



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Tomáš Dolák

**Curieho motory ve výuce fyziky**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Petr Kácovský, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: FMUZV

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne .....

Podpis autora

Děkuji panu RNDr. Petrovi Kácovskému, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a odbornou a pedagogickou pomoc při jejíím zpracování. Děkuji také panu Ing. Ludvíku Němcovi za podnětné diskuze při řešení technických problémů spojených s konstrukcemi motorů. Děkuji také slečnám Heleně Novákové a Monice Němcové za jazykovou korekturu.

Název práce: Curieho motory ve výuce fyziky

Autor: Tomáš Dolák

Katedra: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Petr Kácovský, Ph.D., katedra didaktiky fyziky

Abstrakt: V následujících kapitolách provedeme rešerši literatury týkající se magnetických vlastností látek a fázových přechodů s důrazem na přechod mezi feromagnetickou a paramagnetickou látkou. Následně popíšeme, zkonstruujeme a ověříme funkčnost několika konstrukcí Curieho motorů, což jsou motory fungující na principu změny magnetického chování látek při fázové přeměně způsobené zahřátím látky. Na závěr navrhneme aktivity pro studenty týkající se konstruování Curieho motorů a poznávání fyzikálních jevů pozorovatelných kolem Curieho motorů.

Klíčová slova: Curieho teplota, Curieho stroje, feromagnetismus, výuka fyziky

Title: Curie engines in physics teaching

Author: Tomáš Dolák

Department: Department of Physics Education

Supervisor: RNDr. Petr Kácovský, Ph.D., Department of Physics Education

Abstract: In the following text, we will firstly examine the literature concerning the magnetic properties of materials and their phase transitions. In particular, we will focus on the transition from ferromagnetic to paramagnetic phase. Secondly, we will characterise, construct and assess the functionality of several models of Curie-point heat engines, whose operation is based on the change of substances' magnetic properties upon heating. Finally, we will suggest on-topic student activities focused on the construction of Curie-point heat engines, as well as the examination of the occurring physical phenomena.

Keywords: Curie temperature, Curie-point heat engines, ferromagnetism, physics teaching and learning

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Teorie</b>	<b>3</b>
1.1 Popis magnetického pole . . . . .	3
1.2 Stacionární magnetické pole . . . . .	4
1.3 Magnetické vlastnosti látek . . . . .	6
1.3.1 Diamagnetické látky . . . . .	6
1.3.2 Paramagnetické látky . . . . .	7
1.3.3 Feromagnetické látky . . . . .	8
1.4 Fázové přechody . . . . .	11
<b>2 Curieho stroje</b>	<b>13</b>
2.1 Curieho motory kmitavé . . . . .	13
2.2 Curieho motory otáčivé . . . . .	17
<b>3 Curieho motory ve výuce fyziky na střední škole</b>	<b>21</b>
3.1 Demonstrace fyzikálních jevů . . . . .	21
3.2 Konstrukční problémy . . . . .	21
3.3 Kvantitativní úlohy . . . . .	22
3.4 Kvalitativní úlohy . . . . .	23
3.5 Bezpečnost práce . . . . .	24
<b>Závěr</b>	<b>25</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>26</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>29</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>30</b>
<b>A Přílohy</b>	<b>31</b>
A.1 Příloha 1: Konstrukce I-III . . . . .	31
A.2 Příloha 2: Konstrukce IV-V . . . . .	39

# Úvod

Z pohledu magnetických vlastností mohou látky být, mimo jiných, feromagnetické a paramagnetické. Feromagnetické látky změny při dosažení určité teploty – Curieho teploty – své vlastnosti a chovají se jako paramagnetické. Tento fázový přechod je příkladem fázového přechodu druhého druhu.

Takový fázový přechod z feromagnetické fáze na paramagnetickou fázi lze využít při konstrukci motorů, které se nazývají Curieho, dle Pierre Curie (viz obr. 1). Tyto motory mají malý výkon i účinnost, nehodí se proto pro průmyslové využití, ale jsou zajímavé pro výuku fyziky na středních školách, neboť se na nich dají demonstrovat zajímavé fyzikální jevy, jako například fázový přechod druhého druhu, moment síly či chování feromagnetické a paramagnetické látky. Při konstruování takových motorů mohou žáci řešit mnoho konstrukčních problémů, například centrování a vyvažování. Při konstruování a demonstraci fungujícího Curieho motoru lze posilovat fyzikální myšlení studentů a v souvislosti s těmito motory mohou studenti počítat některé úlohy. Náměty na takové a podobné aktivity se studenty nabízí tato práce.



Obrázek 1: Pierre Curie [1]

# 1. Teorie

## 1.1 Popis magnetického pole

V okolí vodičů, jimiž protéká elektrický proud, nebo v okolí permanentních magnetů existuje magnetické pole. Toto pole silově působí na náboj, který je vůči magnetickému poli v pohybu. Magnetické pole má směr a velikost, jedná se tedy o vektorové pole.

K popisu magnetického pole nám slouží více vektorů, k tomu prvnímu se můžeme dostat následovně: [2] „Uvažujme nejdříve částici malých rozměrů nesoucí náboj  $q$ , který budeme považovat za bodový náboj. ... V případě, že elektrické pole je v daném místě nulové, působí na částici jen magnetická síla, která je dána vztahem

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (1.1)$$

Ve vztahu (1.1) je  $\vec{v}$  vektorem rychlosti částice a  $\vec{B}$  vektorem magnetické indukce. Tímto vztahem získáváme definici  $\vec{B}$ .“

Často je třeba se zabývat tokem vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$  plochou. Jelikož v různých částech plochy nemusí být tok stejný, je dobré danou plochu rozdělit na infinitesimální plošky  $dS$  a určovat tok každou z těchto plošek zvlášť. Takový tok označíme  $\Phi$  a je určen následujícím vztahem:

$$d\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (1.2)$$

kde  $d\vec{S}$  je orientovaná ploška o velikosti  $dS$  a směru kladné normály  $\vec{n}$ .

Na znázornění vektorového pole  $\vec{B}$  se používá magnetických indukčních čar. Jejich tečny v každém bodě udávají směr vektoru  $\vec{B}$ . Z vlastností  $\vec{B}$  víme, že tyto magnetické indukční čáry jsou spojitě a uzavřené, což znamená, že celkový tok libovolnou uzavřenou plochou  $S$  je nulový. Tuto úvahu lze matematicky zapsat jako:

$$\oint_S d\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (1.3)$$

Ze vztahu (1.3) lze pomocí Gaussovy-Ostrogradského věty přejít k následujícímu vyjádření:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (1.4)$$

což je jedna ze čtyř Maxwellových rovnic elektromagnetického pole.

Pro popis magnetického pole dále používáme vektor magnetické intenzity  $\vec{H}$ . Pro tento vektor platí ve vakuu následující vztah:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (1.5)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua. Pokud nejsme ve vakuu, je vztah mezi magnetickou indukcí a magnetickou intenzitou složitější. Za předpokladu, že jsme v látce, kde je magnetická indukce přímo úměrná magnetické intenzitě, lze použít tento vztah:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1.6)$$

kde  $\mu$  je permeabilita daného prostředí, která je dána součinem permeability vakua  $\mu_0$  a relativní permeability  $\mu_r$ , specifické pro každou látku.

V mnoha látkách nelze považovat magnetickou indukci přímo úměrnou magnetické intenzitě s dostatečnou přesností. Pro popis těchto látek se používají dva vektory, vektor magnetické polarizace  $\vec{P}$  a zejména vektor magnetizace  $\vec{M}$ . Oba vektory jsou spojeny vztahem

$$\vec{M} = \frac{\vec{P}}{\mu_0}, \quad (1.7)$$

a s vektorem magnetické indukce jsou svázány následujícím vztahem [3]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}). \quad (1.8)$$

Nebude-li řečeno jinak, budeme v kapitole 1.2 dále pracovat ve vakuu.

Jednotka magnetické indukce je  $[B]=\text{T}$ , magnetické intenzity  $[H]=\text{A/m}$ , permeability vakua  $[\mu_0]=\text{Tm/A}$  a magnetizace  $[M]=\text{A/m}$ .

## 1.2 Stacionární magnetické pole

Stacionární magnetické pole je takové magnetické pole, které je v čase neměnné. Jak jsme již zmínili v kap. 1.1, magnetické pole souvisí s elektrickým polem. Magnetické pole je možné vytvořit volnými a vázanými proudy. (Je možné se setkat s terminologií přístupné a nepřístupné proudy.) Mezi volné proudy patří proud kondukční (někdy též vodivý), konvenční (způsobený pohybem makroskopických veličin, které unášejí při svém pohybu elektricky nabitě částice; např. pohyb ocelové kuličky, která má na svém povrchu nějaký elektrický náboj) a posuvný (součet polarizačního a Maxwellova proudu) [2]. Vázané proudy jsou elementárními proudy v látce.

Magnetické pole vyvolané volnými proudy  $I$  a vázanými proudy  $I_i$  procházejícími nějakou uzavřenou křivkou  $L$  je charakterizováno vektorem  $\vec{B}$  magnetické indukce a vztah mezi veličinami je následující [4]:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(I + I_i). \quad (1.9)$$

Vektor magnetické intenzity  $\vec{H}$  charakterizuje magnetické pole vyvolané jen volnými proudy  $I$  dle vztahu [4]:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I. \quad (1.10)$$

Tyto vztahy (1.9) a (1.10) nám také dávají odpověď na otázku, jak rozlišit magnetickou intenzitu a magnetickou indukci v libovolné látce. Jsme-li ve vakuu, nemáme vázané proudy a pracujeme jen s proudy volnými.

Příklad určení velikosti intenzity provedeme u solenoidu, neboť ten je vhodný pro tvorbu elektromagnetů. Pro solenoid platí, že velikost magnetické intenzity  $|\vec{H}|$  je přímo úměrná počtu závitů solenoidu  $N$  a protékajícímu proudu  $I$  a nepřímo úměrná délce solenoidu  $l$ , což lze vyjádřit jako:

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (1.11)$$



Volné proudy  $I$  nemusejí být všude stejné, je proto výhodné využít vyjádření celkového proudu pomocí plochy  $S$  a proudové hustoty  $\vec{j}$  následovně:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (1.12)$$

Nyní využijme vztah (1.10) a získáme:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}, \quad (1.13)$$

což lze s použitím Stokesovy věty upravit na:

$$\int_S (\text{rot} \vec{H} - \vec{j}) \cdot d\vec{S} = 0, \quad (1.14)$$

z čehož plyne další z Maxwellových rovnic, tentokrát speciální případ bez tzv. Maxwellova posuvného proudu:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}. \quad (1.15)$$

Budeme-li ve vakuu, lze spojit vztah (1.15) a (1.5) takto:

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}. \quad (1.16)$$

Vztah (1.9) nám ukazuje implicitně, jaká je magnetická indukce způsobená proudy. Pokud bychom chtěli mít explicitní vyjádření, vyřešme soustavu (1.4), (1.16).

Zavedeme-li vektorový potenciál  $\vec{A}$  jako:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (1.17)$$

máme díky vektorové identitě ( $\text{div}(\text{rot} \vec{A}) = 0$ ) splněnu rovnici (1.4). Další vektorová identita ( $\text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = \text{grad} \text{div} \vec{A} - \Delta \vec{A}$ ) nám pomůže získat explicitní vyjádření  $\vec{B}$ .

Z vektorové identity a z (1.16) získáme:

$$\text{grad} \text{div} \vec{A} - \Delta \vec{A} = \mu_0 \vec{j}. \quad (1.18)$$

Jelikož  $\vec{A}$  není určen jednoznačně, zvolme si podmínku  $\text{div} \vec{A} = 0$  a tím se nám zjednoduší vztah výše na:

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}. \quad (1.19)$$

Řešením této rovnice je:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} dV', \quad (1.20)$$

kde nečárkovaný systém označuje místo, ve kterém vyšetřujeme vektorový potenciál, a čárkovaný systém označuje příspěvky okolí.

Abychom získali magnetickou indukci  $\vec{B}$ , je potřeba nyní sloučit vztahy (1.17) a (1.20):

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{rot} \left( \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} dV' \right), \quad (1.21)$$

a vyřešením této rovnice získáme Biotův-Savartův vztah:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^2} dV'. \quad (1.22)$$

Tím jsme získali explicitní vyjádření pro magnetickou indukci  $\vec{B}$  v místě určeném vektorem  $\vec{r}$ .

## 1.3 Magnetické vlastnosti látek

Magnetické pole je ovlivněno přítomností látky. Ve vakuu jsme neměli vázané proudy, v látce již obsažené jsou. Jak jsme zmínili v kapitole 1.1, nacházíme-li se v látce, je vztah mezi magnetickou indukcí  $\vec{B}$  a magnetickou intenzitou  $\vec{H}$  složitější. Z tohoto pohledu lze látky rozdělit na tzv. magneticky měkké a magneticky tvrdé látky. U magneticky měkkých látek lze vyjádřit závislost magnetizace  $\vec{M}$  na magnetické intenzitě  $\vec{H}$  pomocí přímé úměry. Konstanta této úměrnosti se nazývá magnetická susceptibilita a značí se  $\chi_m$ . Využijeme-li tuto konstantu a vztah (1.8), získáme následující:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi_m\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H}. \quad (1.23)$$

Porovnáním vztahu (1.6) a (1.23) vidíme, že  $1 + \chi_m = \mu_r$ . Rozlišujeme tři druhy magneticky měkkých látek – ty, které mají  $\mu_r < 1$  ( $\chi_m < 0$ ), ty, které mají  $\mu_r > 1$  ( $\chi_m > 0$ ), kde u obou navíc platí  $\mu_r \approx 1$  ( $\chi_m \approx 0$ ), a ty, kde platí  $\mu_r \gg 1$  ( $\chi_m \gg 0$ ). Nejčastěji se do dělení látek z pohledu magnetických vlastností k posledně zmiňovaným látkám přidávají i magneticky tvrdé látky, které nemají lineární závislost magnetizace na magnetické intenzitě.

