

## Zvuková izolace

### Zvuková izolace místnosti

- O zvukové izolaci místnosti spolurozhoduje i její celková pohltivost. Výsledný tlumicí účinek uzavřeného prostoru proti vnějšímu zvuku udává **stupeň zvukové izolace místnosti** daný vztahem

$$D = L_i - L_m = R - 10 \log \frac{S_d}{A_n}, \quad [D] = \text{dB}, \quad (\text{I.3.20})$$

kde  $L_i$  je hladina zvuku dopadajícího na místnost,  $L_m$  je hladina zvuku proniklého do místnosti,  $S_d$  je plocha dělicí stěny a  $A_n$  je celková pohltivost stěn místnosti.

- Stupeň zvukové izolace můžeme zvětšit bez změny dělicích prvků zvýšením celkové pohltivosti stěn místnosti.

### Část II.

## ELEKTŘINA A MAGNETISMUS

### Sekce 1.

## Základní poznatky

## Matematický aparát II

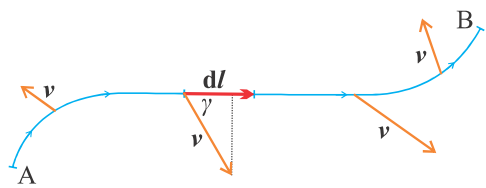
### Dráhový účinek vektoru

~ udává, zda vektorové pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  působí ve směru zvolené křivky

- Účinek vektoru bude tím větší, čím větší bude jeho průmět do křivky a čím větší bude úsek křivky, na kterém vektor působí. Tuto vlastnost má skalární součin, proto diferenciál dráhového účinku zavedeme výrazem

$$d\Gamma = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = v dl \cos \gamma, \quad (\text{II.1.1})$$

kde  $d\mathbf{l} = \boldsymbol{\tau}^\circ dl$  je **orientovaný element křivky**, přičemž  $\boldsymbol{\tau}^\circ$  je jednotkový vektor udávající směr křivky v daném místě a  $dl$  je délka elementu křivky.



Obrázek II.1.1: Ilustrace dráhového účinku vektoru. Křivka je orientována od bodu A k bodu B. Vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  se podél křivky mění, ale na velmi malém úseku  $d\mathbf{l}$  lze  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  považovat za konstantní.

## Matematický aparát

### Dráhový účinek vektoru

- Integrací podél celé křivky obdržíme celkový dráhový účinek vektoru, tj.

$$\Gamma = \int_c d\Gamma = \int_c \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}, \quad [\Gamma] = [v] \text{ m}. \quad (\text{II.1.2})$$

- Je-li  $\Gamma > 0$ , působí vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  spíše ve směru křivky  $c$ . Je-li  $\Gamma < 0$ , působí vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  spíše proti směru křivky  $c$ .
- Křivka může být uzavřená (obklopuje pak jistou plochu  $S$ ) a  $\Gamma$  se pak nazývá **cirkulace vektoru**. Značí se

$$\Gamma = \oint_{c(S)} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}. \quad (\text{II.1.3})$$

- Je-li  $\Gamma \neq 0$  pro nějakou uzavřenou křivku  $c$ , říkáme, že vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  má na křivce  $c$  **vír** (vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  je **pole vírové**). Opakem je **pole nevírové**.

## Matematický aparát

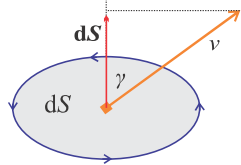
### Tok vektoru plochou

~ udává, zda vektorové pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  protéká zvolenou plochou v daném směru

- Tok vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  plochou bude tím větší, čím větší bude velikost vektoru  $\mathbf{v}$  na ploše a čím kolmější bude tento vektor k ploše (bude mít větší kolmý průmět). Opět tudíž zavedeme diferenciál toku vektoru plochou pomocí skalárního součinu

