

Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta  
Katedra experimentální fyziky



## **Bakalářská práce**

Magnetické pole a jeho praktické využití

The magnetic field and its practical use

Vypracoval:	Josef Charvát
Studijní program:	B7507 – specializace v pedagogice
Studijní obor:	Fyzika – matematika se zaměřením na vzdělávání
Forma studia:	prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Odevzdání práce:	22. dubna 2021

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem uvedenou bakalářskou práci vypracoval samostatně a pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc., a že jsem použil zdroje, které cituji a uvádím v sekci seznamu použitých zdrojů. Také prohlašuji, že jsem neporušil autorská práva ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Olomouci, dne.....

.....

*Josef Charvát*

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. RNDr. Romanu Kubínkovi, CSc. za cenné formální a odborné rady při tvorbě této práce.

Také chci poděkovat panu Mgr. Lukáši Richterkovi, Ph.D., za poskytnuté doporučení při hledání odborné a vědecké literatury, které jsem použil v teoretické kapitole zaměřené na historický vývoj magnetismu této práce.

Poděkování patří i panu Mgr. Milanu Vůjtkovi, Ph.D., za pomoc a poskytnuté rady při realizaci dílčího experimentu v praktické části práce.

Rád bych poděkoval rovněž panu Mgr. Vlastimilovi Vrbovi, Ph.D., za poskytnuté rady a pomoc k NMR (nukleární magnetické rezonanci) při jejím teoretickém zpracování.

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Josef Charvát
Název práce	Magnetické pole a jeho praktické využití
Typ práce	Bakalářská práce
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
Rok obhajoby práce	2021
Abstrakt	Bakalářská práce na téma <i>Magnetické pole a jeho praktické využití</i> je orientována didaktickým směrem. Jsou zde popsány souvislosti a vzájemné návaznosti mezi magnetismem a dalšími dílčími oblastmi fyziky z pohledu výuky na základních a středních školách, v historických souvislostech, moderním pojetí i jeho využití v praxi. Práce se snaží představit magnetické pole z pohledu jeho integrace v přírodovědných oblastech, například v chemii, biologii, astronomie, technickém průmyslu a v neposlední řadě v lékařství.
Klíčová slova	magnetismus, magnetické pole, elektromagnetické pole, experimenty, výuka, vzdělávání
Počet stran	85
Jazyk	český

## **Bibliographical identification**

Autor's name	Josef Charvát
Title	The magnetic field and its use practical
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
The year of presentation	2021
Abstract	<p>The bachelor's thesis on magnetic field and its practical use is oriented in a didactic direction. It describes the connections and interrelations between magnetism and other sub-areas of physics from the point of view of teaching in primary and secondary schools, in historical contexts, in modern conception and in its use in practice. The thesis seeks to present the magnetic field from the point of view of its integration in natural sciences, such as chemistry, biology, astronomy, the technical industry and in the non-sitting row in medicine.</p>
Keywords	magnetism, magnetic field, electromagnetic field, experiments, lessons and education
Number of pages	85
Language	Czech

# Obsah

Úvod.....	8
<b>1. Teoretická část.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Historický vývoj magnetismu.....</b>	<b>9</b>
1.1.1. Antika.....	9
1.1.2. Středověk.....	10
1.1.3. Novověk.....	12
1.1.4. Stručná rekapitulace letopočtů a objevů.....	33
<b>1.2. Magnetismus z pohledu současné fyziky.....</b>	<b>34</b>
1.2.1. Vysvětlení magnetismu.....	34
1.2.2. Magnetické pole.....	34
1.2.3. Zdroje magnetického pole.....	34
1.2.4. Magnetické indukční čáry.....	36
1.2.5. Přehled fyzikálních veličin používaných na základní a střední škole.....	38
1.2.6. Charakteristika pojmů v oblasti magnetismu a elektromagnetismu na základní a střední škole.....	39
1.2.7. Fyzikální popis veličin používané středních školách.....	40
1.2.8. Stručná rekapitulace fyzikálních vztahů používaných na středních školách.....	47
1.2.9. Zmagnetovaná tělesa a magnetické vlastnosti látek z pohledu magnetismu.....	47
<b>1.3. Rozdělení učiva o magnetismu na základních a středních školách.....</b>	<b>50</b>
<b>1.4. Současné trendy a využití magnetismu jako aplikace ve vědě a technice.....</b>	<b>52</b>
1.4.1. Urychlovač částic.....	53
1.4.2. Nukleární magnetická rezonance a zobrazení magnetickou rezonancí (MRI).....	55
1.4.3. Elektrická kytara.....	57
1.4.4. Supravodiče a levitace – jevy popisující chování látek v magnetickém poli.....	58
1.4.5. Magnetické zaznamenávání dat.....	59
1.4.6. Magnetické mikročástice.....	60
1.4.7. Magnetotaktické bakterie.....	61
<b>2. Praktická část.....</b>	<b>63</b>
2.1. Prokázání pólů u magnetů.....	63
2.2. Zmagnetování feromagnetické látky magnetem.....	65
2.3. Ověření Curieovy teploty feromagnetické látky.....	67
2.4. Magnetické pole přímého vodiče.....	68
2.5. Demonstrace magnetické hysterezní smyčky feromagnetického materiálu.....	70

2.6. Ferrofluid .....	73
2.7. Výroba elektromagnetu a jeho využití .....	73
Závěr .....	81
Seznam použité literatury .....	82
1. Knižní zdroje .....	82
2. Internetové zdroje .....	82
3. Legislativní zdroje .....	85
Příloha .....	86

# Úvod

Tématem mojí bakalářské práce je *Magnetické pole a jeho praktické využití*. Toto zaměření a formu zpracování jsem si vybral z několika důvodů. Jedním z nich je ten, že mě magnetismus zajímal již dříve a domnívám se, že je neoddělitelnou součástí našeho života a existence na planetě Zemi. Další důvod je ten, že se *magnetismus* využívá v různých odvětvích celého spektra vědy (např. v lékařství, mikroskopii, nano – oborech, kvantové fyzice, astronomii, chemii aj.). Proto si myslím, že žáci na základních a středních školách by měli dobře pochopit základní projevy, charakteristiky a souvislosti v tomto modulu fyziky. Na základní a střední škole magnetismus bývá vyučován spolu s elektřinou, protože spolu úzce souvisí a je třeba, aby žáci pochopili, v čem spočívá neoddělitelné spojení těchto fyzikálních fenoménů.

Můžeme konstatovat, že i v současné době se tento obor neustále dynamicky rozvíjí, ačkoli již dnes je od prvních vědeckých poznatků velmi obsáhlým. Jako každý vědecký, filozofický nebo umělecký obor zaznamenal první vývoj v antice, poté v dalších vývojových epochách až do současnosti. Již dříve v historii se magnetismus popisoval v oblasti přírodní a technické. Přírodní oblast je myšlená tak, že ji člověk pozoruje a zkoumá, aniž by měl zásluhu na jejím vzniku, zatímco v technické oblasti člověk využívá magnetických vlastností a vytváří je ke svému prospěchu (např. kompas).

Z didaktického i odborného hlediska je podstatné k jednotlivým charakteristikám a popisům jevů uvést fyzikální veličiny a jednotky, které formálně popisují magnetické pole.

V neposlední řadě po teoretickém popisu budu demonstrovat jednoduché a názorné experimenty, které pomohou k lepšímu pochopení fyzikálních vlastností *magnetismu*. Tyto experimenty všeobecně slouží k jasnějšímu propojení teoretických znalostí s využitím v praxi.

S ohledem na šíři daného tématu jsem se snažil o dodržení vybraných cílů bakalářské práce. Hlavními cíli práce jsou:

- 1) historické a první exaktní poznatky o magnetismu.
- 2) Učivo o magnetismu na základních a středních školách a objasnění jeho podstaty.
- 3) Projevy magnetismu v přírodě a technice, významné objevy a jejich návaznost na využití magnetismu v praxi.
- 4) Přehled nejvýznamnějších experimentů magnetismu, včetně některých názorných demonstrací.



# 1. Teoretická část

## 1.1. Historický vývoj magnetismu

### 1.1.1. Antika

V období antiky docházelo k prvním objevům a popisům přírodních jevů a vznikaly první hypotézy o existenci života a jeho prapůvodu. Bylo to zahájeno formováním přírodních věd a jejich přínosu. To vše souviselo s přírodními úkazy a jejich sledováním. Například v elektřině starověká civilizace demonstrovala její původ na jantaru, zvláštní formě uhlíkaté nerostné látky, někdy řazené mezi minerály. Jantar vykazoval přitahování lehkých předmětů, jako například peří nebo kousků papyru, pokud byl uveden do zelektrizovaného stavu třením. To dnes označujeme pojmem elektrická síla a elektrické pole, protože při tření s jinou látkou např. jiným minerálem a vzájemným kontaktem docházelo k jiskření. Odtud pochází úplně první zmínky a název pro elektřinu. Etymologie popisuje a zkoumá původ a historický vývoj slov, a z tohoto pohledu jantar je v řečtině označován jako *έλεκτρον*, což je původ pro označení těchto jevů. [2]

Můžeme konstatovat fakt, že antická kultura, a především věda tvořily bohaté rozmanité stavební kameny pro další civilizace, které se postupně rozvíjely od poznatků starověkého Řecka a Říma, to platí i v oblasti magnetismu. V antice, přibližně ve 2. tisíciletí před naším letopočtem, pojem *magnetismus* byl spojován se specifickou přitažlivou silou, kterou doposud nikdo neznal, a její poznávání se v následujících tisíciletích vyvíjelo.

V antické vědě se objevuje tzv. magnetovec, jehož původ pochází z řecké oblasti Magnesia a až v tento moment jsme schopni říct, že název *magnetismus* je odvozen od tohoto území, v současné době Manisa. Po celém území se vyskytovala železná ruda, která měla specifické vlastnosti (v aktuální době neznámé). Proto se vytvořilo pro železnou rudu pojmenování s názvem magnetovec (magnetit). [7] Zde se zejména Aristoteles, Demokritos, Anaxandros a Thales z Miletu zasloužili o přesnou charakteristiku jevu (na danou dobu) a především položili základy elektřiny a magnetismu.

Na vývoj a objev v Řecku reaguje Čína. Odtud pochází první vynález využitý v praxi. Vynález zvaný kompas, pochází z Číny, protože Číňané uměli, na rozdíl od Řeků, magnetit využít.

Konstrukce prvního kompasu byla vytvořena přímo z magnetitu. Měla tvar pomyslné lžičky, která se volně otáčela na kovové nemagnetické podložce (bronzové nebo měděné) a druhý konec „lžice“ ukazoval zeměpisnou orientaci. [24] Tento popis je patrnější z obrázku č. 1.



Obrázek 1 – první konstrukce kompasu [40]

### 1.1.2. Středověk

Další vývoj v oblasti fyziky je patrný z období středověku, kdy se jasně formovaly první přesnější teze i o projevech magnetismu. Popisy a charakteristiky byly jasnější a ucelenější.

Mezi významné osobnosti, které přispěly v této době k rozvoji magnetismu, patří Petri Peregrinus de Maricourt dílem *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucarcourt, Miltem, De Magnete* (překlad – Dopis Petriho Peregrina z Maricourtu Sygerovi z Foucacourtu, ve vojenské službě, O magnetu). Tento komplikovaný název díla je známější pod názvem *Epistola de Magnete*. V díle Peregrinus popisoval první experimentální projevy magnetismu. Při práci a bádání v oblasti magnetismu Peregrinus spolupracoval s Rogerem Baconem. Společně popsali projevy přírodních magnetů. Ve smyslu, že magnet má dva póly, které nelze od sebe oddělit. Také přicházejí s objevem magnetického momentu, závislého na materiálech, které ovlivňují působení magnetického pole. [2] Později je tato vlastnost pojmenována jako magnetická susceptibilita.



Obrázek 2 – ukázka původní Peregrinusovy epistoly o magnetismu [29]

V době středověku se v magnetismu můžeme setkat s výrazem *magnes rotundus* = *velké oko*. Tento pojem je spojován s určením pólu na kulovitém magnetu. Mělo to souviset s nebeskými jevy a jejich orientací, což se následně ukázalo jako nesprávné. [2], [24]

Další důležitý pojem, který vznikl v období středověku je *zemský magnetismus*. Bezpochyby souvisel s kompasem, který byl na tu dobu brán jako novodobý vynález a jeho využití bylo rozšířenější mezi běžnými obyvateli.

Zemský magnetismus souvisel se změnou odchylky magnetické střelky podle polohy zemských magnetických pólů v blízkosti zemských zeměpisných pólů. Tuto skutečnost lze vysvětlit v příkladu – v blízkosti severního zeměpisného pólu se nachází jižní magnetický pól, proto se severní magnetický pól nazývá pól magnetiky. [2], [32]

Později bylo prokázáno, že zemský magnetismus souvisí s objevem magnetické deklinace. Tento jev je obdobou zemského magnetismu, avšak je založen na principu odchylky, která udává vychýlení magnetické střelky kompasu od geografického poledníku. Nadefinování vlastnosti magnetické deklinace je přisuzována Kryštofu Kolumbovi z roku 1492, který tento projev magnetického pole Země využíval při svých plavbách. Později se i další evropští mořeplavci připojili k používání kompasu, který byl založen na principu magnetické deklinace. Kolem roku 1581 Robert Norman publikoval knihu s názvem *The New Atractive*. V tomto díle autor popisuje využití kompasu při plavbách na moři. [2], [24]

Obrázek středověkého kompasu, kde je patrná střelka na hrotu i s víčkem, je uveden pod číslem obrázku 3.