Podíváme-li se na výše zmíněné tři typy látek z pohledu jejich magnetických momentů, lze při prvním přiblížení považovat elektrony pohybující se kolem jádra za elementární kruhové proudy, které vytvoří magnetický dipól. Směr momentu magnetického dipólu je nahodilý, pokud není vložen do vnějšího magnetického pole. Ve vnějším magnetickém poli dojde k uspořádání těchto momentů a tím k ovlivnění magnetického pole.

Uvnitř homogenně zmagnetované látky se účinky jednotlivých elementárních kruhových proudů vyruší, zůstanou tedy jen účinky na obvodu řezu. Tyto proudy budeme nazývat ekvivalentními povrchovými proudy. V případě nehomogenně zmagnetované látky dojde uvnitř látky ke vzniku proudu. Z principu superpozice a výše zmíněného lze vyjádřit magnetické pole látky jako plošné a objemové proudy, které se souhrnně označují jako magnetizační proudy [2].

Nyní se podíváme na látky dle jejich rozdělení na diamagnetické ( $\mu_r < 1$ ), paramagnetické ( $\mu_r > 1$ ) a feromagnetické, kde se budeme věnovat zejména látkám feromagnetickým, z důvodu povahy této práce.

### 1.3.1 Diamagnetické látky

Z mikroskopického pohledu nemají diamagnetické látky vlastní magnetický moment, protože se jednotlivé spiny subatomárních částic navzájem vyruší. Po vložení do magnetického pole dojde k podobnému efektu jako je Faradayův zákon elektromagnetické indukce a atomy látky si vytvoří vlastní magnetické momenty, které se budou bránit změně magnetického pole, látka tedy bude vypuzována z magnetického pole [8].

Z výše uvedeného plyne, že diamagnetické látky mají hodnotu magnetické susceptibility zápornou a blízkou nule:

$$\chi_m = -10^{-6} \sim -10^{-2}. \quad (1.24)$$

V běžných podmínkách je magnetická susceptibilita nezávislá na hodnotě magnetické intenzity a na teplotě [5].

Diamagnetické látky jsou vypuzovány magnetickým polem, lze z nich proto vytvořit zařízení sloužící k levitaci. Takovéto zařízení je tvořeno vhodným magnetickým polem a diamagnetickou látkou, např. tuhou [6]. Mezi další diamagnetické látky patří inertní plyny, voda, kuchyňská sůl, měď, stříbro, zlato a další (viz tab. 1.1), [7].

látká	magnetická susceptibilita $\cdot 10^{-6}$
Argon	-0,011
Benzen	-8,0
Bismut	-170
Dusík	-0,007
Kadmium	-20
Měď	-8,9
Oxid dusný	-0,01
Oxid dusnatý	-17
Rtuť	-31
Síra	-12
Stříbro	-26
Voda	-9
Vodík	-0,002
Zinek	-14
Zlato	-37

Tabulka 1.1: Diamagnetické látky

### 1.3.2 Paramagnetické látky

Z mikroskopického pohledu mají atomy v paramagnetické látce vnitřní magnetické momenty, neboť se všechny spiny jednotlivých subatomárních částic navzájem nevyruší, avšak interakce mezi nimi jsou velmi slabé. Jednotlivé vnitřní magnetické momenty atomů jsou v látce uspořádány náhodně, vlivem tepelného chaotického pohybu, a tedy celkový magnetický moment látky je nulový. Po vložení do magnetického pole dojde podobně jako u diamagnetických látek k vytvoření magnetických momentů, které se budou odpuzovat od magnetického pole, navíc ale vlastní magnetické momenty, které v látce jsou, se budou přitahovat a přetáčet do směru pole. Druhý zmíněný jev je dominantní, a proto látka bude slabě přitahována do magnetického pole [8].

Z předchozího je vidět, že paramagnetické látky mají hodnotu magnetické susceptibility kladnou a blízkou nule:

$$\chi_m = 10^{-6} \sim 10^0. \quad (1.25)$$

K přetáčení magnetických momentů atomů bude docházet z důvodu minimalizace Zeemanovy energie, což je potenciální energie způsobená magnetickou polarizací [5]. Proti tomuto jevu pořád působí podobný jev jako u diamagnetismu a také tepelný chaotický pohyb, který vlastní magnetické momenty atomů natáčí náhodnými směry. Z této úvahy je zřejmé, proč magnetická susceptibilita látky závisí na teplotě - protože energie tepelného chaotického pohybu je na ní závislá.

Za běžných podmínek je magnetická susceptibilita nezávislá na magnetické intenzitě, ale závisí na teplotě, a to dle Curie-Weissova zákona [5]:

$$\chi_m = \frac{C}{T - \Theta_C}, \quad (1.26)$$

kde  $C$  je Curieho konstanta specifická pro každý materiál,  $\Theta_C$  je paramagnetická Curieho teplota a  $T$  je teplota paramagnetika [9].

Mezi paramagnetické látky patří např. hliník, kyslík, vzduch a další (viz tab. 1.2), [7].

látka	magnetická susceptibilita $\cdot 10^{-6}$
Baryum	7,1
Cín	2,3
Hliník	22
Chrom	320
Iridium	40
Kyslík	1,85
Lithium	3,4
Mangan	810
Olovo	0,82
Platina	280
Tantal	180
Vápník	22
Vzduch	0,38

Tabulka 1.2: Paramagnetické látky

### 1.3.3 Feromagnetické látky

Feromagnetické látky mají nezanedbatelné silové působení mezi jednotlivými magnetickými momenty částic, čímž se odlišují od paramagnetik. Vzájemné působení nositelů magnetických momentů způsobují výměnné síly, které jsou krátkodosahové, souhlasně paralelně orientují magnetické momenty sousedních atomů a jsou způsobeny jevy kvantové mechaniky, které nemají klasickou analogii [10], neboť zde dominují magnetické spinové momenty.

Výměnné síly je možné popsat jako důsledek Pauliho vylučovacího principu. Tento princip tvrdí, že pokud se nacházejí dva elektrony ve stejném stavu, musí mít opačný spin. Pokud jsou blízko sebe dva elektrony se stejným spinem, snaží se přetočit si spin do opačné pozice. Opačné pozice spinů jsou výhodné energeticky – dva elektrony se stejným spinem poblíž sebe mají větší energii, než dva elektrony poblíž sebe s opačným spinem. Na snahu elektronů přetočit si svůj magnetický moment se dá nahlížet jako na působení síly, která magnetický moment natáčí a této síle se říká výměnná síla. Z této úvahy je patrné, že taková síla je krátkodosahová [8].

Z periodické soustavy prvků je vidět, že tři nejběžnější zástupci feromagnetických látek (Fe, Ni, Co) mají podobnou elektronovou strukturu – plně zaplněný 4s orbital a částečně zaplněný 3d orbital. Právě tato neúplná zaplněnost  $d$  orbitalu způsobuje, že je pro látku výhodné mít shodně natočené sousední magnetické

momenty, narozdíl od paramagnetických látek, a tím se vytváří v látce skupiny stejně orientovaných magnetických momentů, tzv. domén, které se vlivem vnějšího magnetického pole začnou přeorientovávat. Ve feromagnetických látkách následně uvažujeme celé domény a ne jednotlivé magnetické momenty. Mezi dvěma doménami vzniká hranice, již nazýváme Blochovou stěnou.[10]

Pro modelování chování feromagnetických látek a pro přiblížení pochopení tohoto jevu jsou vytvořeny modely – Isingův model je tím nejjednodušším, kdy dovolujeme magnetickým momentům nabývat jen dvou orientací. Zobecněným modelem je tzv. Pottsův model, kde již dovolujeme orientaci ve více směrech a v případě spojitě se měnícího úhlu orientace máme ve 2D prostoru XY model a ve 3D prostoru Heisenbergův model. [11], [12] Naše další úvahy pracují s Pottsovým modelem.

Doménová struktura látky před prvotní magnetizací je bez vnějšího magnetického pole uspořádána tak, aby odpovídala minimu celkové energie vzorku. Doménová struktura je závislá na své historii – na předešlých magnetizačních dějích. Dále závisí na teplotě a intenzitě vnějšího magnetického pole. [10]

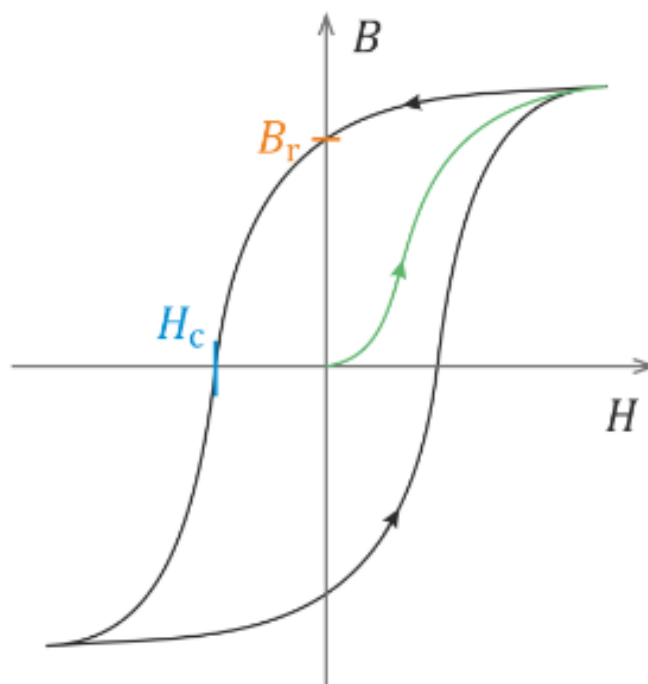
Při vložení do vnějšího magnetického pole se začnou rozšiřovat oblasti domén, které jsou shodně orientované jako vnější magnetické pole a začnou ubývat domény, které jsou orientované jiným směrem. Tento proces není hladký, ale vzhledem k tomu, že se může přetočit nejméně jeden magnetický moment, tak se jedná o skokové změny. Jakmile dojde k posunutí či odstranění Blochovy stěny, sníží se tím energie látky, a tudíž se rychle začne šířit vlna změn magnetizace. Se změnou magnetizace se naindukují vířivé proudy, které látku zahřejí a také dojde k deformacím látky vlivem snížení energie jednotlivých atomů. Tímto se atomy dostanou do těsnějšího elektronového uspořádání. Toto vysvětluje, proč je doménová struktura závislá na své historii – energie pro změny je částečně spotřebována zahřátím látky a částečně deformací látky [8].

Z výše uvedeného vyplývá, že feromagnetické látky silně ovlivňují magnetické pole, tedy mají vysokou hodnotu susceptibility:

$$\chi_m = 10 \sim 10^7. \quad (1.27)$$

Magnetizace a magnetická polarizace feromagnetických látek závisí nelineárně na intenzitě magnetického pole a na historii magnetizace. Pro znázornění průběhů magnetizace se používají magnetizační křivky, což jsou grafy závislosti  $P(H)$ ,  $M(H)$  či  $B(H)$ . V případě, že mluvíme o cyklickém magnetování látky, používáme pojem hysterézní smyčka, což je grafické znázornění magnetizačních křivek pro cyklické magnetování (viz obr.1.1) [13].

V úvodu jsme psali, že momenty magnetických domén jsou bez přítomnosti vnějšího pole nahodilé. Pokud budeme mít látku v magnetickém poli, bude docházet k přetáčení těchto momentů do směru pole. Na obr. 1.1 lze vidět zelenou křivku, která graficky znázorňuje toto přetáčení magnetických momentů při navyšování intenzity vnějšího magnetického pole při prvotní magnetizaci. Ale vzhledem ke konečnému počtu těchto dipólů se při zvyšování intenzity vnějšího pole dostaneme do stavu, kdy budou všechny dipólové magnetické momenty natočeny ve směru pole a hodnota magnetické indukce je tedy již lineárně závislá na hodnotě intenzity pole, protože látka již nemůže přispívat svou magnetizací a příspěvek vakua je lineární. Tomuto stavu se říká saturace. (Na obrázku je tento jev špatně vidět, protože oproti hodnotám susceptibilit ve feromagnetických



Obrázek 1.1: Hysterézní smyčka feromagnetika [3]

materiálech je susceptibilita vakua velmi malá a tudíž se na obrázku jeví lineární závislost jako konstantní.) Pokud po dosažení saturace začneme snižovat intenzitu, nebudeme se pohybovat po téže křivce, ale po černé. I když vnější magnetické pole bude mít nulovou intenzitu, látka bude mít nenulovou magnetickou indukci, které se říká remanentní ( $B_r$ ). Hodnota intenzity potřebná pro odmagnetování látky se nazývá koercitivita ( $H_c$ ). Je-li tato hodnota velká, mluvíme o magneticky tvrdých materiálech, v opačném případě mluvíme o magneticky měkkých materiálech. Přibližná hranice je v praxi okolo 100 A/m.

Magneticky tvrdé materiály mohou sloužit jako permanentní magnety, zatímco magneticky měkké materiály jsou vhodné jako jádra do elektromagnetů. Sílu permanentních magnetů určuje hodnota remanentní indukce, zatímco odolnost proti přemagnetování určuje koercitivita daných magnetů. Neodymové magnety mají hodnotu remanentní indukce přibližně 1 – 1,5 T a koercitivitu přibližně 900 – 1000 kA/m [16],[15].

Při zvyšování teploty je vliv tepelného pohybu větší a dochází k rozpadům domén. Existuje teplotní hranice, které se říká Curieho teplota  $T_C$ , nad níž se látka chová jako paramagnetická (viz tab. 1.3).

látka	Curieho teplota (°C)
Kobalt (Co)	1075
Železo (Fe)	780
Nikl (Ni)	365
Gadolinium (Gd)	16

Tabulka 1.3: Curieho teploty jednotlivých materiálů [19]

Chování feromagnetických látek se dá ve škole velmi snadno ukázat tak, že feromagnetickou látku přichytíme k nějakému magnetu. Pokud chceme demonstrovat Curieho teplotu, lze využít Curieho stroje, viz dále.