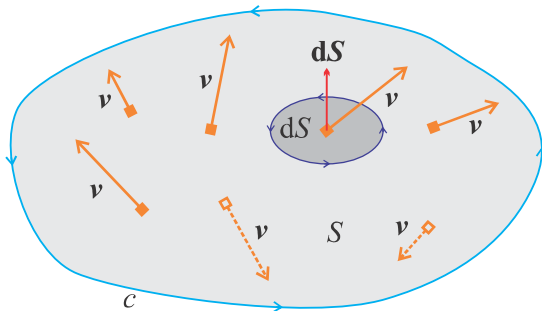
$$\mathrm{d}\Phi = \mathbf{v} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = v \, \mathrm{d}S \cos \gamma, \quad (\text{II.1.4})$$

kde  $\mathrm{d}\mathbf{S} = \nu^\circ \, \mathrm{d}S$  je **orientovaný element plochy**, přičemž  $\nu^\circ$  je jednotkový normálový vektor plochy (udává kladný směr toku) a  $\mathrm{d}S$  je velikost elementu plochy.



Obrázek II.1.2: Směr vektoru elementu plochy  $\mathrm{d}\mathbf{S}$  je určen pravidlem pravé ruky, tj. **ukazují-li prsty pravé ruky směr obíhání křivky obklopující element, pak vztyčený palec udává směr vektoru elementu plochy**.

## Matematický aparát



Obrázek II.1.3: Ilustrace k toku vektoru plochou. Plocha  $S$  je ohraničena orientovanou křivkou  $c$ , značíme  $c(S)$ . Směr i velikost vektorů vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  se na ploše mění, viz plné šipky popisující vektory směřující „nad“ plochu a čárkované šipky směřující „pod“ plochu. Plochu  $S$  rozdělíme na malé elementy plochy  $\mathrm{d}S$ , na nichž lze pokládat  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  za konstantní. Křivka, která obklopuje element  $\mathrm{d}S$ , **musí** mít stejnou orientaci jako  $c$  (viz stejný směr šipek na křivkách). Celkový tok vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  plochou  $S$  pak dostaneme, sečteme-li všechny příspěvky k toku od všech elementů  $\mathrm{d}S$  dělících  $S$ , tj. „vyintegrujeme“ příspěvky  $\mathrm{d}\Phi = \mathbf{v} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$  po celé ploše  $S$ .

## Matematický aparát

### Tok vektoru plochou

- Celkový tok vektorového pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  plochou  $S$  získáme integrací, tj.

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}, \quad [\Phi] = [v] \text{ m}^2. \quad (\text{II.1.5})$$

- Je-li  $\Phi > 0$ , protéká vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  spíše ve směru normály plochy  $S$ . Je-li  $\Phi < 0$ , protéká pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  spíše proti směru normály plochy  $S$ .
- Plocha může být uzavřená (obklopuje pak jistý objem  $V$  a  $\nu^\circ$  vždy směřuje ven z  $V$ ) a  $\Phi$  se pak nazývá **tok vektoru uzavřené plochou**. Značí se

$$\Phi = \oint_{S(V)} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.6})$$

- Je-li pak  $\Phi > 0$ , má vekt. pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  v objemu  $V$  **zřídlo** (zdroj). Je-li  $\Phi < 0$ , má  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  ve  $V$  **nor**. Je-li  $\Phi = 0$  pro všechna  $S$ , je pole  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  **nezřídlové**.

## Elektrický náboj

### Elektrický náboj $Q$

~ vlastnost základních látkových částic, která je podstatou elektrického a magnetického chování látkových objektů. Jednotka:  $[Q] = \text{C}(\text{coulomb}) = \text{A s}$ , kde  $A$  je ampér (viz dále).

- Atomy (v základním stavu) jsou elektricky neutrální, protože mají stejný počet el. nábojů kladných jako záporných. Kladný el. náboj nesou protony v atomovém jádře a záporný el. náboj mají elektrony v atomovém obalu.
- El. náboj je kvantován, tj. existuje nejmenší možné množství el. náboje, tzv. **elementární elektrický náboj**  $e_0$ , a ostatní náboje jsou jeho celočíselným násobkem, tj.  $Q = Ne_0$ , kde  $N \in \mathbb{Z}$ . Velikost elem. el. náboje je rovna velikosti el. náboje protonu a elektronu a jeho hodnota je

$$e_0 \doteq 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C}. \quad (\text{II.1.7})$$

