

# EL. PROUD V POLOVODIČA'CH

## Pojem polovodič

1. polovina 20. stoloč' - priedporčt, výroba

soniasnost: VŠUDE KOLEŇ MA'S (i věc', čičla  
teploť, fotoaparaty...)

vymerení;

01, dle měřného odporu

- kovy ...  $\rho \in (10^{-8}; 10^{-6}) \Omega \cdot m$
- Polovodič ...  $\rho \in (10^{-6}; 10^x) \Omega \cdot m$
- izolanty ...  $\rho_{diamant} = 3 \cdot 10^{16} \Omega \cdot m$   
(nejlepší průvodka izolant)

☐ 24 vteřiny!!!

2, dle závislosti odporu na teplotě

• kovy ...  $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$   
(viz  $R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$ )

• polovodiče

-  $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$

-  $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$  ... skvělejší materiál  
než u kovu

typické prvky pro výrobu: Ge, Si



# Vodivost polovodičů

materiál vede el. proud  $\Leftrightarrow$  obsahuje  
VOLNÉ NABITÉ ČÁSTICE

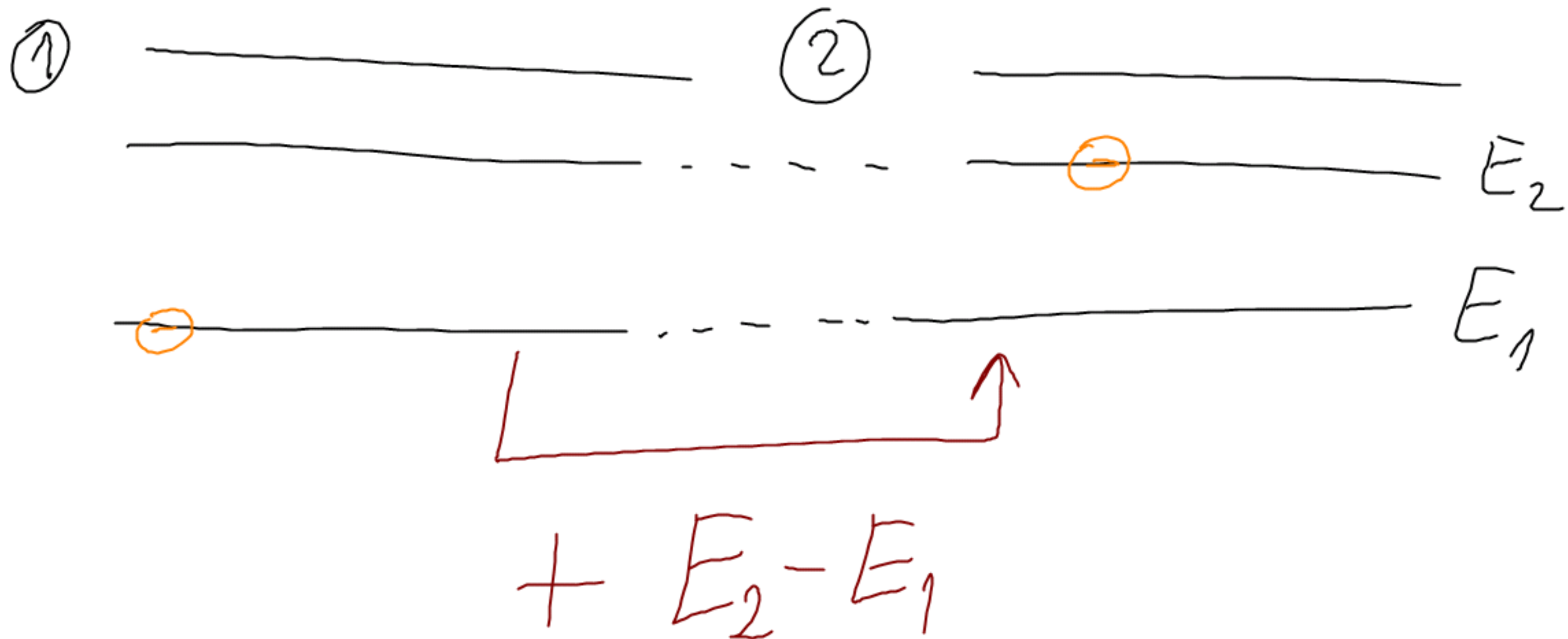
existují 2 mechanismy:

- VLASTNÍ VODIVOST - polovodič EXCITACE,  
tj. je nutné uvolnit  $e^-$  a vytvořit
- PŘÍMĚSOVÁ VODIVOST - do struktury Ge, Si  
přidáme nějaký jiný vhodný prvek

a) Vlastnu 'vodu'rost

k volnè'm'  $e^-$  je m'vne! DODAT

ENERGII a tu m'm s' dostat MAJEDNOU



(analogie: skompaktn' po z'ebn'ku)

3 mechanismy:

- tepelná excitace - ohřev  $\Rightarrow$  dodání energie  $\Rightarrow$  volní  $e^-$   $\Rightarrow$  polovodič

- světelná excitace - dopad světla  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  přidání energie  $\Rightarrow$  volní  $e^-$

↳ fotoelektrický jev; světlo: "správná" fre



světlo:  $\lambda = 500 \text{ nm}$

$E = ?$  (1 foton)

Planck:  $E = hf = h \frac{c}{\lambda}$

$$E = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7}} \text{ J}$$

$$E = 40 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$E = 4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

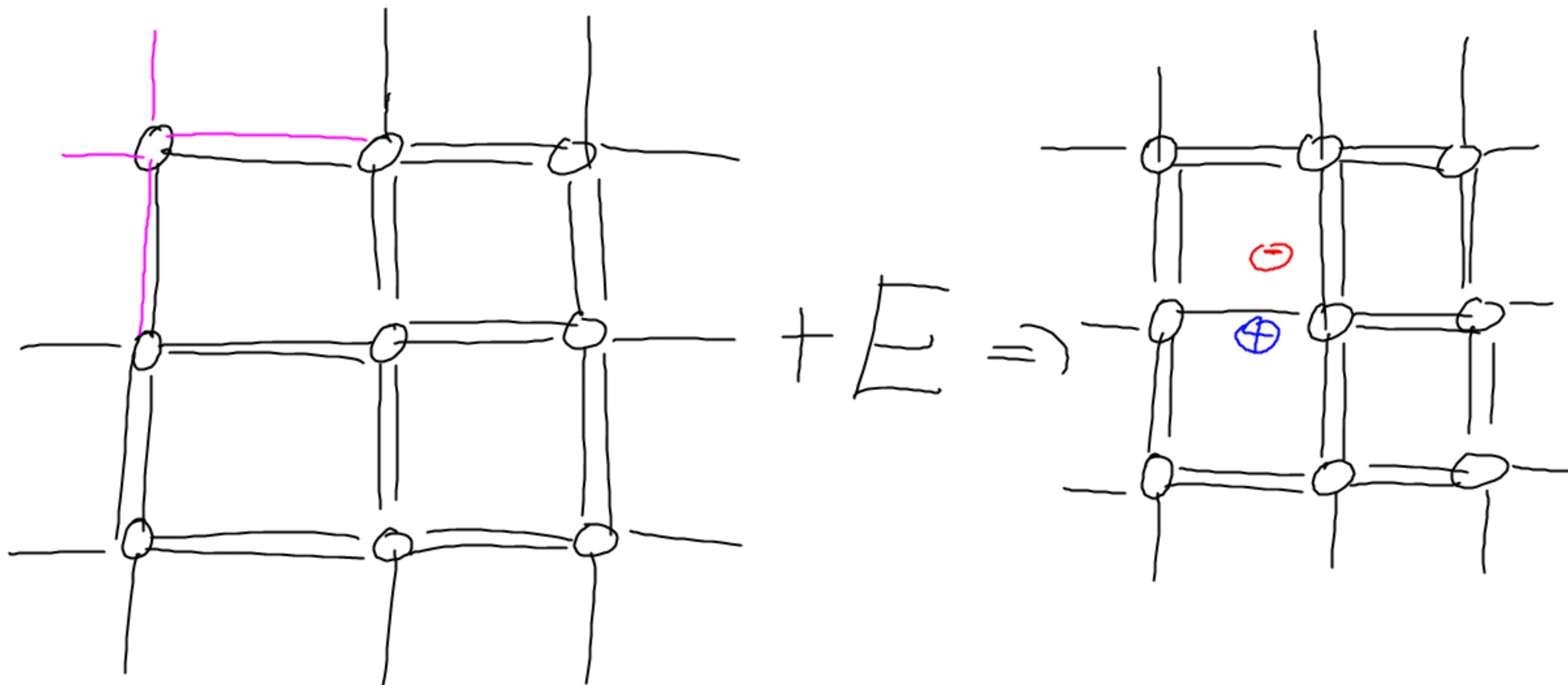
$$\Rightarrow E = 2,5 \text{ eV}$$

$$1 \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$$

2,5 eV je i' kv. STIRKA ZAKAZANO  
PA'SU v atomu Si

- excitace el. polem – v praxi nepoužitelné,  
nebot' el. intenzita pole  $\gamma$  musela  
dosáhnout pro danou energii takových  
hodnot, že  $\gamma$  ionizuje (material) předtím  
aniž by





o Si

Si je ve 4. skupině PSP  $\Rightarrow$  ma' 4 valenční elektrony

⊖ ... elektron; VOLNÝ  $\Rightarrow$  může se pohybovat materiálem

⊕ ... díra; KVÁZION'STICE; i ona se může pohybovat a to tak,

že interaguje s jiným elektronem  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  díra se objeví jinde

GENERACE - vznik páru  $e^-$ -díra za  
DODÁNÍ ENERGIE

REKOMBINACE - páru  $e^-$ -díra za  
UVOLNĚNÍ ENERGIE

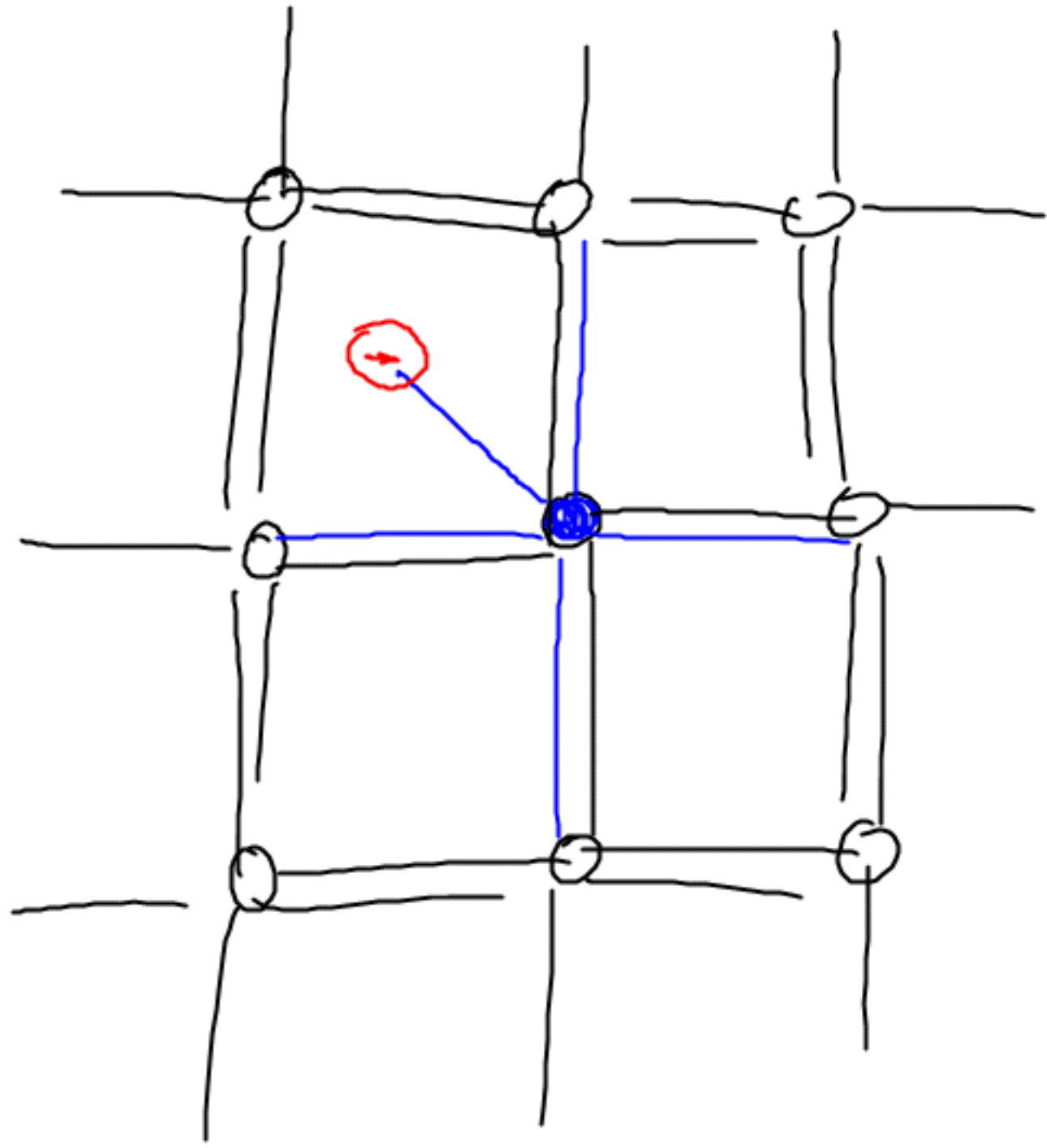
6) Prilmešova' vodi'rost

prilmeš — mīm'sde'ma' Qa'me'me

15 praxi se ponzi'va' SUBSTITUCI' POLONIA  
(tj. ma'krada atomum Si g'ing'm problem)



① polovodič typu N - do Si přidáme  
purek 5. skupiny (P, As, ...)

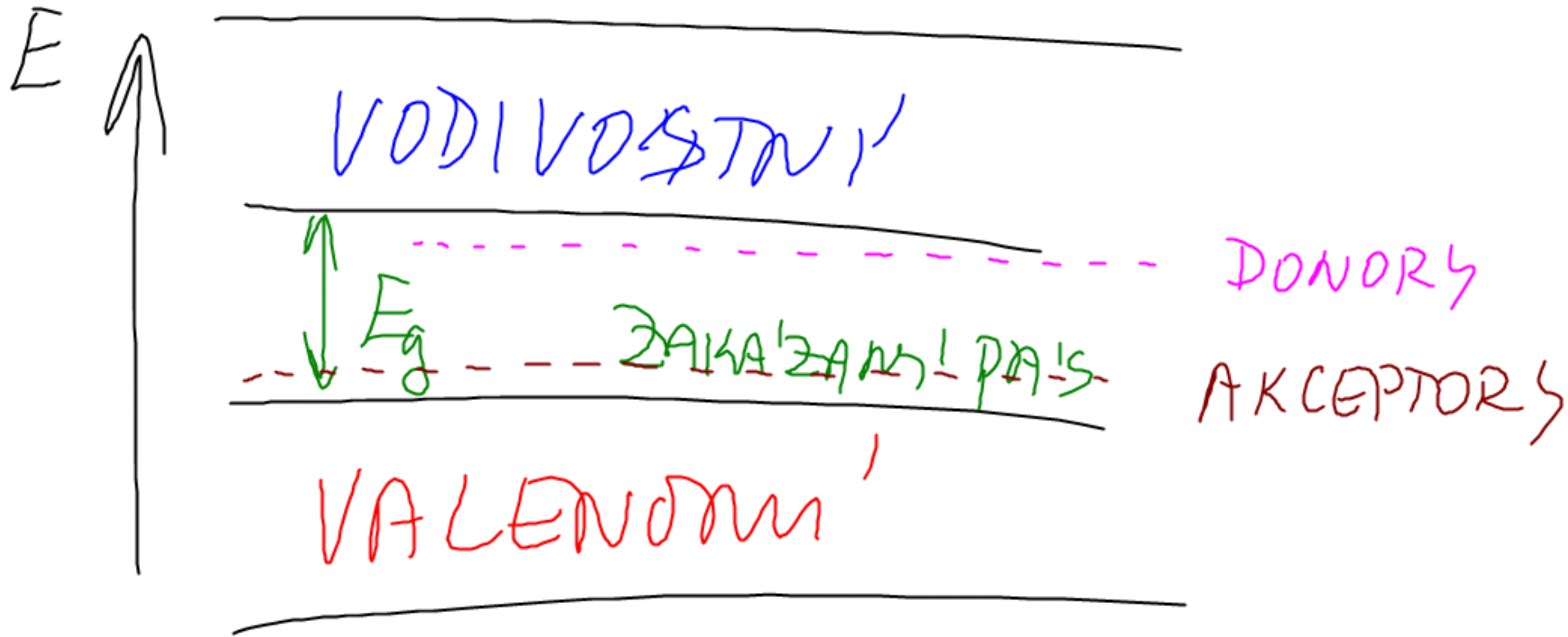


⊖ k jádru • vázan  
SLABĚ  $\Rightarrow$  snadno  
se volní

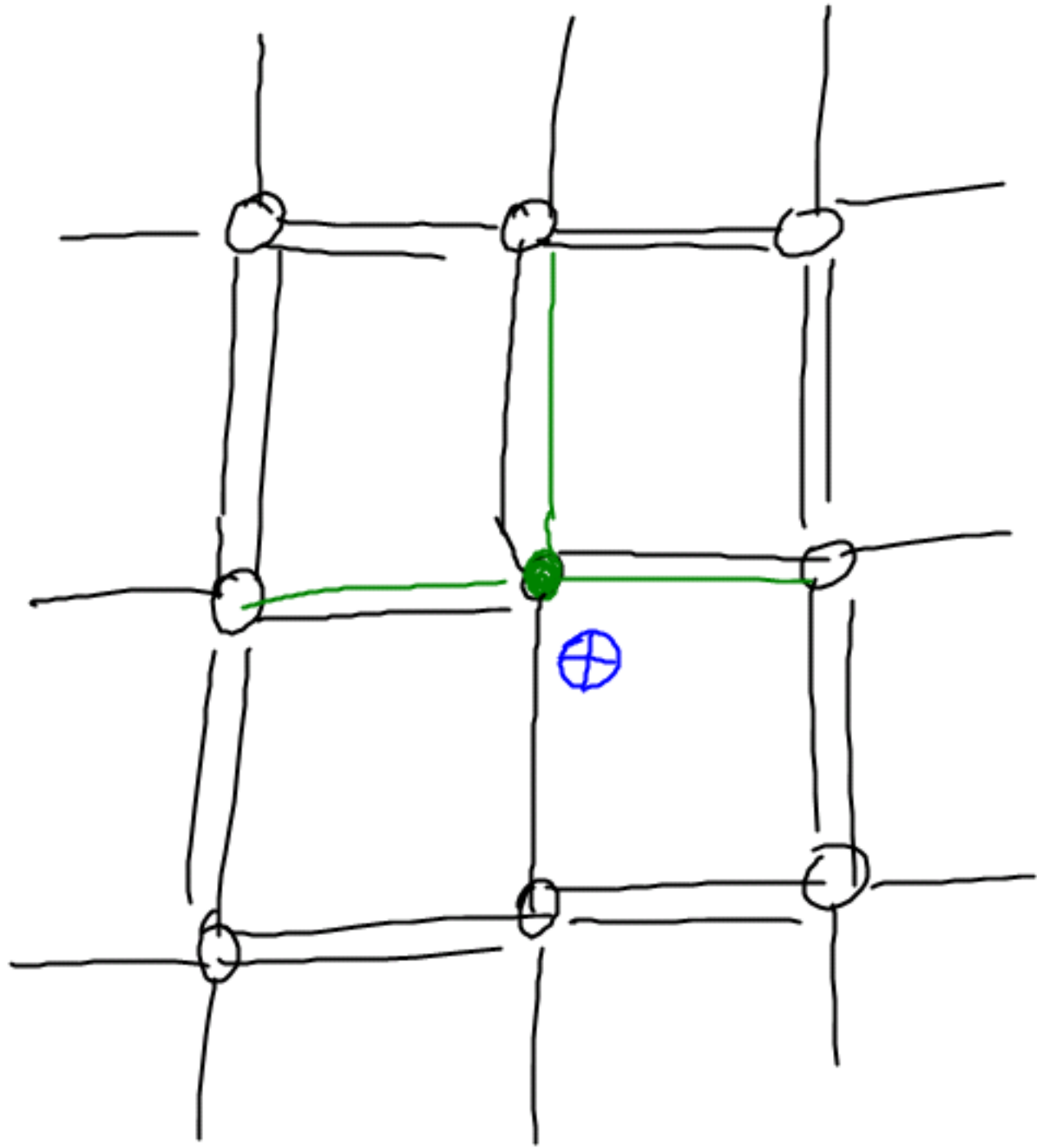
vyšší vodivost „nad  
vlastní vodivost“

• DÁRCE (DONOR)  
přidá ELEKTRONOVÁ VODIVOST

Si



② polovodič typu P - do struktury Si  
přidáme navíc ze 3. skupiny (B, Al, Ga, ...)