Z prvků jsou feromagnetickými látkami následující: Fe, Ni, Co, Gd. Dále známe i jiné feromagnetické látky, a to například Heuslerovy slitiny [10], které neobsahují žádný z výše uvedených prvků. Mezi Heuslerovy slitiny patří mimo jiné i CuMnSb, CuMnAs a CuMnP. CuMnAs je materiál pravděpodobně použitelný pro aplikace ve spintronice [20], oboru elektroniky, která využívá spin elektronu pro přenos informací [21].

## Permanentní magnety

Za definici permanentního magnetu lze brát: „Permanentní magnet je objekt, který tvoří ve svém okolí magnetické pole. K jeho vytvoření nepotřebuje žádné vnější vlivy. Objevují se přirozeně v některých nerostech, ale dají se i vyrobit.“ [14] Běžně dostupné magnety jsou tedy látky, které mají vysokou remanenci a koercitivitu. Vyrábí se smícháním vhodných prášků, lisováním do formy a spékáním. Následně dochází k magnetizaci.

**I Feritové magnety** Feritové magnety jsou levné, běžně dostupné a mají relativně velkou škálu pracovní teploty. Jako hranice rozsahu pracovních teplot se udává  $-40\text{ °C}$  jako dolní hranice a  $+250\text{ °C}$  jako hranice horní. Jedná se o sloučeniny železa a boru [15].

**II Neodymové magnety** Neodymové magnety jsou slitiny  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  a jejich obrovskou výhodou je jejich síla. Velkými nevýhodami jsou nízký rozsah pracovních teplot (od  $-150\text{ °C}$  do  $+130\text{ °C}$ ) a křehkost. Curieho teplota neodymových magnetů je  $310\text{ °C}$  [16].

**III Samariové magnety** Samariové magnety se skládají ze samaria a kobaltu. Jsou tvrdé a křehké. Jejich maximální pracovní teplota je  $300\text{ °C}$ .

## 1.4 Fázové přechody

V případě zahřívání látky feromagnetické dojde při překročení Curieho teploty ke změně a látka se začne chovat jako paramagnetická. Postupným snížením teploty pod Curieho teplotu opět dojde ke změně chování látky a bude se znovu chovat jako feromagnetická. Jelikož se jedná o dvě různé fáze téže látky, dochází při výše zmíněném ději k tzv. fázovému přechodu [17].

Fázové přechody lze klasifikovat podle Ehrenfesta na fázové přechody prvního druhu a fázové přechody druhého druhu (též spojitě fázové přechody). Chemický potenciál ( $\mu_i$ ) je energie spojená s existencí nějaké látky. Při fázovém přechodu jsou chemické potenciály v rovnováze [18]. Pokud jsou jejich první parciální derivace nespojitě, mluvíme o fázovém přechodu prvního druhu:

$$\mu_A = \mu_B, \left( \frac{\partial \mu_A}{\partial T} \right)_{p,c_i} \neq \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial T} \right)_{p,c_i} \vee \left( \frac{\partial \mu_A}{\partial p} \right)_{T,c_i} \neq \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial p} \right)_{T,c_i}, \quad (1.28)$$

kde  $c_i$  značí, že přechod je za konstantního počtu částic. Pokud jsou spojitě, mluvíme o fázovém přechodu druhého druhu:

$$\mu_A = \mu_B, \left( \frac{\partial \mu_A}{\partial T} \right)_{p, c_i} = \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial T} \right)_{p, c_i}, \left( \frac{\partial \mu_A}{\partial p} \right)_{T, c_i} = \left( \frac{\partial \mu_B}{\partial p} \right)_{T, c_i}. \quad (1.29)$$

Mezi fázové přechody prvního druhu patří skupenské přeměny. Příkladem fázového přechodu druhého druhu je přechod feromagnetika na paramagnetikum při přechodu přes Curieho teplotu. U spojitěho fázového přechodu nemusí platit rovnost druhých derivací, tedy může nastat:

$$\left( \frac{\partial^2 \mu_A}{\partial T^2} \right)_{p, c_i} \neq \left( \frac{\partial^2 \mu_B}{\partial T^2} \right)_{p, c_i}, \left( \frac{\partial^2 \mu_A}{\partial p^2} \right)_{T, c_i} \neq \left( \frac{\partial^2 \mu_B}{\partial p^2} \right)_{T, c_i}, \left( \frac{\partial^2 \mu_A}{\partial p \partial T} \right)_{c_i} \neq \left( \frac{\partial^2 \mu_B}{\partial p \partial T} \right)_{c_i}. \quad (1.30)$$

Toto vyjádření se používá běžně pro plynné systémy, ale nezahrnuje veličiny, které jsou typické pro magneticky aktivní látky. V nich je objemová hustota volné energie  $f$  určena následovně [22]:

$$f = u - Ts - \mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H}, \quad (1.31)$$

a její diferenciál při konstantním počtu částic pak je:

$$df = -s dT + \frac{p}{\rho} d\rho - \mu_0 \vec{M} \cdot d\vec{H}, \quad (1.32)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota,  $s$  je hustota entropie,  $\vec{M}$  je vektor magnetizace,  $\vec{H}$  je vektor magnetické intenzity,  $p$  je tlak a  $\rho$  je hustota. V tomto vztahu jsme využili konstantnosti počtu částic, tedy lze psát  $\rho V = M$ ,  $\rho dV + V d\rho = 0$ ,  $-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$ .

Z (1.32) vidíme, že můžeme určit magnetizaci jako  $\vec{M} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial f}{\partial \vec{H}}$  a tato je spojitá, proto se jedná o přechod druhého druhu.

Magnetickou susceptibilitu lokálně lze získat jako parciální derivaci magnetizace podle magnetické intenzity  $\chi(T) = \frac{\partial M(H, T)}{\partial H}$  a jelikož je magnetizace vyjádřena jako parciální derivace volné energie, lze magnetickou susceptibilitu vyjádřit následovně:

$$\chi_{kl} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 f}{\partial H_k \partial H_l}, \quad (1.33)$$

kde  $k, l$  vyjadřují složky vektoru magnetické intenzity. Z toho je také vidět, že v obecném případě je magnetická susceptibilita tenzor [22]. Jelikož je magnetická susceptibilita určena druhou derivací volné energie a přechod z feromagnetika na paramagnetikum je fázovým přechodem druhého druhu, je při přechodu nespojitá změna magnetické susceptibility.

Z makroskopického pohledu při zahřívání feromagnetika, které je umístěno v magnetickém poli, pozorujeme zánik přitahování látky do magnetického pole a látka se chová jako by magnetickým polem ovlivněna nebyla – což je způsobeno tím, že paramagnetické látky mají velmi nízkou susceptibilitu. Během zahřívání lze někdy sledovat deformaci látky, to je způsobeno teplotní roztažností. Při fázovém přechodu není patrná žádná další deformace, což je ve shodě s popisem teorie výše. Deformace, která by měla být způsobena přetáčením domén, je okem nepozorovatelná.

Poté, co začneme látku chladit a dojde opět k fázovému přechodu, se látka v jednom momentě rychle přitáhne směrem do největšího magnetického pole. Pokud chladíme až na pokojovou teplotu, lze znovu pozorovat deformace látky.



## 2. Curieho stroje

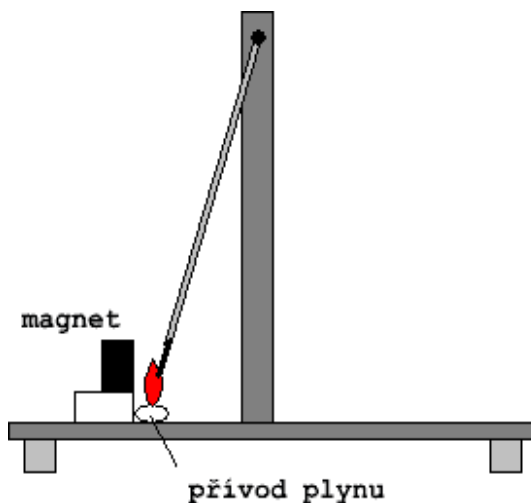
Jak už víme, Curieho teplota je teplotní hranicí pro zachování feromagnetické látky. Po jejím překročení již látka není feromagnetickou a stává se paramagnetickou. Po překročení této teploty dochází k narušení doménové struktury látky. Po ochlazení pod Curieho teplotu se látka stává opět feromagnetickou, nemusí však nutně být ve stejném stavu jako před ohřátím, tj. může mít jiné či jinak natočené domény, neboť doménová struktura je závislá na předchozích procesech v látce a nově vznikající magnetické domény ve feromagnetiku jsou již při vzniku ovlivněny vnějším magnetickým polem.

Z výše uvedeného je patrné, že lze vyrobit nějaký stroj, který bude konat otáčivý či kmitavý pohyb. Pro tuto výrobu bude potřebné mít feromagnetikum, zdroj magnetického pole a zdroj ohřevu feromagnetika. Rozhodli jsme se použít dělení na Curieho motory kmitavé a Curieho motory otáčivé. Níže následuje několik konstrukcí popsanych v literatuře a autorem této práce zkonstruovaných. Zkušenosti popsané níže vycházejí z mé zkušenosti při sestavování daných konstrukcí. Většina z konstrukcí je sestavena a nafočena v domácích podmínkách, vinou omezení přístupu na fakultu z důvodů epidemiologických.

### 2.1 Curieho motory kmitavé

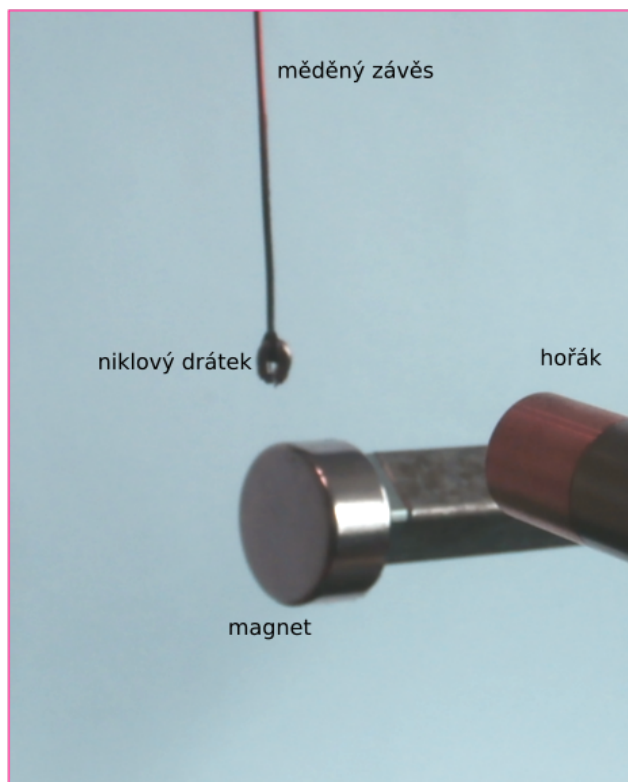
#### Konstrukce I

Tuto konstrukci navrhuje [23], (viz obr. 2.1). Autor navrhuje na stojan zavěsit rameno, jehož konec obsahuje kousek vhodného feromagnetického drátu. Do polohy v rovině kyvu, nepříliš vzdálené od rovnovážné stabilní polohy, umístíme magnet, který bude přitahovat zmíněné feromagnetikum. Zdroj tepla – kahan, svíčka – umístíme pod tuto novou rovnovážnou polohu. Jak se drát ohřeje, dojde ke spojitému fázovému přechodu a kyvadlo se pokusí zaujmout běžnou rovnovážnou polohu svisle dolů. Tím vychladne a dojde opět k fázovému přechodu druhého druhu a drát bude přitahován magnetickým polem.



Obrázek 2.1: Konstrukce I dle [23]

Naše konstrukce vypadala následovně (viz obr. 2.2) a její funkčnost lze vidět ve Sbírce fyzikálních pokusů viz [24].



Obrázek 2.2: Naše konstrukce I

Po sestavení takové konstrukce jsou naše zkušenosti s touto konstrukcí následující:

1. Jako feromagnetikum jsme zkoušeli železný drát, který fungoval při použití plynového kahanu a delším zahřívání. Při použití méně dostupného niklového drátu fungovala konstrukce lépe.
2. Je potřeba použít dostatečně odolný závěs pro železný drátek. V našem případě jsme použili měděný drát o průměru 1 mm. V případě použití slabšího drátu (0,1 mm), kdy by situace lépe odpovídala matematickému kyvadlu, došlo k utavení závěsu. Při používání niklového drátu stačil i měděný drát o průměru 0,1 mm.
3. Feromagnetikum je potřeba mít dostatečně malé, drát o délce 10 mm vytvarovaný do tvaru podkovy nám spolehlivě fungoval, protože při použití většího množství feromagnetika, přibližně 50 mm stočených do klubíčka, se hůře prohřívá a chod není plynulý.
4. V případě použití feritového permanentního magnetu je potřeba vybrat „dostatečně silný“ feromagnet. S běžnými školními feritovými magnety nám

tato konstrukce nefungovala. V případě použití neodymových magnetů je vhodné dbát na chlazení. V našem případě došlo při absenci chlazení magnetu k překročení jeho pracovní teploty a magnet ztratil významnou část své síly. Jako pasivní chlazení se nám osvědčilo použít kovovou desku, na kterou magnet umístíme do potřebné pozice. Tato deska následně odvádí teplo od magnetu.

## Konstrukce II

Nyní okomentujme podobnou konstrukci jako v prvním případě, avšak zde autoři zmenšují rozměry závěsu a plynový kahan nahrazují svíčkou [25], (viz obr. 2.3).