## Elektrický náboj

### Zákon zachování el. náboje

- **Celkový elektrický náboj izolované soustavy je neměnný.** Matematicky:

$$\sum Q_i = \text{konst.} \quad (\text{II.1.8})$$

### Objemová hustota el. náboje $\rho$

- Pro makroskopická tělesa lze abstrahovat od kvantování el. náboje a popisovat spojitě jeho rozložení pomocí objemové hustoty dané vztahem

$$\rho = \frac{dQ}{dV}, \quad [\rho] = \text{C m}^{-3}, \quad (\text{II.1.9})$$

kde  $dQ$  je el. náboj, který se nachází v elementu prostoru  $dV$  okolo  $r$ .

## Elektrický náboj

### Volné a vázané náboje

- **Volný el. náboj** se může přemísťovat na makroskopické vzdálenosti, např. elektrony v kovech či ionty v plynu.
- **Vázaný el. náboj** se nemůže přemísťovat na makroskopické vzdálenosti.

### Elektrický proud $I$

~ vzniká usměrněným pohybem látkových objektů nesoucích el. náboj

- Základní vztah definující el. proud

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad [I] = \text{A (ampér)}, \quad (\text{II.1.10})$$

kde  $dQ$  je kladný el. náboj, který projde danou plochou za čas  $dt$ .

- **El. proud je roven velikosti kladného el. náboje prošlého danou plochou za jednotku času.**

## Elektrický náboj

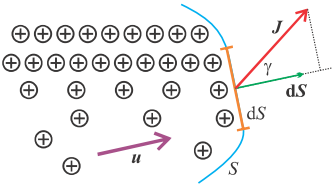
### Plošná hustota el. proudu $\mathbf{J}$

- Z mikroskopického hlediska se el. proud popisuje **plošnou hustotou el. proudu  $\mathbf{J}$**  definovanou relací

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = J dS \cos \gamma, \quad [J] = \text{A m}^{-2}. \quad (\text{II.1.11})$$

- Pomocí plošné hustoty el. proudu je možné chápat el. proud jako tok vektoru  $\mathbf{J}$  plochou  $S$ , tj.

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.12})$$



Obrázek II.1.4: Ilustrace k plošné hustotě el. proudu. El. náboje se pohybují střední rychlostí  $\mathbf{u}$  a procházejí plochou  $S$ , tím i elementem plochy  $dS$ . Pro velikost hustoty el. proudu  $\mathbf{J}$  pak platí:  $J = dI / (dS \cos \gamma)$ .

## Elektrické pole

### Elektrický indukční tok $\Psi$

- **Elektrický náboj je zdrojem (zřídlem) elektrického pole**, tj. každý el. náboj vytváří ve svém okolí el. pole projevující se silovými účinky na jiné el. náboje.
- Schopnost náboje vytvářet el. pole kvantifikuje veličina **el. indukční tok  $\Psi$**  definovaná vztahem

$$\Psi = Q_c = \int_V \rho dV, \quad [\Psi] = \text{C}, \quad (\text{II.1.13})$$

kde  $Q_c$  je celkový el. náboj v uvažovaném prostoru o objemu  $V$  a  $\rho$  je objemová hustota el. náboje v tomto objemu.

- Rozložení el. nábojů nemusí být homogenní, tj. je nutné zavést veličinu charakterizující el. pole lokálně.

## Elektrické pole

### Indukce elektrického pole $D$

- K lokálnímu popisu el. pole slouží veličina **indukce el. pole** (také el. indukce)  $D$ , zavedená vztahem:

$$d\Psi = \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = D dS \cos \gamma, \quad [D] = \text{C m}^{-2}. \quad (\text{II.1.14})$$

- **El. indukce udává plošnou hustotu el. indukčního toku a charakterizuje el. pole z hlediska jeho zdrojů (nábojů).**
- Ze znalosti el. indukce můžeme určit el. indukční tok z objemu  $V$  uzavřeného plochou  $S$  jako

$$\Psi = \oint_{S(V)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.15})$$

- Pro el. indukci platí princip superpozice, tj.  $\mathbf{D} = \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2$ .