Obrázek 3 – ukázka středověkého kompasu [15]

### 1.1.3. Novověk

V novověku významnou vědeckou osobností, která se zabývala magnetickými projevy a jejich zkoumáním, je William Gilbert, který byl svou specializací lékařem. Jedná se o poměrně známou osobnost z dob středověké Anglie. Veškerá zkoumání a experimenty související s přírodovědnou oblastí si platil ze svého, neboť jeho primárním zaměřením bylo lékařství ve vyšší společnosti. Z dostupných zdrojů víme, že byl lékařem královny Alžběty I. a jejího syna Jakuba I. Vydává rozsáhlou knihu *De Magnete (O Magnetu)*. Gilbert ve své publikaci shrnul doposud známá fakta, ale také ji obohatil o zkoumání, která provedl on sám na základě tehdejších a dostupných metod. [2], [10]

Dílo *De Magnete* bylo členěno do 6 spisů. Každý spis se zabýval něčím jiným souvisejícím s magnetismem. V rozsáhlém díle se poprvé objevuje hypotéza o Zemi, jako velkém magnetu. Vysvětluje podstatu magnetismu a elektřiny a jejich vzájemné korelace. Veškeré své hypotézy a domněnky Gilbert demonstroval na více než 600 experimentech. [2], [8]

Období 17. století je známé zámořskými objevy a dlouhými cestami po moři, a tak se rozšiřuje používání kompasu i do menších lodí.

V prvních fundamentálních a podrobně zpracovaných faktech Gilbert objasnil:

- magnety mají dva póly, kde jeden nelze oddělit samostatně od druhého (*doplnění důkazu od Peregrinuse – první definice pólu a diskuse o „záhadné nadlidské síle“*),

- popisoval odpuzení elementu (nyní bychom řekli magnetického náboje) z tělesa za pomoci plamene – látku odmagnetizoval,
  - popsal magnetizaci různých látek (permeabilitu – přesněji definuje Ampère),
  - poprvé zavádí pojem „magnetická indukce“,
  - zmínil magnetickou sílu, a to pouze jako pojem, bez uvedení matematické závislosti.
- [2], [8], [43]

V čem se však pletl, byl fakt, že magnetismus a elektřina spolu nesouvisí, že nemají podobné vlastnosti a nosič makroskopické elektrické jednotky (náboj), který je v pohybu, není jedním ze zdrojů magnetického pole. Snažil se tedy zcela od sebe diferencovat jevy elektřiny a magnetismus. Ze současných vědeckých důkazů víme, že by toto bylo pravdivé tvrzení, pokud by se náboj nepohyboval.



Obrázek 4 – portrét Williama Gilberta [43]

V průběhu následujícího 18. století dochází k velkému rozvoji vědy, techniky a řemesel. Tento fakt se také projevuje ve fyzice magnetismu, protože již v 18. století dochází k prvním průmyslovým, a především hromadným výrobám umělého magnetu. Toto bylo velmi nezvyklé, jelikož do 17. století veškeré magnetické předměty byly vyrobeny z přírodního magnetu – magnetovce, a tím také magnety byly drahé. O výrobu umělého magnetu se zasloužili dva fyzici. První je považován za exaktního vědce, který veškeré výroky ověřoval experimentálně a tím byl Johan Conton, druhý, Johan Michel, byl svým zaměřením považován za astronoma. V podstatě u jejich vynálezu umělého magnetu šlo o výrobu tzv. „dvojitým tahem“. Způsob výroby dvojitým tahem vycházel z technologického popisu Contona a Michelsona následujícím

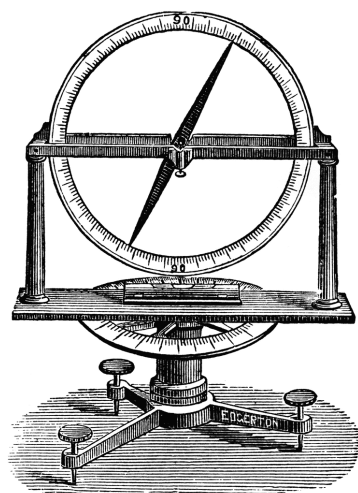
způsobem: „železná tyč se má kovat v horizontální poloze v severojižním směru zemského magnetického pole, aby bylo dosaženo jejího trvalého zmagnetizování“. [2]

Řemeslné výroby umělých magnetů se ujali obchodníci a svojí původní profesí vědci, Gowin Knight a Edward Nairny. [2]

Protože vzdělanost v 18. století nebyla na vysoké úrovni, lidé odmítali jakékoli vědecké pokroky a vynálezy. To se však u magnetů změnilo, mj. tím, že je začala používat i církev. Někteří se domnívali, že vliv zmagnetizovaného kovu je léčivý a blahodárný pro kosti, kožní nemoci aj. Také cena řemeslně vyrobených magnetů klesla vůči přírodním magnetům, neboť látka umělých magnetů nebyla tak drahá a nedostupná. *Přírodní magnety* byly vyrobeny z přírodních nerostů magnetovce (železná ruda = magnetit, oxid železnato – železitý), zatímco *umělý magnet* byl vyráběn z oceli a jiných slitin.

V průběhu několika desetiletí v 18. století docházelo k formálním popisům nejen na teoretické úrovni. S nástupem Isaaca Newtona, došlo k popisu závislosti magnetické síly v magnetickém poli na vzdálenosti jiného tělesa, které ovlivňuje dané pole. O této skutečnosti se zmiňuje ve svém díle *Principie*. [8]

Za významného experimentátora v oblasti magnetismu lze považovat astronoma Edmunda Halley. Ten se pokoušel vycházet z myšlenek Newtona. Jak pojednává literatura [2] princip Halleyho experimentu spočíval v upevnění magnetické jehly ve středu cejchovaného kvadrantu, kde trvalý magnet začal působit na jehlu. Ta začala reagovat na magnetické pole tak, že bylo možné odečítat výchylku jehly. Magnet byl umístěn v kolmém směru k magnetickému poledníku. Celková odchylka jehly se přímo úměrně měnila v závislosti na vzdálenosti magnetu. [2] Tento experiment se uskutečnil ke konci 18. století. Uvedený experiment je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 5 – Halleyho experiment s jehlou a umístění magnetu pro měření závislosti na vzdálenosti [13]



Obrázek 6 – portrét Edmunda Halleyho [41]

Po Halleyho experimentu a názorné demonstraci závislosti vlivu permanentního magnetu na jiný kovový předmět, prokazuje souvislosti a pravdivost Charles Augustin de Coulomb dalšími exaktními demonstracemi, které potvrzovaly zákonitosti magnetických sil v magnetickém poli. Provedl dva důkazové experimenty, které na sobě nebyly závislé. [2]

Při první demonstraci postupoval následovně: „V první z těchto metod použil krátkou magnetickou střelku volně oscilující kolem své základní polohy a svisle zavěsil zmagnetizovaný ocelový drát délky kolem 25 palců (tj. 0,635 m, přepočteno na základě zdroje [5], [20]). Zaznamenával periodu oscilující jehly pro malé amplitudy. Nejdříve pod vlivem samostatného magnetického pole Země, a potom s vertikálním magnetem drženým v různých vzdálenostech od zmagnetizované jehly“. [2]



Při druhé demonstraci Coulombe využil torzních vah podobným způsobem jako při empirickém odvození svého zákona pro působení elektrických nábojů. Konstrukce tohoto přístroje se skládala z kruhové stupnice, jejímž středem procházela trubice s vnitřním mosazným drátem. Tento drát byl z jednoho konce připevněn k mikrometru, který se byl schopný otáčet v různých úhlech. Tyto úhly bylo možné odečítat na ocejchované hlavici mikrometru. Na svém dolním (druhém) konci drátu byl zavěšen třmen, do kterého byl umístěn trvalý tyčový magnet. V obecném případě se torzní váhy využívají k měření velmi malých sil. [2]

Na základě jednotlivých výchylek a zároveň se závěry předešlého experimentu s elektrickými náboji, bylo možné vyslovit faktickou formulaci, že velikosti magnetického pole, tedy silového projevu magnetismu hraje důležitou roli ve vzdálenosti nějakého kovu od trvalého magnetu. Vyslovil tak matematickou formulaci, že platí inverzní kvadratická vzdálenost síly na vzdálenosti předmětu. Coulombův zákon pro elektrické náboje má následující matematický zápis:

$$F_E = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_{12}^2}, \quad (1)$$

kde  $k$  je konstanta v Coulombově zákoně;  $Q_1; Q_2$  jsou elektrické náboje a  $r$  je vzdálenost těchto nábojů. [4]

Po formulaci Coulombova zákona pro elektrickou sílu, úplně stejně zformuloval matematický vztah pro magnetickou sílu, který měl tvar následující

$$F_M = k_m \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2}, \quad (2)$$

kde  $k_m$  je konstanta závislá na volbě jednotek;  $m_1$  a  $m_2$  jsou magnetická množství (množství magnetického fluida – *magnetická pólová mohutnost* v pólech);  $r$  vzdálenost pólů. [24]

Ve vědě a lékařství se magnetismus začal hojně využívat díky lepší dostupnosti, prostřednictvím řemeslné (umělé) výroby a celkovém rozvoji elektrotechniky. Fakta o léčebných metodách počátkem 19. století jsou jasným důvodem, proč až nyní se stává magnet součástí života mnoha lidí. Z hlediska lékařského využití se magnet používal jako „lapač“ nebo „odpuzovadlo“ chorob a nemocí. Dle záznamů na přelomu 18. a 19. století jej lékaři využívali tak, že na postižené místo (infikované, chorobné, nemocné) aplikovali magnet a po určitý časový interval s několika opakováními tak postižené místo léčili. Kupodivu v některých případech se nemocný pacient uzdravil, v současné době se můžeme jen domnívat, zdali to byla



náhoda nebo v dané době existovaly tak silné magnety, které odpuzovaly nebo naopak zachycovaly na své póly celé spektrum chorob a infekcí (můžeme se pouze domnívat, že šlo o náhodu, takovému odpuzování nemocí mohli věřit jen blázni nebo šarlatáni). První varianta je z pohledu vědeckého přístupu správná. Jednalo se o rozkvět magnetického léčení, neboť síly a účinky magnetu byly považovány za čarovné, magické a spirituální. Bohužel těmto myšlenkám uvěřili i někteří lékaři. Pro nevzdělané vrstvy by tyto skutečnosti byly možné a tolerovatelné, zatímco u učenců a vzdělaných lidí se to může zdát jako pošetilost. [2]

Německý lékař a zubař Friedrich Wilhelm Klarich koncem 18. století publikoval spis s názvem *Versuche der magnetischem Kraft bei Zahnschmerzen* (český překlad: *Pokusy s magnetickou silou při bolestech zubů*). Klarich v tomto díle prohlásil: „*nemocní pociťovali nejprve velmi silný chlad a nedlouho potom vlnivé pohyby, až tepání bolesti v zubu zmizí*“. [2] Říká se, že tak do konce roku 1765 vyléčil přes 172 pacientů.



Obrázek 7 – Portrét významného francouzského fyzika Charlese Augustina de Coulomba [8]

Po období vývoje popisů magnetických polí magnetů (látek uvedených do zmagnetizovaného stavu), se začaly v první polovině 19. století objevovat zmínky o souvislosti magnetických a elektrických jevů, tj. o elektromagnetismu.

Bezpochyby tento pojem zazněl již na přelomu 17. a 18. století, ale byl pouze teoretickým, ba dokonce vůbec neprokázaným jevem. O existenci elektromagnetismu začal spekulovat již zmiňovaný William Gilbert v díle *O magnetu*, koncem 17. století, také kněz Pierre Gassendi, který uskutečnil experiment spojený se zmagnetizováním tyče pomocí úderu bleskem. Něco podobného se však stalo kolem roku 1676 Athanasisu Kircherovi. Objevil prepolarizování magnetické stříelky kompasu při bouři, tedy opět tento jev souvisel s blesky.

V současné době se můžeme domnívat, že tyto skutečnosti byly v dané době velkou záhadou. V následujících letech, až do Voltova vynálezu (Voltova sloupu), tato skutečnost ani nemohla být vědecky prokázána z důvodu nepřesných informací o elektřině, neboť do této doby nebyla nalezena exaktní shoda s magnetismem. Do Voltova známého a velmi přínosného objevu zdroje napětí, který byl známý od roku 1800, [2], nemohlo dojít k přesné charakteristice a propojení elektrického a magnetického pole, tedy vzniku elektromagnetismu. V literatuře [2] můžeme nalézt první, avšak neúspěšné pokusy s elektrickým proudem, které by v důsledku nich měly vyvolat magnetické pole. Jedná se například o experimentátora Carla Wilhelma Boeckmanna. Tento vědec v roce 1801 publikuje následující fakt: „*U galvanicko-elektrických proudů jsem nezjistil žádné zvláštní vlivy na magnetickou střílku*“. [2], [24]

Mezi další neúspěšné experimentátory patří italský advokát Gian Domenico Romagnosi nebo přírodovědec Gazzeta di Trento.

Dalšími, avšak úspěšnými vědci v kategorii experimentů jsou němečtí fyzici a pedagogové na německém gymnáziu v Berlíně Johannu Heidrichu Voigthovi a Johannu Salomovi Christophu Schweiggerovi. Jak uvádí literatura [2], Schweigger ve svém článku, který publikuje kolem roku 1806, píše: „*Elektřina nastaví jehlu na magnetický poledník*“ [2], tudíž je patrné, že zdrojem elektřiny byl stejnosměrný elektrický proud, protože střídavý proud ještě nebyl znám.