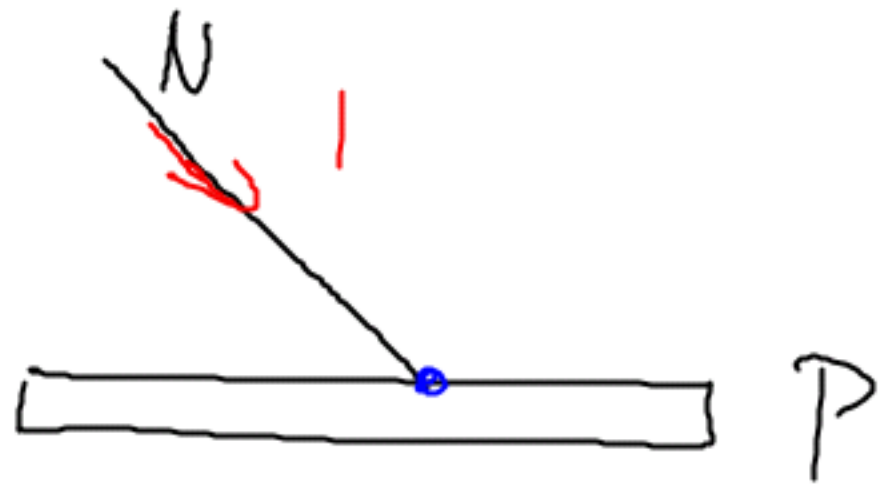
• PRÍSENCIE (AKCEPTOR)  
přidá se dělá volnost

⊕ díra; může  
interagovat s  $e^- \Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  objeví se p-částice  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  pohyb díry



# Přechod PN

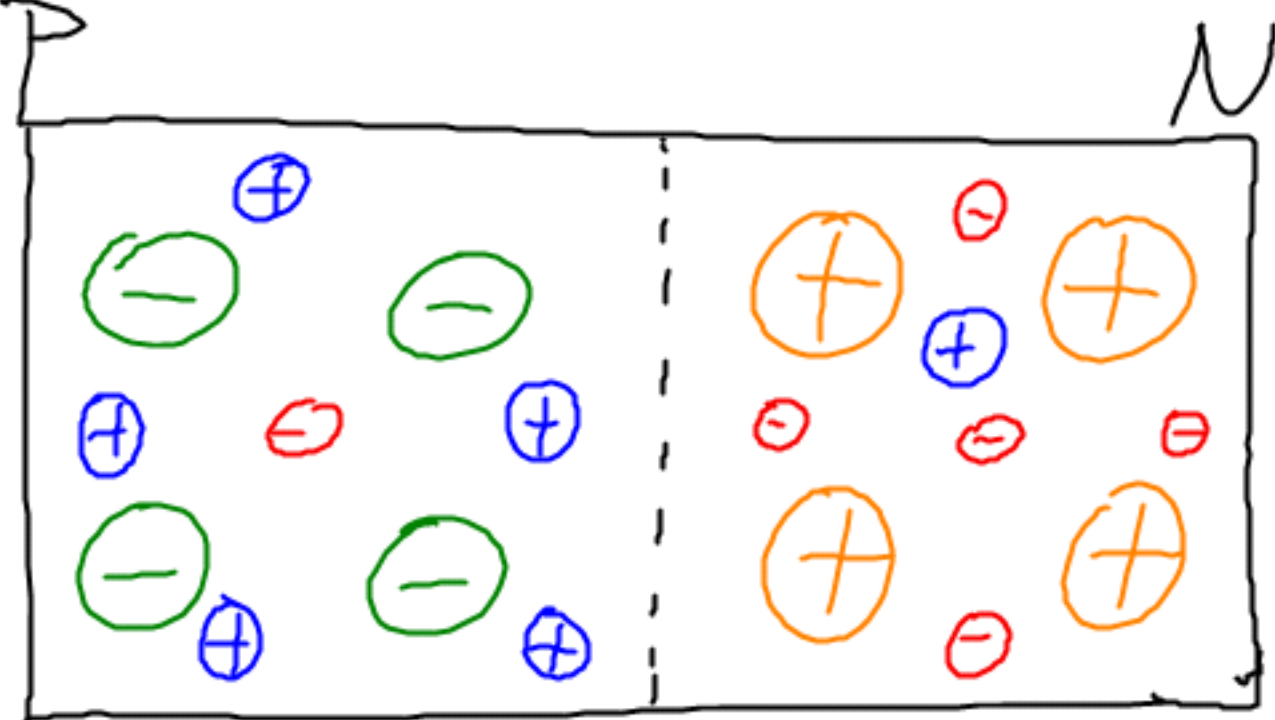
Spojení polovodiče typu N a typu P  
na MIKROSKOPICKÉ ÚROVNI



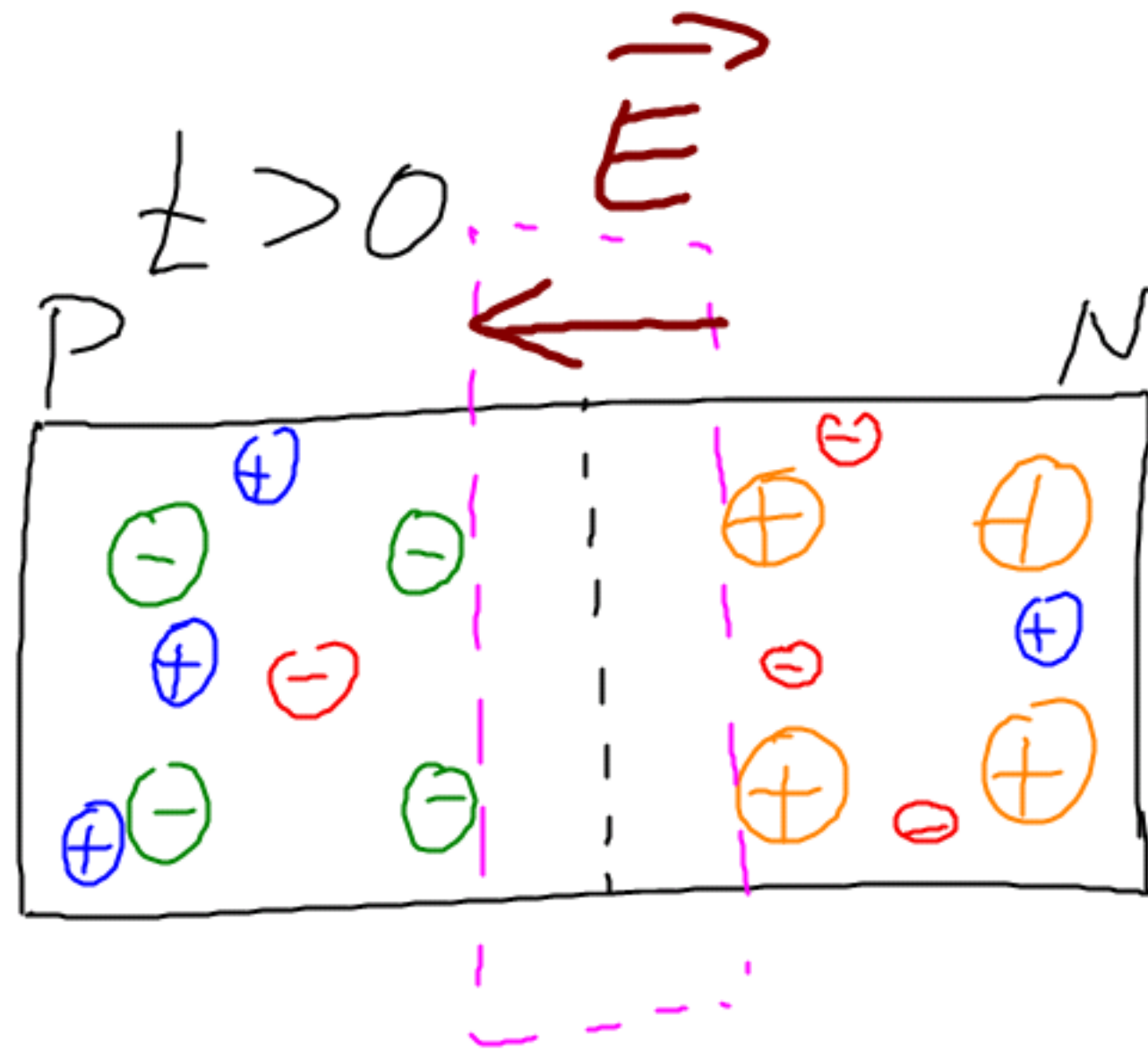
- sráž dle přechodu !

a) Vznik a podstata

$t < 0$



$t > 0$



⊕ atky po odtržení  $e^-$  a prím 5. skupiny PSP  
 ⊖: iont, který namíel a atomu AKCEPTORU přilomen  $e^-$   
 ⊕ díra



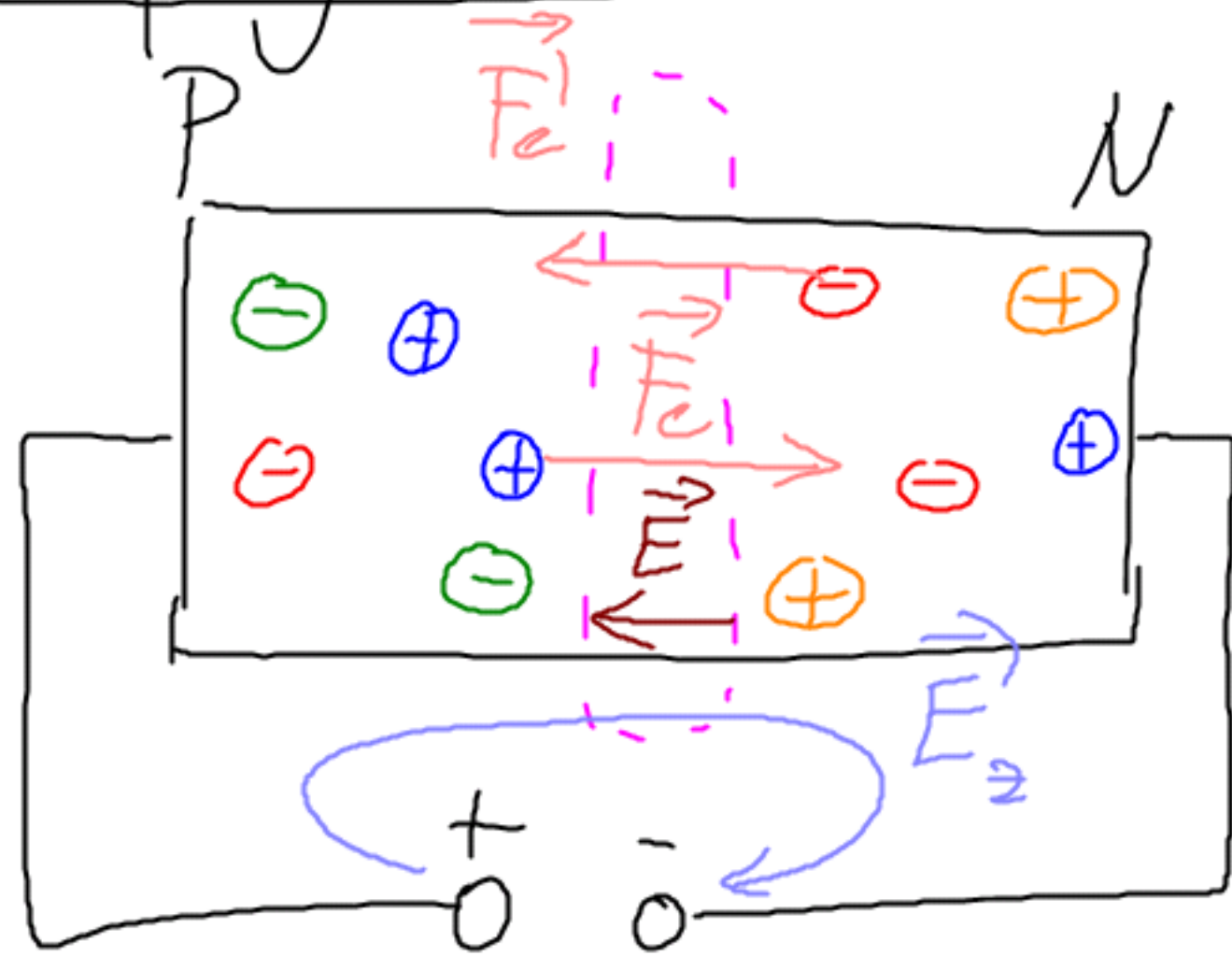
oblast, v níž nejsou ZÁDNĚ VODIVOSTNÍ  
ČÁSTICE (ty, které tam byly  
ZREKOMBINOVALY); PŘECHOD  
(HRAĐLO) <sup>PN</sup>  
( $\sim 1 \mu\text{m}$ )

$\perp \Rightarrow R \rightarrow \infty$

$\vec{E}$  - el. intenzita pole, které "vytvorí", "slytly"  
 $\oplus$  a  $\ominus$



b) Zapojení přechodu PN do el. obvodu



PROPUSTANÍ  
(PRŮMĚN) SMĚR

přechodem PN můžeme provést vodičům částečně

$\ominus$  a  $\oplus$ , ALE

$\vec{E}_z$  - el. intenzita pole závisí na ORIENTACI V MĚ  
ZDROJE OPACNĚ než  $\vec{E} \Rightarrow$  el. proud teče  $\Leftrightarrow E_z > E$



# Dioda

sonia'stka 1 pichod PN

1, Usmèrnyy'ca' dioda

pozit': usmèrnem' stit'dannelo napit'