## Elektrické pole

### Gaussova věta elektrostatiky

- Spojením (II.1.13) a (II.1.15) dostaneme **Gaussovu větu elektrostatiky**

$$\oint_{S(V)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV. \quad (\text{II.1.16})$$

- Slovy: **El. indukční tok uzavřenou plochou je roven celkovému el. náboji rozloženému v objemu touto plochou ohraničeném.** Význam: **Zdrojem el. pole jsou el. náboje.**
- Tj. el. pole je pole zřídlové, přičemž zřídly (popř. nory) jsou el. náboje.
- Gaussova věta elektrostatiky se stala jednou z Maxwellových rovnic, které jsou základními rovnicemi elektromagnetismu.

## Elektrické pole

### Intenzita elektrického pole $E$

- Základní účinky el. pole jsou silové účinky mezi jednotlivými el. náboji.
- Bylo zjištěno, že v daném místě působí na el. náboj síla  $F_e$ , která je úměrná velikosti tohoto náboje  $Q$ , tj.

$$F_e = E Q. \quad (\text{II.1.17})$$

- Konstanta úměrnosti  $E$  je **intenzita el. pole** (též el. intenzita). Pomocí testovacího náboje  $Q$ , můžeme v prostoru rekonstruovat pole vektoru  $E$  dle vztahu

$$E = \frac{F_e}{Q}, \quad [E] = \text{V m}^{-1} = \text{m kg A}^{-1} \text{s}^{-3}, \quad (\text{II.1.18})$$

kde V je volt.

- Pro el. intenzitu platí též princip superpozice, tj.  $E = E_1 + E_2$ .

## Elektrické pole

### Intenzita elektrického pole $E$

- Dle II. NPZ uděluje el. pole  $E$  nosiči el. náboje  $Q$ , který má hmotnost  $m$ , zrychlení  $a = QE/m$ .

### Vztah mezi $D$ a $E$

- Silové účinky daného el. pole závisejí na prostředí, v němž se el. pole rozkládá, proto pokládáme

$$D = \varepsilon E, \quad [\varepsilon] = \text{F m}^{-1}, \quad (\text{II.1.19})$$

kde  $\varepsilon$  je tzv. **permittivita prostředí** a  $\text{F} = \text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4$  je farad, přičemž

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (\text{II.1.20})$$

kde  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$  je **permittivita vakua** a  $\varepsilon_r$  je **relativní permittivita prostředí** ( $[\varepsilon_r] = 1$ ).

## Elektrické pole

### Vodiče, izolanty a polovodiče

- V látkovém prostředí el. náboje narážejí na atomy látky, což vede ke vzniku jejich střední unášivé rychlosti, a tím i k el. proudu o plošné hustotě

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad [\gamma] = \text{S m}^{-1}, \quad (\text{II.1.21})$$

kde  $\gamma$  je **měrná el. vodivost** a  $\text{S} = \text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$  je siemens.

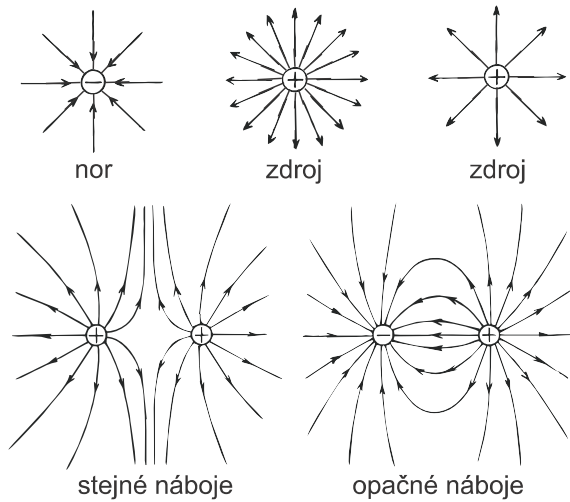
- Dle hodnoty  $\gamma$  rozdělujeme látky na:
  - 1 **vodiče** –  $\gamma$  velké; mají velký počet volných nosičů náboje
  - 2 **nevodiče** –  $\gamma$  malé; mají malý počet volných nosičů náboje; nazývají se též izolanty či dielektrika
  - 3 **polovodiče** –  $\gamma$  střední; mají vlastnosti mezi nevodiči a vodiči
- **D.Cv.:** Nastudovat mechanismus vedení el. proudu v kovech, plynech, kapalinách a polovodičích.