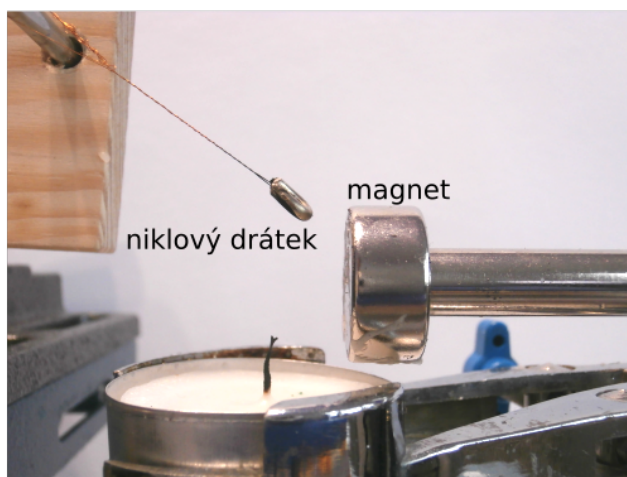


Obrázek 2.3: Konstrukce II dle [25]

Hlavní výhodou této konstrukce je relativní nenáročnost na komponenty, neboť používá obyčejnou čajovou svíčku a celou konstrukci minimalizuje co do velikosti. Tato konstrukce nám fungovala i s použitím niklových drátků malého průměru, které jsou k dostání v potřebách pro kuřáky. Výrazně lepší funkčnost však zajišťuje větší průměr niklového drátu (použili jsme průměr 2 mm) (viz obr. 2.4) a funkčnost takové konstrukce lze vidět ve Sbírce fyzikálních pokusů viz [26].

Naše zkušenosti s podobnou konstrukcí jsou následující:

1. Je problematické udržet magnety z dosahu plamene a zároveň dostatečně blízko pro přitahování niklového drátku.
2. Tření mezi závěsným očkem a tyčkou, na které očko je, je nezanedbatelné. Často se stane, že se místo celého závěsu natočí jen očko z niklového drátku, zatímco rameno je statické. K vyřešení tohoto problému lze použít slabý měděný drát, který tření sníží. My jsme použili drátek o průměru 0,1 mm.
3. S niklovým drátkem o průměru 0,2 a 0,254 mm byly problémy zejména s přitahováním k magnetu. Při použití niklového drátu o průměru 2 mm fungovala konstrukce spolehlivě.
4. Při použití čajové svíčky není vhodné používat konstrukci příliš dlouho, neboť po roztavení veškerého vosku dojde k přitažení plíšku knotu k magnetu a během tohoto procesu mohou odlétávat zapálené části knotu.



Obrázek 2.4: Naše konstrukce II

### Konstrukce III

Tato konstrukce byla sestavena bez předlohy. Z feromagnetického materiálu je vytvořena vidlice, která je zasazena na hrotové ložisko a její pohyb je tedy omezen na kmitání v horizontálním směru (viz obr. 2.5) a funkčnost takové konstrukce lze vidět ve Sbírce fyzikálních zákonů viz [27].



Obrázek 2.5: Naše konstrukce III

Naše zkušenosti s touto konstrukcí jsou následující:

1. Je vhodné použít silný magnet, jehož rozměry jsou malé vzhledem k vzdálenosti vidlic od sebe. U velkého magnetu bylo pole homogenní a vidlička se natáčela mimo plamen do stabilní polohy. Z tohoto důvodu byl použit zmagnetovaný šroub.
2. Konstrukce funguje poměrně spolehlivě i s železným drátem a jednotlivé kmity jsou v porovnání s ostatními konstrukcemi rychlé (doba kmitu se u nás pohybovala kolem 1,5 s).

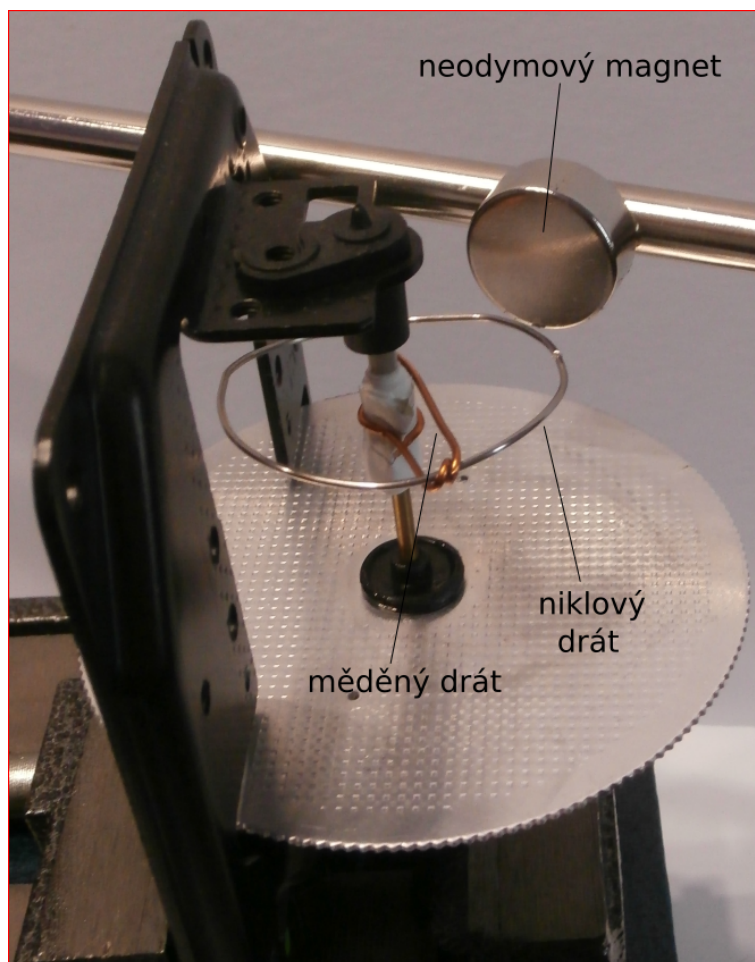
Obecně lze říci, že kmitavý typ motoru je jednodušší na konstrukci a jeho chod je plynulejší, než je tomu u motorů otáčivých. Pro spolehlivou demonstraci ve školním prostředí proto doporučujeme využívat zejména tento typ. Návody na tyto konstrukce jsou publikovány ve Sbírce fyzikálních pokusů [28]. Tyto konstrukce lze také vidět v příloze 1.

## 2.2 Curieho motory otáčivé

### Konstrukce IV

Popíšeme konstrukci, kterou navrhuje [23]. Autor navrhuje mít konstrukci do tvaru „U“, do které vloží kotouč připevněný na hrotových ložiskách. Na obvodu kotouče má být naletováno feromagnetikum. Do blízkosti kousku feromagnetika umístíme magnet a pod tento bod umístíme zdroj ohřevu. Jak se bude feromagnetikum zahřívat, dojde k fázovému přechodu a zahřátá část původního feromagnetika je paramagnetická, tudíž nebude přitahována do magnetického pole tak silně, jako nezahřátá část. Tím dojde k otáčení, přičemž po cestě mimo zdroj ohřevu se látka ochladí a stane se feromagnetickou. Autor doporučuje pro plynulé otáčení použít silný kahan a dobrá hrotová ložiska.

Naše zkušenosti s podobnou konstrukcí, kterou jsme publikovali ve Sbírce fyzikálních pokusů viz [29], jsou níže. Fotografie takové konstrukce je vidět níže (viz obr. 2.6).



Obrázek 2.6: Naše konstrukce IV

1. Na konstrukci je vhodné použít část z analogového třífázového elektroměru, která už má kotouč na hrotových ložiskách. Ke konstrukci je už jen potřeba připevnit feromagnetikum, umístit ji do magnetického pole a ke zdroji tepla.

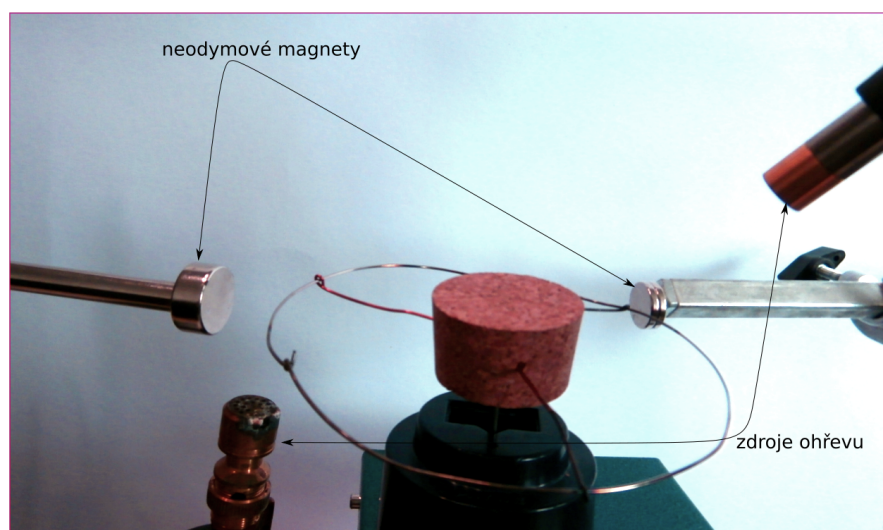
2. Při použití niklového drátu o průměru 2 mm nebyla funkčnost dobrá, ale výrazně se zlepšila při použití niklového drátu o průměru 1 mm. Změnou na menší průměr drátu se teplo hůře přenáší vedením a tedy jednotlivé části lépe chladnou i se zahřívají. Drát má také menší tepelnou kapacitu, tudíž oba procesy probíhají rychleji.
3. Při použití feromagnetika větších rozměrů může být problém s průchodem úzkými částmi konstrukce elektroměru.
4. Při použití malých průměrů niklového drátu (0,2 mm, 0,254 mm) je funkčnost špatná, protože síly působící na drát jsou malé.
5. Feromagnetikum je potřeba dobře vycentrovat, neboť jinak nedochází k otáčení motoru, ale k jeho kmitání.
6. Osu elektroměru je vhodné tepelně izolovat od měděných drátů, které drží niklový drát, protože jinak dochází k natavení plastových částí elektroměru.
7. U této konstrukce je problém s místem, proto místo staticky umístěného zdroje ohřevu doporučujeme použít ruční hořák, jehož plamen míří proti směru pohybu otáčení. Pokud by mířil po směru, mohl by vytvořit nesprávné představy o fungování motoru, protože plamen hořáku ohřívá vzduch a vytváří proudění vzduchu, které urychluje konstrukci ve směru plamene. Ve všech pěti námi provedených testech proud vzduchu vytvořený plamenem roztočil konstrukci po směru plamene bez přítomnosti vnějšího magnetického pole.

## Konstrukce V

Tato konstrukce vychází z konstrukce IV, avšak nevyužívá elektroměr a tudíž je dostupnější. Dále využívá dvou zdrojů magnetického pole a dvou zdrojů ohřevu, čímž zesiluje moment sil roztáčející motor. Video s funkční konstrukcí je publikováno ve Sbírce fyzikálních pokusů [30]. Obrázek takové konstrukce je níže (viz obr. 2.7).

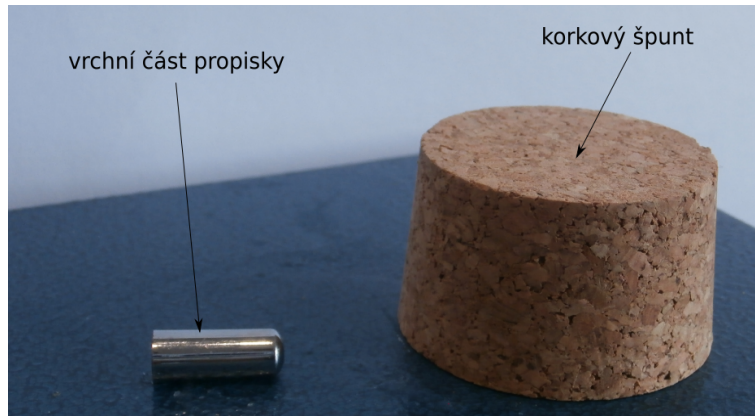
1. Měděný drát, kterým je uchycen niklový drát o průměru 1 mm, se zahřívá natolik, že natavuje korek použitý jako část ložiska.
2. U této konstrukce je více prostoru než u konstrukce IV, lze tedy použít dva magnety na různých místech a dva zdroje ohřevu, což pomůže překonat tření ložiska.
3. Při použití ručního hořáku je lepší namířit jej proti směru pohybu. Tímto způsobem eliminujeme vliv proudění vzduchu, které urychluje konstrukci, což by mohlo ve studentech zanechat mylný dojem, že je motor roztáčen plamenem.
4. Nejlépe se nám osvědčil špunt s co nejmenší zrnitostí, ideálně náhražka korku, neboť zde bylo menší tření. U korků s větší zrnitostí je pravděpodobně větší tření způsobeno většími mezerami, do kterých se může hrot zabodnout.





Obrázek 2.7: Naše konstrukce V

5. Pokud není k dispozici nekorkový špunt, lze do korkového šuntu umístit víčko od propisovací tužky, do kterého se vloží hrot a tření je tím sníženo (viz obr. 2.8 a 2.9).