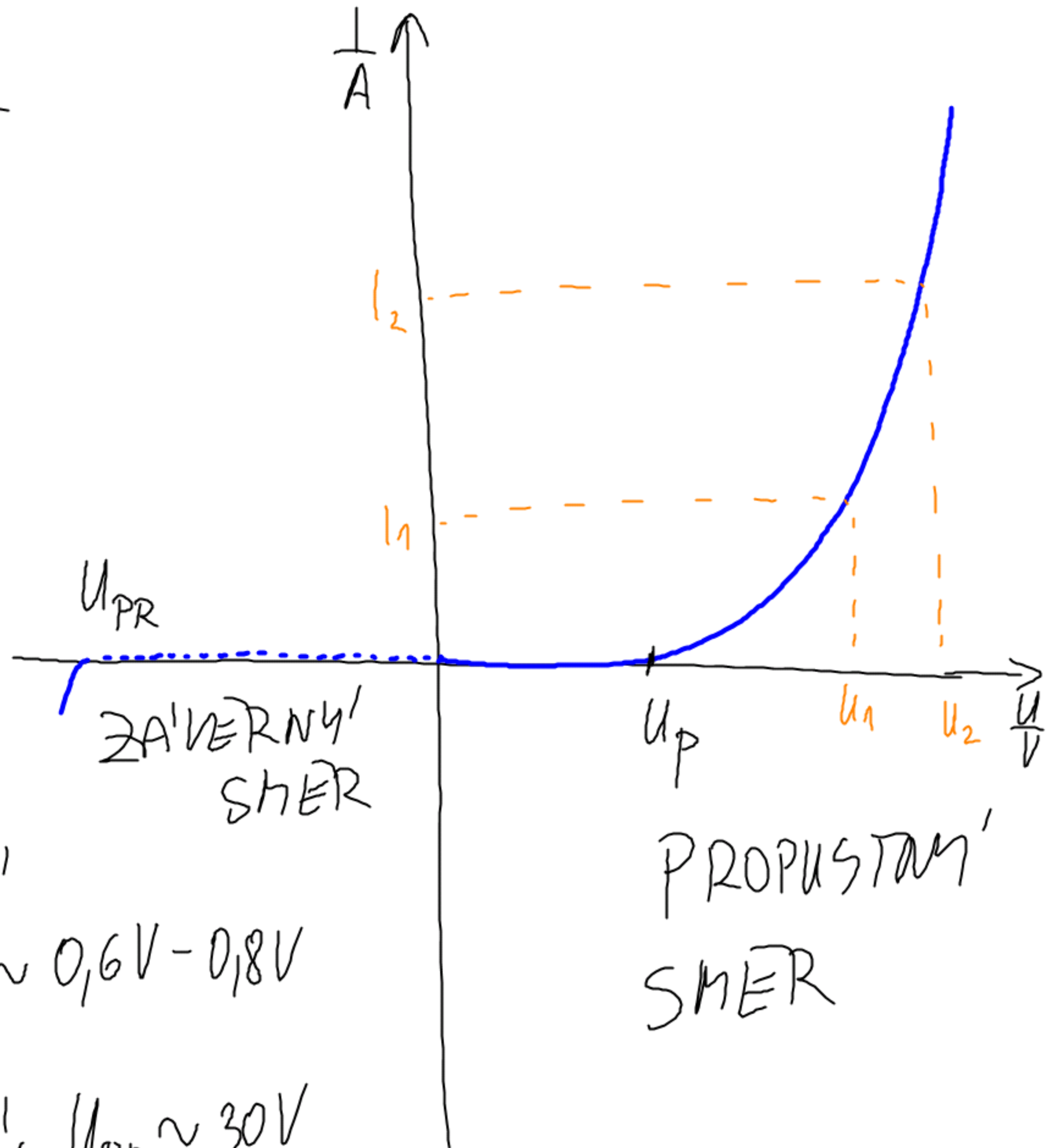
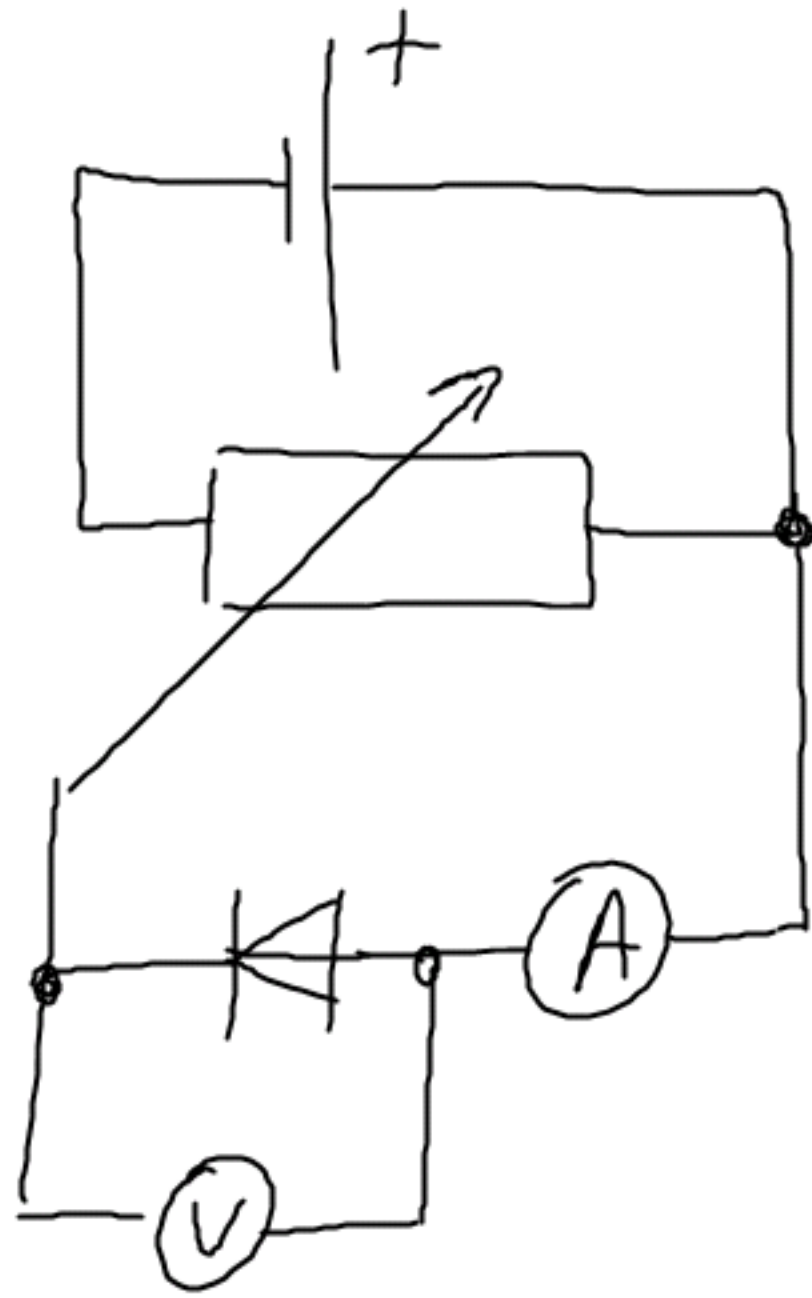
typy: • FIZIONA'

• PLOŠNA' - snese vèto' el. proud ( $\Leftarrow$  le'pe se ochlazuyt')





# VA charakteristika



$U_P$  - PRAHOVÉ NAPĚTÍ  
(níz  $E_2 > E$ );  $U_P \sim 0,6V - 0,8V$

$U_{PR}$  - PRŮRAZNÉ NAPĚTÍ;  $U_{PR} \sim 30V$

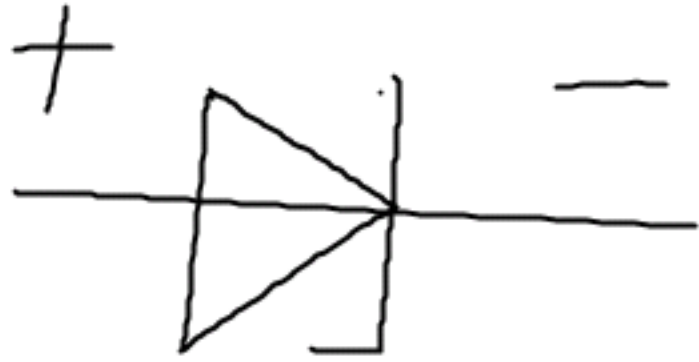
PROPUSTNÝ  
SMĚR

NELINEARNÍ  $\Rightarrow$  NEPLATÍ  
OHMŮV ZÁKON !!! PRŮBĚH: EXPONENCIÁLNÍ

$\forall$  | platí  $U_i = R_i I_i$ ,  $R_i \in M$

se navíc DIFFERENCIÁLNÍ ODPOR: v daném  
bode krivky sestavíme tečnu a určíme  
převrácenou hodnotu její směrnice

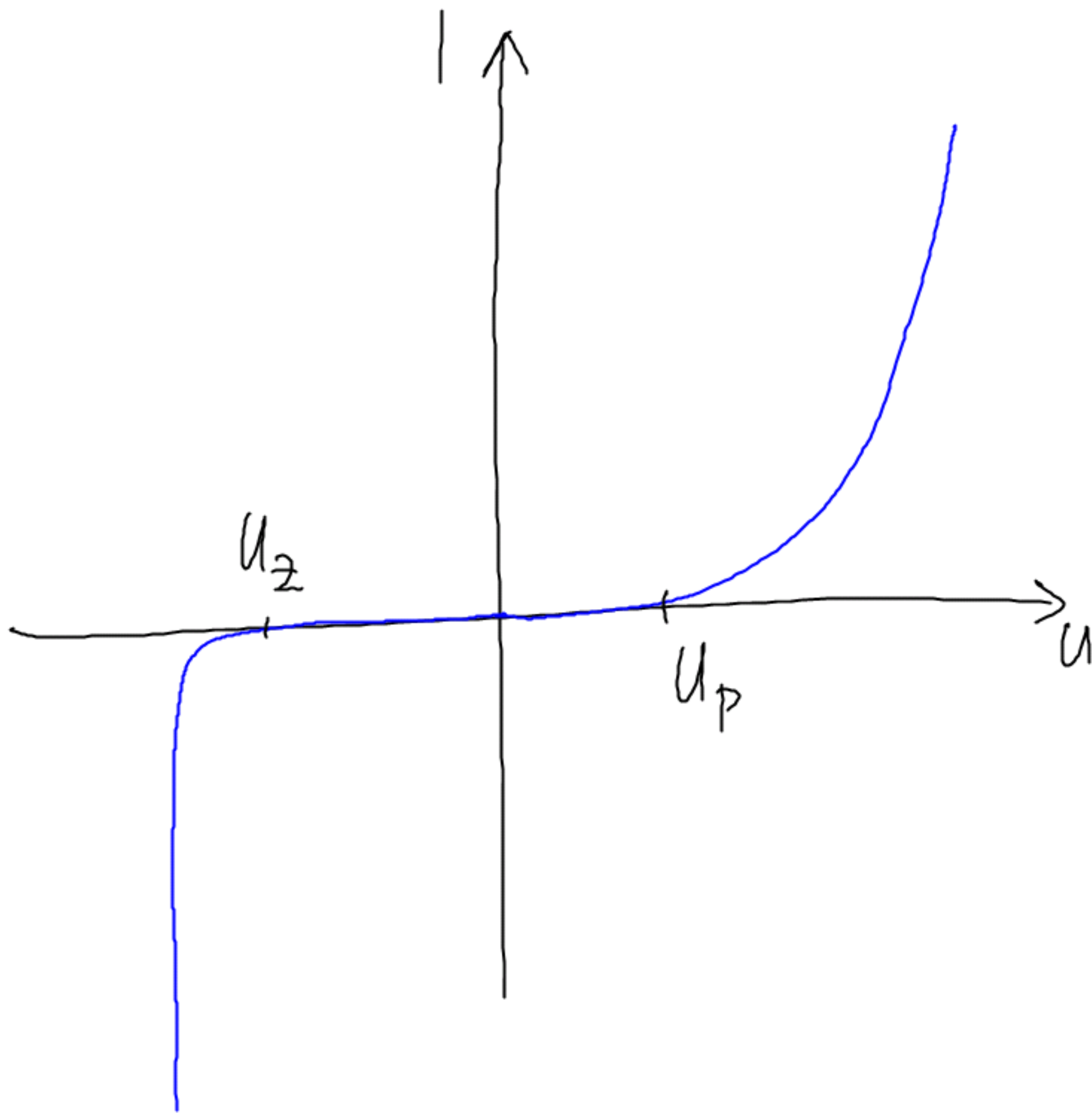
## 2, Zenerova (stabilizační) dioda



přechod PN je vyroben tak, že el. proud může  
procházet i v závěrném směru

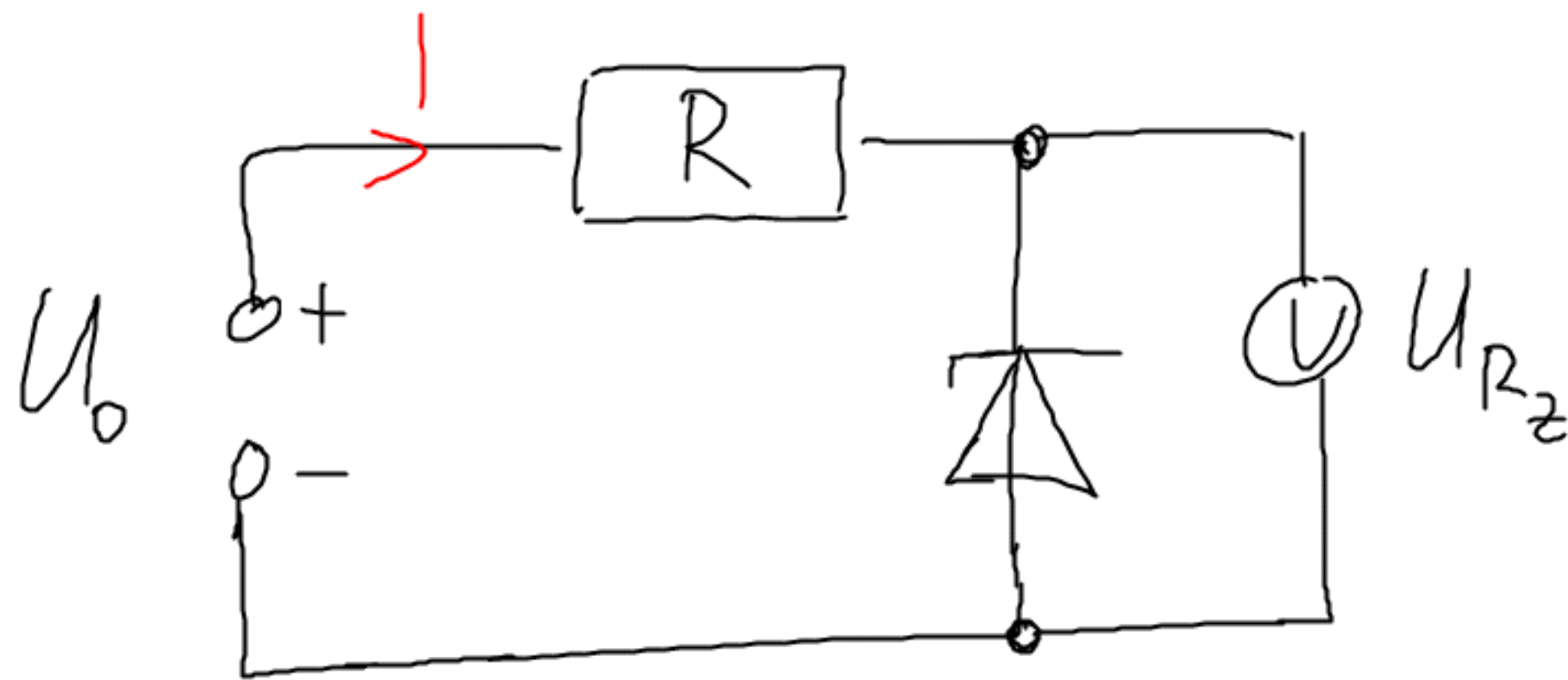
$$E = \frac{U}{d} \Rightarrow d \downarrow \Rightarrow E \uparrow \Rightarrow F = EQ \uparrow \Rightarrow$$

vytvoření  $e^-$  a jejich přenos přechodem  
v závěrném směru ... PRŮRAZ V ZÁVĚRNÉM  
SMĚRU; NEDESTRUKTIVNÍ



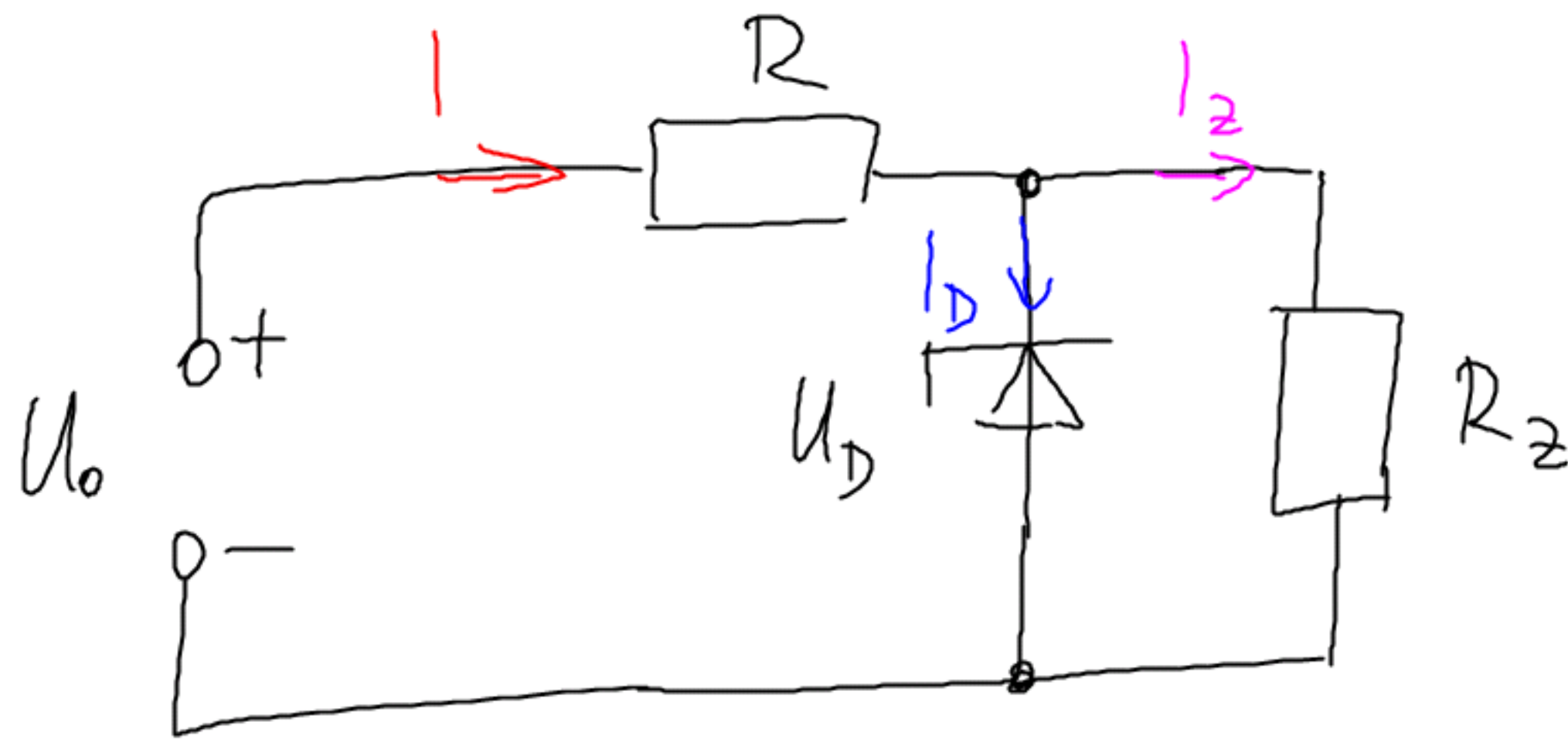
$U_Z$  - Zenerovo napetie;  $T \uparrow \Rightarrow U_Z \downarrow$   
 $\sim 6V \dots U_Z = \text{const (nezavisi na } T)$





dioda nāvršnje  $U_{R2} = \text{konst}$  pro relativnē  
 velly interval mondu' 1 pri' zapoju' 1  
 r ZĀVERNĒN SĒERU

v praxi: Spotřebič o odporu  $R_z$  (a ten se mění) a na něm chceme udržovat stálé napětí