## Elektrické pole

### Grafické znázornění el. pole

- **Bodový náboj (BN)** – el. nabitě těleso o rozměrech zanedbatelných vůči rozměrům popisované oblasti prostoru
- K znázornění el. pole využíváme systému dvou typů křivek:
  - 1 **El. indukční čáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru el. indukce  $\mathbf{D}$
  - 2 **El. siločáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru el. intenzity  $\mathbf{E}$
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se obvykle volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru ( $\mathbf{D}$  či  $\mathbf{E}$ ).
- V anizotropním prostředí je  $\mathbf{D} \nparallel \mathbf{E}$ , a tak se obecně mohou indukční čáry lišit od siločár.

## Elektrické pole



Obrázek II.1.5: Znáznornění el. indukčních čar či siločár pro samostatné el. náboje a soustavy dvou nábojů se stejnými velikostmi.

## Elektrické pole

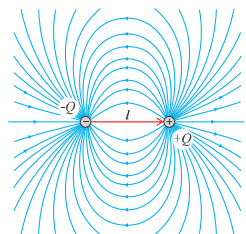
### Elektrický dipól

~ soustava kladného a záporného BN o stejných velikostech nábojů

- Pro popis el. dipólu zavádíme **dipólový moment  $p$**  rovnicí

$$p = Ql, \quad [p] = \text{C m}, \quad (\text{II.1.22})$$

kde  $Q$  je velikost BN a  $l$  je vzájemný polohový vektor od záporného náboje k náboji kladnému.



Obrázek II.1.6: Vyobrazení el. dipólu s el. indukčními čárami a vzájemným polohovým vektorem  $l$  mezi záporným a kladným BN. Adaptováno z Wikipedie.

## Magnetické pole

### Magnetické pole

- Bylo objeveno, že existuje další pole (rozkládající se okolo určitých těles – permanentních magnetů), **pole magnetické**, které působí silou na **pohybující se el. náboje**, což nebylo možné vysvětlit v rámci pole elektrického.

### Magnetický náboj

- Budeme chtít postupovat stejně jako v případě pole elektrického.
- Zavedeme proto mag. indukční tok rovnicí  $\Psi = Q_m$ , kde  $Q_m$  je magnetický náboj. Podobně pak zavedeme mag. indukci relací  $d\Psi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$  a budeme požadovat, aby platilo

$$\oint_{S(V)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = Q_m.$$

## Magnetické pole

### Neexistence magnetických nábojů

- **Problém!** Přes veškerou snahu se nám zatím nepodařilo experimentálně prokázat, že by se v přírodě magnetické náboje (magnetické monopóly) vůbec vyskytovaly!
- Tento poznatek zahrneme do teorie rovnicí

$$\oint_{S(V)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{II.1.23})$$

- Slovy: **Mag. indukční tok uzavřenou plochou je vždy nulový.** Význam: **Mag. náboje neexistují.** Tudíž **mag. pole je pole nezřídlové.**
- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.

## Magnetické pole

### Magnetický indukční tok $\Phi$

- Mag. indukční tok  $\Phi$  **neuzavřenou** plochou  $S$  však může být nenulový, a tak je jeho definice důležitá:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad [\Phi] = \text{Wb (weber)} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}. \quad (\text{II.1.24})$$

### Vznik magnetického pole

- Bylo zjištěno, že v okolí vodičů, jimiž protéká el. proud, se rozkládá fyzikální pole, které též působí silově na el. náboje. I toto pole působí pouze na el. náboje v pohybu. Jedná se proto o pole magnetické.
- Tudíž: **Příčinou vzniku magnetického pole jsou elektrické proudy.**