Obrázek 2.8: Korek a vrchní část propisky

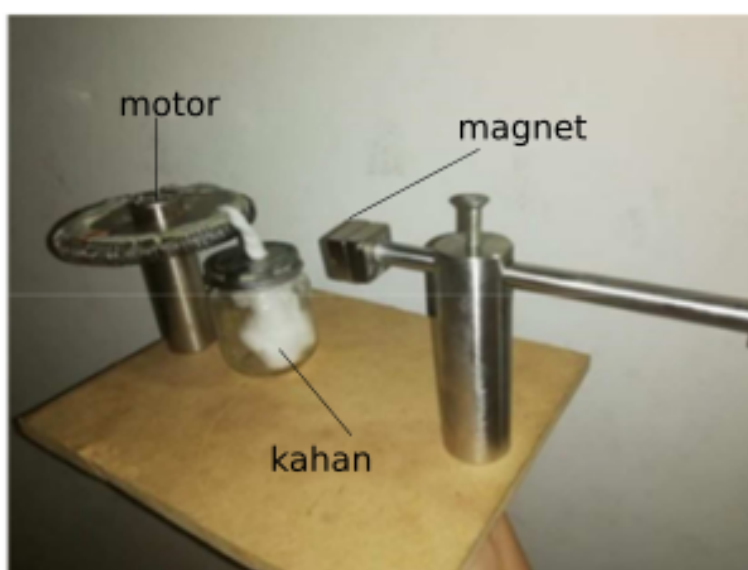
## Konstrukce VI

Nyní okomentujme konstrukci vyrobenou s pomocí ložisek harddisku [31]. Autoři používají konstrukci, kde vytvoří toroidní cívku ze slitiny železa a niklu, upevněnou na ložisku z harddisku. Řešitel této bakalářské práce a jeho vedoucí si jsou vědomi nevalné kvality jazyka použitého ve zdrojovaném článku i nejasností v teorii, kterou zmiňují. Tuto konstrukci jsme nesestavovali, avšak přikládáme její návrh do této práce, neboť nám nepřijde nápad na použití ložisek a kotoučů z harddisku špatný.

Tuto konstrukci, jak navrhuje autoři, je možno vidět níže (viz obr. 2.10).



Obrázek 2.9: Vrchní část propisky v korku



Obrázek 2.10: Konstrukce VI dle [31]

Obecně k otáčivým konstrukcím lze říci, že je nutné systém dobře vyvážit, použít dostatečně silné magnety, které jsou teplotně odolné, a použít materiály, které nebudou příliš náchylné na teplotní roztažnost. Za předpokladu, že nelze výše zmíněné dobře splnit, je nutné navrhnout taková řešení, aby tyto problémy byly co nejvíce eliminovány. Nejlépe fungující konstrukcí se, dle očekávání, ukázala být konstrukce IV. S ohledem na dostupnost lze z otáčivých motorů doporučit konstrukci V. Před samotnou demonstrací Curieho motoru doporučujeme funkčnost konstrukce několikrát vyzkoušet a odladit její nedostatky. Návody na tyto konstrukce jsou publikovány ve Sbírce fyzikálních pokusů [32]. Tyto konstrukce lze také vidět v příloze 2.



# 3. Curieho motory ve výuce fyziky na střední škole

Konstrukce Curieho motorů lze využít na demonstraci mnoha fyzikálních jevů a lze na nich procvičovat fyzikální myšlení. Níže následují návrhy na aktivity, které jsou dle autora proveditelné na úrovni střední školy. Tyto návrhy nejsou otestovány ve výuce. Návrhy jsou rozřazeny do částí, dle toho, zda se jedná o demonstraci fyzikálních jevů, konstrukční problémy, kvantitativní úlohy, kvalitativní úlohy nebo bezpečnost práce.

## 3.1 Demonstrace fyzikálních jevů

- Jednou z podmínek funkčnosti Curieho motorů je skoková změna magnetické susceptibility při zahřátí přes Curieho bod. Tento fázový přechod druhého druhu je demonstrovatelný na úrovni středních škol. Také se tím dá prokázat existence Curieho teploty. Oproti fázovým přechodům prvního druhu zde dojde ke skokové změně vlastnosti materiálu. Studenti mohou porovnávat, v čem se liší fázové přechody a zkoumat, zda něco vidí na první pohled. U přechodu z feromagnetické látky na paramagnetickou neuvidí žádnou změnu materiálu, tak jako například u změny skupenství, uvidí ale změnu chování této látky – nebude přitahována magnetickým polem. Pro vysvětlení, co se změnilo, je vhodné kvalitativně popsat doménovou strukturu a její porušení při zahřívání.
- Z pohledu magnetických vlastností existuje několik typů látek. U těchto konstrukcí je ukázka materiálu, který je přitahován do magnetického pole. Takovým materiálům se říká materiály feromagnetické. Možná někteří studenti budou vědět i o dalších materiálech, které se do magnetického pole přitahují, jako například antiferomagnetické materiály. S těmito materiály zde nepracujeme.
- Dalším typem materiálu z pohledu magnetických vlastností je paramagnetický materiál. Zde je vhodné nechat studenty přemýšlet, či s nimi diskutovat, že je nevhodné mít celou konstrukci z feromagnetického materiálu, neboť by se pak celá přitahovala k magnetu a mohla by narušit rovnováhu.
- Síla působící na těleso dané těleso urychluje, pokud chceme těleso roztočit, musí na něj působit moment síly. Takový moment síly se dá demonstrovat například na konstrukci IV a moment dvojice sil na konstrukci V Curieho kyvadla.

## 3.2 Konstrukční problémy

- Zejména otáčivé konstrukce jsou velmi náchylné na vyvážení, neboť pokud by byly konstrukce umístěny na ložiska do labilních poloh, v průběhu otáčení a silového působení by spadly. Na konstrukcích Curieho motorů lze tedy

demonstrovat labilní a stabilní rovnovážné polohy a diskutovat se studenty, proč je vhodné vytvořit stabilní rovnovážnou polohu.

- Pokud není otáčivá konstrukce dostatečně vycentrována, nebude se točit dokola, ale bude kmitat kolem polohy, kdy bude feromagnetikum nejbližší magnetu.
- Aby konstrukce fungovaly, je potřeba mít malé tření. Toho se dá dosáhnout použitím ložisek a je vhodné se studenty diskutovat přednosti jednotlivých ložisek. Nám se nejlépe osvědčila hrotová ložiska, která již byla součástí otáčivé komponenty. Vytvářet vlastní funkční ložiska není tak efektivní, jako využít již hotová. Následuje několik nápadů na výrobu ložisek.
  1. Použití jehly a vrchní části propisovací tužky.
  2. Použití hřebíku a korku s dírou.
  3. Použití jehly a skleněného korálku.
- Vlivem zahřívání většina látek zvětšuje svůj objem. Materiály v ložisku se mohou roztáhnout nestejně a může tím dojít k zadrhnutí ložisek. Takový efekt je potřeba brát v potaz při zvažování vhodného ložiska pro konstrukce Curieho motorů. Kuličková ložiska se nám v tomto ohledu neosvědčila. Se studenty je vhodné tento problém diskutovat a mohou se tím dozvědět o pracovních teplotách jednotlivých ložisek.

### 3.3 Kvantitativní úlohy

- Objem látek je závislý na teplotě, a byť tato závislost není většinou moc velká, v případě změny teplot několik set stupňů již může jít o nezanedbatelný jev. Studenti mohou odhadnout a spočítat, jaké relativní prodloužení bude v případě konstrukcí Curieho motorů. Tím se dá také před samotnou konstrukcí určit, zda je bezpečné něco podobného vyrábět, či nikoli. Pokud by se materiály významně prodlužovaly, mohlo by dojít k roztrhnutí konstrukce nebo porušení vyvážení a riziku zranění. Náš výpočet ukázal, že v případě niklového drátu, který má při pokojové teplotě délku  $l_0 = 13$  cm a teplotní změně  $\delta t = 800$  K, bude relativní prodloužení  $l_r = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0(\gamma \cdot \delta t)}{l_0} = \gamma \cdot \delta t = 13 \cdot 10^{-6} \cdot 800 = 0,000104$ , což je zanedbatelné, a tudíž roztržení konstrukce vlivem teplotní roztažnosti niklu nehrozí.
- Když máme fungující Curieho motor, může nás zajímat, jak kvalitní takový motor je, abychom ho mohli porovnat s jinými. K tomu lze použít účinnost, s jakou motor pracuje. Pro zjednodušení budeme zanedbávat tření, protože by bylo složité ho určit. Výkon motoru budeme určovat v časovém intervalu, po kterém se motor roztáčí. Tuto dobu jsme určovali z 10x zpomaleného videa a vyšla nám  $9,8 \pm 0,1$  s. Za tuto dobu vykonal motor otočení o  $3210^\circ$ . Poté, co se motor plně roztočí, je účinnost motoru nulová, neboť příkon je spotřebován na překonání odporových sil.

Pro zjednodušení výpočtů budeme uvažovat osu otáčení nekonečně tenkou, disk elektroměru ve tvaru rotačního válce. Niklový drátek a měděný úchyt

zanedbáme, neboť rozměry a hmotnost drátů jsou v porovnání s diskem malé.

Rozměry disku elektroměru jsou:  $d = 89,0 \pm 0,1$  mm,  $h = 1,0 \pm 0,1$  mm. Moment setrvačnosti disku vůči ose procházející středem disku  $J_v$  je  $J_v = \frac{1}{2}mR^2$ , kde  $m$  je příslušná hmotnost a  $R$  příslušný poloměr [33]. Hmotnost disku je  $22 \pm 1$  g (zváženo a zaokrouhleno směrem dolů).

Moment setrvačnosti disku, po dosazení výše uvedeného do příslušného vzorce, je  $J_v = (2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$  kg·m<sup>2</sup>.

Kinetická energie rotačního pohybu  $T$  je  $T = \frac{1}{2}J\omega^2$  [33]. Jako odhad jsme vypočítali průměrnou úhlovou rychlost jako úhel dělený časem, za který se konstrukce o daný úhel otočila. Tato rychlost nám vyšla  $5,72 \pm 0,06$  s<sup>-1</sup>. Celkovou práci potřebnou pro roztočení motoru na ustálenou úhlovou rychlost jsme spočetli pomocí výše uvedeného a vyšla nám  $0,36 \pm 0,02$  mJ.

Příkon závisí na množství spáleného paliva a na výhřevnosti paliva. Náš ruční hořák je plněn plynem do zapalovačů (butanem), který má výhřevnost 43 500 kJ/kg [7]. Pomocí vážení jsme zjistili, že se každých třicet sekund hoření spálí  $0,30 \pm 0,02$  g paliva. Pro výpočet budeme pracovat s konstrukcí IV, kde bereme časový úsek dlouhý  $9,8 \pm 0,1$  s. Během této doby dodá hořák  $43\,500 \cdot 0,098/1\,000 = 4,3 \pm 0,3$  kJ energie.

Účinnost  $\eta$  je daná poměrem výkonu a příkonu, tedy v našem případě poměrem kinetické energie rotačního pohybu a energie dodané hořákem  $\eta = \frac{0,36 \cdot 10^{-3}}{4,3 \cdot 10^3} = (0,08 \pm 0,02) \cdot 10^{-6} = (80 \pm 20) \cdot 10^{-9}$ , což je velmi malá účinnost.

### 3.4 Kvalitativní úlohy

- U matematického kyvadla je doba kmitu přímo úměrná odmocnině z délky závěsu, je-li kyvadlo v tíhovém poli. Na kyvadlo mohou působit i jiné síly a takové případy jsou ukázány v konstrukci I a II. Tyto konstrukce se kromě zdroje ohřevu liší délkou závěsu. Studenti mohou odhadnout, zda i v takovémto případě bude délka kyvadla hrát roli v době kmitu, či nikoli. U naší konstrukce I, kde je délka závěsu větší než u konstrukce II, nám vyšla průměrná doba kmitu  $2,15 \pm 0,05$  s. U konstrukce II nám vyšla průměrná doba kmitu  $0,86 \pm 0,02$  s. Zde může hrát však roli i jiný zdroj ohřevu. Při použití stejné čajové svíčky u konstrukce I nám vyšla doba kmitu  $5,1 \pm 0,1$  s. Doba kmitu tedy na délce závěsu pravděpodobně závisí, v případě delšího závěsu je doba kmitu delší, než v případě použití kratšího závěsu. Jednoznačně tuto závislost nemůžeme zatím potvrdit, neboť se do ní mohou promítat i další vlivy, jako například změna geometrie uspořádání.
- Stejně jako jiné feromagnetické materiály, i materiály ze kterých jsou vyrobeny permanentní magnety mají svůj Curieho bod. Studenti si tak mohou propojit chování feromagnetických materiálů a chování permanentních magnetů, když budou určovat, co se stane s magnetem, který zahřejeme nad Curieho bod. Efektivně demonstrovat odmagnetování se dá například zahřátím magnetu, který je umístěn na železné tyči. Když magnet odpadne,

síla, jakou byl přitahován k tyčce, je již výrazně menší, než před zahřátím, nemusí však být nulová. Studenti pak mohou zjišťovat, že různé magnety mají různé pracovní teploty.

- Studenti mohou diskutovat a experimentálně ověřovat, jaký průměr feromagnetika je nejvhodnější a proč. Nám se osvědčil niklový drát o průměru 1 mm, protože dostatečně rychle chladne a je ovlivněn dostatečnou silou.
- Studenti mohou diskutovat a experimentovat s umístěním magnetů vůči hořáku a konstrukci Curieho motoru. Vhodné je vznést následující otázky a hledat na ně odpovědi. Jakou geometrii má mít uspořádání, aby byl výsledný moment co největší? Jak závisí magnetická síla působící na konstrukci na vzdálenosti od ní? Pokud budu blízko, může se stát, že konstrukce přiskočí k magnetu? Jakou geometrii má mít umístění hořáku, aby byl účinek co největší?
- Plamen nemá všude stejnou teplotu, je vhodné při vylepšování konstrukcí zjistit, kde má plamen největší teplotu a využít toto místo pro ohřev feromagnetika.
- Se studenty je vhodné diskutovat problémy bránící využívání těchto motorů v praxi. Takové problémy jsou zejména malá účinnost a malý výkon motoru, potřeba silných magnetických polí pro pohyb motoru a vysoké provozní teploty.
- Zajímavá může být diskuze nad možnostmi eliminace výše uvedených problémů. Krom zlepšení geometrie konstrukcí by účinnost výrazně zlepšilo snížení rozdílů teplot, za kterých motor pracuje. Z toho důvodu je stroj s niklovým drátem použitým jako feromagnetikum účinnější, než stroj se železným, nebo kobaltovým drátem. Zde se můžete dostat k materiálům, které mají nízkou Curieho teplotu, jako je například Gadolinium. Také se lze dostat k otázce, zda by nešel fázový přechod obrátit a mít paramagnetikum, které by se lokálně chladilo a tím měnilo na feromagnetikum. Bohužel s tímto zkušenosti nemáme kvůli špatné dostupnosti gadolinia. V teoretické rovině avšak ničemu tato změna nevádí.