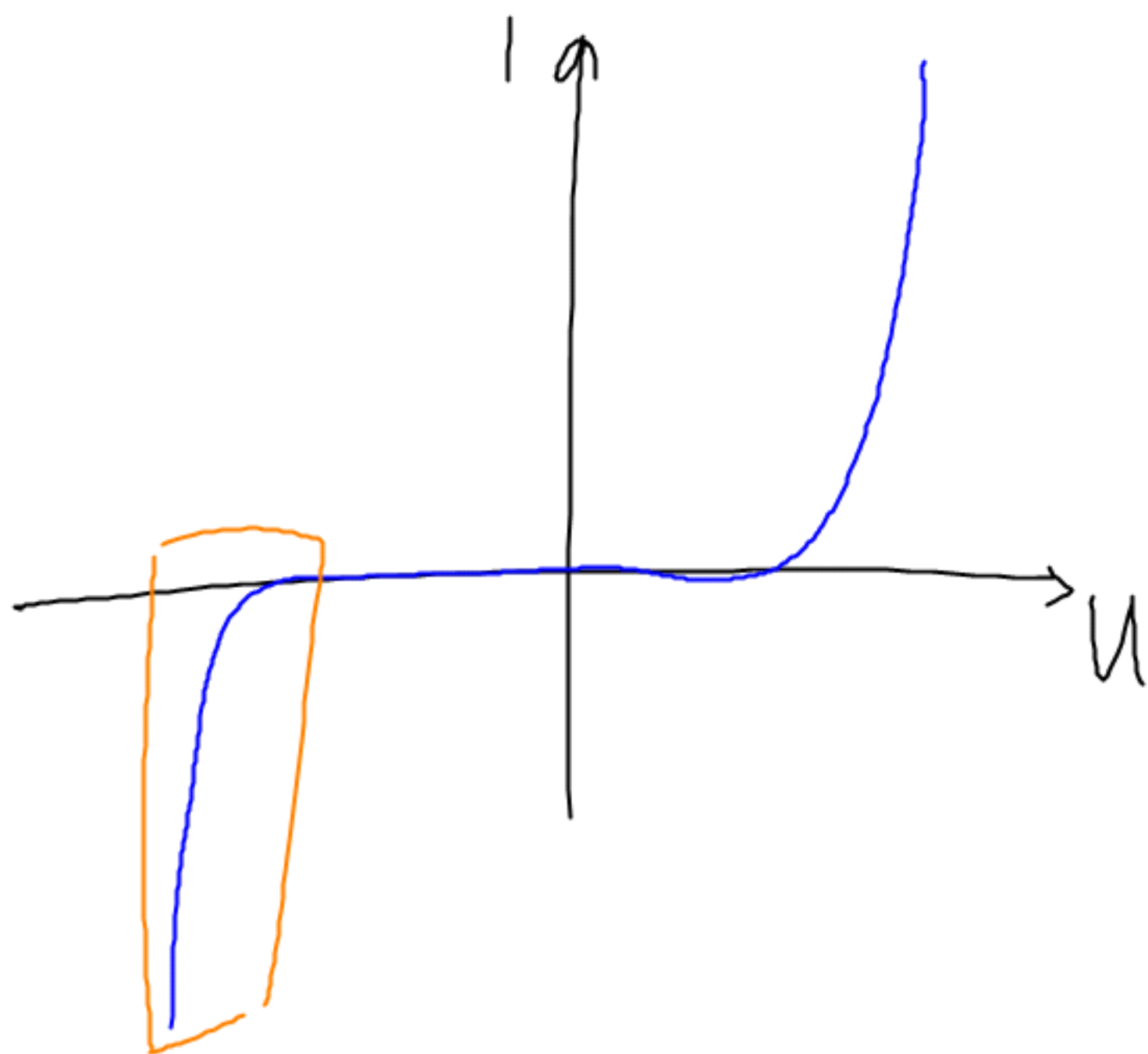


1. KZ:  $I = I_D + I_z$

$U_0 \doteq \text{konst} \Rightarrow I \doteq \text{konst} \Rightarrow$  při změně  $R_z$  (tedy změně  $I_z$ )  
 se mění  $I_D$

podm možovane! apněny  $I_D$   $\eta_{son}$   $n$   
dane! čas h' VA diody, je  $U_D = konst \Rightarrow$


$$\Rightarrow U_{R_2} = konst$$



# LED

světlo emitující dioda

činnost: energie vlnění při REKOMBINACI  
při  $e^-$  díra se mění na SVĚTLO



A horizontal line with an arrow pointing to the right, labeled with the Greek letter lambda ( $\lambda$ ) at the end. Two points are marked on this line: a blue vertical tick mark labeled 'B' below it, and a red vertical tick mark labeled 'R' below it. Below the horizontal line is another horizontal line with an arrow pointing to the left, labeled with the letter 'f' at its tip.

$$E = h \cdot f$$



# Termistory

• NTC -  $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$

- měření  $T \rightarrow$  napětí (el. proud)
- měření  $\underline{v}$  teploty
- ...

• PTC -  $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$  (pozistor)

- stabilizace napětí (např. trondy)

# Fotosoučastky

fotorizistor

fotodioda

fototranzistor

místní světlost



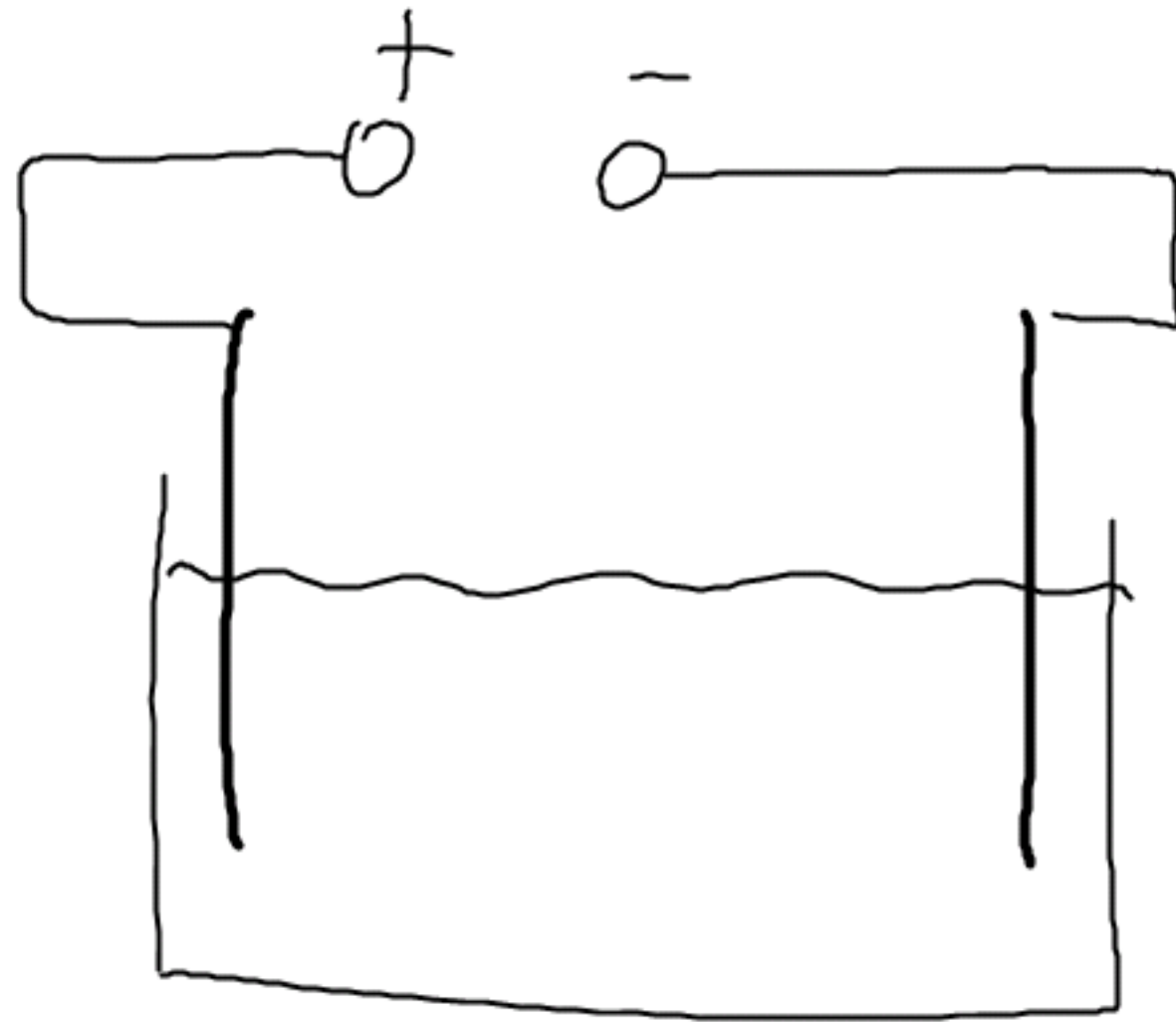
poznámka: „fotobuňka“

# EL. PROUD V TEKUTINÁCH

Obecné podmínky

kapalina a plyn musí obsahovat VOLNÉ  
NABITÉ ČÁSTICE

# Kapali'ma



- voda - el. proud je malý
- voda + sol - el. proud velký  $\Leftarrow$  velký rozklad
- voda + sol - el. proud velký  $\Leftarrow$  velký rozklad

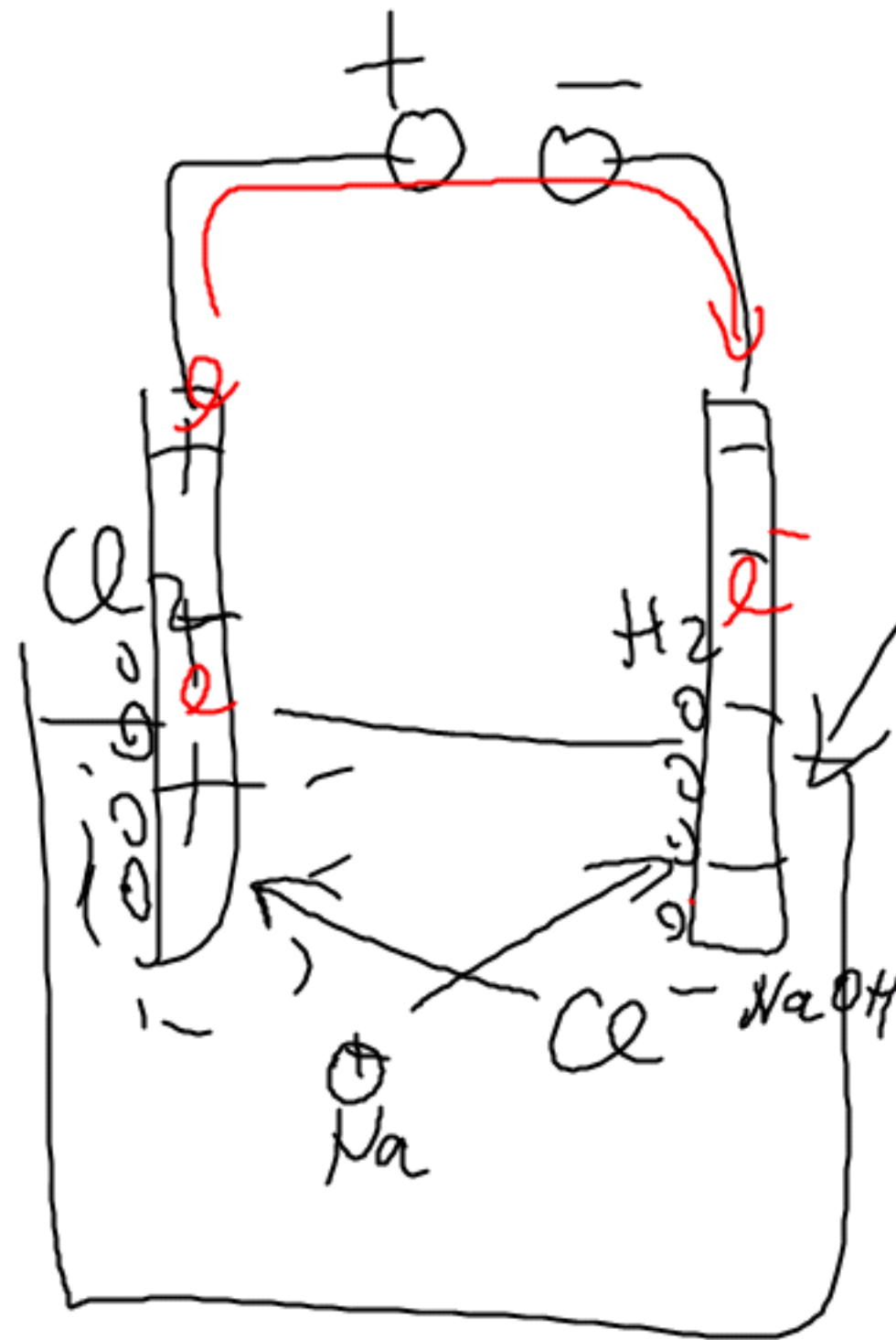
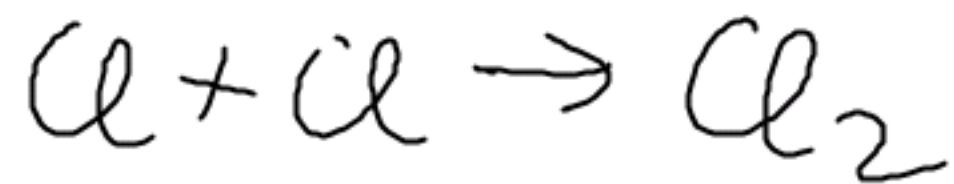
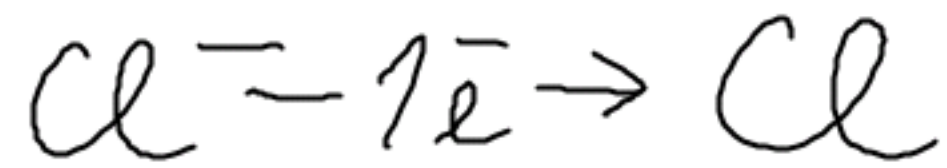
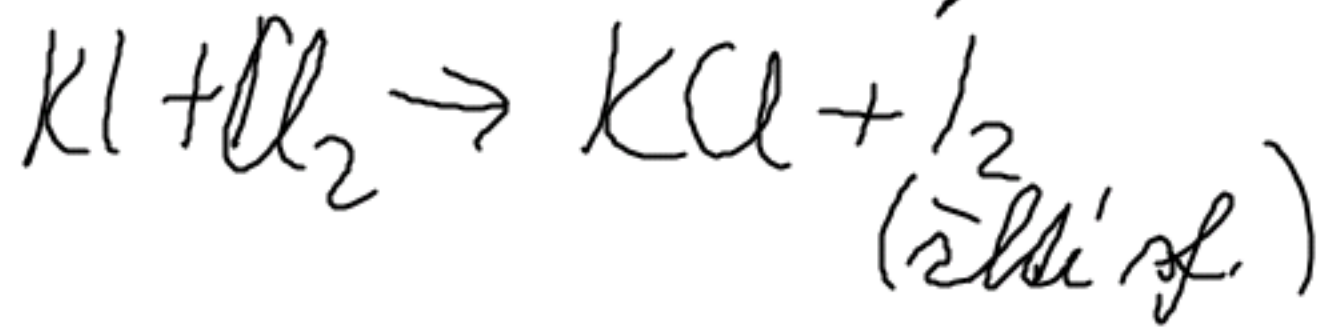




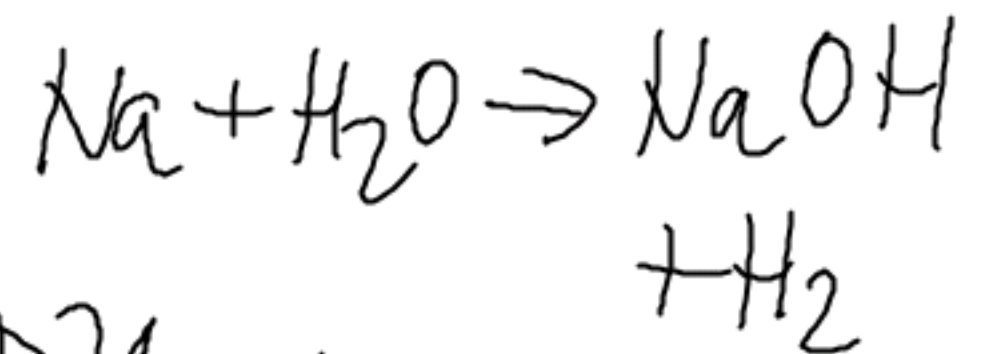
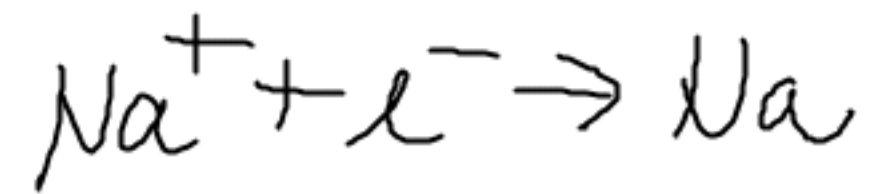
n kladné elektrody (= ANODA) se  
vylučuje  $\text{Cl}_2$  ("bublinky")

n záporné elektrody (= KATODA) se vylučuje  
sodík:  $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$  ("bublinky")  
vzniká  $\text{H}_2$  vzhledem  
stoupá nahoru)

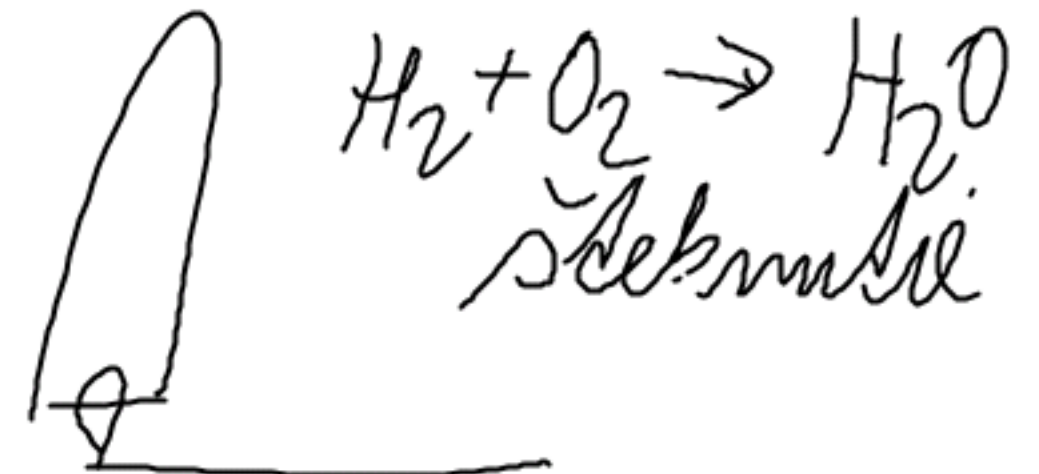
+ pridat  $\text{KI}$



+ fenzelfarben (phosphor)