## Magnetické pole

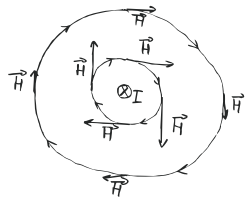
### Intenzita magnetického pole $\mathbf{H}$

- K charakterizaci příčiny vzniku mag. pole zavádíme vektor **intenzita magnetického pole  $\mathbf{H}$**  (též mag. intenzita) vztahem

$$\oint_{c(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_S = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}, \quad [H] = \text{A m}^{-1}, \quad (\text{II.1.25})$$

kde  $I_S$  je el. proud procházející vodičem, který protíná plochu  $S$  (viz obrázek).

- Pro vektor  $\mathbf{H}$  platí princip superpozice, tj.  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$ .



**Obrázek II.1.7:** Magnetické pole vzniklé okolo proudovodiče, kterým prochází el. proud  $I$  směrem do nákresny (označeno šípovým pravidlem, tj. symbolem  $\otimes$ ). Zobrazeny jsou dvě křivky a směry cirkulace vektoru  $\mathbf{H}$  na nich.

## Magnetické pole

### Silové účinky magnetického pole

- Experimentálně bylo zjištěno, že síla působící na el. náboj je úměrná velikosti tohoto náboje  $Q$  a velikosti jeho rychlosti  $v$ , přičemž její směr je dán vektorovou relací

$$\mathbf{F}_m = Q \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad [\mathbf{B}] = \text{T (tesla)} = \text{kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}, \quad (\text{II.1.26})$$

kde  $\mathbf{B}$  je mag. indukce.

- Mag. síla má vždy směr kolmý ke směru pohybu el. náboje, tj. má směr normály k jeho dráze, a tak může měnit pouze směr jeho pohybu (nemůže el. náboj urychlovat ani zpomalovat).
- Tudíž: **Magnetické pole nekoná na elektrickém náboji práci.** (Nemění jeho kinetickou energii.)
- Pro vektor  $\mathbf{B}$  platí též princip superpozice, tj.  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$ .

## Magnetické pole

### Vztah mezi $\mathbf{B}$ a $\mathbf{H}$

- Jako v případě el. pole i silové účinky pole magnetického závisejí na prostředí. Pokládáme proto

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad [\mu] = \text{H m}^{-1}, \quad (\text{II.1.27})$$

kde  $\mu$  je tzv. **permeabilita prostředí** a  $\text{H} = \text{m}^2 \text{ kg C}^{-2}$  je henry, přičemž

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (\text{II.1.28})$$

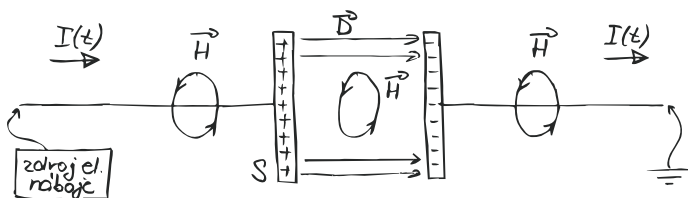
kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  je **permeabilita vakua** a  $\mu_r$  je **relativní permeabilita prostředí** ( $[\mu_r] = 1$ ).

## Magnetické pole

### Grafické znázornění magnetického pole

- K znázornění mag. pole využíváme také systému dvou typů křivek:
  - 1 **Mag. siločáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. intenzity  $\mathbf{H}$
  - 2 **Mag. indukční čáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. indukce  $\mathbf{B}$
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se opět volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru ( $\mathbf{H}$  či  $\mathbf{B}$ ).
- V anizotropním prostředí je  $\mathbf{H} \nparallel \mathbf{B}$ , a tak se obecně mohou indukční čáry lišit od siločár.
- Orientaci mag. siločáry (mag. indukční čáry) určíme pravidlem pravé ruky: **Uchopíme-li proudovodič do pravé ruky tak, aby palec ukazoval směr el. proudu vodičem procházejícího, pak zbylé prsty ukazují směr mag. siločár (mag. indukčních čar).** (viz obr. II.1.7)