### 3.5 Bezpečnost práce

- Při konstruování Curieho motorů je třeba dbát na bezpečnost práce. Pracujeme zde často s vrtačkou, silnými magnety a ohněm.
- Práci s vrtačkou by měl dělat poučený dospělý a studenti by tuto práci neměli vykonávat samostatně.
- Při práci s magnety je třeba být opatrný, aby nedošlo ke skřípnutí částí lidského těla mezi magnety či mezi magnety a feromagnetikum.
- Celá konstrukce je horká i nějakou dobu po ukončení zahřívání a je třeba ji před další manipulací nechat vychladnout. Také se může stát, že se konstrukce rozpálí tak moc, že se může poškodit povrch, na kterém je konstrukce umístěna.

# Závěr

Nejprve jsem se zaměřil na rešerši literatury a popsal magnetické vlastnosti látek. Zabýval jsem se také fázovým přechodem druhého druhu, který se projevuje u přechodu feromagnetika na paramagnetikum.

Dále jsem zkonstruoval, ověřil funkčnost a popsal několik konstrukcí Curieho motorů. Postup, popis konstrukce a videa s funkčními konstrukcemi jsem publikoval ve Sbírce fyzikálních pokusů.

Nakonec jsem vytvořil návrhy aktivit pro studenty týkající se konstrukce Curieho motorů a poznávání fyzikálních zákonů souvisejících s Curieho motory.

# Seznam použité literatury

- [1] Příspěvatelé Wikipedie, Pierre Curie [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 8. 06. 2020, 10:18 UTC, [citováno 16. 05. 2021] <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierre\\_Curie&oldid=18666037](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierre_Curie&oldid=18666037)>
- [2] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Elektřina a magnetismus. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [3] Katedra didaktiky fyziky. Magnetostatika: permanentní magnety a jejich pole [online]. [cit. 2.4.2021 16:20]. Dostupné z: [https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/ElMag\\_05\\_Magnetostatika\\_ver0a.pdf](https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/ElMag_05_Magnetostatika_ver0a.pdf)
- [4] Fuka, J., Havelka, B. (1965). Elektřina a magnetismus. Praha: SPN.
- [5] MIYAZAKI, Terunobu a Hanmin JIN. The Physics of Ferromagnetism [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 [cit. 2021-4-16]. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-642-25582-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-25583-0
- [6] Levitující tuha - demonstrace diamagnetismu. Sběrka fyzikálních pokusů [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <http://fyzikalnipokusy.cz/1877/levitujici-tuha--demonstrace-diamagnetismu>
- [7] MIKULČÁK, Jiří, Bohdan KLIMEŠ, Jaromír ŠIROKÝ, Václav ŠŮLA a František ZEMÁNEK. Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro střední školy. Dotisk 3. vydání. Praha: Prometheus, 1997. ISBN 80-85849-84-4.
- [8] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1643-6.
- [9] Wikipedia contributors. (2021, March 20). Curie–Weiss law. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 13:30, March 27, 2021, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Curie%E2%80%93Weiss\\_law&oldid=1013166330](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Curie%E2%80%93Weiss_law&oldid=1013166330)
- [10] Houdek, V. (1984). Obecná fyzika II – Elektřina a magnetismus. Praha: SPN.
- [11] Od mřížových modelů ke kvantové chromodynamice I [online]. 7. 2009 [cit. 2021-04-11]. ISSN 1214-1674,. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2009\\_47\\_mag.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_47_mag.php)
- [12] cit. 2021 04 05 17:46 autor Marek Malý [http://physics.ujep.cz/mmal/vyuka/poc\\_fyz\\_1/ISING/Ising/Ising.pdf](http://physics.ujep.cz/mmal/vyuka/poc_fyz_1/ISING/Ising/Ising.pdf)
- [13] cit. 2021 04 05 17:46 autor Marek Malý [http://physics.ujep.cz/mmal/vyuka/poc\\_fyz\\_1/ISING/Ising.pdf](http://physics.ujep.cz/mmal/vyuka/poc_fyz_1/ISING/Ising.pdf)

- [14] Západočeská univerzita v Plzni. Balatka, J. (2017). Tepelná závislost permanentních magnetů. [online]. [cit. 27. 11. 2019]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/27592/1/Tepelna%20zavislost%20permanentnich%20magnetu.pdf>
- [15] Magnetické vlastnosti feritových magnetů [online] citováno 4.4.2021 16:11 dostupné z: <https://e-shop.magsy.cz/magneticke-vlastnosti-feritovych-magnetu/>
- [16] Magnetické vlastnosti neodymových magnetů [online] citováno 4.4.2021 16:11 dostupné z: <https://e-shop.magsy.cz/magneticke-vlastnosti-neodymovych-magnetu/>
- [17] Termodynamika a statistická fyzika: Termodynamika. Portál moderní fyziky [online]. Olomouc: UPOL, 2020 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/termodynamika-statisticka-fyzika>
- [18] OBDRŽÁLEK, Jan. Úvod do termodynamiky, molekulové a statistické fyziky. Praha: Matfyzpress, 2015. ISBN 978-80-7378-287-0.
- [19] Artemis. Artemis [online]. 2005: Přf OU, 1997 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz:8080/artemis/index.php>
- [20] Fyzikální ústav Akademie věd České republiky. Fyzikální vlastnosti slitiny CuMnAs - materiálu nastupující antiferomagnetické spintroniky. [online]. [cit. 26. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-teorie-kondenzovanych-latek/vyznamne-vysledky/fyzikalni-vlastnosti-slitiny-cumnas-materialu>
- [21] Štrajblová J. Magnonová spintronika. (30. 4. 2018) [online] dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/1133-aktualita-z-fyziky-magnonova-spintronika> [cit. 2. 12. 2019]
- [22] KULHÁNEK, Petr. Vybrané kapitoly z teoretické fyziky. Praha: AGA, 2016. ISBN 978-80-904582-8-4.
- [23] Rauner, K. (1996). Několik demonstračních pokusů z magnetismu. In: Sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky 1, 20-24.
- [24] Sbírka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieho motory, konstrukce I*, Youtube video. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z <https://youtu.be/giNPVanrf4w>
- [25] CHIAVERINA, Chris a George LISENSKY. Nickel Curie point engine. The Physics Teacher [online]. 2014, 52(4), 250-250 [cit. 2021-04-06]. ISSN 0031-921X. Dostupné z: doi:10.1119/1.4868949
- [26] Sbírka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieovy motory kmitavé, konstrukce II*, Youtube video. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z <https://youtu.be/bmm6ZyGdgSg>.
- [27] Sbírka fyzikálních pokusů, 2019, *Curieovo vidličkové kyvadlo*, Youtube video. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://youtu.be/eYVx8x8Cmkk>.

- [28] Sběrka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieho motory, konstrukce I-III*. [cit. 2021-05-24]. Dostupné z <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>
- [29] Sběrka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieho motory, konstrukce IV*, Youtube video. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z <https://youtu.be/pFjBk4tt640>
- [30] Sběrka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieho motory, konstrukce V*, Youtube video. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z <https://youtu.be/vwI7I5vYctU>
- [31] RODRÍGUEZ, Rubén, Jhon AMAYA a Alex ESTUPIÑÁN. Design and Experimental Study of Tesla's Thermomagnetic Engine. *Teacher Education and Curriculum Studies* [online]. 2019, 4(2) [cit. 2021-04-06]. ISSN 2575-498X. Dostupné z: [doi:10.11648/j.tecs.20190402.11](https://doi.org/10.11648/j.tecs.20190402.11)
- [32] Sběrka fyzikálních pokusů, 2021, *Curieho motory, konstrukce IV-V*. [cit. 2021-05-24]. Dostupné z <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>
- [33] FRIŠ, S.E a A.V TIMOREVOVÁ. *Kurs fyziky: I. 2. dopl.vyd.* Praha: Nakladatelství ČSAV, 1962.



# Seznam obrázků

1	Pierre Curie [1] . . . . .	2
1.1	Hysterézní smyčka feromagnetika [3] . . . . .	10
2.1	Konstrukce I dle [23] . . . . .	13
2.2	Naše konstrukce I . . . . .	14
2.3	Konstrukce II dle [25] . . . . .	15
2.4	Naše konstrukce II . . . . .	16
2.5	Naše konstrukce III . . . . .	16
2.6	Naše konstrukce IV . . . . .	17
2.7	Naše konstrukce V . . . . .	19
2.8	Korek a vrchní část propisky . . . . .	19
2.9	Vrchní část propisky v korku . . . . .	20
2.10	Konstrukce VI dle [31] . . . . .	20

# Seznam tabulek

1.1	Diamagnetické látky . . . . .	7
1.2	Paramagnetické látky . . . . .	8
1.3	Curieho teploty jednotlivých materiálů [19] . . . . .	10

# A. Přílohy

## A.1 Příloha 1: Konstrukce I-III

## Sbířka fyzikálních pokusů

### Curieho motory, konstrukce I-III

Pokus číslo: 2181

#### Cíl pokusu

Budeme sestrojovat kmitavé motory fungující na principu fázového přechodu látky při zahřívání nad Curieho teplotu.

#### Teorie

Curieho bod je teplota, při níž se feromagnetická látka mění na paramagnetickou – jinými slovy, téměř se přestává přitahovat k magnetům. Této vlastnosti lze využít pro konstrukci Curieho motoru.

Motory, které v tomto experimentu zkonstruujeme, budou mít podobu kyvadel z feromagnetického materiálu, který zahříváme v blízkosti permanentního magnetu. Třetí konstrukce bude mít podobu netradičního kyvadla ve tvaru vidličky. Když jeden hrot vidličky vložíme do plamene, stane se po zahřátí paramagnetickou látkou a nebude již přitahován blízkým magnetem, ke kterému se proto přitáhne druhý hrot. Pootočením vidličky se ale první hrot dostane mimo plamen a druhý naopak do plamene – první hrot se tedy ochladí a začne se znovu k magnetu přitahovat, zatímco druhý hrot se stane paramagnetikem. Vidlička se vrátí do původní pozice a děj se bude periodicky opakovat, čímž získáme jakési „horizontální kyvadlo“.

V případě běžných kyvadel je princip podobný, avšak je potřeba umístit konstrukci a magnet tak, aby v případě feromagnetické fáze byla konstrukce mimo obvyklou stabilní polohu kyvadla. Po zahřátí nad Curieho teplotu se látka přestane přitahovat a kyvadlo se vychýlí do běžné stabilní polohy svisle dolů. V nové poloze je mimo dosah plamene, čímž se ochladí a dojde k přechodu na feromagnetickou fázi a děj se bude opakovat.

Další konstrukce Curieho motorů lze vidět v experimentu [Curieho motory, konstrukce IV-V](#).

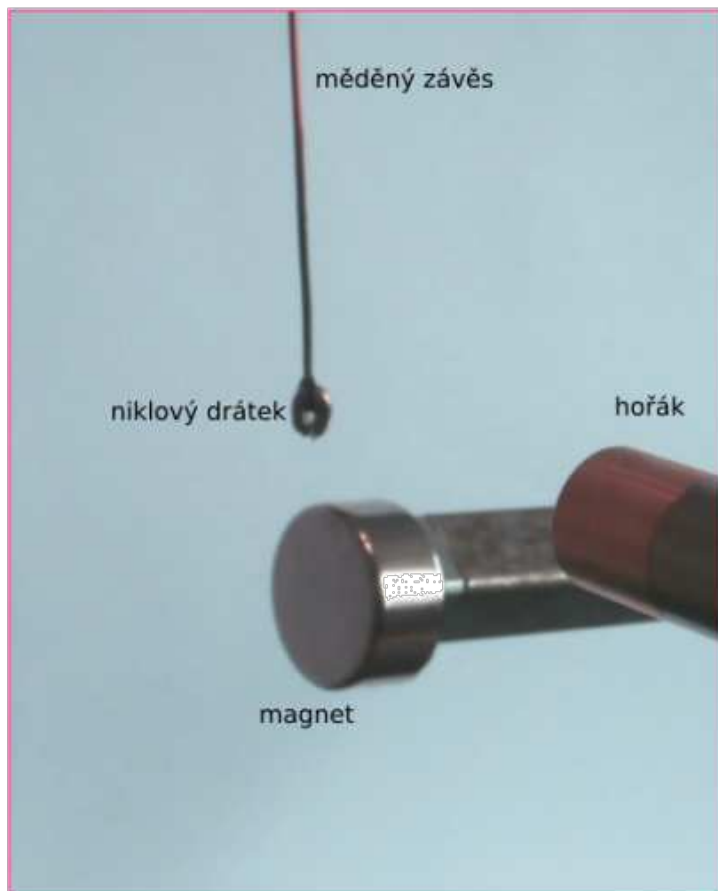
#### Pomůcky

- konstrukce motoru viz níže
- stojan
- permanentní magnet (využíváme neodymový)
- hořák a zápalky

#### Postup konstrukce I

1. Na stojan zavěsíme měděný drátek (my použili průměr 1 mm), na jehož konci je niklový drát (my použili průměr 2 mm).
2. Do blízkosti niklového drátu umístíme magnet.
3. K niklovému drátu umístíme hořák a zapálíme ho.