Dobry:



# Faradayovy zákony elektrolýzy

M. Faraday

$$m = f(Q, \dots) = ?$$

$m$  - hmotnost látky uvolněné na elektrodě

$Q$  - celkový náboj, který projde obvodem

$\gamma$  - počet elektronů, které musí přijmout (odevzdat) iont, aby se stal el. neutrálním atomem

$$N = \frac{Q}{ye}$$

$$m_o = \frac{m}{N} = \frac{m \cdot M_m}{m \cdot N_A} = \frac{M_m}{N_A}$$

$$m = N \cdot m_o$$

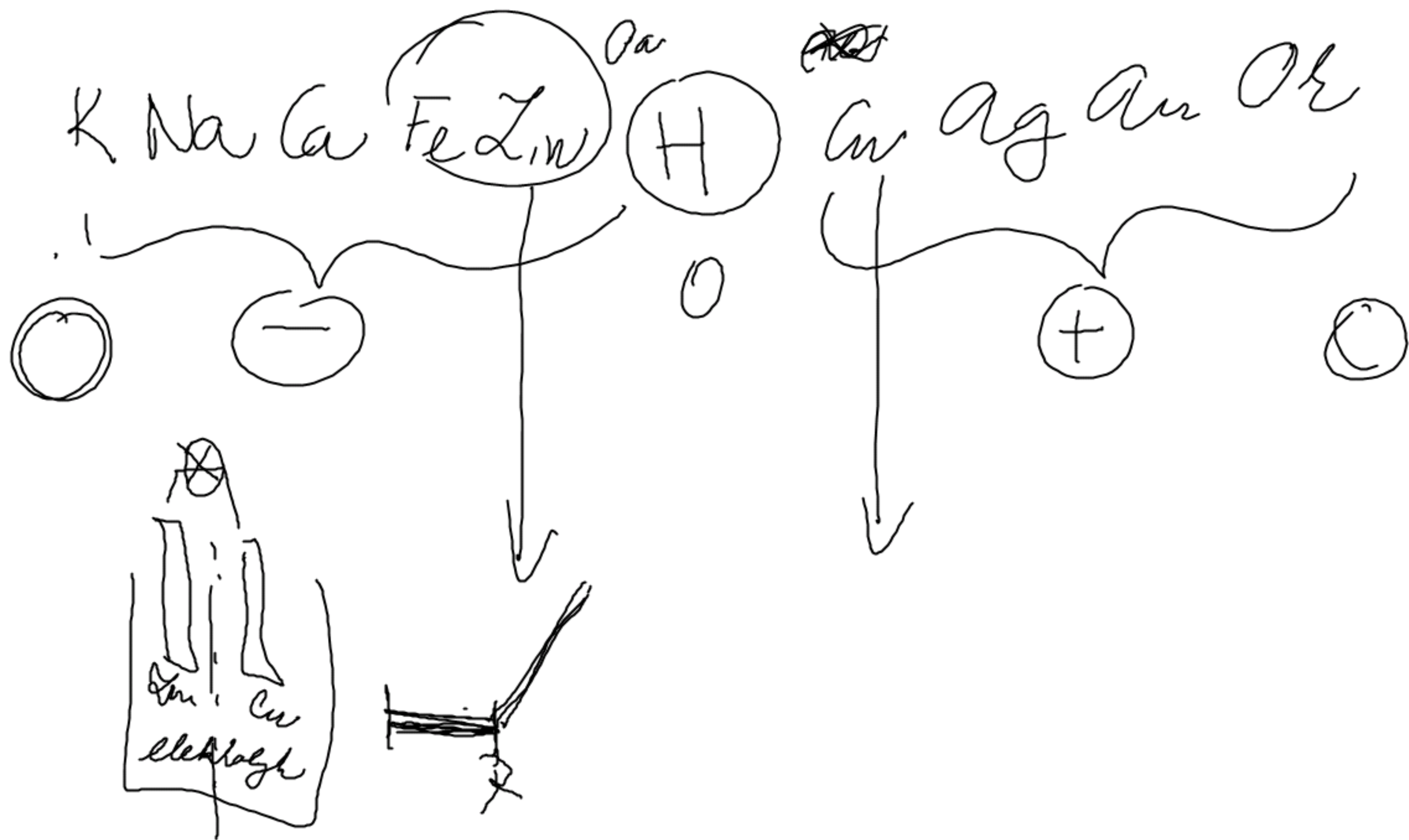
$$m = \frac{Q}{ye} \cdot \frac{M_m}{N_A}$$

$$\rightarrow F = N_A \cdot e = 6 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} = 9,6 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$m = \frac{M_m}{y \cdot F} \cdot Q = \frac{M_m}{y \cdot F} \cdot I \cdot t$$







# VA elektrolýza

## LINEÁRNÍ

### Pomůcky

- výroba  $Al$ ,  $NaOH$ ,  $Na$ , ...
- pokusová m' předmětů
  - roztok' předmět
  - připravit jako KATODU ( $\Leftarrow$  když vytráňejí' KATIONY)

Plýny

vedení el. proudu v plynech =  $U \cdot B \cdot A$

aby nastal výboj, je nutné plyn IONIZOVAT

- ohřev
- velký rozdíl potenciálů 2 elektrod



~~typy vybojů~~

• JISKROVÝ – kvařovací, (blesk)  
– mnohá místa s otevřenými  
potenciály

• OBLOUKOVÝ – kvařovací  
– ke relativně velké el. proud  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ohřev  $\Rightarrow$  opožehnutí elektrod

- KORÓMA - sršem' el. ma'boje  
- na kramach, krotech, ...

za sm'ženeho kalam:

- DOUINAU' - analogie oblonheného  
- miž' kalam ⇒ me'ne ča'zh'e ⇒  
⇒ me'ne malhody'ch sčat'ch ⇒ men' U  
- za'v'ry, reklamni' knižice

# STACIONARNI' MG. POLE

Stacionarni' - v case nepromenne'  
-  $\vec{B} = \text{konst}$

nestacionarni' - v case promenne'  
- velicity, ktere' ho popisuji' j'son  
v case promenne'

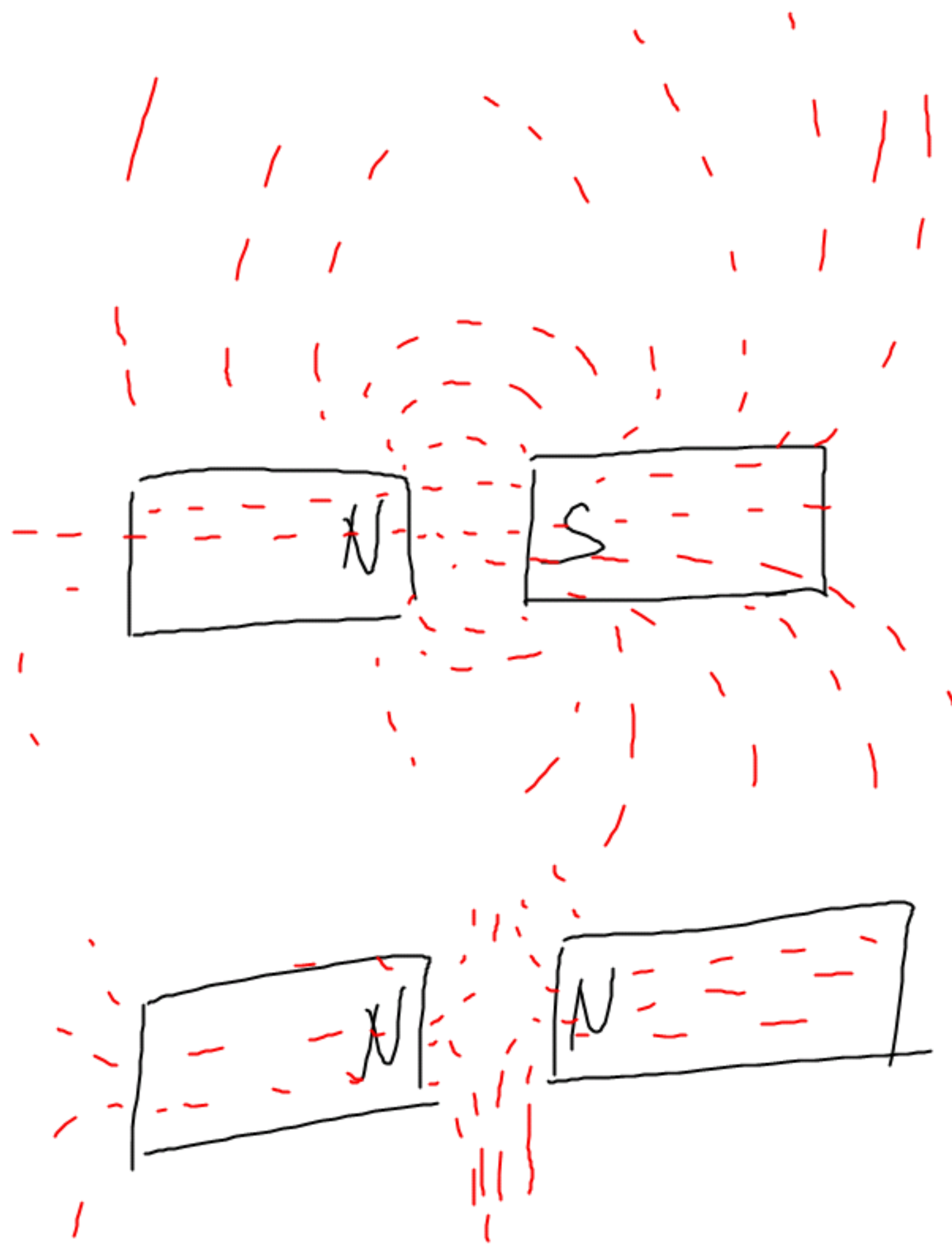
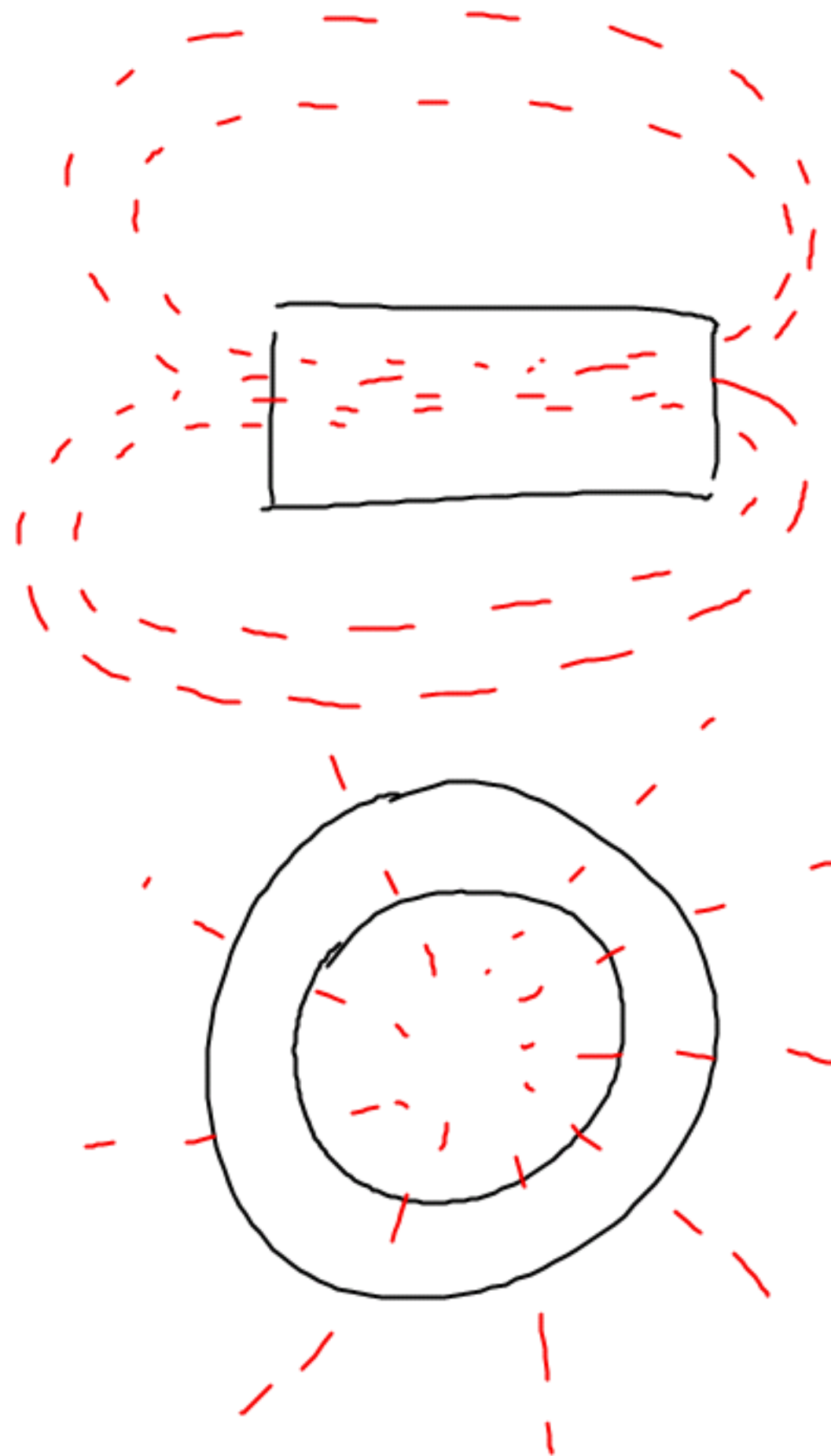
## Zdroje stacionárního mag. pole

- permanentní magnet, který je v klidu vůči cídlu, kterým mag. pole měříme
- vodič, který je vůči cídlu v klidu a kterým proudí stálý el. proud
- Země



# Popis mag. pole

a) pomocí obrázků



f) fyzikální popis  
řádek vektoru  $\vec{B}$

- analogie s  $\vec{E}$  a elst. pole

- ve směru TEČNY k „čáře namíhle“

a našupavých pířím



--- magnetická  
indukční čára (MČ)  
UZÁVŘENÉ

$\vec{B}$  - fyz. veličina MG. INDUKCE

$$[B] = T \quad (\text{tesla})$$

např.  $B_{\text{země}} \sim 20 \mu T$

$$B_{\text{NEODYM}} \sim T$$

# Mg. pole vodiče s proudem

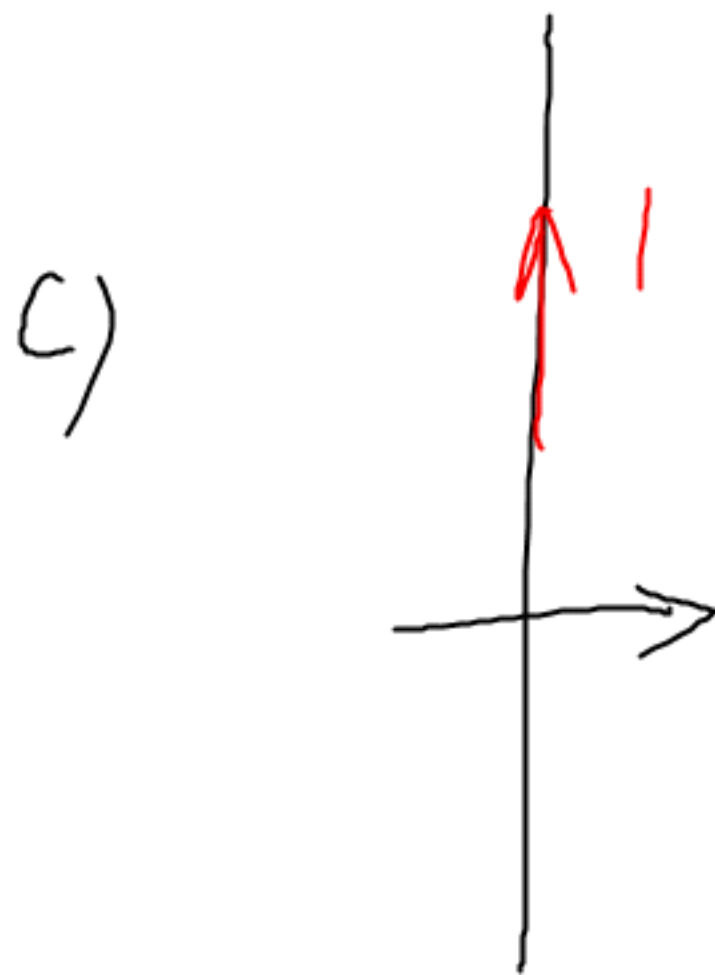
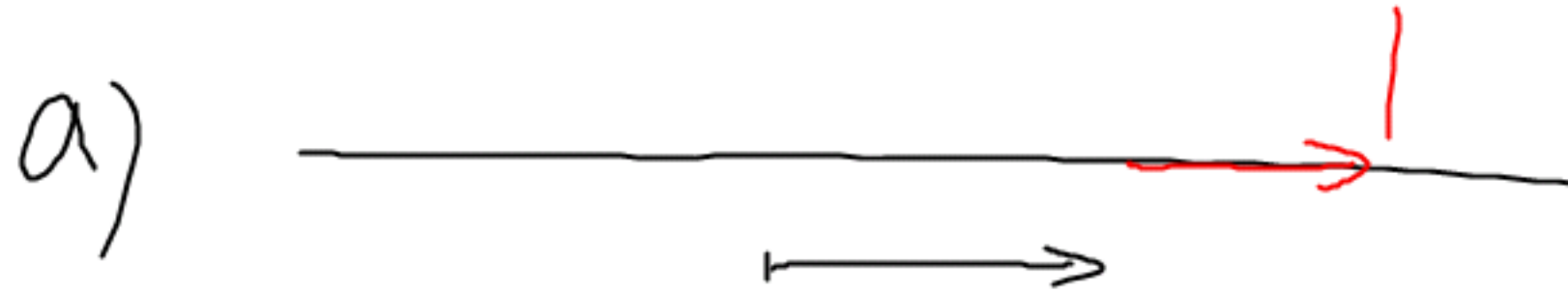
- vodič, kterým prochází el. proud, interaguje s magnetem



spojen! obvodu  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  vodič se přitažne  
(odpudí)