Přelom nastává v roce 1820, kdy se do čela vědy a experimentů v elektřině a magnetismu dostává dánský fyzik Hans Christian Oersted. Jeho objev byl velmi přínosný pro budoucnost a je také známý tímto citátem: „*The agreement of this law with nature will be better seen by the repetition of experiments than by a long explanation*“ [12], (doslovný překlad – *podobnost tohoto zákona s přírodou bude lépe vidět na opakování experimentů, než na dlouhém vysvětlování*).

Než se Oersted proslavil objevem elektromagnetismu, jeho profesní dráha byla spíše chemického a farmaceutického zaměření, až později se začal zajímat i o biologii, matematiku a fyziku. Ovlivňovaly ho především Kantovy filozofické myšlenky o přírodě, vědě a umění. [26]

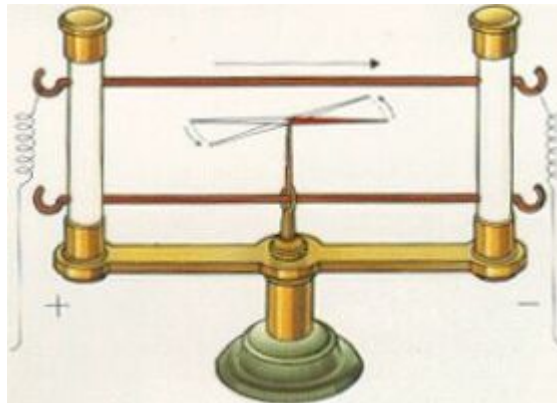
*Immanuel Kant byl filozof, který dal novou podstatu filozofii v oblasti epistemologie – teorii poznání a kritice čistého rozumu, také teorii etiky a filozofii náboženství. V oblasti přírodovědné a technické dával do sporu teoretický a praktický rozum. Teoreticky se člověk učí a prakticky člověk ověřuje.* [16] Tyto myšlenky a teorie Oersted obdivoval a nechal se jimi vést.

Před objevem souvislosti elektrických a magnetických jevů v dubnu 1820, byly popsány jen některé vlastnosti elektrického proudu, např. teplo ve vodiči vyvolané průchodem

stejnoseměrného proudu. Jak je uvedeno v literatuře [8], již v roce 1813 Oersted předpokládal úzký vztah mezi elektřinou a magnetismem, to však tehdy ještě experimentálně nedokázal. Tuto neověřenou hypotézu se 7 let pokoušel experimentálně prokázat, ale jeho vědecká zaneprázdněnost byla ovlivněná tím, že přednášel na univerzitě v Kodani a také, že se podílel na několika dalších projektech. [26]

Experiment se mu podařilo objevit prakticky náhodně. Po dokázání přítomnosti magnetického pole v souvislosti s vlivem stejnosměrného proudu na magnetku, následoval přesnější matematický popis. O ten se zasloužil A. M. Ampère. Tento popis byl základem pro dnešní, všeobecně uznávanou charakteristiku obou polí (elektrického a magnetického) pro J. C. Maxwella v jeho teorii o elektromagnetickém poli.

Oerstedův experiment někdy zvaný jako „náhodný experiment“ elektromagnetismu, spočíval v následujícím – umístil do uzavřeného vodivého obvodu tvaru úzkého obdélníka magnetickou strelku, tj. magnetku, která byla v rovnoběžné poloze s vodičem, kterým protékal stejnosměrný elektrický proud. Jakmile tímto obvodem začal protékat proud, strelka se vychýlila o  $90^\circ$ , což byla známka působení magnetismu. Pokud obrátil směr proudu tak, aby se polarita změnila, magnetka se vychýlila naopak. Oerstedovi se z počátku provedení tohoto experimentu nedařilo, neboť při zahájení demonstrace napolohoval strelku kolmo, tudíž při interakci vodiče s elektrickým proudem se nemohla strelka vychýlit. [26]



Obrázek 8 – Oerstedovo experimentální zařízení v dubnu 1820 [11]



Obrázek 9 – portrét Hanse Christiana Oersteda [11]

Oersted bádání v této oblasti přírodních věd ukončil následujícím vyjádřením, které je citované ze zdroje [2]: „Tyto pokusy, jak se zdá, ukázaly, že magnetka byla galvanickým přístrojem (proudem) vychýlena ze své polohy, a to tehdy, když galvanický okruh byl uzavřen, a nikoliv otevřen, jak o to před několika lety marně usilovali velmi proslulí fyzici“.

Uvedené informace vedly k prvním úvahám o vzniku tzv. elektromagnetického pole a jeho využití v technickém odvětví. Mezi další vynálezy spojené s magnetickým a elektrickým polem a jejich jevy patří například:

- solenoid a toroid, tedy cívky jako elektrotechnické součástky,
- elektromagnetická indukce a charakteristika nestacionárního magnetického pole,
- elektrický zvonek,
- elektrický telegraf,
- elektromagnet.

Po Oerstedovi se na fyzikálním působišti objevuje zmiňovaný André Marie Ampère a Francois Dominique Arago, kteří zkoumají provedené pokusy po teoretické stránce, tedy na matematickém základě. Formulují fyzikální veličiny jako je magnetická indukce  $\vec{B}$  nebo magnetická síla  $\vec{F}_M$ . Na základě těchto skutečností se později zformulovaly fyzikální vztahy pro ampérův zákon celkového proudu, Biotův, Savartův a Laplaceův zákon a později i pro zákony v nestacionárním magnetickém poli, zejména Faradayův zákon. Tyto základy pro teoretickou fyziku byly později využity a uceleně doplněny o formální souvislosti J. C. Maxwellem. [2], [8]

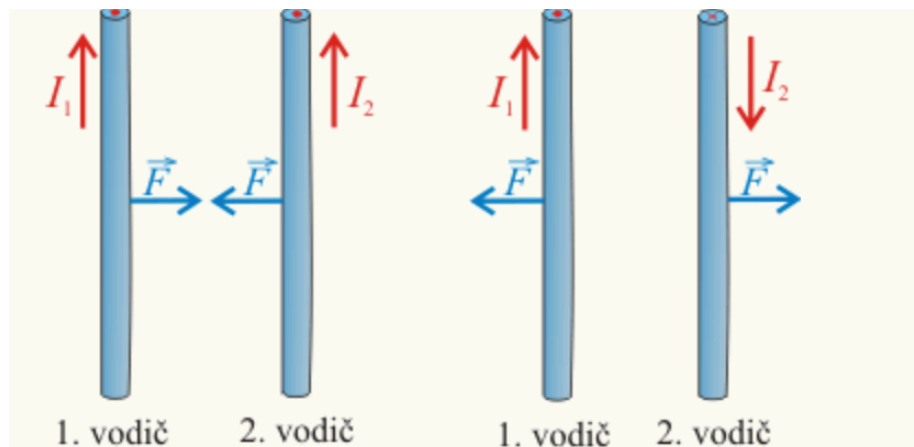
O pár let později byly vynalezeny první přístroje, které měřily elektrické veličiny na základě elektromagnetismu. Jednalo se o využití Oerstedova objevu. Mezi přední fyziky

zkoumající přístroje a jejich postupné zdokonalování patří Johann Salomo Christoph Schweigger a Johann Christian Poggendorf a James Cumming, ale také William Thomson. Společně sestavili tzv. galvanometr. Později toto bylo zdokonaleno tak, aby tyto přístroje byly schopné měřit i malé rozsahy proudů. Kolem magnetky omotali drát, tudíž se redukovaly odchylky a násobila se přesnost i pro malé rozsahy. Tento technicky lepší a přesnější přístroj je známý pod názvem multiplikátor. V současné době „multiplikátor“ známe pod názvem ampérmetr nebo galvanometr pro malé proudy. [2]

V této době se také objevuje první zmínka o elektromagnetu, kdy se zkoumání magnetických projevů a účinků ujali André Maria Ampère a Francois Dominique Arago. Vyrobili první solenoid a zjistili, že elektrický proud v závitech a dutině dlouhé cívky vytváří magnetické pole a také se chová podobně jako tyčový magnet. Kolem cívky se vyskytuje silové působení magnetického pole.

Jako reakci na Oerstedovy experimenty Ampère začíná zkoumat teoretickou podstatu magnetismu a přínos do fyziky. Zabýval se podstatou působení vodičů protékáných proudem na magnetickou střílku a její orientaci. V této době Ampère přichází na určující pravidlo směru magnetického působení proudu z historického hlediska tzv. *pravidlo plavce*. Z literatury [2] toto pravidlo lze interpretovat takto: „*Představme si člověka, který plave s proudem v drátě a který se při tom stále dívá na magnetku, a ať už je nad ní nebo pod ní. Pak konec magnetky směřující k severu se bude vždy vychylovat směrem k jeho levé ruce*“. Nyní toto pravidlo známe pod názvem *Ampérovo pravidlo pravé ruky*. Ampérovo pravidlo pravé ruky mírně doplnil a lépe zformuloval J. C. Maxwell, jak toto pravidlo známe a používáme v současné době. Doplněný a přesněji formulovaný zákon můžeme najít např. v literatuře [1], přičemž se jedná o tak fundamentální pravidlo, že jej najdeme v každé učebnici fyziky o magnetismu: „*Položíme-li pravou ruku na místo vodiče tak, aby prsty mířily ve směru proudu a dlaň byla obrácena k magnetce, pak ta se vychýlí ve směru palce pravé ruky*“.

Později na základě zkoumání elektrických sil Ampère přichází na souvislosti s magnetickými silami. Přišel s obecnou koncepcí, že důsledkem působení elektrické síly, je síla magnetická. Tuto skutečnost lze interpretovat na názorném příkladu. Silové působení mezi dvěma přímými vodiči, kudy protéká elektrický proud je takové, že se přitahují, teče-li v nich proud stejným směrem, a naopak se odpuzují při opačných směrech proudu. Pokud jsou dva vodiče dostatečně dlouhé, avšak na sebe vzájemně kolmé, potom na sebe téměř nepůsobí. Lze tedy říct, že přitažlivá nebo odpudivá síla vodiče explicitně závisí na orientaci proudu. [6] Uvedený příklad je lépe představitelný na základě uvedeného obrázku č. 10.



Obrázek 10 – silové působení proudovodičů při Ampérových pokusech [33]

Obrázek č. 10 vysvětluje podstatu vztahu (18) v kapitole této práce *rekapitulace středoškolských vztahů*.

Z historického hlediska uvedený matematický vztah (3), na který Ampère přišel na základě zkoumání a bádání v oblasti vodičů protékaných elektrickým proudem, kde jako důsledek vzniká síla, lze interpretovat následujícím způsobem:

$$dF = \frac{(i_1 ds_1) \cdot (i_2 ds_2)}{r^n} \cdot (\cos \varepsilon + k \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2), \quad (3)$$

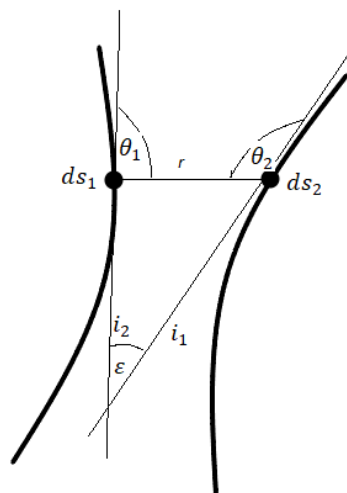
kde  $dF$  je interakční síla působící mezi proudovými elementy  $ids$ ;  $\varepsilon$  je úhel mezi proudovými elementy  $i_1 ds_1$ ;  $i_2 ds_2$ , úhly  $\theta_1$  a  $\theta_2$  jsou mezi směrem proudových elementů a jejich spojnicí a  $r$  je vzdálenost proudových elementů. [2]

Poté Ampère uskutečňuje několik teoretických výpočtu, jak přijít na parametr  $k$ , později však uvedený vztah (3) upravil do následující formy:

$$dF = \frac{(i_1 ds_1) \cdot (i_2 ds_2)}{r^2} \cdot (\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2), \quad (4)$$

kde  $n$  u veličiny vzdálenosti bylo rovno 2, neboť se jednalo o vzdálenost dvou proudovodičů a  $k = -\frac{3}{2}$ . Na vztah (3) (4) přichází na základě experimentálního šetření. [2]

Uvedený matematický vztah (3) lze pro jednodušší pochopení znázornit graficky, tj. obrázek č. 11. Z historického pohledu musím konstatovat, že vztah (3) a následně upravený do podoby vztahu (4) se týká části elektřiny. Vztah, který se týká Ampérový magnetické síly mezi dvěma rovnoběžnými vodiči je vyjádřen ve vztahu (18).



Obrázek 11 – Ampérův zákon silového působení elementů v grafickém znázornění [vlastní obrázek]

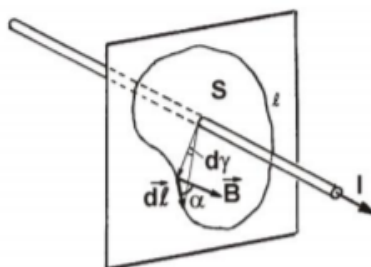
Na základě uvedeného vztahu (4), tedy matematického vztahu pro elektrickou sílu, kterou Ampère definoval po následné úpravě do vektorové formy vznikl nový vztah zvaný jako Ampérův zákon celkového proudu, avšak byl také důsledkem pro vznik Biotova a Savarotova zákona. V literatuře [2] lze dohledat, že vztah (5) definuje integrální vyjádření v Maxwellova upraveném vztahu pro celkový proud v látkovém prostředí, který souvisí s magnetickým polem  $H^I$  a proudem  $I$ :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I . \quad (5)$$

Později tento vztah byl ještě upraven J. C. Maxwellem, ze kterého vycházel vztah pro odvození vektoru magnetické indukce, magnetického toku, popsání pojmu vírové a nezářidlové pole a jeho důsledky, což nám udává čtvrtá Maxwellova rovnice.