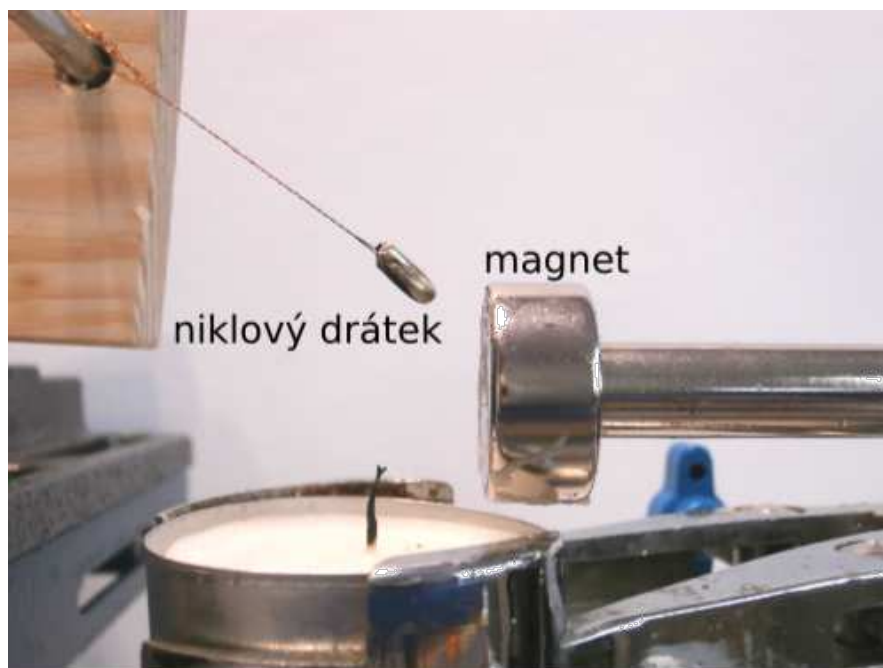




<http://fyzikalnipokusy.cz/>

#### Postup konstrukce II

1. Na kovovou tyčku umístíme měděný drát (my použili průměr 0,1 mm), na jehož konci je niklový drát (my použili průměr 2 mm).
2. Do blízkosti niklového drátu umístíme magnet.
3. Pod niklový drát umístíme čajovou svíčku a zapálíme ji.



<http://fyzikalnipokusy.cz/>

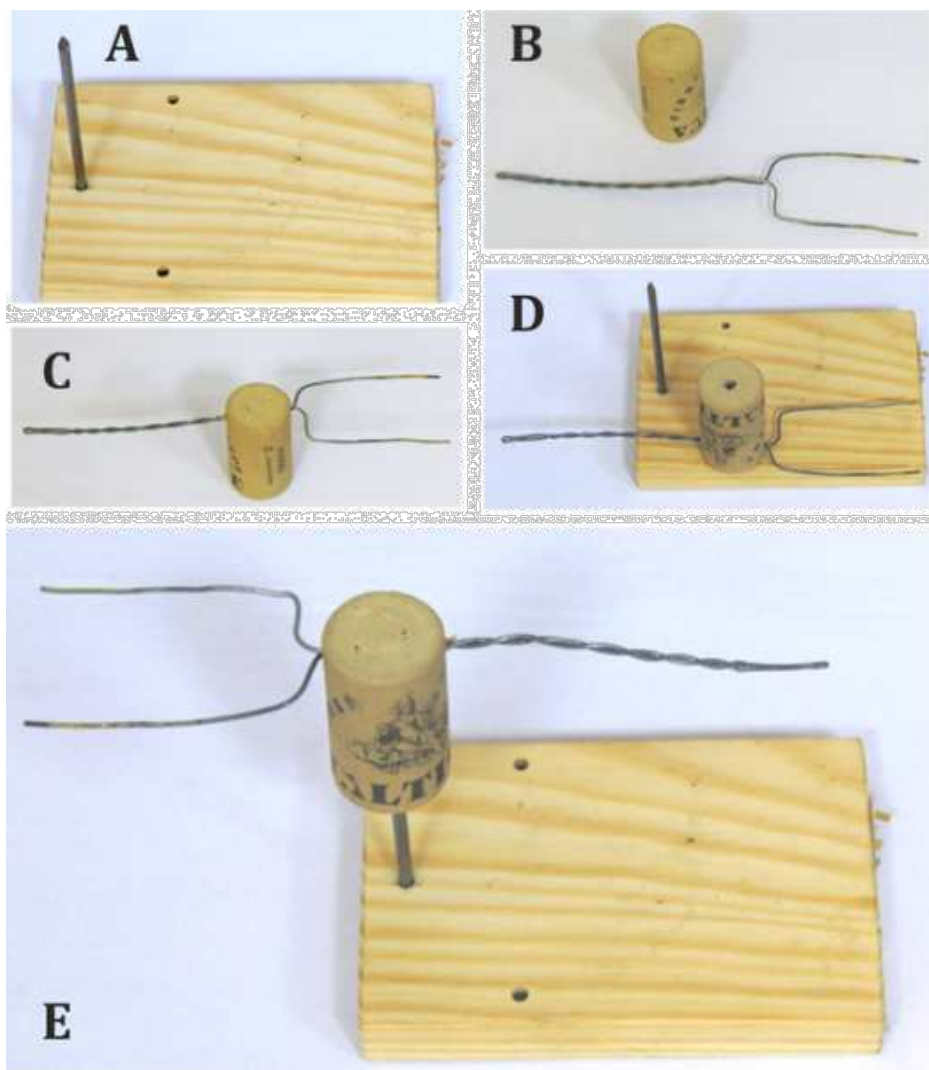
### Postup konstrukce III

#### Pomůcky

- korkový špunt
- drátek z feromagnetické látky (využíváme ocel)
- dřevěné prkno
- hřebík
- nářadí

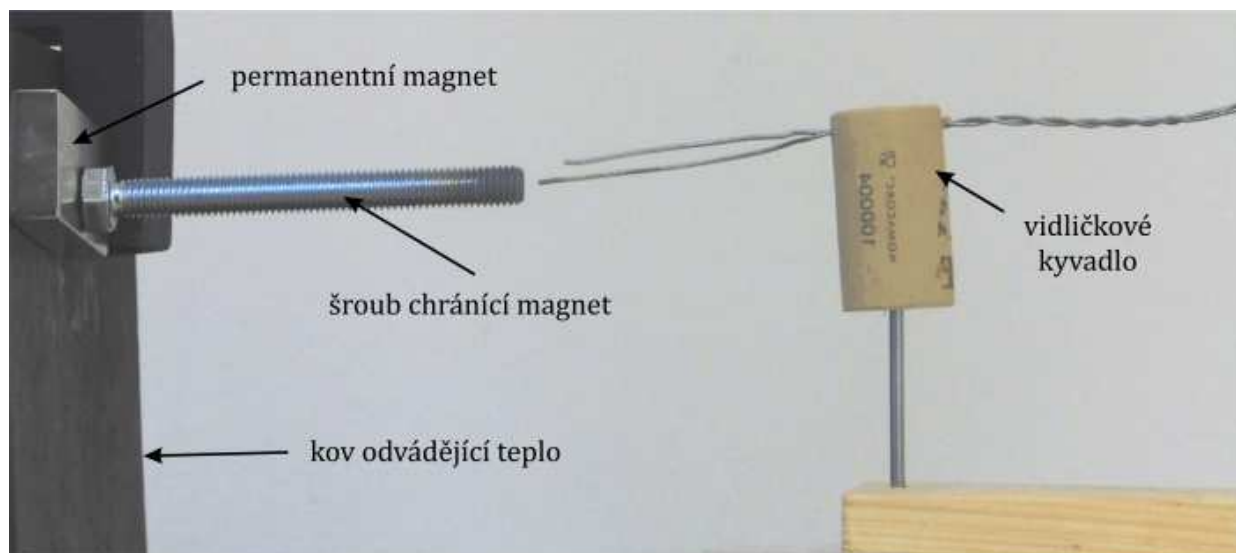
#### Postup výroby vidličkového kyvadla

1. Do dřevěného prkna provrtáme díru a vložíme do ní hřebík (obr. 3A).
2. Do korkového špuntu provrtáme z boku díru a vložíme do ní drát vytvarovaný do podoby vidličky (obr. 3B a 3C).
3. Do korkového špuntu vyvrtáme zespoda díru o něco větší než je průměr hřebíku a špunt nasadíme na hrot hřebíku (obr. 3D a 3E).



### Postup provedení experimentu

1. Sestrojíme konstrukci podle obr. 4. Kovová deska má funkci odvodu tepla od magnetu, aby nedošlo k jeho odmagnetování.
2. Umístíme vidličkovou konstrukci kyvadla do blízkosti šroubu, který je umístěn na magnetu.
3. Pod vychýlený hrot vidličky umístíme hořák a zapálíme ho.

**Vzorový výsledek**

Video níže zachycuje vzorový výsledek pro konstrukci I Curieho motoru.

**Curieho motory, konstrukce I**

Video níže zachycuje vzorový výsledek pro konstrukci II Curieho motoru.



## Curieho motory, konstrukce II



Video níže zachycuje vzorový výsledek pro konstrukci III Curieho motoru.

## Curieho motory, konstrukce III



### Technické poznámky

- U závěsu, který je dlouhý, doporučujeme použít měděný drát o průměru 1 mm, neboť závěs je hodně vystaven plameni a může se přepálit. U kratšího závěsu je úhel k plameni větší a riziko přepálení se snižuje.
- Pro úspěch experimentu je zásadní vzdálenost hrotů vidličky. Pokud budou hroty příliš daleko od sebe, budou se méně přitahovat k magnetu. Pokud budou naopak příliš blízko, můžete prohrát oba hroty zároveň a efekt nebude viditelný. Ve vzorovém experimentu s plynovým

hořákem byla vzdálenost hrotů cca 3 cm.

- Doporučujeme použít silný neodymový magnet, neboť takto sestrojené kyvadlo má v korkovém ložisku nezanedbatelné tření (lze jej snížit například naolejováním hrotu hřebíku).
- Neodymové magnety mají doporučenou pracovní teplotu 80 °C a je nutné zajistit, aby se magnet nezahřál na teplotu vyšší. Pro odvod tepla jsme proto použili kovovou desku, ke které je magnet přichycen. Dále jsme k magnetu připevnili feromagnetický šroub – ten se zmagnetuje a poslouží jako magnet, který snese vysoké teploty.
- Snáze než ocel zahřejeme na Curieho teplotu nikl (tato teplota je pro něj výrazně nižší než pro ocel), ovšem jde o méně běžný materiál – prodává se např. v obchodech s elektronickými cigaretami.

#### **Metodické poznámky**

- Před provedením experimentu je zásadní si vyzkoušet uspořádání aparatury, zejména najít optimální vzájemnou polohu magnetu, hořáku a kyvadla, případně vidličky.
- Pokud je umístění kyvadla na špičce hřebíku nestabilní a hrozí pád vidličky, chraňte se před rizikem popálení pracovními rukavicemi.

Aktualizováno: 26. 5. 2021

## A.2 Příloha 2: Konstrukce IV-V

## Sbířka fyzikálních pokusů

### Curieho motory, konstrukce IV-V

Pokus číslo: 2182

#### Cíl pokusu

Budeme sestřovovat otáčivé motory fungující na principu fázového přechodu látky při zahřívání nad Curieho teplotu.

#### Teorie

Curieho bod je teplota, při níž se feromagnetická látka mění na paramagnetickou – jinými slovy, téměř se přestává přitahovat k magnetům. Této vlastnosti lze využít pro konstrukci Curieho motoru.

Motory, které v tomto experimentu zkonstruujeme, budou mít podobu otáčivých motorů z feromagnetického materiálu, který zahříváme v blízkosti permanentního magnetu. Když část feromagnetického drátu vložíme do plamene, stane se po zahřátí lokálně paramagnetickou látkou a tato část nebude přitahována blízkým magnetem, ke kterému se proto přitáhne následující část drátu. Pootočením motoru se první část dostane mimo plamen a další část naopak do plamene – postupně se tak první část ochladí a ve vhodné pozici motoru se znovu bude k magnetu přitahovat. Tento děj se bude periodicky opakovat, čímž získáme otáčivý motor.

Další konstrukce Curieho motorů lze vidět v experimentu [Curieho motory, konstrukce I-III](#).