## Magnetické pole



Obrázek II.1.8: Připojíme-li zdroj kladného el. náboje na levou část obvodu a z jeho pravou část, projde obvodem (i přes přerušení mezi deskami, kde je vakuum) časově proměnný el. proud  $I(t)$ . Tento proud vybudí mag. pole jak okolo vodičů, tak i mezi deskami. Musí tak existovat mechanismus, který je schopen „vést el. proud“ i ve vakuu. El. proud  $I(t)$  nabíjí levou desku kladným nábojem, který vzápětí způsobí na pravé desce indukci záporného náboje o stejné velikosti. Velikost náboje na deskách je též časově závislá, tj.  $Q = Q(t)$ . S nábojem na desce je však spojen časově proměnný el. indukční tok  $\Psi(t)$ . Právě časová změna el. indukčního toku mezi deskami vede ke vzniku mag. pole ve vakuu.

## Magnetické pole

### Maxwellův proud

- Experimentálně bylo zjištěno, že časová změna el. indukčního toku  $d\Psi/dt$  má ve vakuu stejné magnetické účinky jako el. proud v proudovodiči, což je třeba doplnit do rovnice pro vznik mag. pole.
- Použijeme-li (II.1.13), můžeme zavést **Maxwellův proud** vztahem

$$I_M = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.29})$$

- Rovnici pro vznik mag. pole (II.1.25) proto rozšíříme o tento člen na tvar

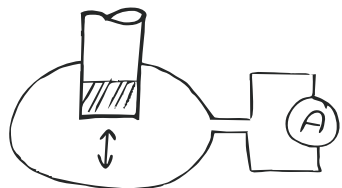
$$\oint_{c(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.30})$$

- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.

## Magnetické pole

### Elektromagnetická indukce

- Experimenty ukázaly, že proměnné mag. pole vytváří v uzavřené vodivé smyčce el. proud. Tento jev byl nazván **elektromagnetická indukce**.
- Proměnné mag. pole způsobuje časovou změnu mag. indukčního toku plochou smyčky, tj.  $\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ .
- Aby smyčkou tekla el. proud, musí v ní vzniknout el. pole, viz  $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$ . Směr  $\mathbf{E}$  je podél smyčky stejný, tudíž cirkulace  $\mathbf{E}$  bude nenulová, tj.  $\oint_{c(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \neq 0$ .



Obrázek II.1.9: Pohyb permanentního magnetu skrz vodivou smyčku způsobuje časovou změnu mag. indukčního toku  $\Phi(t)$  plochou smyčky, což vede k indukci el. proudu  $I(t)$  tekoucího smyčkou.

# Magnetické pole

## Elektromagnetická indukce

- Směr el. proudu ve smyčce popisuje Lenzovo pravidlo: ***El. proud indukovaný ve smyčce má takový smysl, že tímto proudem buzené mag. pole brání změně mag. indukčního toku, který je příčinou indukovaného proudu.***
- Spojením předchozích poznatků získáme matematické vyjádření elektromagnetické indukce ve tvaru

$$\oint_{c(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.31})$$

- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.
- Rovnice platí i v případě, že mag. pole je neměnné a mění se pouze plocha smyčky  $S$ .

# Maxwellovy rovnice

## Maxwellovy rovnice

- Sem patří rovnice na papíru.

# Maxwellovy rovnice

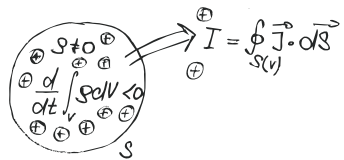
## Rovnice kontinuity elektrického proudu

~ matematické vyjádření zákona zachování elektrického náboje.

- Pro objem  $V$  uzavřený plochou  $S$  rovnice zní

$$\oint_{S(V)} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV. \quad (\text{II.1.32})$$

- Slovy: ***El. proud vytékající uzavřenou plochou je roven časovému úbytku el. náboje v objemu uzavřeném touto plochou.***



**Obrázek II.1.10:** Jelikož platí zákon zachování el. náboje, musí el. proud tekoucí z uzavřeného objemu nutně znamenat časový úbytek hustoty el. náboje v tomto objemu.