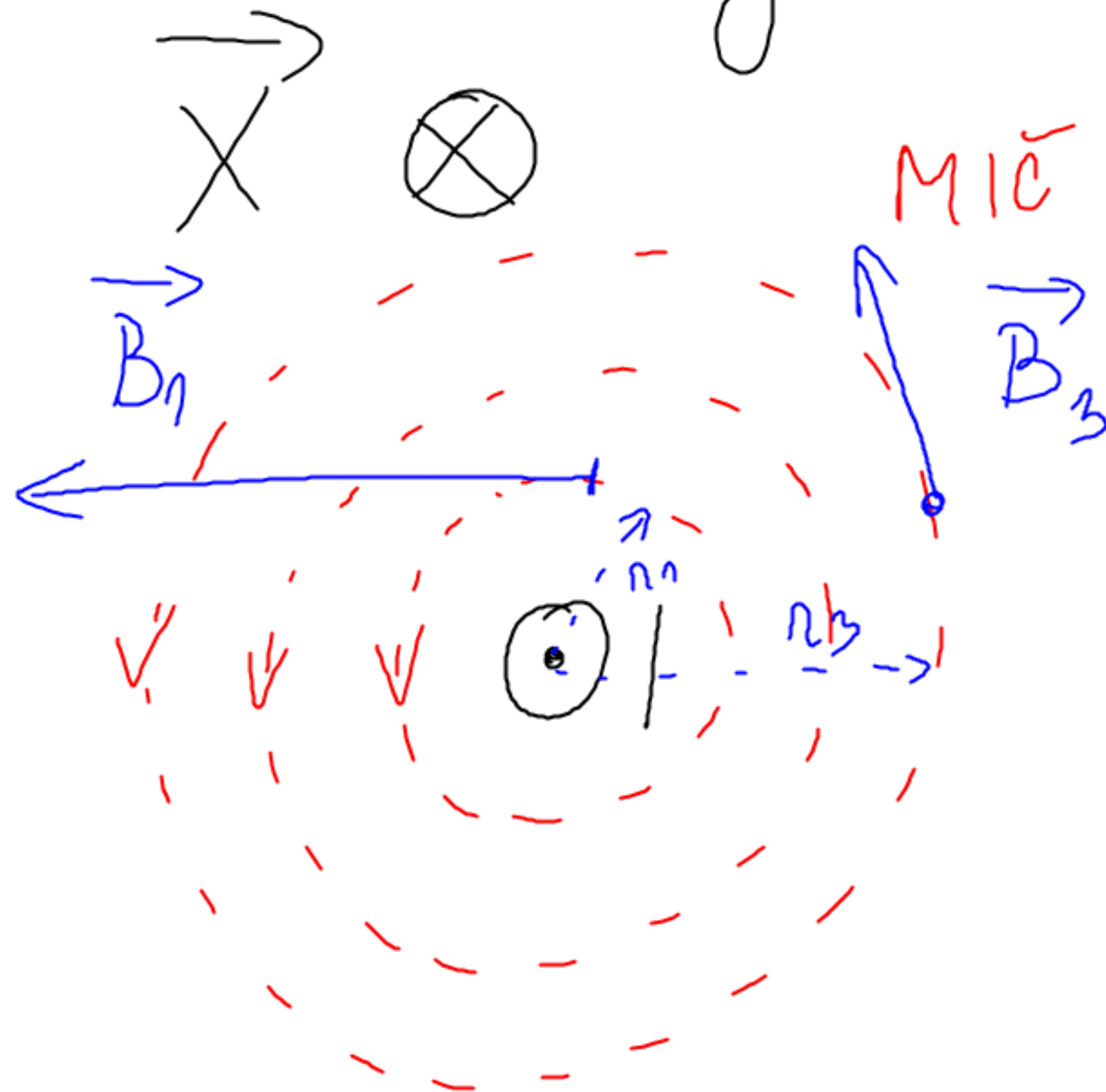


• har MIC

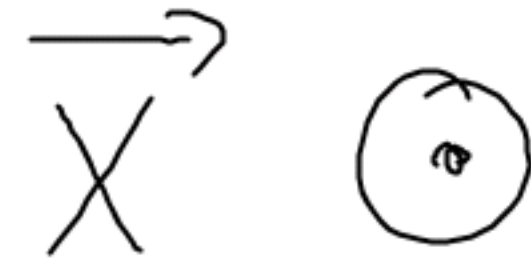


Symbolické znázornění vektorů mříž

• do náhledu



• 2 náhledy



orientace  $MIC$  –  
– pravidlo prave'  
ruky (Ampère)

$\vec{B}$  – směr kory

$n \uparrow \Rightarrow B \downarrow$

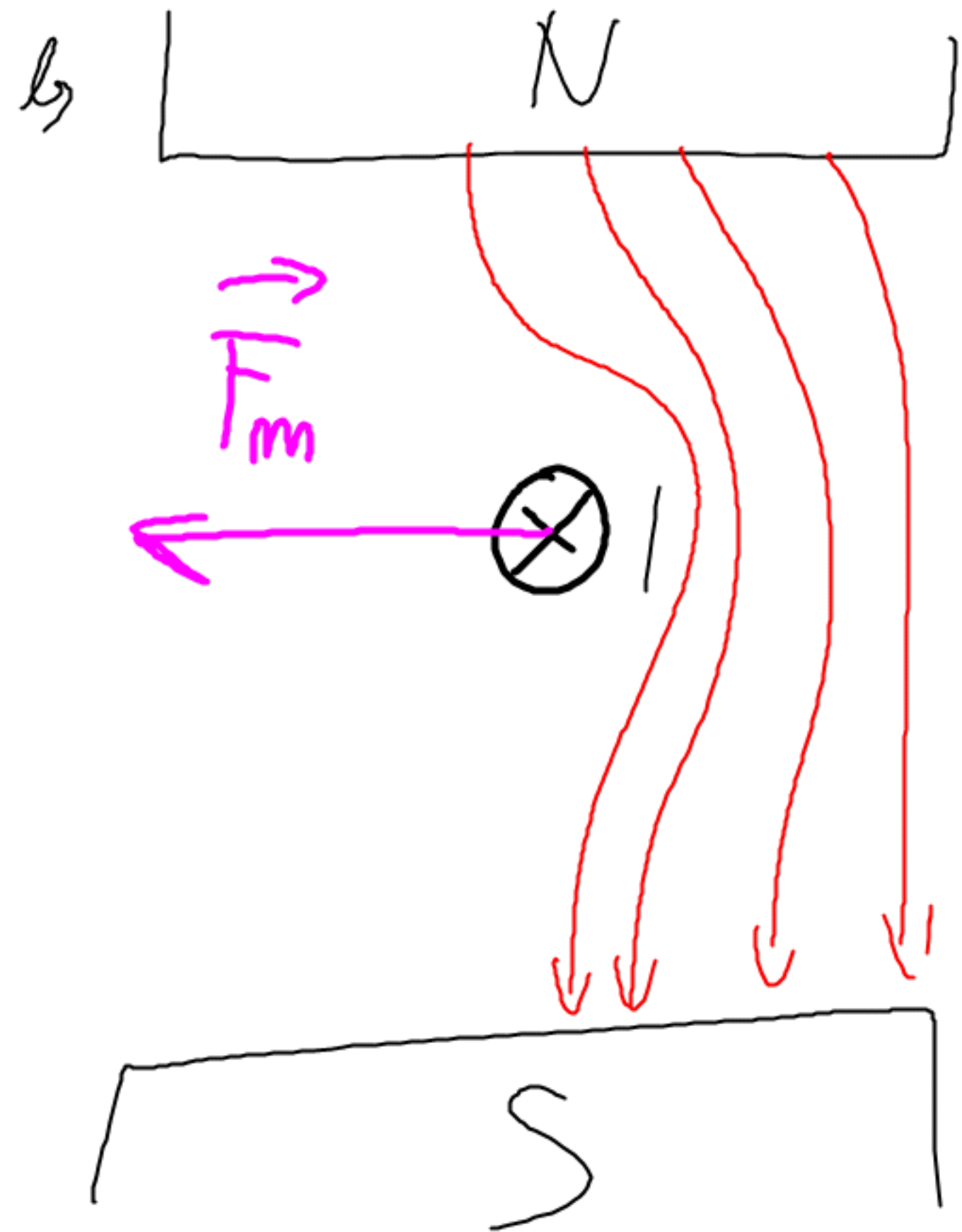
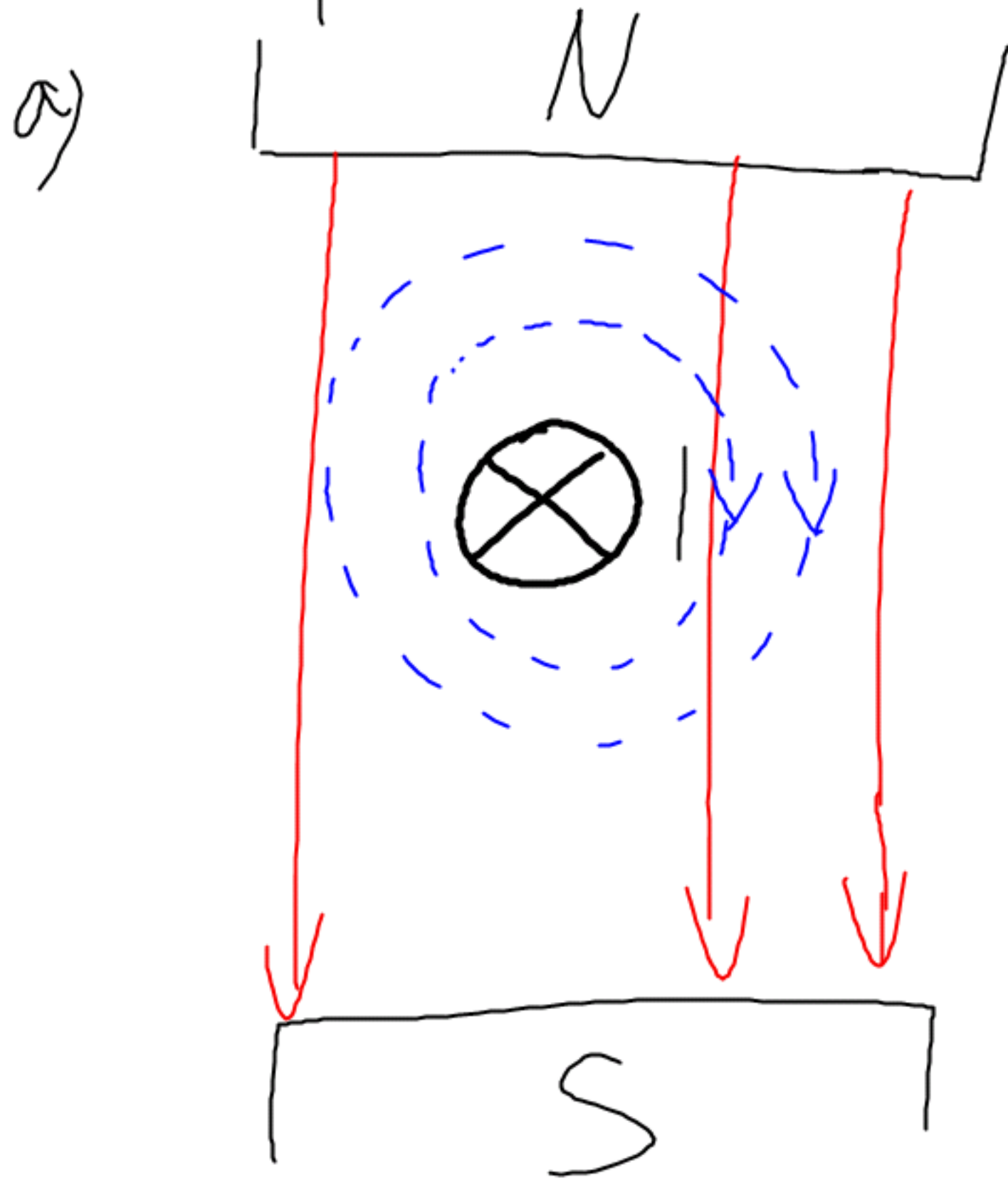
$$B \sim \frac{1}{r}, \quad |, \text{ prostredí}$$

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{1}{2\pi r}$$

$\mu_0$  ... PERMEABILITA VAKUA ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$   
 $\mu_r$  ... RELATIVNÍ PERMEABILITA PROSTŘEDÍ

# Vodič s proučkom ve vnejším mag. poli

2 experimentu  $\Rightarrow$  na vodič působí síla





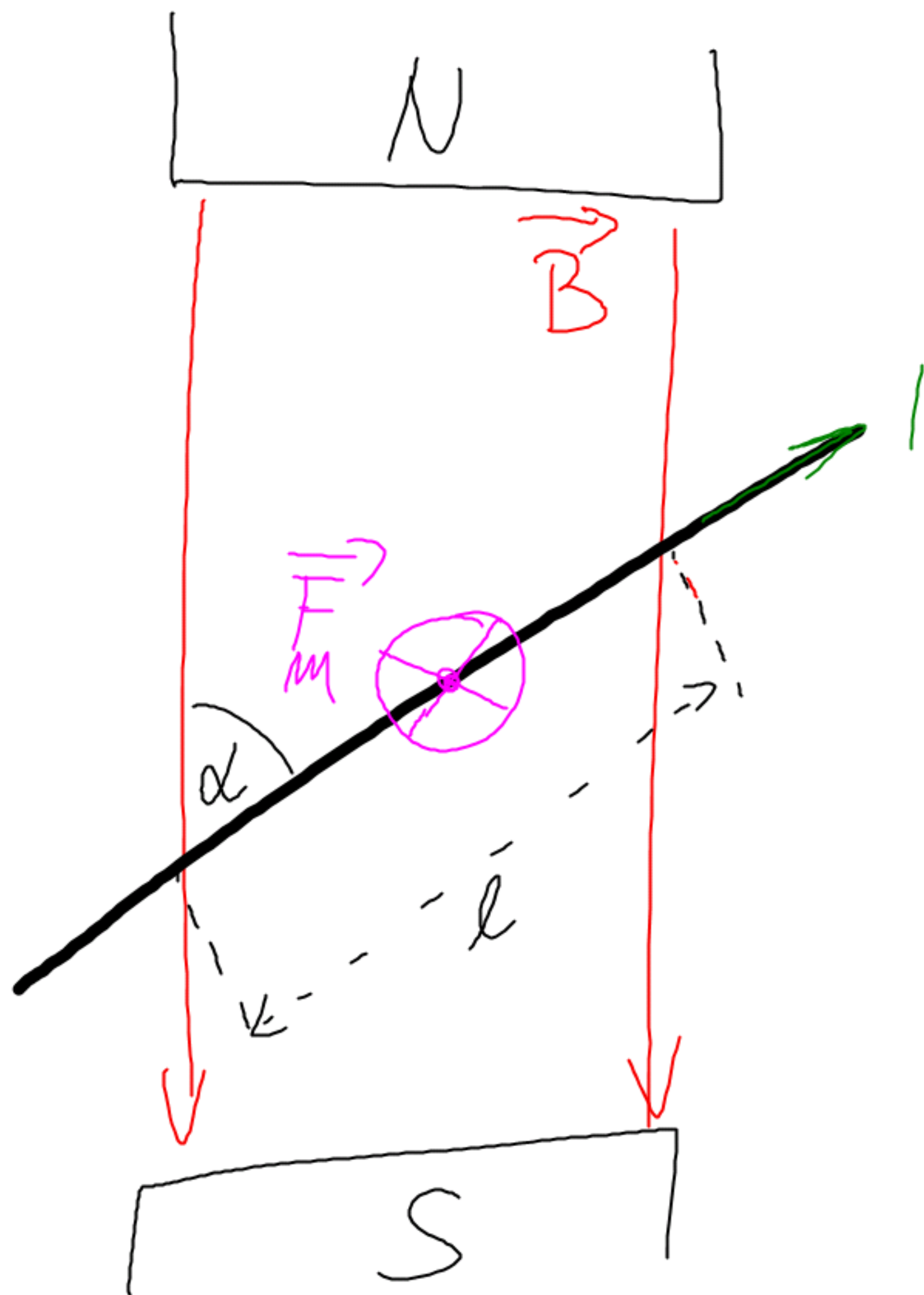
směr  $\vec{F}_m$  dle FLEMINGOVY PRAVIDLA  
LEVÉ RUKY