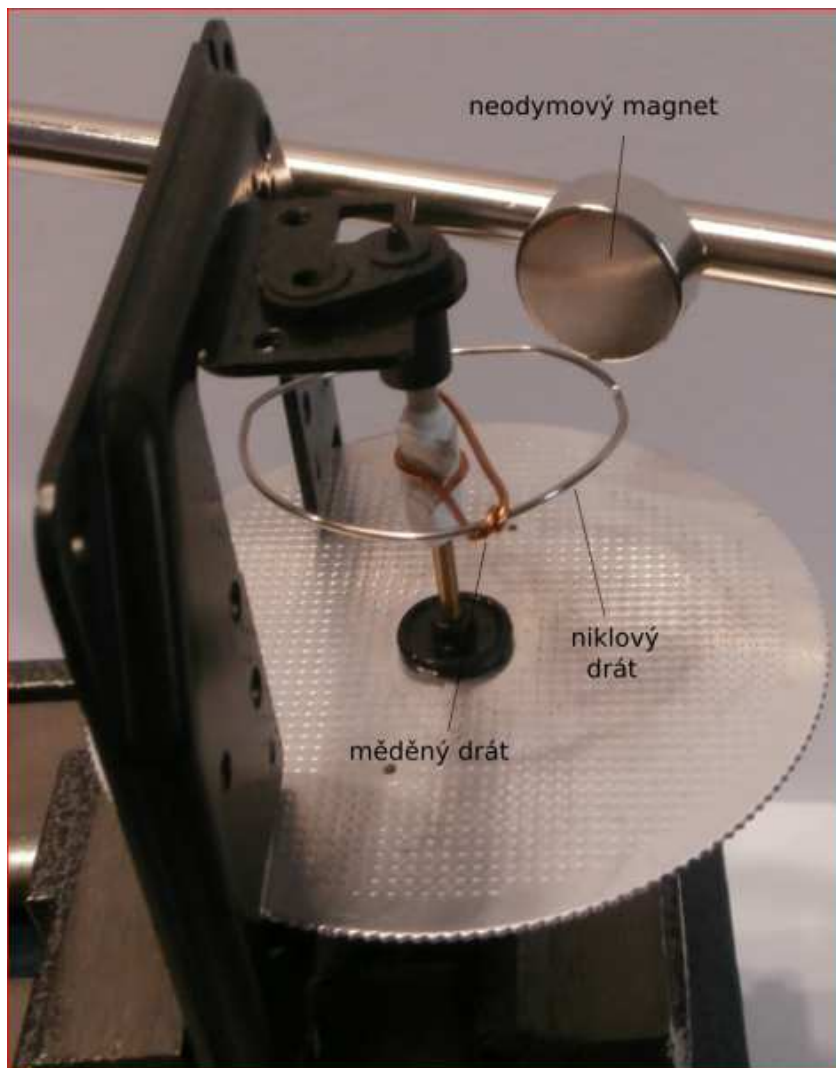
#### Pomůcky

- konstrukce motoru viz jednotlivé postupy
- hořák a zápalky
- permanentní magnet (my využíváme neodymový)
- stojan na konstrukce a magnet

#### Postup konstrukce IV

1. Z třífázového analogového elektroměru vyjmeme otáčivou část s diskem umístěnou v kovovém držáku.
2. Na osu dáme kousek papíru a omotáme měděným drátem, který bude držet niklovou obruč.
3. Z niklového drátu vytvoříme obruč a připevníme ji pomocí měděných drátů k ose elektroměru.
4. Do blízkosti obruče umístíme magnet.
5. Na obruč, poblíž umístění magnetu, namíříme plynový hořák a zapálíme.

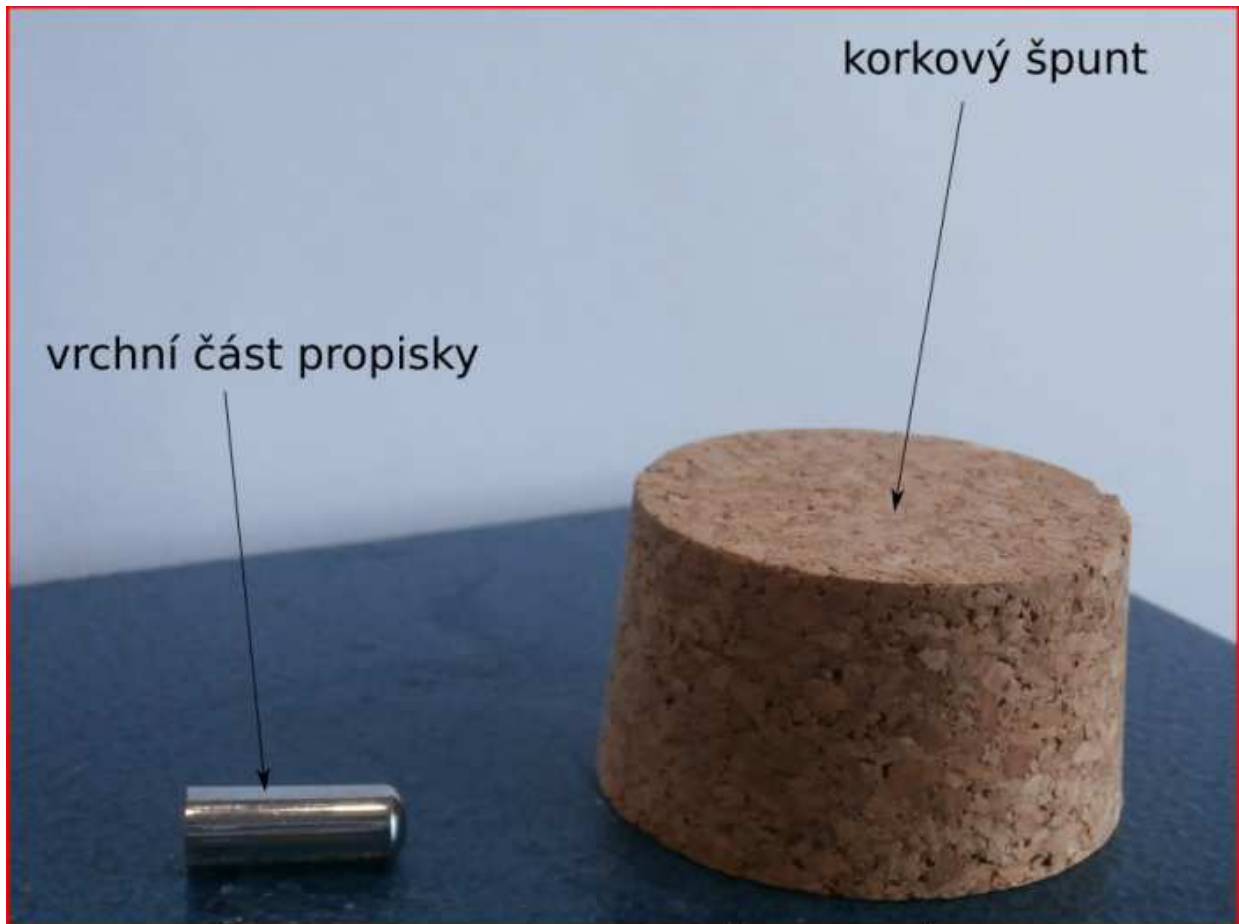




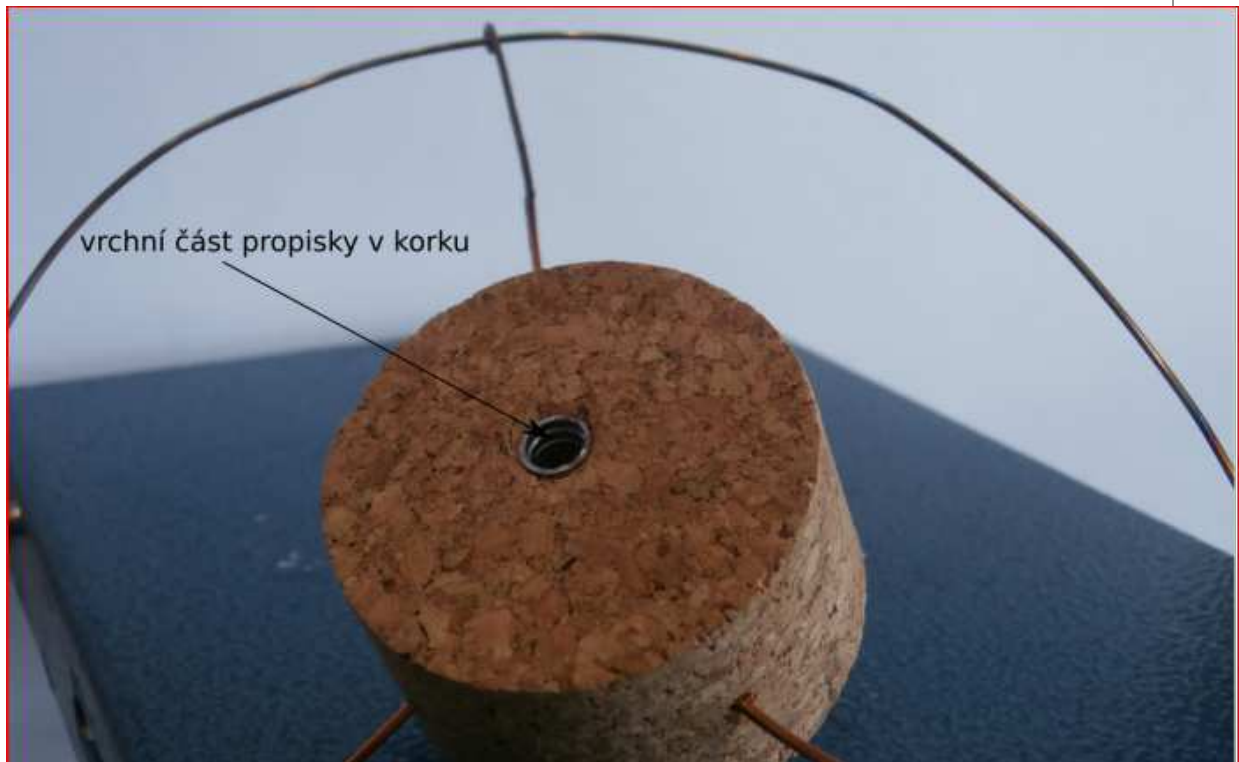
<http://fyzikalnipc>

#### Postup konstrukce V

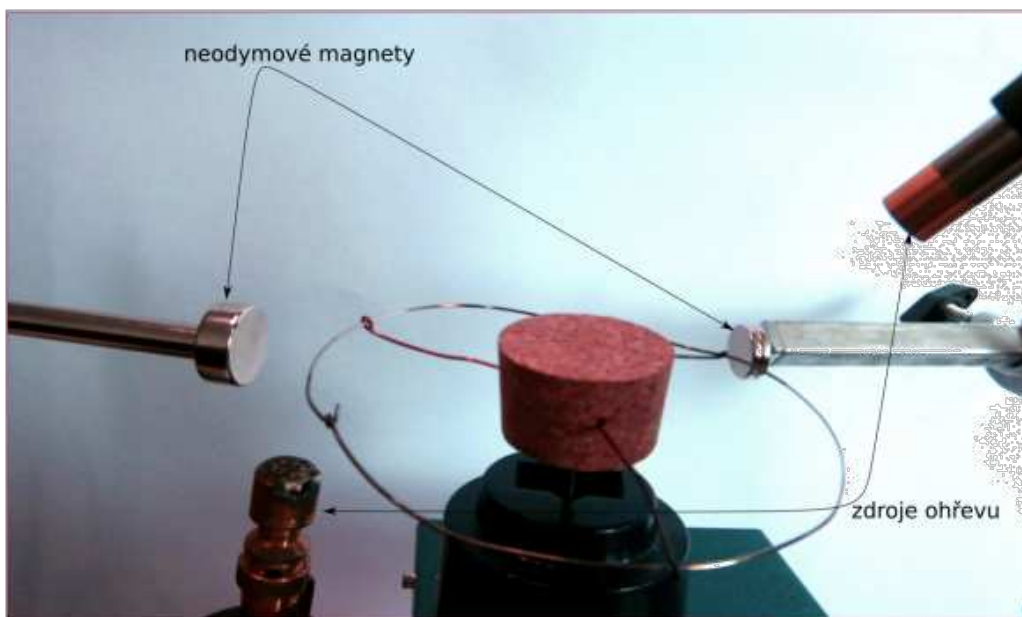
1. Do osy špuntu vyvrtáme otvor o tloušťce 4 mm do hloubky přibližně 2-3 cm.
2. Do špuntu vyvrtáme kolmo na osu otvor o tloušťce 1 mm a hloubce 1 cm. Další dva otvory umístíme rovnoměrně po plášti válce.
3. Do otvoru v ose umístíme odšroubovanou část propisovací tužky, která je umístěna na mačkáčím mechanismu, viz obr. 2, obr. 3.
4. Do otvorů v plášti umístíme měděné dráty.
5. Z niklového drátu vytvoříme obruč a pomocí měděných drátů ji připevníme na špuntu.
6. Do stojanu umístíme jehlu nebo hřebík a na hrot umístíme část propisovací tužky ve špuntu.
7. Do blízkosti obruče umístíme dva magnety, každý na jinou pozici, ideálně naproti sobě.
8. Na obruč, do blízkosti obou magnetů, umístíme hořáky a zapálíme je.



<http://fyzikalnipokusy.cz/>



<http://fyzika>



<http>

**Vzorový výsledek**

Video níže zachycuje vzorový výsledek pro konstrukci IV Curieho motoru.



Video níže zachycuje vzorový výsledek pro konstrukci V Curieho motoru.

## Curieho motory, konstrukce V



### Technické poznámky

- Konstrukci V lze sestavit z běžně dostupných pomůcek a niklového drátu. Konstrukce IV je sestavena z třífázového analogového elektroměru, který již není běžně dostupný.
- Konstrukce by měly fungovat i za použití běžněji dostupného ocelového drátu, avšak funkčnost je horší než v případě použití niklového drátu.
- U otáčivých motorů je nutné mít obruč pokud možno vycentrovanou, aby se motor otáčel.
- Použijeme-li silný magnet, bude jev patrnější, neboť tření v ložisku a nedokonalosti v konstrukci jsou překonány silou magnetu.
- Často se vyplatí umístit hořák ne přímo pod místo nejbližší k magnetu, ale trochu stranou tak, aby zahřívána část nebyla symetricky blízko k magnetu, pak se může stát, že se motor neotáčí jedním směrem, ale jednou tím a podruhé opačným směrem.
- Neodymové magnety mají doporučenou pracovní teplotu 80 °C, někdy je nutné použít pro magnet chlazení. Jako dostatečné chlazení stačí pasivní chlazení větším kusem kovu. U používání ocelového drátu místo niklového je často potřeba magnety více chladit.

### Metodické poznámky

- Doporučujeme mít tento pokus umístěný na místě, kde jej budeme předvádět a mít dopředu vyzkoušené, kde mít umístěn hořák, kde magnet a kde konstrukci motoru, aby byl efekt patrný.
- Zkuste se studentů zeptat, co by mohlo nastat po zapálení hořáku a diskutujte s nimi možné výsledky, které vymyslí.
- Doporučujeme při provádění experimentu dodržovat zásady bezpečnosti práce a nenechat studenty, aby pokus prováděli sami, bez dozoru vyučujícího.

### Komentář

Pro sestavování motoru studenty doporučujeme použít konstrukci III, která je popsána v úloze



[Curieho motory, konstrukce I-III.](#)

Aktualizováno: 26. 5. 2021