Ampère také odvodil zákon celkového proudu ve vakuu, což je fundamentální poznatek pro dnešní fyziku elektrického a magnetického pole. Jedná se o určení účinku magnetické indukce  $\vec{B}$  v definované uzavřené křivce  $l$ . Toto odvození pro zákon celkového proudu lze znázornit na obrázku č. 12.

<sup>1</sup> Intenzita magnetického pole je vyjádřena:  $H = \frac{B}{\mu_0} - M$ , kde  $M$  je magnetizace, fyzikální veličina vyjadřující magnetické vlastnosti látkového prostředí,  $B$  magnetická indukce a  $\mu_0$  permeabilita vakua.



Obrázek 12 – schéma středového úhlu mezi plochou a vodičem [3]

Na základě obrázku č. 12 a zdroje [3] lze odvodit vztah (6) pro tzv. středový úhel  $d\gamma$ , přičemž  $d\vec{l}$  interpretuje vektorový element na délce  $l$ , jehož vzdálenost je určen průvodičem  $\vec{r}$ .

$$d\gamma = \frac{dl \cos \alpha}{r} \rightarrow dl \cos \alpha = r d\gamma, \quad (6)$$

$d\vec{l} \cdot \cos \alpha$  definuje velikost průmětu elementu  $d\vec{l}$  v ortogonálním směru k  $\vec{r}$ . Úhel  $\alpha$  nám charakterizuje směr  $\vec{B}$  a  $d\vec{l}$ . Poté lze sestavit integrální tvar tohoto křivkového elementu tak, že použijeme vztahu (6):

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_l B dl \cos \alpha = \oint_l \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\gamma = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\gamma, \quad (7)$$

tudíž lze definovat vztah (8) v konečném tvaru:

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (8)$$

Zde je nutné dodat, že uvedené vztahy (5) a (8) jsou interpretovány i v diferenciálním tvaru, to však bylo z historického hlediska zavedeno později. [3]



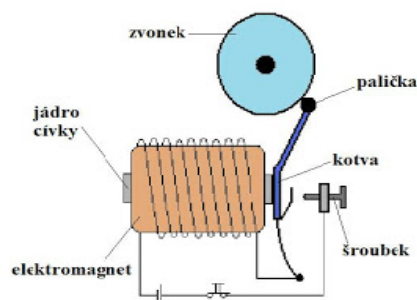


Obrázek 13 – portrét Andrého Maria Ampéra [28]

Ve skutečnosti se objev elektromagnetu připisuje amatérskému fyziku Williamu Sturgeonovi. Jako první zkonstruoval reálný a fungující elektromagnet. Konstrukce, jak uvádí literatura [8] byla následující – drát z měkké oceli byl navinutý kolem jádra z feromagnetické látky (železná tyče tvaru podkovy). Přičemž závitů na drátu bylo 16 a byly od sebe dostatečně odděleny. Následně k této konstrukci připojil galvanický člunek (zdroj elektrického proudu) s deskami o ploše 130 čtverečních palců (tj. 20 x 40 m). Tento vzájemný silový účinek dokázal zvednout a přenést závaží až o hmotnosti 4 kg. Okamžitě téhož roku (1825) tento vynález vzbudil obrovský zájem. Začíná se vyrábět ve velkém množství, tudíž přechází do hromadné (řemeslné) výroby. Nejznámějším konstruktérem je americký elektrotechnik a fyzik Joseph Henry. Henry dokázal později vyvinout elektromagnet se zdvihovou hmotností 1,5 tuny. [2]

K následným využitím elektromagnetu patří elektrický zvonek a telegraf.

Fungování elektrického zvonku je založeno na následujícím principu: jakmile bylo stisknuto zvonkové tlačítko (sepnutím obvodu) z cívky navinuté na jádře se stal magnet. Tento magnet přitáhne kotvu a tím palička udeří do cimbálku (zvonku). Přiblížením kotvy k cívce dochází k přerušování elektrického obvodu, tudíž cívka přestává být magnetem a zvuk odezní. Následně se opět kotva odtáhne od cívky tak, že se obvod opět uzavře a cívka se stane magnetem. Tento děj se opakuje cyklicky po dobu držení zvonkového tlačítka. [9], [38]



Obrázek 14 – ukázka elektrického zvonku [38]

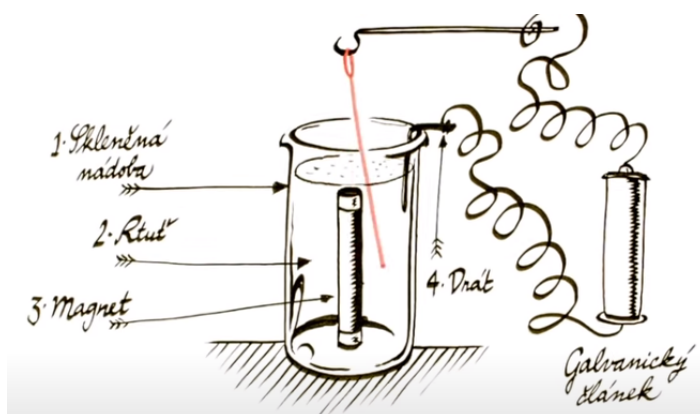
Dalším významným objevem v oblasti elektrického a magnetického pole bylo vynalezení prvního elektrického telegrafu. Jednalo se rovněž o využití elektromagnetu. Lze však konstatovat, že tento vynález nesl velké praktické nepřesnosti, tudíž jeho první modely nemohly být prakticky využívány. Vynález prvního funkčního elektrického telegrafu měl být sestaven v roce 1835. Hlavními badateli byli Pavel Schilling, Karl Fridrich Gauss a Ampère. Na základě literatury [2] se lze dopátrat toho, že princip *Schillingova telegrafu* vycházel z Oerstedova a Thomsnova přínosu, tedy z výchylky magnetky vlivem průchodu elektrického proudu cívkou. Zde svůj přínos nachází i tzv. multiplikátor, který byl přesnějším měřidlem malých proudů. Později princip Schillingova telegrafu byl modifikován Ampérem, a to tak, že bylo použito 24 galvanometrů s magnetkami, které byly označeny písmeny a číslicemi, ale prakticky nebyly využité, protože se magnetky mohly pohybovat doleva nebo doprava, a to nebylo efektivní. [2]

Další prakticky využívaný elektrický telegraf byl založen na principu tří magnetických střelek, které se vzájemně vychylovaly do stran a různou kombinací tvořily signál. Později k nim byly přidány kotouče, kde byla písmena a číslice. O pár let později, místo elektromagnetických střelek se signál posílal přes pružinu pomocí tlačítka, které dokázalo přerušovat signál, a tak vznikal přenos informace. V roce 1844 na základě tohoto velmi důležitého vynálezu vzniká Morseova abeceda. Vynález telegrafu byl využíván například v kolejové dopravě, na frontách za války, při mořských plavbách ale také k zasílání informací mezi lidmi. Morseova abeceda začala být oficiálně a světově uznaná až v roce 1918. [45]

V průběhu let 1820 – 1830 bylo přesněji popsáno magnetické pole permanentního magnetu a stanoven popis pole pomocí magnetických indukčních čar na základě chování železných pilin. Také se objevila první zmínka o hysterezní křivce. O tyto skutečnosti se zasloužil německý fyzik Thomas Johann Seebeck. [2]

V letech 1820 – 1825 M. A. Ampère s H. Ch. Oerstedem vyvíjejí první prototyp elektromotoru, který byl založený na doposud známých principech o elektromagnetickém poli. Jednalo se o to, že chtěli dokázat hypotézu o přeměně elektromagnetické energie na energii mechanickou. Na tento fakt ihned navázal Michael Faraday, který realizoval jejich experiment názorněji. Uvedl vodič do trvalého pohybu za pomoci elektrického proudu a magnetismu. [8]

Experiment realizoval následovně. Do skleněné nádoby obsahující rtuť vložil vertikálně ke stěně nádoby tyčový magnet, následně do rtuti na okraj nádoby vložil volně drát. Jako zdroj napětí použil galvanický článek. Jeden pól článku byl připevněn na volně visící kov, který měl na druhém konci svislé feromagnetické tělíčko ponořené ve rtuti. Druhý pól připevnil k volnému drátu na stěně nádoby. Ve chvíli, kdy začala působit elektrická síla se silou magnetickou, feromagnetický drát se pohyboval kolem tyčového magnetu. Lze tedy usoudit, že hypotéza o přeměně elektromagnetického pole na pohybovou – mechanickou energii byla pravdivá.



Obrázek 15 – Faradayův experiment o přeměně elektromagnetického pole na energii mechanickou – využití jako elektromotor [2]

Dne 29. srpna 1831 došlo k dalšímu velmi důležitému a přínosnému objevu v oblasti magnetismu. Michael Faraday o něm přemýšlel od roku 1822, protože věřil, že na základě Oerstedova experimentu je možné přeměnit magnetismus v elektřinu. Po roce 1831 se elektromagnetická indukce, kterou objevil a popsal M. Faraday, začíná hojně využívat při výrobě střídavých elektrických proudů.

Fyzikální jev, označovaný jako elektromagnetická indukce, nebo také z historie známý pod názvem megneto-elektrická indukce, podle zdroje [2] spočíval v následujícím. Faraday sestavil dvě cívky, které byly navinuté na společném jádře ve tvaru válce. Jedna cívka byla připojena ke zdroji napětí, přičemž toto napětí střídavě přerušoval, aby vytvořil nestacionární

pole. Pohyb magnetky indukoval ve druhé cívce střídavé impulzy elektrického proudu. Následně 17. října téhož roku do druhé cívky zasouval tyčový magnet a to způsobilo, že se v cívce indukoval elektrický proud.

Z jeho závěrů vyplývá, že k elektromagnetické indukci dochází s časovou změnou magnetického indukčního toku, tedy v nestacionárním magnetickém poli. Nestacionárního magnetické pole můžeme dosáhnout těmito způsoby:

- pohybem permanentního magnetu nebo elektromagnetu (kolem sledovaného místa),
- pohybem vodiče s proudem (konstantním nebo proměnným),
- nepohyblivým vodičem, ve kterém protéká proměnlivý proud.

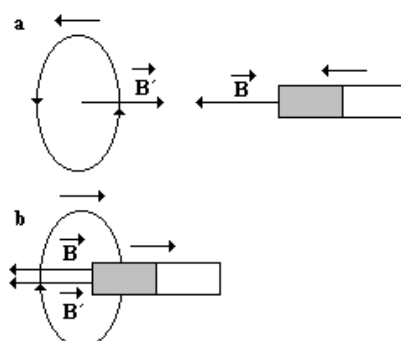
Na obrázku č. 16 je ukázka Faradayovy cívky, kterou zkonstruoval sám na základě současných znalostí o magnetickém a elektrickém poli. Později se však cívkami a jejich přesnou fyzikální interpretací zabývá H. F. E. Lenz.



Obrázek 16 – ukázka dobové Faradayovy cívky [16]

Roku 1834 bylo Henrichem Fridrichem Emilem Lenzem zformulováno Lenzovo pravidlo. Vyjadřovalo podstatu a vzájemnost magnetického pole s vodičem vedoucím indukovaný elektrický proud. Na základě literatury [4] je interpretováno takto: „Indukovaný proud má takový směr, že magnetické pole tímto proudem vzbuzené působí proti změně magnetického indukčního toku, která proud indukovala“. Lenzův zákon lze charakterizovat dvojím způsobem. První je takový, že změna magnetického indukčního toku je větší než 0, tj.  $\Delta\phi > 0$ . Jedná se situaci, kdy k uzavřenému kruhovému závitů budeme magnet přibližovat. U vodiče se bude magnetický indukční tok zvětšovat vlivem větší hodnoty magnetické indukce. Druhá možnost je taková, že změna magnetického indukčního toku je menší než 0, tj.  $\Delta\phi < 0$ .

V tomto případě se magnetický indukční tok bude zmenšovat, protože se magnet oddaluje od kruhového vodiče. Obě situace jsou patrné na obrázku č. 17. [4]



Obrázek 17 – případy Lenzova zákona [4]

Lenzovo pravidlo se projeví jako záporné znaménko v rovnici (9).

