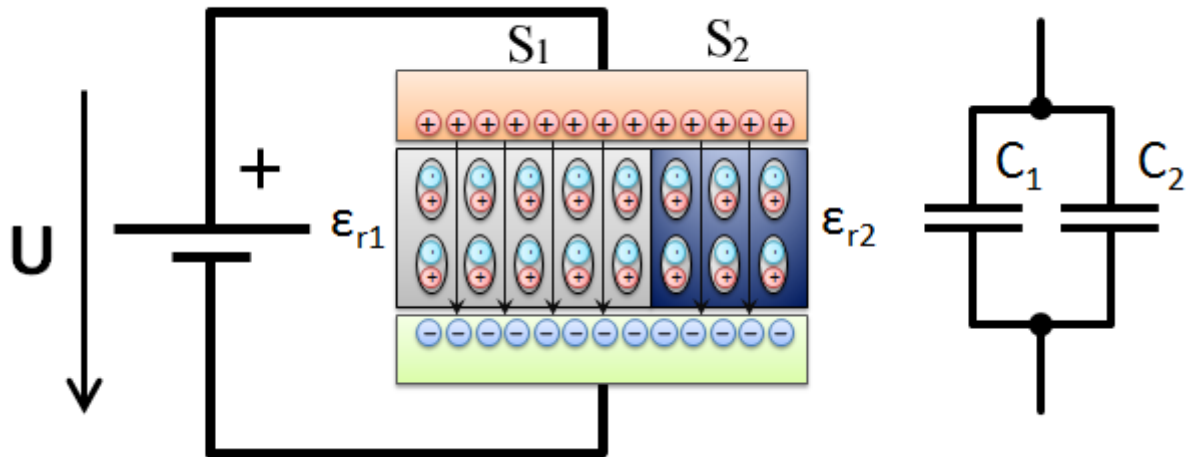
$$\frac{1}{C_{12}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$C_S = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

## Dielektrika vedle sebe a za sebou

### Dielektrika vedle sebe



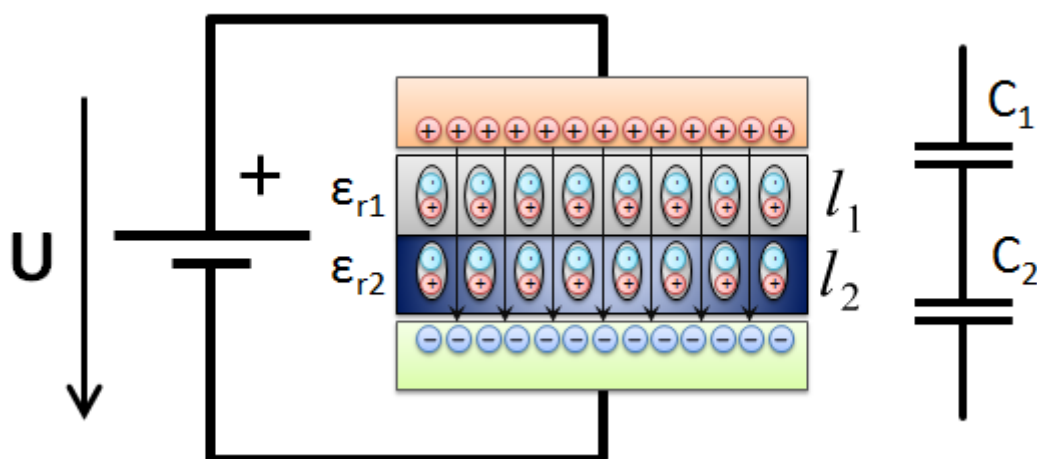
Pokud jsou mezi deskami kondenzátoru dvě **dielektrika vedle sebe**, budou se chovat jako dva **kondenzátory spojené paralelně**. Kapacita bude dána **součtem kapacit** těchto dvou kondenzátorů.

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S_1}{l}$$

$$C = C_1 + C_2$$

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{S_2}{l}$$

## Dielektrika za sebou



Pokud jsou mezi deskami kondenzátoru dvě **dielektrika za sebou**, budou se chovat jako dva **kondenzátory spojené sériově**.

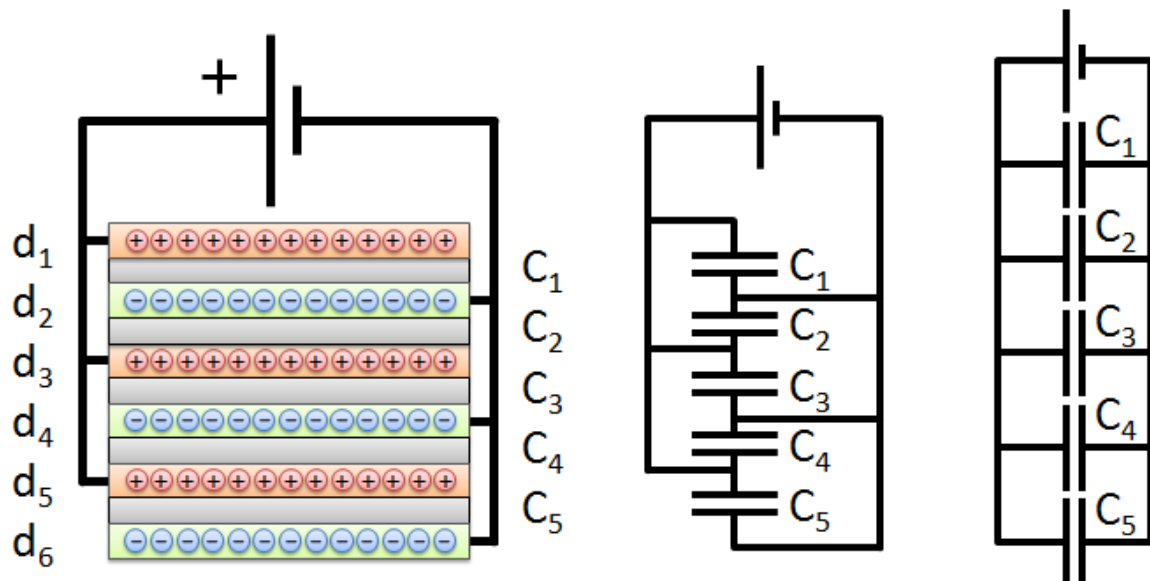
$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S}{l_1}$$