MIC magnetického pole --- do dlaně

$\perp$  ve směru prstu

$\vec{F}_m$  odtažený palec

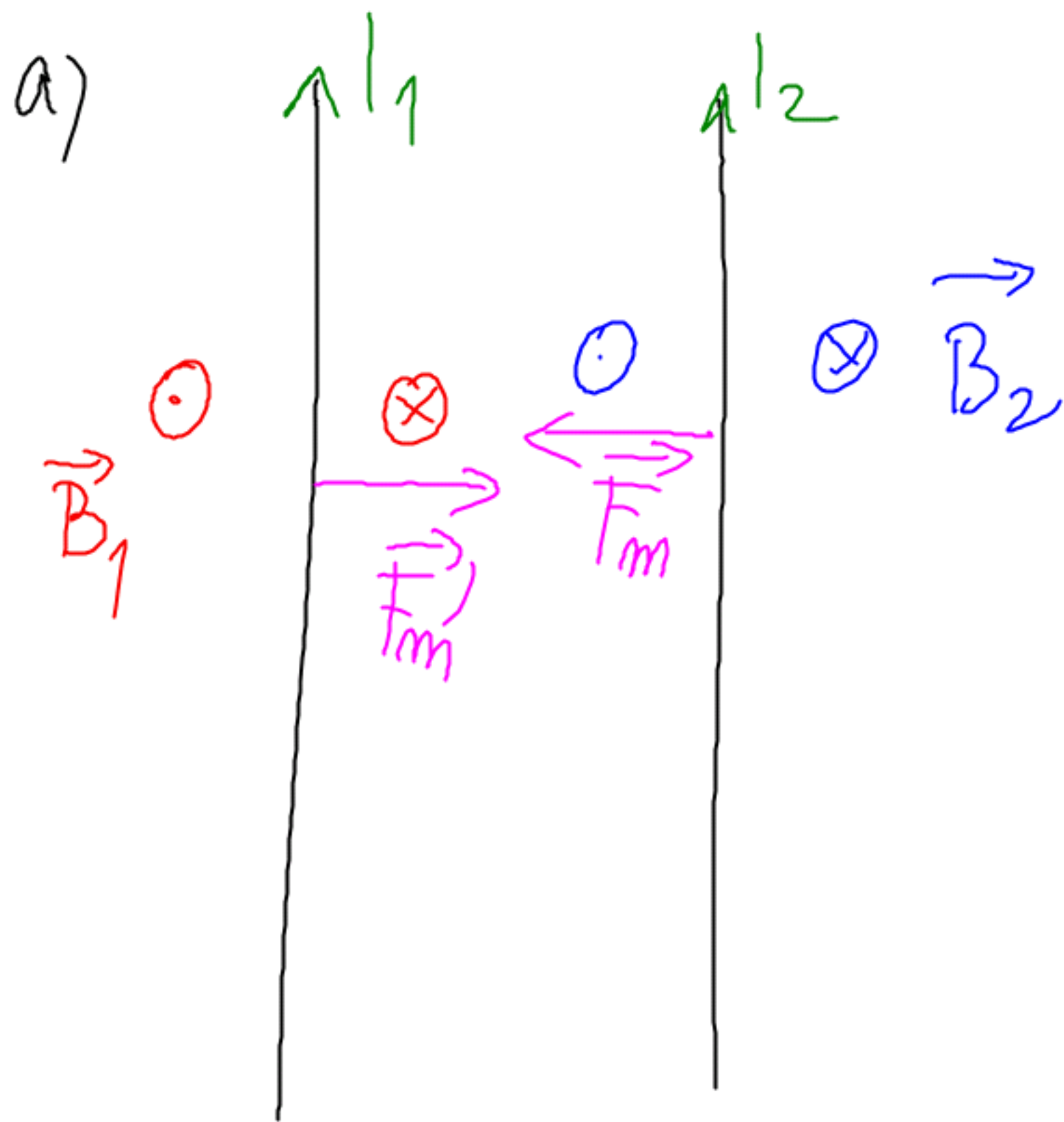
přítom:  $\vec{F}_m \perp \vec{B} \wedge \vec{F}_m \perp$  vodič (vždy kolmo k  $\perp$ )



$$F_m = B l \sin \alpha$$

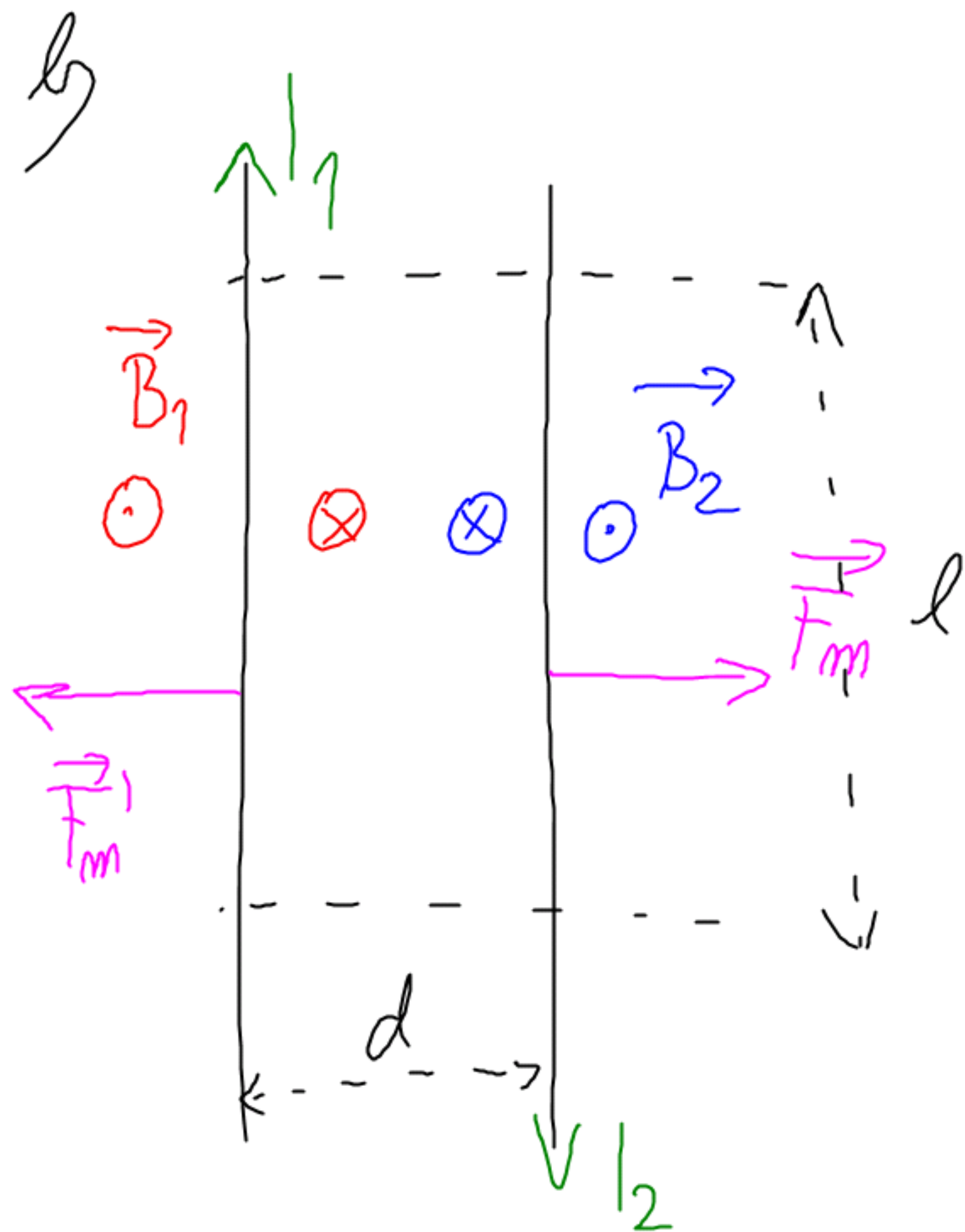
$\alpha$  – uhol, ktorý zhrňa  
 MŤ s vodičom

# Mg. pole 2 navzájem rovnoběžných (nekonečně dlouhých) vodičů s proudem



① ~ zdroj mg. pole

$\vec{F}_m$  působí na vodič ①  
ma' opačný směr než  
 $\vec{F}_m$  (dle 3. NZ)



① ~ zdroj mag. pole

$$F_m = B_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \sin 90^\circ =$$

$$= \mu_0 \mu_r \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \cdot l \cdot 1$$

$$F_m = \mu_0 \mu_r \frac{I_1 I_2}{2\pi d} l$$



# Mg. pole c'vly

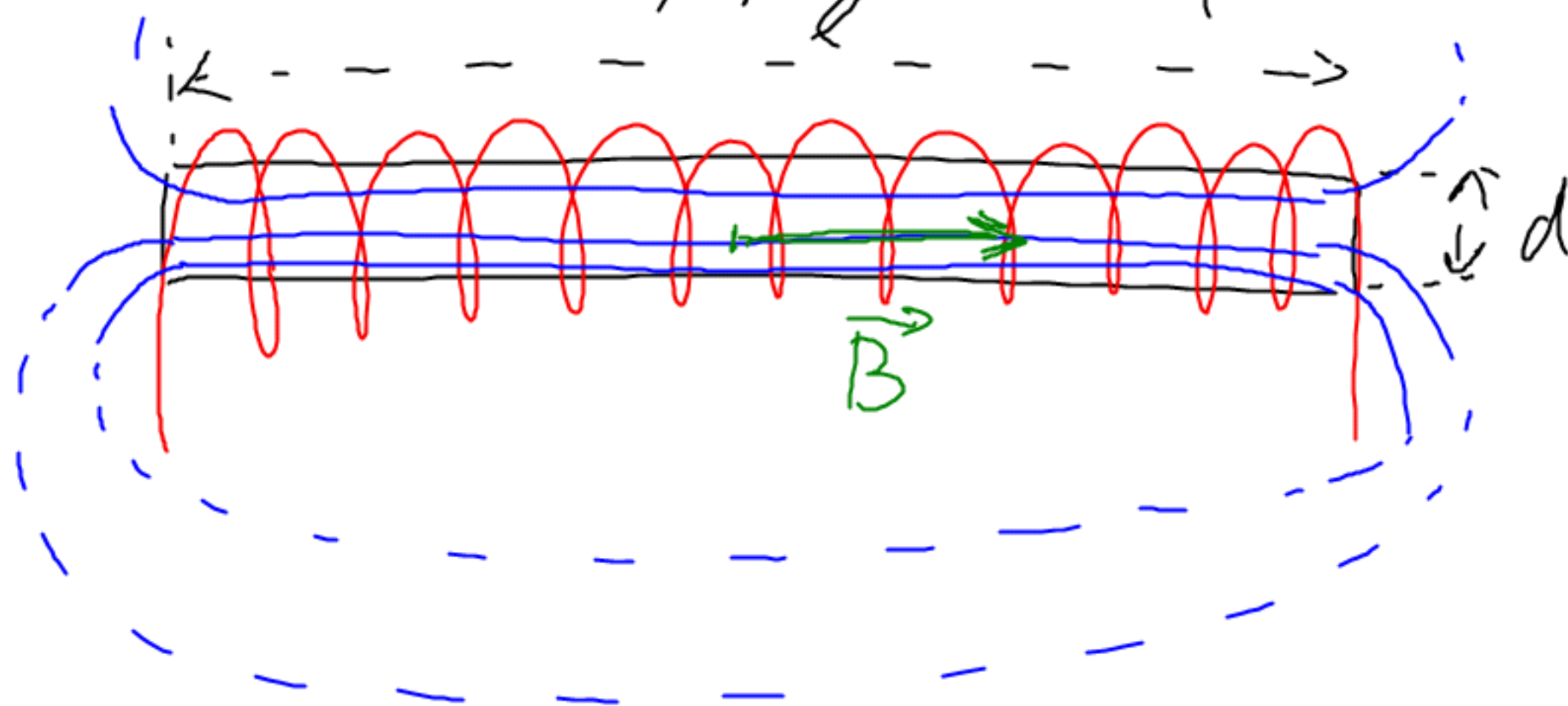
c'vha - „kys dra'ha namotany' na ma'sadu  
od hostete“

divod: as'lem' mg. pole ve svorniku' s vodi'cem,  
který je prázdný,

nejjednodušší model: M1C s dist'ivní c'vly jsou  
vzá'jemně rovnoběžné  $\Rightarrow$  mg. pole c'vly je  
HOMOGENNÍ

pro splnění: musíme předpokládat DLOUHOU  
cívku

SOLENOID - cívka, pro níž platí:  $l \gg d$



$$B \sim \mu_0 N I \frac{1}{l}, \text{ materiál jádra}$$

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}$$

Experiment:  $\frac{B}{l} = 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1}$

$$\frac{B}{l} = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l}$$

$$\mu_0 = \frac{B}{l} \cdot \frac{l}{N \mu_r}$$

$$\mu_r = 1$$

$$N = 15$$

$$\mu_0 = 10^{-4} \cdot \frac{0,14}{15 \cdot 1} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \cdot l = 0,14 \text{ m}$$

$$\mu_0 \doteq 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^2$$

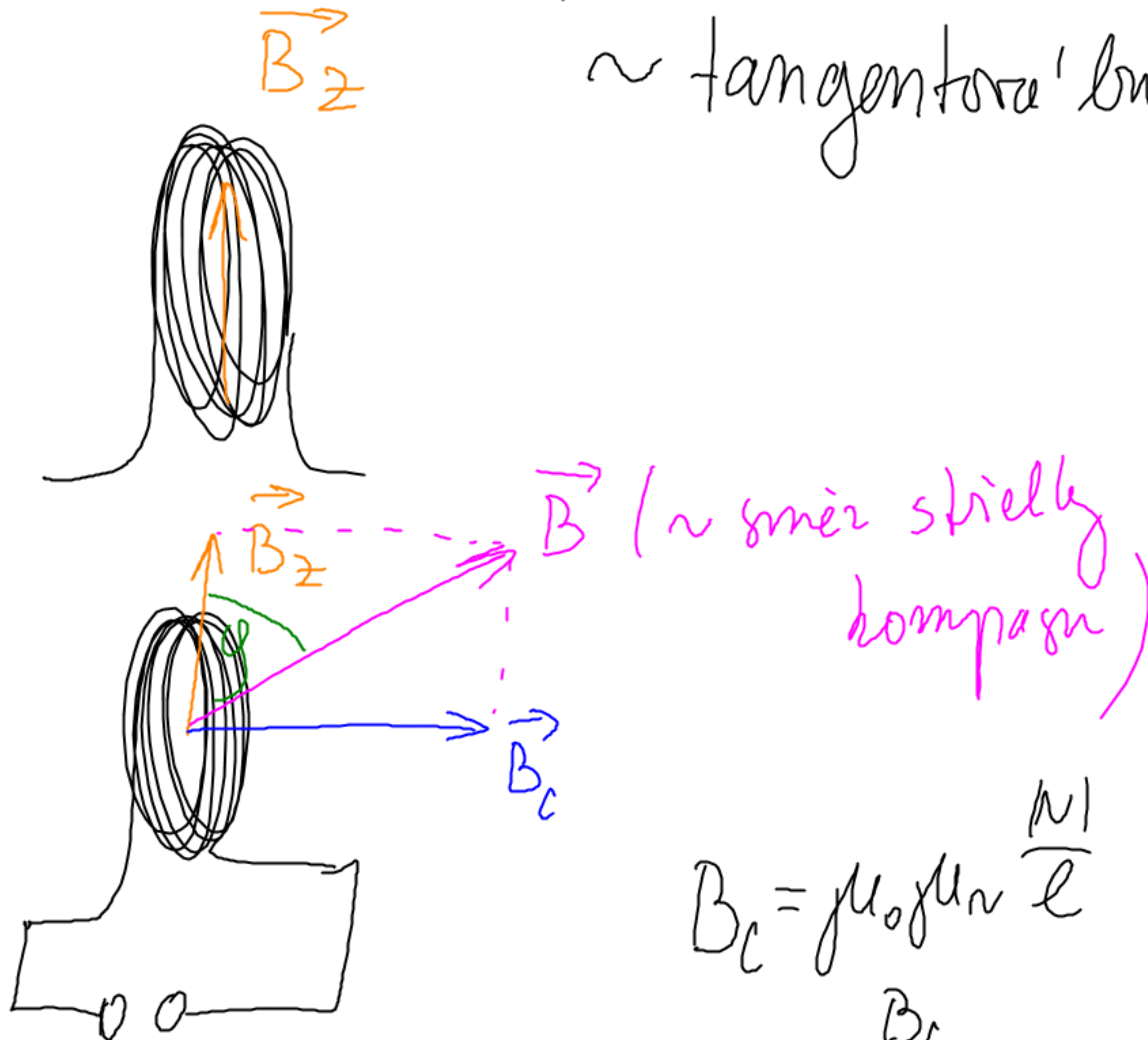
$$\mu_{0 \text{ THEOR}} = 4\pi 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$



jednoduchý detektor el. proudu

SHORA

$\sim$  tangenta' bráda



$$B_c = \mu_0 \mu_n \frac{NI}{l}$$

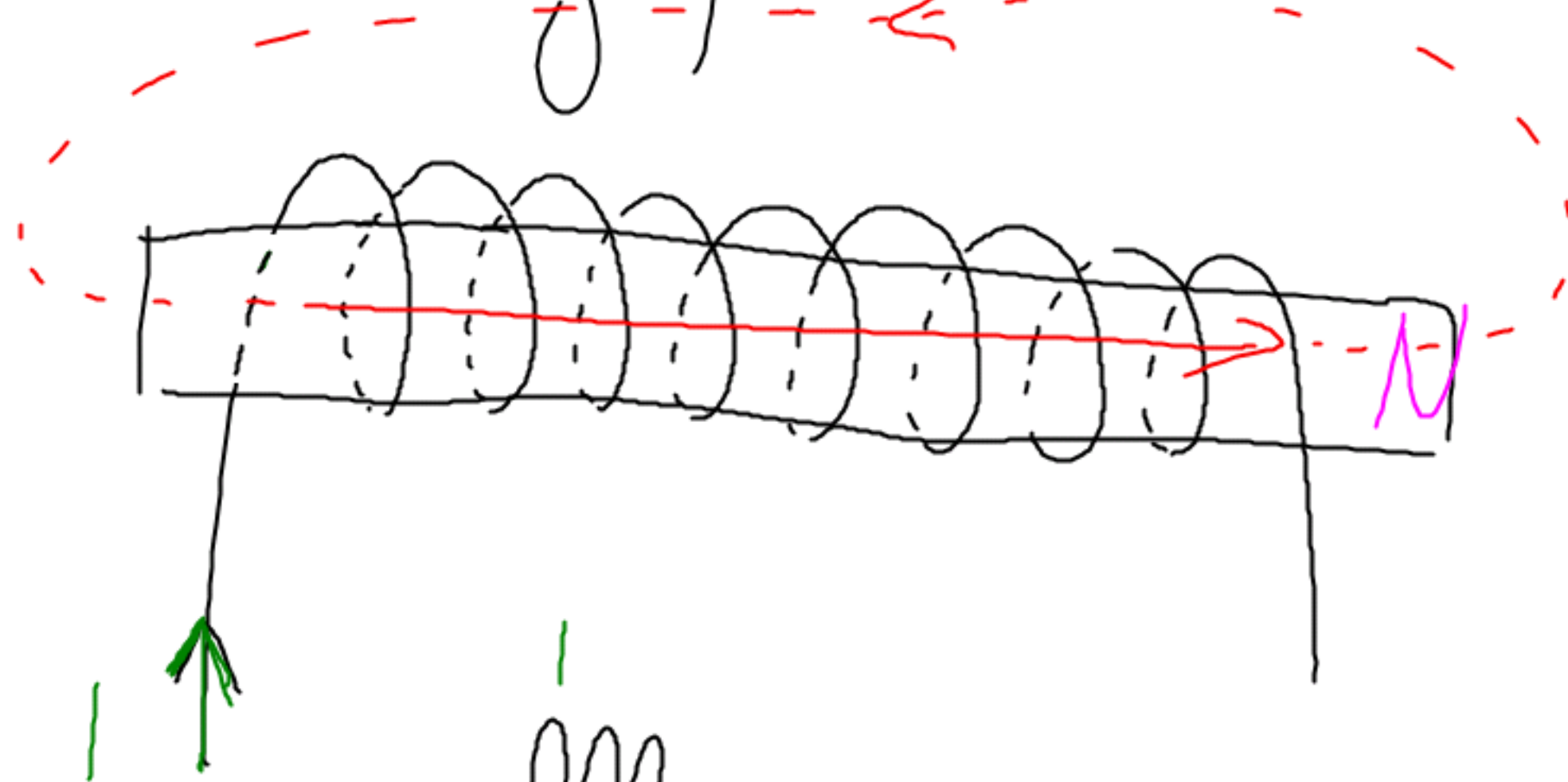
$$\tan \varphi = \frac{B_c}{B_z}$$



$$\Rightarrow B_z = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{l \tan \varphi}$$

velikost horizontální  
složky mag. indukce  
mag. pole Země

Orientace mag. pole solenoidu:

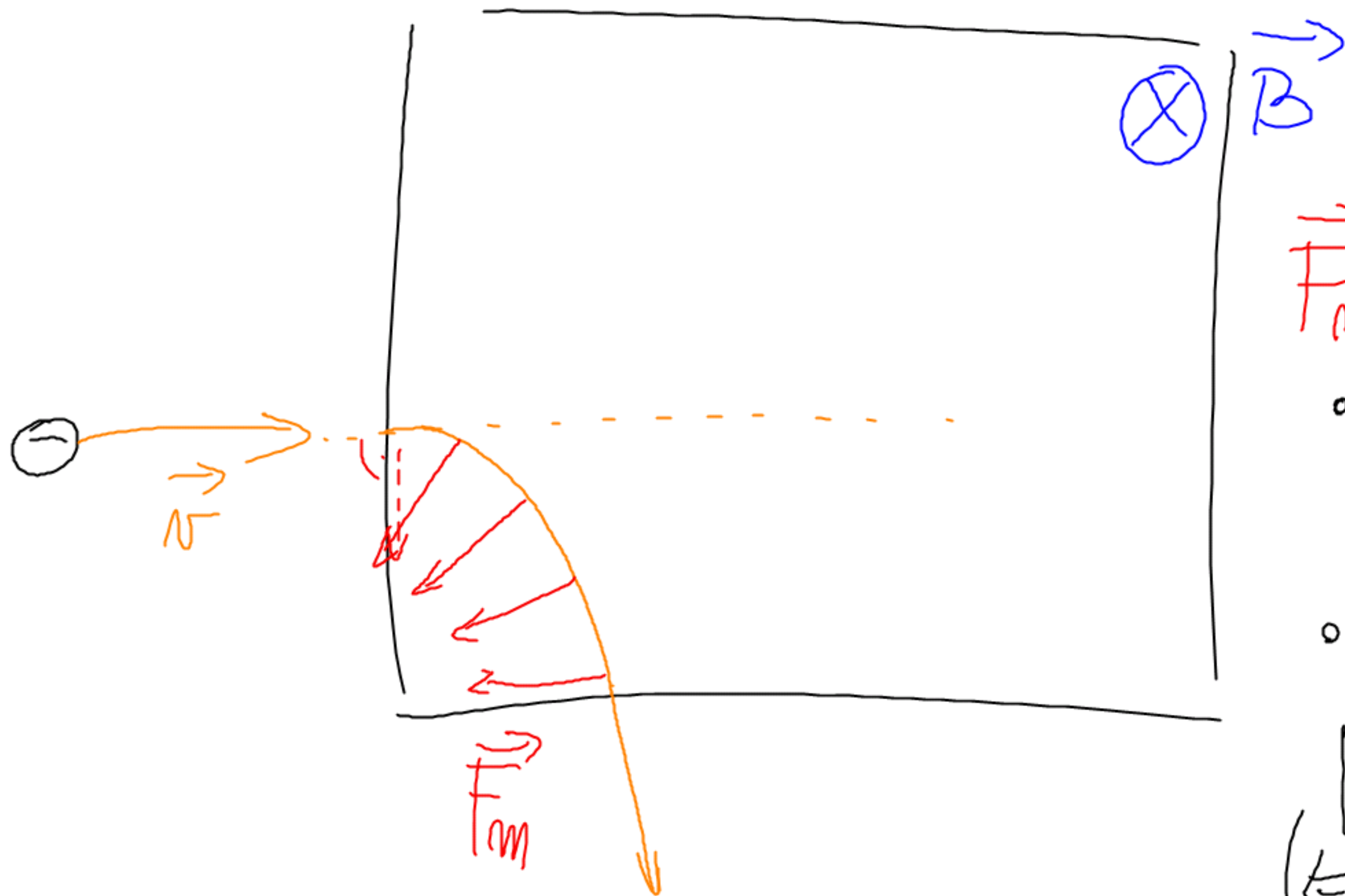


pravá ruka



Nabitá čára v mg. poli

omezení (rychlostem):  $\vec{v} \perp \vec{B}$



- dráha
- způsobuje  
přiblížení  
( $\vec{F}_m \perp \vec{v}$ )

pro veličnost  $\vec{F}_m$  lze využít ze vztahu

$$F_m = B l \sin \alpha$$

$$F_m = B \frac{Q}{L} l \sin 90^\circ, \text{ kde } Q \text{ je náboj}$$

částice

$$F_m = B Q v$$

tato síla valí díky dostředivou sílu působící na

$$\text{částici} \Rightarrow F_d = F_m$$
$$m \frac{v^2}{r} = B Q v$$



aplikace

- CRT monitor (historie 😞)
- měření parametrů kabelů
- CERN
- osciloskop
-

bude-li celá aparatura vložena do  
elst. pole, bude na částici působit  
i síla  $\vec{F}_e$

- $\vec{F}_e$  působí VE SMĚRU POHYBU ČÁSTICE ( $\sim \vec{a}_t$ )
- $\vec{F}_m$  působí KOLMO na směr pohybu částice ( $\sim \vec{a}_m$ )

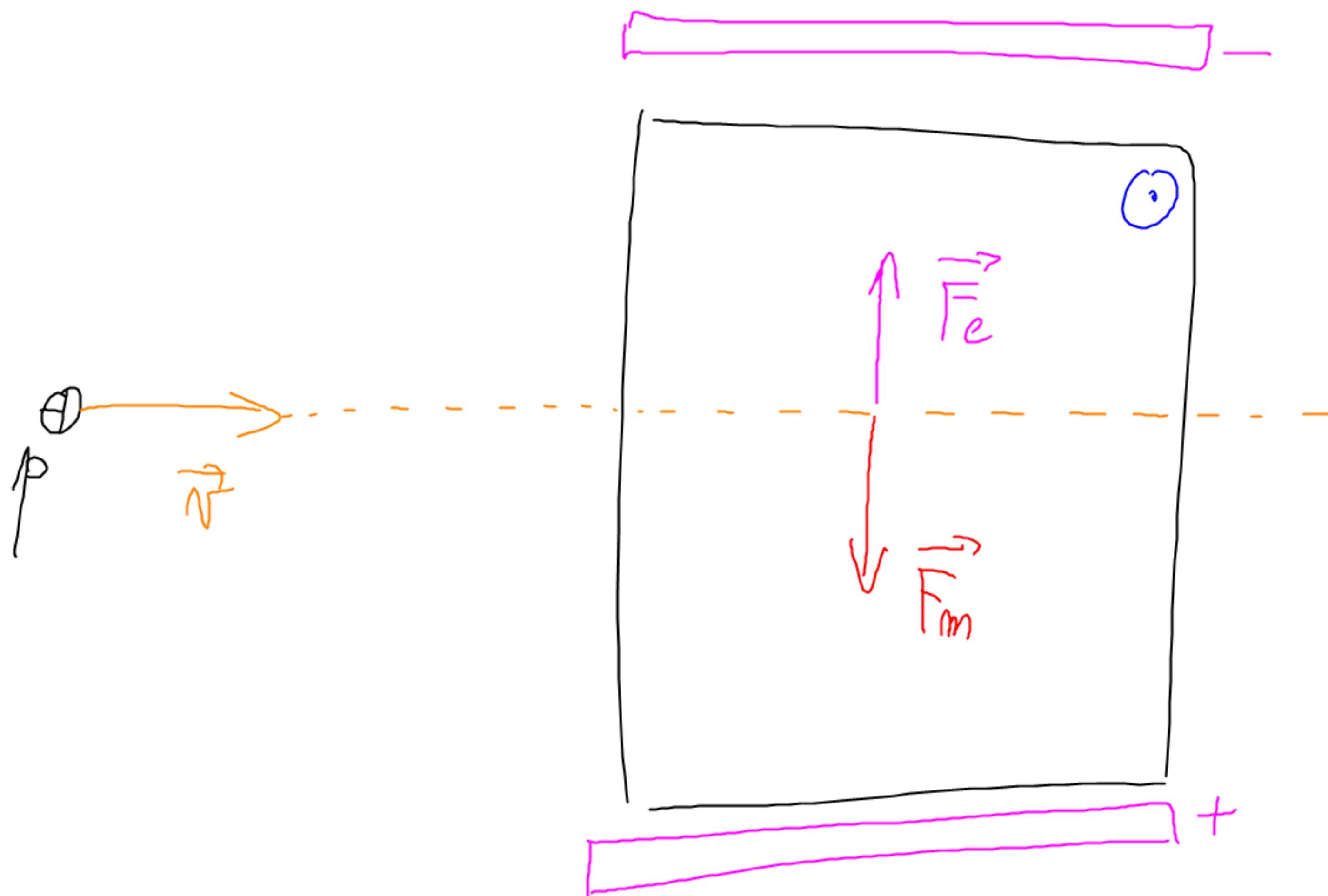
$\Rightarrow$  expe výsledná síla: LORENTZOVA SÍLA  $\vec{F}_L$

$$\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m$$

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

..... relativný' soncl'm  
 $\Downarrow$

afekčný' předpoklad  
 $\vec{v} \perp \vec{B}$



Усл:  $p$  &  $v$   $\perp$  поверхности и  $v$   $\perp$  маг. пол.  $PR$ ! МОЦАРЕ

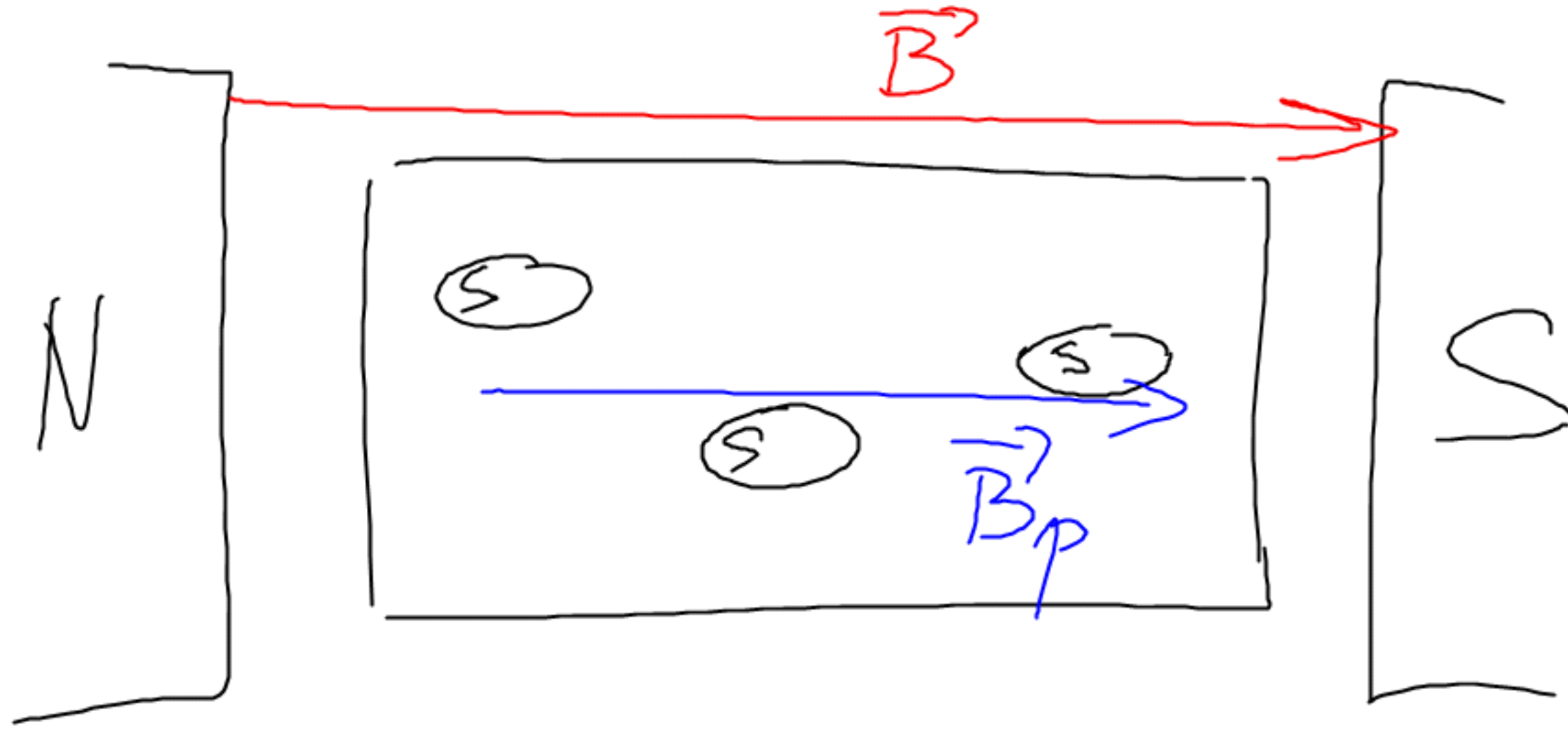
Решение:



# Magnetiches i vlasnost' latel

3 tpy latel:

- DIAMAGNETICHE - m'ne oslablyt' mag. pole
  - $\mu_r < 1$
  - voda, med' (kov)
- PARAMAGNETICHE - m'ne osiblyt' mag. pole
  - $\mu_r > 1$
  - CuSO<sub>4</sub>



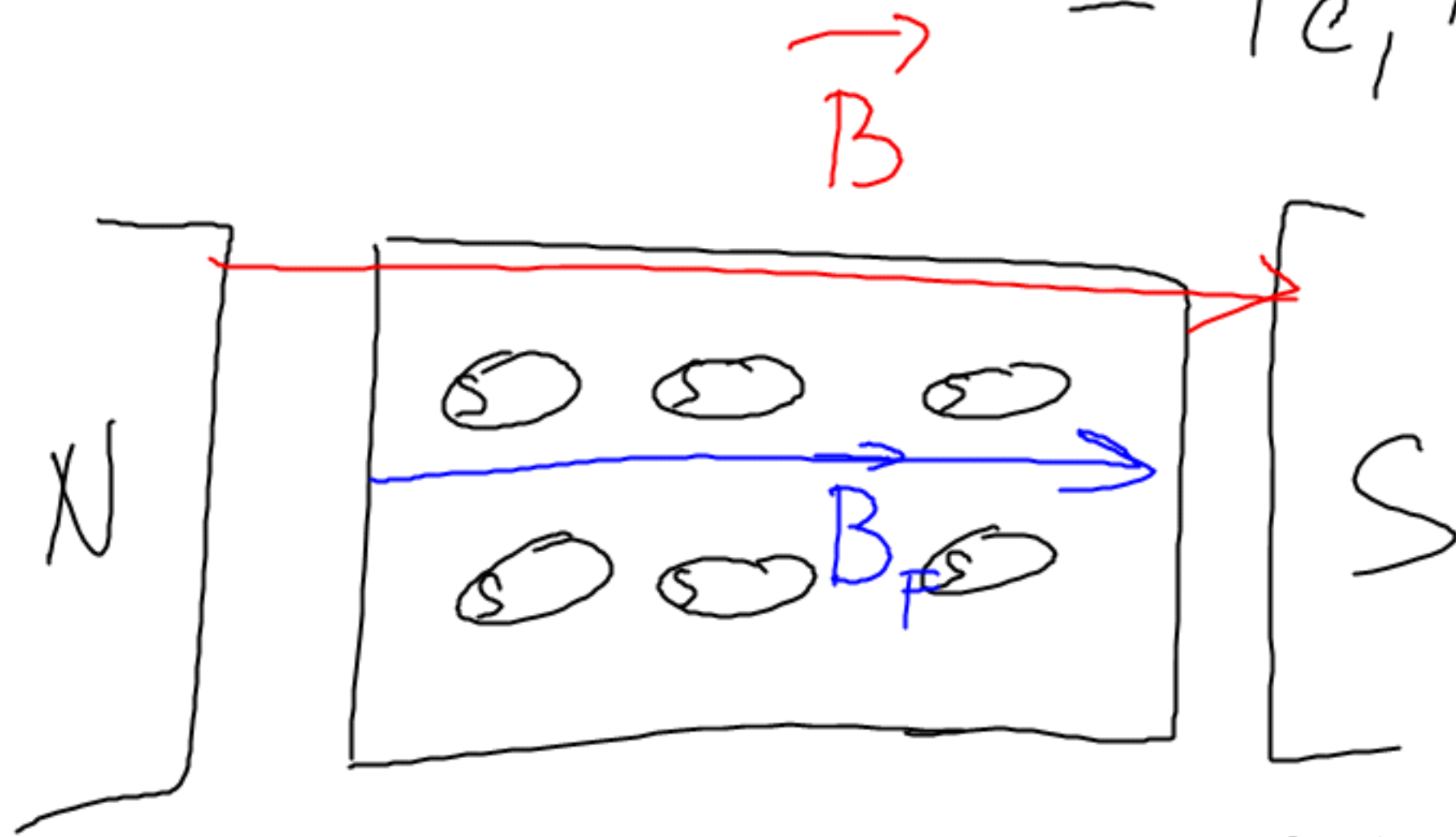
od stranem' vytvorilo pole  $\Rightarrow$  la'ha se vraci'  
do prvotneho stavu

# ◦ FEROMAGNETICKÉ'

— velkým významem  
mg. pole

—  $\mu_n \gg 1$

— Fe, Ni, Co, ...



DOMÉNY — „skupiny částic“

magnetizace drží i po odstranění vnějšího pole

pozadí:

- vyrobta kompasů
- Amagnetorane! šroubovák, mříž
- mg-zařadnam avonlu, filmm



Curierova teplota – při níž se  
rozbitá struktura feromagnetika

$$T_{Fe} = 770^{\circ}C$$

$$T_{Ni} = 350^{\circ}C$$

⋮