V roce 1832 Joseph Henry definuje vlastní indukčnost cívky. Tuto fyzikální veličinu označuje značkou  $L$ . Později jí je přiřazena jednotka  $[L] = \text{H}$  (henry). Ze vztahu pro indukované napětí v cívce o indukčnosti  $L$ :

$$U_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{L \cdot dI}{dt}, \quad (9)$$

vyjádříme indukčnost:

$$-L = \frac{U_i dt}{dI}, \quad (10)$$

kde  $d\phi$  magnetický indukční tok;  $U_i$  indukované napětí v cívce;  $L$  vlastní indukčnost cívky;  $dI$  je změna elektrického proudu;  $dt$  je změna času. Na základě rovnice (10) lze vyjádřit jednotku indukčnosti následujícím způsobem

$$[L] = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} = \text{Wb} \cdot \text{A}^{-1} = \text{H}, \quad (11)$$

přičemž

$$\text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}. \quad (12)$$

O uvedené odvození vztahů se zasloužil také zmiňovaný Ampère. Faraday se mimo jiné věnoval studiu a bádání v oblasti magnetů a jejich vlivů v magnetickém poli. V roce 1845

objevil diamagnetismus a poprvé se hovoří o paramagnetismu, tudíž se zavádějí jejich vlastnosti. [6]



Obrázek 18 – portrét Michaela Faradaye [17]

Ampère a Farady v letech 1844 až 1851 objasnili podstatu a charakteristiku feromagnetických látek, paramagnetických a diamagnetických látek. Tyto jednotlivé skupiny doplnili o řadu látek, které svými vlastnostmi charakterizovaly dané skupiny. Farady například pozoroval chování mědi v magnetickém poli, a to tak, že měděná tyč se orientovala mírně napříč, což byla známka diamagnetismu. Další experiment provedl s hliníkovou tyčí, která měla vykazovat paramagnetické vlastnosti. Hliníková tyč se orientovala přibližně rovnoběžně se směrem magnetických indukčních čar. [2]

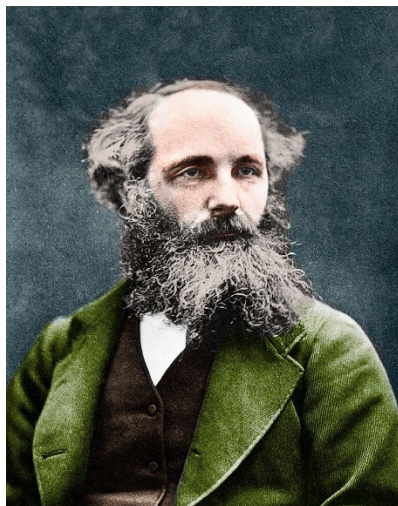
Ve druhé polovině 19. století se na fyzikálním a matematickém působišti objevuje James Clark Maxwell. Je považován spíše za teoretického fyzika, ale později zopakoval některé historicky významné experimenty, které provedli Faraday, Ampère nebo Oersted. Na základě jeho šetření a teoretického bádání Maxwell formuluje tři základní teorie:

- nerelativistickou teorii,
- makroskopickou teorii,
- fenomenologickou teorii. [8]

Uvedené teorie popisuje ve svém díle *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Jednalo se o text 71 stran, kde uceleně charakterizuje elektřinu, magnetismus a elektromagnetismus (statické a stacionární elektrické pole, stacionární magnetické pole a nestacionární magnetické pole). Vlastnosti jednotlivých elementů popisuje rovnicemi, které

nesou jeho jméno. Kniha *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* byla publikována v roce 1864. V roce 1873 publikuje další texty, které jeho teorie potvrzují. [2], [8]

Zde je nutné dodat, že „Maxwellovy rovnice“ byly postupně upraveny až do současné podoby. Původní podoba těchto rovnic byla sice fundamentálním a exaktním vyjádřením elektromagnetického pole, ale byla velmi nepřehledná. Jednalo se o to, že veličiny v kartézském souřadnicovém systému se označovaly jinak pro elektrické a magnetické veličiny. [2]



Obrázek 19 – portrét J. C. Maxwella [34]

Od 50 let 19. století do počátku 20. století docházelo k upřesňování informací a podávání jasnějších charakteristik elektromagnetických projevů na základě různých bádání. Mezi přínosné objevy lze zařadit:

- Wiedemannův a Villariův jev,
- vznik hystereze u feromagnetických látek,
- Curieova teplota – Curieův bod,
- definování vlastností pro materiálové vztahy. [2]

Wiedemannův jev (r. 1858) je založen na principu průchodu vyšších hodnot elektrického proudu feromagnetickou látkou (tvaru tyče), která je umístěna v magnetickém poli. Průchod el. pole způsobí „zkroucení“ tyče. Jinými slovy, šlo o deformaci feromagnetické látky způsobenou elektrickým proudem v magnetickém poli. [2]

Villariův jev (r. 1865) je založen na principu ovlivňování magnetizačních křivek u feromagnetických látek (železo, nikl, kobalt, ruthenium) mechanickým namáháním. Tento jev se může pojít se synonymem „magnetoelastický jev“. V obecném případě tento jev způsobí změnu permeability materiálu. [2]



V roce 1872 Alexander Grigorjevič Stoletov zcela popsal vlastnosti hystereze – hysterezní smyčky. Navázal na výzkum T. J. Seebecka. Stoletov našel nevratný magnetický děj, tedy křivku pojednávající o úplném uspořádání magnetických struktur v závislosti na intenzitě magnetického pole. [2]

V roce 1895 Pierre Curie přichází na skutečnost, že feromagnetická látka, která silně ovlivňuje magnetické pole, má při tavení (rozpuštění) charakteristickou teplotu, od které pozbývá své magnetické vlastnosti. Tuto skutečnost již naznačil středověký fyzik William Gilbert. Curie tento poznatek však obohatil o ucelenější a odbornější zápisy, tudíž se tato teplota nazývá Curiova teplota nebo Curieův bod. [2], [1]

V počátku 20. století došlo k mnoha praktickým aplikacím nejrůznějších objevů a vynálezů v oblasti magnetismu. Mezi využití magnetismu v praxi patří elektronický průmysl, například elektrické kytary, kazetové pásky nebo pevné disky, tj. externí paměti k PC. Hlavní vynálezy spojené s technickým a elektrotechnickým průmyslem byly např. každodenní využívání telegrafů, elektromagnetických jeřábů, zahájení rozhlasového (r. 1919) a později televizního přenosu (r. 1925). V roce 1946 došlo k důležitému objevu a tím bylo objevení prvního prototypu NMR (nukleární magnetické rezonance). V toto případě se jedná o spektroskopickou metodu využívanou v chemii. V současné době se s nukleární magnetickou rezonancí můžeme setkat také i v lékařském prostředí v podobě zobrazení magnetickou rezonancí (MRI). [2]

S magnetickým polem je spojena i supravodivost, objevená v roce 1911 Kamerlinghem Onnesem. Jedná se o zajímavou změnu odporu na teplotě. První experiment Onnes provedl se rtutí, jejíž teplotu snížil na 4,3 K a při připojení do obvodu na základě součástky zjistil, že vykazuje téměř nulový odpor (*o supravodivosti a její současné aplikace později*). [2]

Další objevy a vynálezy ve 20. století:

- r. 1930 vznik cyklotronu, tj. magnetického rezonančního urychlovače (zde magnetické pole zakřivuje dráhu pohybujících se částic),
- r. 1983 Roy Harrigan vyvíjí speciální magnet zvaný levitron, tedy magnet, který se vznáší v magnetickém poli jiného magnetu. [2]



### 1.1.4. Stručná rekapitulace letopočtů a objevů

Tabulka 1 – Souhrn letopočtů z kapitoly „historický vývoj magnetismu“

Období	Událost
6.st.př. n. l	jantar a jeho elektrické vlastnosti
2. st. př. n. l.	objevení naleziště s železnou rudou a jejím pojmenováním jako magnetit
počátek středověku	První vynález spojený s magnetismem - kompas
středověk	P. Peregrinus – první ucelenější dílo o magnetismu a jeho účincích
do roku 1492	kompas se stává běžně využívaný při plavbách na moři
konec 15. století	William Gilbert a jeho dílo De Magnete o rozsáhlejším popisu vlastností magnetu
18. století (1750)	Conton a Michaleson - výroba umělého magnetu
18. století	E. Halley - experiment s magnetkou se závislosti na vzdálenosti s prvkem ovlivňující magnetické pole
18. století	Coulombe definuje vztah spojený s projevem magnetismu v závislosti na vzdálenosti
konec 18. století	lékař (zubař) F. W. Klarich publikuje spisy o léčení magnetem
r. 1820	H. Ch. Oersted definuje pojem elektromagnetismus
po roce 1820	první prototyp el. zvonků a telegrafů s krátkou dosahovostí, první elektromagnet
polovina 19. století	definice Ampérova pravidla a jeho zákona
17. 10. 1831	Faraday definuje elektromagnetickou indukci
1832	J. Henry definuje vlastnosti cívky (dnešního solenoidu a toroidu)
1844 - 1851	definice vlastností feromagnetických, diamagnetických a paramagnetických látek
druhá polovina 19. století	J. C. Maxwell a Maxwellovy rovnice
r. 1858	Wiedemannův jev
r. 1865	Villarův jev
r. 1872	definování vlastností k magnetické hysterezi
r. 1895	definování Curieova bodu
r. 1911	podstata supravodivosti
1929	konstrukce prvního lineárního urychlovače
1930	cyklotron - magnetický rezonanční urychlovač
1946	objevení NMR (nukleární magnetické rezonance)
1983	objev tzv. levitronu

## 1.2. Magnetismus z pohledu současné fyziky

### 1.2.1. Vysvětlení magnetismu

Podobně, jako v okolí nabitých těles vzniká elektrické pole nebo v okolí hmotných objektů se vytváří gravitační pole, tak v okolí magnetů nebo vodičů, kterými protéká elektrický proud vzniká magnetické pole. Magnetické pole působí na ostatní tělesa a ty toto pole zesilují nebo zeslabují. Magnetismus, jako fyzikální jev, se vyznačuje také silovým působením na tato tělesa. V následující kapitole se zaměříme na zdroje, které vytvářejí magnetické pole.

### 1.2.2. Magnetické pole

Magnetické pole je oblast, ve které se projevují silové účinky magnetismu. Magnetické pole můžeme znázornit magnetickými indukčními čarami, které charakterizují silové účinky daného pole. Vytváří se kolem magnetu, kolem vodiče, kterými procházejí makroskopické proudy. Na základě různých zdrojů potom definujeme různé vlastnosti magnetického pole. V případě magnetu se budeme zabývat zejména látkami, které v magnetickém poli zesilují nebo zeslabují toto pole, podle hodnoty magnetické permeability těles. U magnetického pole vytvořeného elektrickými proudy vyjádříme jeho magnetickou indukci, intenzitu, magnetický indukční tok, případně další fyzikální veličiny, které magnetické pole charakterizují. Magnetické pole budeme dělit i podle závislosti na čase, tedy na pole stacionární a nestacionární. [1], [4]

### 1.2.3. Zdroje magnetického pole

Pro magnetismus a jeho vznik jsou důležité zdroje, které jej vyvolají. Mezi 3 magnetické zdroje patří:

- magnetické pole Země,
- zmagnetovaná tělesa,
- vodiče, kterými protéká elektrický proud.

#### **Magnetické pole Země**

Země představuje jeden z možných zdrojů magnetismu. V obecném pojetí se jedná o přirozený a stálý magnet. Literatura [1] uvádí, že je Země velkým planetárním magnetem.

Magnetické pole Země lze přirovnat k tyčovému magnetu, procházející středem Země, který má dva póly. Díky tomuto dipólu lze i u Země definovat magnetický dipólový moment  $\vec{\mu}$ .<sup>2</sup> Dle aktuálních zdrojů je tato fyzikální veličina rovna  $\vec{\mu} = 8,0 \cdot 10^{22} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ , přičemž směr magnetického dipólového momentu svírá  $11^\circ$  s osou rotace Země. Osa dipólu je ve směru  $\vec{\mu}$  a protíná zemský povrch v geomagnetickém severním pólu a v geomagnetickém jižním pólu. Přičemž geomagnetický jižní pól leží na severním zeměpisném pólu a naopak, tudíž indukční čáry magnetické indukce vycházejí z jižní polokoule a vstupují do Země na severní polokouli, jak bychom pól znázornili magnetickými indukčními čarami. Dalšími významnými ukazateli v oblasti magnetického pole Země a geografické orientace jsou magnetická inklinace a magnetická deklinace. [1]

Magnetická deklinace, o které se již zmiňuji v kapitole *historie magnetismu*, je orientovaný úhel mezi zeměpisným severem (odpovídající  $90^\circ$ ) a směrem vodorovné složky magnetického pole (laicky řečeno jde o úhel orientovaný nalevo s kladným znaménkem nebo napravo se záporným znaménkem). Magnetická inklinace je orientovaný úhel mezi vodorovnou rovinou a směrem magnetického pole (laicky řečeno jde o úhel orientovaný směrem nahoru s kladným znaménkem nebo směrem dolů se záporným znaménkem). [1]

### **Zmagnetovaná tělesa**

Jedná se o nejběžnější příklad zdroje magnetického pole v souvislosti s magnety, tedy látek uvedených do zmagnetovaného stavu. Magnety (přírodní i umělé) jsou v tomto případě primárními zdroji magnetického pole. Dle způsobu výroby a chemického složení zpravidla obsahují buď oxidy železa nebo příměsi kovových slitin (mangan, baryum). [1], [6]

Jak uvádí literatura [1], u permanentních (stálých) magnetů je magnetické pole vytvořeno pohybem a orientací orbitalů (závisí na magnetickém a spinovém kvantovém čísle), daného atomu. Pokud je orientace spinů elektronů v jednom směru, tak se navzájem sčítají a těleso trvale vytváří magnetické pole. Pokud je tato orientace neuspořádaná a náhodná, tak se magnetické pole vyruší a materiál je bez magnetických vlastností. Mezi zástupce tohoto typu zdroje magnetického pole patří magnet nebo magnetka a podle závislosti na čase je rozlišujeme na stálé = permanentní a dočasné. Tato problematika je blíže vysvětlena v podkapitole „Zmagnetovaná tělesa a magnetické vlastnosti látek“.

---

<sup>2</sup> Jedná se o fyzikální veličinu, která nám charakterizuje jevy spíše po kvantovém popisu. Obecně lze konstatovat, že nám udává magnetické vlastnosti zdrojů (elementárních částic). „Dipól“ dvoje, tj. v tomto případě dvojice sil v magnetickém poli.