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{S}{l_2}$$

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$



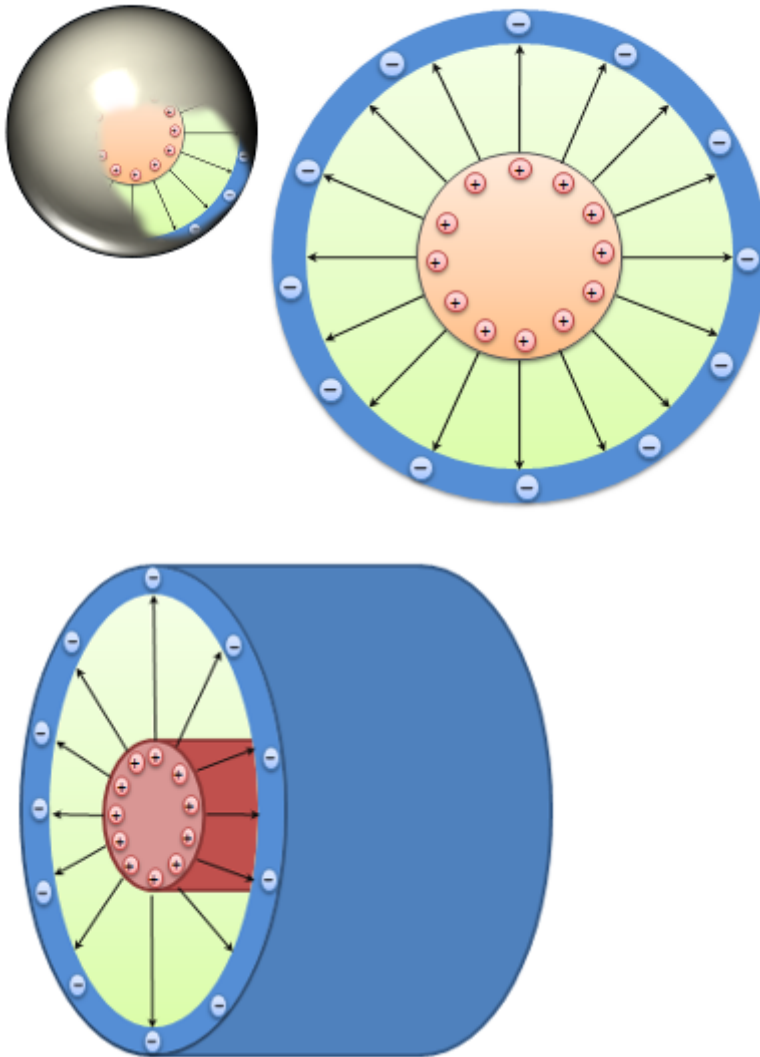
## Vrstvené kondenzátory



Pokud jsou jednotlivé desky prokládané dielektriky, vnitřní desky budou vytvářet kondenzátory na obou stranách. Takže pro  $n$  desek bude kapacita  $(n-1)$  krát větší, než pro dvě desky.

$$C = (n - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{l}$$

## Kulové a válcové kondenzátory



Desky nemusí mít tvar destiček, pokud mají tvar koulí nebo válců, vytváří se mezi nimi **nehomogenní elektrostatické pole**. Výpočet kapacity takovýchto kondenzátorů lze provést pomocí vyšší matematiky...

Kapacita dvou soustředných koulí o poloměrech  $r_1$  a  $r_2$ :

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{r_2 \cdot r_1}{r_2 - r_1}$$

Kapacita jedné koule o poloměru  $r_1$  vůči okolí (druhá elektroda je v nekonečnu):

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot r_1$$

Kapacita dvou soustředných válců o poloměrech  $r_1$  a  $r_2$  a délce  $l$ :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$(F; F \cdot m^{-1}, -, m, m)$$

## Energie elektrostatického pole

Aby se kondenzátor ze zdroje nabil, musí zdroj dodat práci na přenesení nábojů (elektronů) z jedné elektrody na druhou. Práce vynaložená na nabití kondenzátoru se do dielektrika uloží jako energie, kterou lze potom odebrat (vybitím kondenzátoru). Pro tuto energii lze odvodit následující vztahy:

$$W = \frac{1}{2} QU \quad (J; C, V)$$

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (J; F, V)$$

$$W = \frac{Q^2}{2C} \quad (J; C, F)$$