## Vodiče protékané proudem

V tomto přídě je magnetické pole vyvoláno pohybujícími se elektrickými náboji v kovových vodičích (elektrony). Je tedy vytvořeno elektrickým proudem, který protéká vodičem a kolem tohoto vodiče vzniká magnetické pole. Podle literatury [6] se standardně uvádí příklady vodičů:

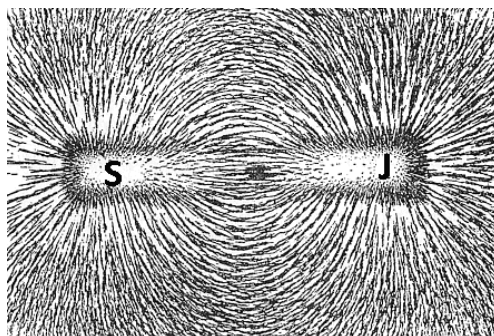
- magnetické pole přímého vodiče,
- magnetické pole – magnetická indukce na ose kruhového závitu,
- magnetická indukce na ose solenoidu,
- magnetická indukce toroidu,
- vektorový potenciál homogenního pole a nekonečně dlouhého vodiče.

### 1.2.4. Magnetické indukční čáry

Pojem magnetická indukční čára je spojována se znázorněním magnetického pole. V obecném případě se jedná o prostorově orientovanou uzavřenou křivku, jejíž souhlasně orientovaná tečna v určitém bodě má směr vektoru magnetické indukce.

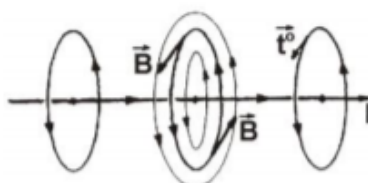
Budeme-li uvažovat magnetické indukční čáry jednotlivých zdrojů magnetického pole, tj. magnetu, přímého vodiče, kudy prochází elektrický proud, cívky (solenoidu, toroidu), potom jejich magnetické indukční čáry budou mít charakteristické tvary. [4]

**Magnetické indukční čáry magnetu** tvoří uzavřené orientované křivky, které vychází ze severního magnetického pólu a vchází do jižního magnetického pólu. Hustota magnetických indukčních čar charakterizuje intenzitu magnetického pole daného magnetu, viz obr. 20.



Obrázek 20 – magnetické indukční čáry trvalého magnetu [27]

**Magnetické indukční čáry přímého vodiče**, kterým prochází elektrický proud, jsou taktéž uzavřené prostorové křivky. Pro nekonečně dlouhý vodič mají indukční čáry tvar soustředných kružnic, které mají svůj střed ve vodiči. Podle čtvrté Maxwellovy rovnice (Ampérův zákon celkového proudu) je toto magnetické pole proudovodiče polem vírovým a zároveň je polem nezářidlovým, které vyjadřuje uzavřenost magnetických indukčních čar.<sup>3</sup>

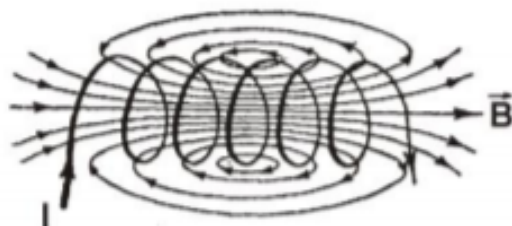


Obrázek 21 – magnetické indukční čáry přímého vodiče [27]

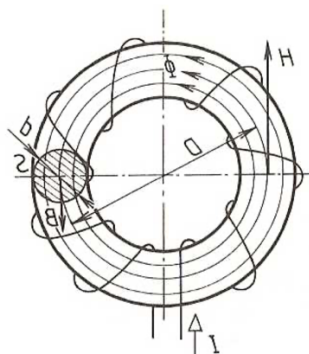
Pro určení směru indukčních čar v dlouhém přímém vodiči využijeme **Ampérovo pravidlo pravé ruky**. Z historického hlediska se Ampérovo pravidlo pravé ruky mírně modifikovalo do současné podoby se současným názvem, neboť původní označení bylo Ampérovo pravidlo plavce. Současnou interpretaci tohoto pravidla lze popsat následovně: „*Naznačíme-li uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu ve vodiči, prsty pak ukazují orientaci magnetických indukčních čar*“ [1]

**Magnetické indukční čáry cívky solenoidu** (dlouhé jednovrstvé cívky) jsou uzavřené křivky, které v dutině cívky jdou přibližně rovnoběžně s osou této dlouhé cívky, což znamená, že znázorňují homogenní magnetické pole. Na základě tvaru cívky rozlišujeme solenoid a toroid. Solenoid je tvarově válcovité těleso, zatímco toroid je prstencové těleso. Magnetické indukční čáry cívky (toroidu) jsou soustředěny v dutině tohoto tělesa tak, že tvar magnetických indukčních čar připomíná soustřednou kružnici se středem v ose prstence. [4]

<sup>3</sup> Magnetické pole je vírové, protože hustota cirkulace je různá od nuly a je zároveň nezářidlovým, protože indukční čáry jsou uzavřené, proto lze říci, že nezačínají a nekončí v magnetickém poli, neboť prochází skrz magnet nebo dutinu cívky.



Obrázek 22 – magnetické indukční čáry solenoidu [23]



Obrázek 23 – magnetické indukční čáry toroidu [23]

### 1.2.5. Přehled fyzikálních veličin používaných na základní a střední škole

Žáci na základních školách nepoužívají k popisu magnetismu a elektromagnetismu matematický aparát. S touto skutečností pracují až na střední škole. Zde uvedu výčet používaných fyzikálních veličin s jednotkami. V následující kapitole „*Přehled fyzikálních vztahů používaných na střední škole*“ uvedu výčet používaných matematických vztahů, vyjadřujících fyzikálně správně veličiny charakterizující stacionární a nestacionární magnetické pole.

Tabulka 2 – Přehled fyzikálních veličin používaných na střední škole

Název fyzikální veličiny	Označení veličiny	Jednotka veličiny
magnetická síla	$[F_M]$	N
magnetická indukce	$[B]$	T
intenzita magnetického pole	$[H]$	$A \cdot m^{-1}$
magnetický indukční tok	$[\phi]$	Wb
vlastní indukčnost cívky	$[L]$	H
indukované elektrické napětí	$[U_i]$	V
susceptibilita	$[\chi_m]$	-
permeabilita vakua	$[\mu_0]$	$N \cdot A^{-2}$

### 1.2.6. Charakteristika pojmů v oblasti magnetismu a elektromagnetismu na základní a střední škole

**Stacionární magnetické pole** je takové pole, které se vyznačuje svými konstantními veličinami, tj. magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole stálou v závislosti na čase. V obecném případě lze konstatovat, že se vyskytuje u všech nepohybujících se vodičů a magnetů nebo u všech vodičů, kudy prochází stejnosměrný elektrický proud. [4]

**Nestacionární magnetické pole** je opakem stacionárního magnetického pole. Vyznačuje se změnou magnetické indukce nebo celkovou změnou magnetického indukčního toku. Zdroje vzniku nestacionárního magnetického pole máme 3:

1. nepohybující se vodič s časově proměnným proudem, tj. vodičem prochází střídavý proud,
2. pohybující se vodič s proudem, který je buď stejnosměrný (konstantní) nebo střídavý (proměnný),
3. pohybující se permanentní magnet nebo elektromagnet. [4]

**Cívka** je elektrotechnická součástka, charakterizovaná svojí indukčností. V obecném případě je cívka tvořena závitou (z měděného nebo hliníkového materiálu) navinuta na feromagnetickém jádře nebo jádro obsahovat vůbec nemusí. Hlavní vlastností cívky je přeměna elektrické energie na magnetickou při nejmenším vnitřním odporu vinutí tak, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Má-li cívka jádro, může se využít jako elektromagnet. Cívku lze využít jako induktor, tj. k indukci elektrického proudu v proměnném magnetickém poli (nestacionární magnetické pole). Podle charakteristického tvaru rozlišujeme tyto typy cívek:

- solenoid,

- toroid. [1], [3], [4]

Solenoid je typ cívky, která je dlouhá s navinutými závitů tak, že její délka je mnohem větší než její průřez jádra. Toroid je typ cívky, která se vyznačuje prstencovým (prostorovým) tvarem s hustými kruhovými závitů, tj. jedná se o stočený solenoid do prstence. Na obrázcích č. 22 a 23 jsou ukázky modelů solenoidu a toroidu.

**Elektromagnet** je cívka, která je tvořena z magneticky měkkého ocelového jádra. Magneticky měkké jádro umožňuje elektromagnet snadno zmagnetovat a odmagnetovat a toto dočasné magnetické pole využít k danému účelu. Princip elektromagnetu závisí na přeměně energie elektromagnetického pole, složeného z působení elektrického a magnetického silového účinku na energii mechanickou. Toho se může v praxi využít při manipulaci na skládkách železného šrotu, kde se nacházejí feromagnetická tělesa, v elektrotechnickém průmyslu, jako elektrických jističů, brzd tramvajových vozů, magnetických relé, apod. [1]

V elektromagnetismu se setkáváme s pravidly a zákonitostmi, které pomáhají určovat orientace a způsoby projevu svého charakteru. Mezi fundamentální pravidlo, které jsme již zmiňovali, patří Ampérovo pravidlo pravé ruky, avšak mezi další pravidla musíme zařadit **Flemingovo pravidlo levé ruky**. Toto pravidlo se pojí k určení směru působící magnetické síly. V literatuře [4] najdeme toto pravidlo s následujícím vyjádřením: „*Položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem*“. Toto pravidlo se také týká případů pohybujících se nabitých částic v magnetickém poli.

### 1.2.7. Fyzikální popis veličin používané středních školách

Přehled fyzikálních veličin, jsem uvedl v kapitole 1.2.5. Zde budu charakterizovat jednotlivé fyzikální veličiny tak, jak jsou běžně uváděny ve škole.

Jednou z prvních veličin z oblasti magnetismu a elektromagnetismu, se kterou se na střední škole, je magnetická indukce. Jakmile si zavedeme a popíšeme veličinu magnetická indukce, zjistíme, že je spojena s důležitou fyzikální veličinou, a to magnetickou silou. Obě veličiny spojuje právě silové působení. K této fyzikální veličině můžeme přistupovat dvojím způsobem. Jedním z nich je tzv. Lorenzova síla, která je zavedena díky pohybům nabitých částic, na základě čehož vzniká magnetické pole (relativistická transformace složky elektrické síly do soustavy pozorovatele). Složka magnetické indukce definuje magnetickou sílu působící na



pohybující se náboj a doplňuje složku elektrickou, aby obě byly součástí vyjádření Lorentzovy síly. Druhý charakter fyzikální veličiny magnetické síly je spojen s působením magnetického pole na vodič, kterým protéká proud. Obvykle se uvádí v učebnicích dlouhý vodič nebo cívka. Tato síla popisující uvedené možnosti bývá také označována jako Ampérova síla. Dalšími fyzikálními veličinami z pohledu elektromagnetismu ve středoškolském učivu jsou např. magneticky indukční tok, vlastní indukčnost, indukované elektrické napětí nebo intenzita magnetického pole. V neposlední řadě se žáci na střední škole mohou setkat s pojmy jako je permeabilita a susceptibilita. V podstatě s permeabilitou vakua se setkáme již při zavádění fyzikální veličiny magnetické indukce ve vakuu. Se susceptibilitou (relativní permeabilitou) se podrobněji setkáme v případě určování magnetických vlastností látek, když studujeme chování magnetických látek (magnetik) v magnetickém poli. [1]

**Magnetická indukce** je vektorová fyzikální veličina. Charakter této veličiny spočívá v kvantitativním vyjádření silových účinků magnetického pole na pohybující se částice s nábojem. Prostřednictvím síly v magnetickém poli a velikostí proudu snadno zjistíme velikost magnetické indukce. Vektor magnetické indukce je kolmý na vektor síly. Podle pravidla vektorového součinu je velikost magnetické síly závislá na úhlu, který svírá směr vektoru magnetické indukce a orientace délky proudovodiče (ve směru proudu). Maximální hodnotu tohoto vektorového součinu pak máme při vzájemně kolmém směru vektoru magnetické indukce a délky vodiče, kdy je  $\sin 90^\circ$  roven 1. Tuto veličinu značíme  $B$ , přičemž její jednotka je T (tesla). Tuto jednotku lze odvodit na základě uvedeného vztahu:<sup>4</sup>

$$B = \frac{F_M}{Il}, \quad (13)$$

Kde  $F_M$  je magnetická síla působící v magnetickém poli o dané magnetické indukci  $B$ ,  $I$  velikost proudu ve vodiči a  $l$  délka vodiče. Potom lze definovat jednotku takto:

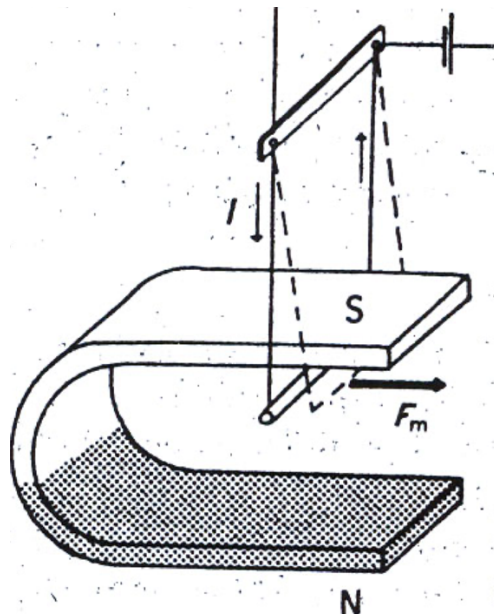
$$[B] = \frac{[F_M]}{[I] \cdot [l]} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \text{T}. \quad [4] \quad (14)$$

**Magnetická síla** v magnetickém poli vzniká na základě průchodu elektrického proudu vodičem, který je umístěn v tomto poli. Existenci této veličiny lze provést experimentem, který bude spočívat v tom, že do podkovitého magnetu, který je charakteristický svými póly, vložíme vodič, kterým bude procházet elektrický proud. V okamžiku, kdy bude vodičem procházet

---

<sup>4</sup> Ve skutečnosti je zavedena pomocí relativistických účinků mezi soustavou pozorovatele a soustavou, ve které se pohybuje nabitá částice.

elektrický proud  $I$ , vodič se vychýlí vpravo nebo vlevo. Vychýlení bude explicitně závislé na orientaci proudu a indukčních čar magnetu, což je patrné na obrázku č. 24 s využitím Flemingova pravidla levé ruky.



Obrázek 24 - ukázka magnetické síly [18]

Důsledkem působení magnetického pole na vodič s proudem, působí na vodiči magnetická síla. Magnetickou sílu budeme značit  $F_M$  s jednotkou N. Magnetickou sílu můžeme charakterizovat složkou tzv. Lorenzovy síly a to vztahem (15). Tato rovnice nám popisuje projev elektrického proudu, který prochází vodičem tak, že je daný elektrický proud charakterizován pohybujícími se náboji o určité rychlosti. Z předešlých úvah víme, že při průchodu elektrickým proudem vodiče kolem něj vzniká magnetické pole, které charakterizujeme magnetickou indukcí.

$$\vec{F}_L = Q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (15)$$

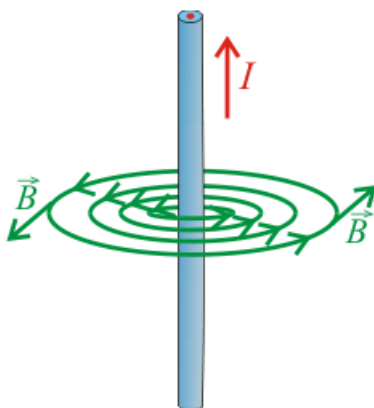
Veličina  $Q$  je velikost náboje,  $v$  je rychlost náboje a  $B$  magnetická indukce magnetického pole. Vztah (15) lze interpretovat i následujícím způsobem:

$$d\vec{F}_L = dQ(\vec{v} \times \vec{B}) = Idt\left(\frac{d\vec{l}}{dt} \times \vec{B}\right). \quad [6] \quad (16)$$

Potom se z Lorenzovy síly vztahu (15) a (16) stává Ampérova síla v upraveném tvaru pro magnetickou sílu ve srovnání se vztahem (13). Můžeme ji tedy chápat tak, že na všechny náboje ve vodiči působí magnetická síla, která se projeví souhrnným (kumulativním) účinkem jako síla na celý vodič. Pro vodič, pohybující se kolmo k vektoru magnetické indukce platí maximální velikost síly, kterou vyjádříme:

$$F_M = BIl. \quad (17)$$

Po odvození vztahu (17), tedy pro určení velikosti magnetické síly pro vodič protékaným proudem, který je definovaný délkou  $l$ , si můžeme názorněji tento fakt představit v následujícím obrázku. Na obrázku jsou také patrné soustředné kružnice magnetických indukčních čar (pro nekonečně dlouhý a přímý vodič), a to tak, že tyto mají střed v místě daného vodiče a magnetická indukce kvantitativně popisuje velikost magnetické síly v určité vzdálenosti. [4]

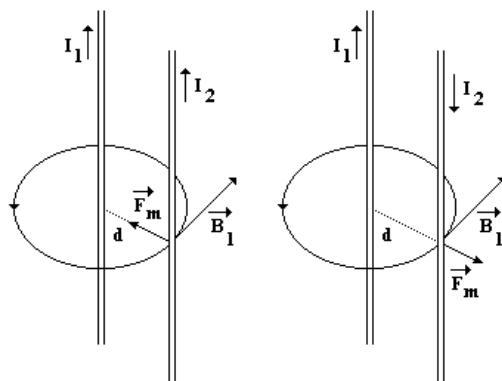


Obrázek 25 – demonstrace magnetických indukčních čar a vektoru magnetické indukce [24]

Ampère také charakterizoval fyzikální vztah pro výpočet magnetické síly pro dva vodiče, kterými protékají proudy souhlasného nebo opačného směru. Zde Ampère popsal fakt, který je zmiňovaný již v kapitole „Historický vývoj magnetismu“, a to takový, že směry magnetických sil závisí na směru proudu procházejícími rovnoběžnými vodiči. Při totožných směrech proudu se vodiče přitahují, zatímco při nesouhlasných směrech proudů se vodiče odpuzují. Velikost magnetické síly dvou rovnoběžných dlouhých vodičů určíme následujícím vztahem:

$$F_M = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l, \quad (18)$$

kde  $l$  je určitá délka vodiče,  $d$  je vzájemná vzdálenost dvou vodičů, tedy délka od jednoho vodiče ke druhému,  $I_1$ ;  $I_2$  jsou jednotlivé proudy ve vodičích a  $\mu$  je permeabilita prostředí. Vztah (18) a jeho aplikace je názorná na následujícím obrázku. [4]



Obrázek 26 – Ampérova síla pro dva rovnoběžné a nekonečně dlouhé vodiče [4]

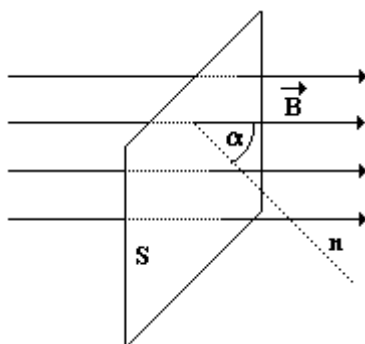
**Magnetický indukční tok** je skalární fyzikální veličina, která nám popisuje tok magnetického pole určitou plochou, např. plochou obdélníkového závitu. Tato plocha je kolmá k magnetickým indukčním čarám, tudíž svírá s vodičem pravý úhel. Fyzikálně však pro matematický popis uvádíme pro tok plochou skalární součin vektoru magnetické indukce a orientovaný vektor plochy (směr normály). Nastane-li případ, že magnetická indukce nebude zcela kolmá na plochu, ale bude svírat určitý úhel, potom musíme uvažovat i tento úhel. Tím úhlem je právě úhel mezi vektorem magnetické indukce a vektorem normály k ploše. Tuto fyzikální veličinu budeme značit  $\phi$  a jednotkou je Wb. Výpočet maximální hodnoty magnetického indukčního toku budeme realizovat z následujícího vztahu:

$$\phi = BS, \quad (19)$$

nebo pokud budeme uvažovat nějaký úhel mezi plochou a vektorem magnetické indukce:

$$\phi = BS \cos \alpha, \quad (20)$$

kde  $B$  je velikost vektoru magnetické indukce a  $S$  je plocha. Ve vztahu (19) se jedná o maximální tok, kdy plocha  $S$  je kolmá k vektoru magnetické indukce  $B$ . [4]



Obrázek 27 – ukázka magnetického indukčního toku vektoru magnetické indukce určitou plochou [4]

Pokud se plocha závitu bude pohybovat (např. ve směru hodinových ručiček), mění se magnetický indukční tok  $\phi$  a budeme uvažovat nestacionární magnetické pole. Pokud dochází k časové změně magnetického indukčního toku, vzniká indukované elektrické napětí. Tuto skutečnost interpretují ve vztahu (21).

**Indukované elektrické napětí** vzniká v nestacionárním magnetickém poli v důsledku Faradayova zákona o elektromagnetické indukci. Uvedený zákon pojednává o vzniku indukovaného elektrického napětí v uzavřeném obvodu, který zapříčiní změna magnetického pole. Změna magnetického pole se projeví v časové změně magnetického indukčního toku  $\phi$ . Z tohoto předpokladu byla vyjádřena závislost pro výpočet indukovaného napětí magnetického pole:

$$U_i = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}. \quad (21)$$

Uvedený vztah (21) lze odvodit a prokázat z myšlenkového experimentu. Budeme uvažovat homogenní magnetické pole o magnetické indukci  $B$ , kde se kolmo vůči magnetické indukci pohybuje vodič o určité délce. Pohybující se vodič se při pohybu dotýká vodičů tvořící elektrický obvod. Voltmetr zaznamenává výchylku na obě strany v návaznosti na pohyb vodiče jedním nebo opačným (druhým) směrem. Při pohybu vodiče působí na elektrony v daném vodiči magnetická síla, kterou lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$F_M = Bev. \quad (22)$$

Tato působící síla uvádí elektrony do pohybu tak, že se elektrony pohybují v záporném směru a jako důsledek tohoto pohybu vzniká indukované elektrické pole o dané intenzitě

$$E_i = \frac{F_M}{-e}, \quad (23)$$

Indukované elektrické pole vyjadřuje indukované elektrické napětí ve vodiči délky  $l$ :

$$U_i = -E_i l = -Bvl. \quad (24)$$

Potom bude platit tento vztah:

$$|U_i| = -B \frac{\Delta sl}{\Delta t} = -B \frac{\Delta S}{\Delta t} = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t}. \quad (25)$$

Ze vztahu (25) vyplývá, že  $\Delta sl$  je změna obsahu plochy opané vodičem za změnu času  $\Delta t$  a součin této elementární plochy a magnetické indukce, tj.  $\Delta SB$  vyjadřuje magnetický indukční tok  $\Delta \phi$  za tento časový interval. Jeho časová změna pak vyjadřuje velikost indukovaného napětí ve vodiči. [4]

Záporné znaménko ve vztahu (21) vysvětluje tzv. Lenzovo pravidlo. Jeho vysvětlení a přesný charakter jsem již uvedl v kapitole *historický vývoj*.

Dalším jevem, který vychází ze zákona elektromagnetické indukce je **vlastní a vzájemná indukce**. Časová změna magnetického pole, vyvolaná proudem procházejícím v cívce, indukuje napětí ve vlastní cívce nebo v jiném obvodu, na který toto pole působí. [4] Vztah číslo (9) v kapitole *historický vývoj* udává výpočet indukovaného elektrického napětí na základě fyzikální veličiny  $L$ . Tato veličina charakterizuje cívku, jako elektrotechnickou součástku a nazývá se vlastní indukčnost cívky. Jednotkou vlastní indukčnosti cívky je H [Henry]. Podobně  $M$  se označuje vzájemná indukčnost v jednotkách H [Henry], vyjadřující vzájemné induktivní působení jednoho obvodu na druhý.

Další důležitou fyzikální veličinou je **permeabilita**. Budeme-li diskutovat tzv. permeabilitu vakua, jedná se o důležitou fyzikální konstantu značenou  $\mu_0$ . S hodnotou  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$ . Pro relativní permeabilitu prostředí, charakterizující chování magnetických látek v magnetickém poli a odvozenou od magnetické susceptibility platí, že je to bezrozměrná fyzikální veličina. Každý materiál má jinou relativní permeabilitu. Značí se tímto symbolem  $\mu_r$ .

S magnetickou susceptibilitou je svázán vztah:

$$\mu_r = 1 + \chi_m, \quad (26)$$

přičemž  $\chi_m$  je fyzikální veličina s názvem susceptibilita.

Jednou z posledních fyzikálních veličin, se kterou se mohou žáci na střední škole setkat je **intenzita magnetického pole**. Tato fyzikální veličina se značí písmem  $H$  a má jednotku  $A \cdot m^{-1}$ . Tuto veličinu lze charakterizovat jako míru silových účinků v magnetickém poli a získáme ji tak, že podělíme magnetickou indukci permeabilitou. [1]

### 1.2.8. Stručná rekapitulace fyzikálních vztahů používaných na středních školách

Po provedení sumarizace podkapitoly *fyzikální popis veličin používaných na středních školách*, můžeme sestavit stručný přehled fyzikálních vztahů, se kterými se běžně žák na střední škole setká.

Tabulka 3 – stručný přehled fyzikálních vzorců v oblasti magnetismu používaných na střední škole

Název pro fyzikální vztah	Fyzikální vztahy
magnetická síla působící na vodič s proudem	$F_M = BIl \sin \alpha$
magnetická síla působící na pohybující se nabitou částici	$F_M = BQv \sin \alpha$
magnetická síla mezi dvěma rovnoběžnými vodiči protékanými proudem	$F_M = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$
magnetická indukce pole působící na vodič s proudem	$B = \frac{F_M}{Il}$
magnetický indukční tok	$\phi = BS \cos \alpha$
vlastní indukčnost cívky (definovaná jako vztah proudu v cívce a indukčního toku) <sup>5</sup>	$L = \frac{\phi}{I}$
magnetická indukce v dutině dlouhé cívky (solenoidu)	$B = \frac{\mu NI}{l}$
indukované elektrické napětí	$U_i = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$

### 1.2.9. Zmagnetovaná tělesa a magnetické vlastnosti látek z pohledu magnetismu

#### Zmagnetovaná tělesa

<sup>5</sup> Indukčnost cívky (solenoidu) lze definovat i takto:  $L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$ , kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $N$  počet závitů cívky,  $S$  je obsah průřezu cívky, kde platí vztah  $S = \pi r^2$ ,  $l$  je délka cívky.

Zmagnetovaným tělesem je např. **magnet**. Jako magnet označujeme těleso, které ve svém okolí vytváří magnetické pole a dokáže svým silovým působením za určitých podmínek přitahovat další tělesa. Podmínky, za kterých tento jev vzniká, budeme definovat níže. Magnety můžeme rozdělit na permanentní (stálé – magneticky tvrdé) a dočasné (magneticky měkké), také se dělí dle původu složení na přírodní a umělé magnety. [6]

**Přírodní magnety** vykazují vlastnosti magnetovce, který byl popsán v souvislosti s původem tohoto označení. Jedná se o nerost v podobě oxidu železnato-železitého. Jedná se o nejstarší typ materiálu s magnetickými vlastnostmi. [6]

**Umělé magnety**, kterých je v současné době většina, jsou složením z feromagnetické oceli nebo oxidů na bázi železa (feritů nebo dopované neodymem). Ferity jsou nejběžnějším typem pro výrobu magnetů, které využíváme i v domácnost. Magnet vyrobený z tohoto materiálu se vyznačuje černou barvou, a zpravidla bývají vyrobeny ze sloučenin oxidu železa s oxidy dalších kovů, např. manganu nebo barya. Magnety s příměsí neodymu jsou velmi silné, avšak křehké. Tyto magnety se především využívají v elektronickém průmyslu, jako např. součást CD a DVD zařízení. [6]

**Permanentní magnety** zůstávají zmagnetované i po oddálení z magnetického pole, které je zmagnetovalo, zatímco **dočasné magnety** jsou tělesa, která po oddálení z magnetického pole přestávají být zmagnetované. [4]

### **Magnetické vlastnosti těles**

Na základě chemického složení každá pevná látka vykazuje své specifické vlastnosti a tím i projevy na okolí nebo se může jinak chovat v magnetickém poli. Z hlediska chování látek v magnetickém poli, je třeba zkoumat jejich chování na atomární úrovni. Důležitou veličinou při charakterizování magnetických vlastností látek je relativní permeabilita. Tato veličina nám charakterizuje interakci s vnějším magnetickým polem. Dojde-li k interakci magnetického pole s jinou látkou, potom budeme pozorovat jevy vedoucí k zeslabení nebo zesílení magnetických účinků. Jedná se tedy o feromagnetické látky (silně magnetické látky), diamagnetické látky nebo paramagnetické látky (slabě magnetické látky). Tyto látky budou závislé na magnetickém kvantovém čísle a spinu elektronů v orbitalech. Na základě toho rozhodneme, o jaký typ se bude jednat.

Diamagnetické látky mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1, tj.  $\mu_r < 1$ . Do této skupiny látek lze zařadit například– zlato, stříbro, měď nebo rtuť, sklo, některé kapaliny (voda) a plyny. Tyto látky při interakci s magnetickým polem nepatrně toto pole zeslabují.

U paramagnetických látek je obsah relativní permeability nepatrně větší než 1, tj.  $\mu_r > 1$ . Jedná se o objekty, které při vzájemné interakci s magnetickým polem toto pole



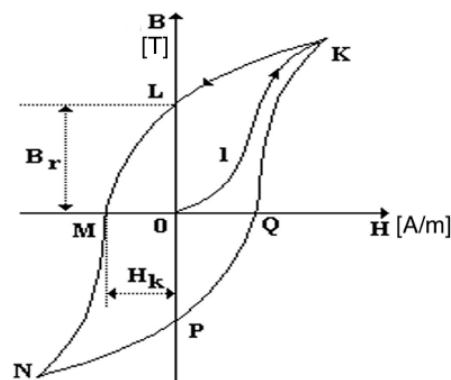
nepatrně zesilují. Do spektra zástupců této skupiny látek lze zařadit například sodík, draslík, platinu, hliník nebo kapalný a plynný kyslík.

Feromagnetické látky jsou látky tvořené atomy, jejichž magnetické momenty dávají relativní permeabilitu značně větší než 1 (může dosahovat až 15 000). Relativní permeabilita bývá uváděna takto  $\mu_r \gg 1$ . Mezi příklady feromagnetických látek lze zařadit železo, nikl, kobalt, slitiny železa, gadolinium.

U feromagnetických látek může docházet ke speciálnímu fyzikálnímu jevu a tím je magnetování látky. Tento jev může být dočasný nebo trvalý. U silných feromagnetických látek stačí jen slabé působení magnetického pole a dojde k okamžité magnetizaci látky.

Spousta feromagnetických látek je neoddelitelnou součástí našeho každodenního života, jako například záznamová média, různé typy harddisků, magnet na lednici, elektromagnet ve zvonku a spousta dalších věcí. [4]

Důležitým fyzikálním jevem je **magnetická hystereze**. Tento jev souvisí s feromagnetickými látkami a označuje se také jako magnetické zpoždování. Popíšeme si ho na základě závislosti magnetické indukce v jádře cívky, v závislosti na proudu, který teče jejími závity (na magnetické intenzitě). Magnetickou hysterezi znázorňujeme grafickým způsobem tak, že výsledným grafem je křivka zvaná hysterezní smyčka. Tato křivka popisuje chování feromagnetické látky. Na obrázku č. 28 můžeme vidět typickou hysterezní smyčku, která je popsána body, vysvětlující jednotlivé fyzikální fáze magnetizace. [4], [31]



Obrázek 28 - graf hysterezní smyčky [31]

Vysvětlení obrázku č. 28, respektive jednotlivých bodů: **křivka OK** je křivkou prvotní magnetizace cívky s feromagnetickým jádrem, **bod K** nám charakterizuje magnet, který má

největší magnetickou indukci (při saturaci jsou domény natočeny ve směru magnetického pole). **Křivka KL** nám charakterizuje snižování intenzity magnetického pole, tj. snižováním elektrického proudu. **Bod L** =  $B_r$  nám udává tzv. remanentní indukci<sup>6</sup>, platí tedy rovnost  $\vec{B} = B_r$ . **Křivka LM** nám charakterizuje to, že elektrickým proudem, který proteče opačným směrem, dosáhneme nulové hodnoty magnetické indukce. Jakmile se budeme nacházet v **bodě M**, bude  $\vec{B} = 0$ , bude také platit rovnost  $M = H_r$  (jedná se o koercitivní intenzitu magnetického pole)<sup>7</sup>. **Křivka MN** nám popisuje zvyšování elektrického proudu, tudíž zvětšování intenzity elektrického pole. **Bod N** nám udává magnet s opačnými póly od bodu K. Jedná se o to, že domény jsou opět zmagnetizovány s maximální magnetickou indukci. **Křivka NP** nám charakterizuje snižování snížení elektrického proudu, až se dostaneme do **bodu P**, kde elektrický proud, tj. intenzita magnetického pole bude rovna 0.

V kapitole 1.4. si ukážeme využití magnetismu v praxi, a to na některých příkladech ve vědě, technice pro 21. století, případně v přírodě z pohledu přirozeného výskytu.

### 1.3. Rozdělení učiva o magnetismu na základních a středních školách

Klíčovou legislativou České republiky ve školských oblastech je zákon č. 561/2004 Sb., tj. Zákon o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělání. Tento dokument mimo jiné právně stanovuje povinnosti, které souvisejí se školskými institucemi. Na základě § 4 zákona č. 561/2004 Sb. musí mít každý typ a stupeň vzdělávacího zařízení tzv. rámcové vzdělávací programy, podle kterých si každá škola vytvoří následné školní vzdělávací programy, tj. § 5 zákona č. 561/2004 Sb. Rámcové vzdělávací programy vydává ministerstvo mládeže a tělovýchovy po konzultaci s ministerstvem zdravotnictví, zatímco školní vzdělávací programy vydává ředitel školy po poradě s vedením školy (především předmětová komise). [48]

Rámcové vzdělávací programy se pro základní školu i pro střední školu typu střední odborné školy a gymnázia liší svým charakterem. Pro základní školu a pro osoby s lehkým mentálním postižením, tj. pro základní vzdělání platí *RVP – ZV – LMP*. Pro středoškolské

<sup>6</sup> Remanentní indukce nám umožňuje ponechání zmagnetování feromagnetické látky i po zastavení napětí, které protéká cívkou, proto platí rovnost  $\vec{B} = B_r$ .

<sup>7</sup> Tato rovnost nám popisuje tzv. koercitivní intenzitu magnetického pole. Jedná se o jev, kdy magnetická indukce je rovna nule.

odborné vzdělání platí *RVP SOV* a pro gymnaziální vzdělání platí *RVP GV*. Potom se každá škola – každý ředitel musí řídit strukturálním algoritmem při tvorbě explicitních pro danou školu transparentních školních vzdělávacích programů, které jsou mírně doplněny didaktickými náležitostmi.

Nyní se budu zabývat rámcovým vzdělávacím programem vydaným MŠMT pro základní školu předmětu fyziky 2. stupeň oblasti magnetismu a uvedu specifika dané části. Oblast magnetismu a elektromagnetismu se nachází pod hlavním tématem „Elektromagnetické a světelné děje“ a v podkapitole „elektrické a magnetické pole“ se žáci zabývají širokým spektrem učiva o elektrickém poli a pozvolna přejdou do teorie o magnetickém poli. Lze konstatovat, že se žáci seznámí převážně s pojmy jako například „magnetické pole“, „magnetka“, „vodič a elektrický proud“, „tělesa přitahující magnet“. Na úrovni základního vzdělání si tedy osvojí teorii a pojmy bez matematického aparátu. Ačkoli se žáci s pojmem „magnetismus a elektromagnetismus“ seznámí bez matematické aplikace, tak už zde na základní škole si mohou udělat představu, jak je magnetismus důležitý a neoddělitelný od našeho běžného života, aniž bychom jej aplikovali do vědeckých oblastí. Mezi první zástupce aplikací a využití můžeme zařadit na této úrovni například zemský magnetismus a kompas, představit koncept přitažlivosti a odpudivé síly dvou magnetů, vysvětlit uchování informace na magnetických audio nebo VHS páskách a dokázat že je zde magnet nebo magnetické částice v telefonech. [46]

Zde budeme diskutovat rámcový vzdělávací program typu *RVP GV* neboli gymnaziální. Na středoškolskou problematiku předmětu fyziky oboru magnetismu a elektromagnetismu se budeme zaměřovat z pohledu gymnaziálního přístupu, protože na středních odborných školách se sice fyzika vyučuje, ale s velmi malým učebním rozsahem. Gymnaziální oblast magnetismu a elektromagnetismu se nachází pod hlavním tématem „Elektromagnetické jevy, světlo“. Zde se zkoumá zvlášť charakter elektrického pole a charakter magnetického pole, a až poté se uvádí komplexní korelace těchto pojmů. Můžeme zde konstatovat, že až na střední škole se v této oblasti projeví i matematický aparát, který je klíčovou a neoddělitelnou částí každé oblasti fyziky. [47]

Aby názorně učitel ukázal smysluplný přínos této partie fyziky, má několik nástrojů, jak toto provést. Jedním z nich je například motivace pro praktické využití ve vědě, technice a průmyslu, které nás doprovází na každém rohu, ovšem v komplexnější úrovni. Toto může realizovat například návštěvami do výzkumných center nebo lékařských center, do oblasti výroby energie nebo prostřednictvím názorných experimentů. To také souvisí s integrací a mezipředmětovými vztahy mezi biologií, chemií, fyzikou, matematikou nebo geografii.

Můžeme tak do této oblasti začlenit všechny přírodovědné předměty. Na základě vyplývajících faktů by si studenti na střední škole měli udělat vlastní názor, proč se na střední škole učí o magnetismu a proč je natolik důležitý. [47]

Důležitost a praktičnost budu popisovat v následující kapitole. Dle mého názoru, by magnetismus a elektromagnetismus neměl být podceňován nebo vyučován pouze na teoretické úrovni bez vazby na praktické využití. Principy projevu, pochopení fyzikálních veličin a exaktních zákonitostí se můžeme teoreticky naučit, ale důležité je pochopení v návaznosti na praktické aplikace. V následující kapitole představím některé modernější aplikace magnetismu a elektromagnetismu ve vědě a technice. Také si popíšeme některé zajímavosti z přírodní oblasti, kde nás magnetismus doprovází na každém kroku.

## 1.4. Současné trendy a využití magnetismu jako aplikace ve vědě a technice

V současné technicky vyspělé době můžeme při výuce fyziky na střední škole využít celou řadu příkladů praktického užití elektromagnetismu. Žijeme ve 21. století, tedy v době, kdy dochází k významným technickým a vědeckým pokrokům. Na základě tohoto faktu můžeme do výuky fyziky zahrnout i spektrum moderních přístrojů, které standardní teoretické znalosti rozšíří a u žáků mohou vyvolat větší zájem o tuto oblast fyziky a techniky. Já jsem pro tento účel vybral následující technické objevy využívající magnetismus:

- kruhový urychlovač částic (cyklotron),
- nukleární magnetickou rezonanci a lékařský přístroj pro zobrazení magnetickou rezonancí,
- supravodiče (jsou vodiče, které se v magnetickém poli chovají jinak než normální vodiče) nebo fyzikální jev zvaný levitace na „magnetickém polštáři“ (např. využíváný v dopravě) a
- vytváření paměti na základě magnetického pole.

Uvedený výčet pracuje s uměle vytvořeným magnetickým polem např. v lékařství, vědě, technice, běžném životě – dopravě. Kromě technických pokroků v oblasti magnetismu se můžeme setkat s magnetickými mikročásticemi i nanočásticemi, které v této části také představím.

S uvedenými jevy se nyní podrobně seznámíme.

### 1.4.1. Urychlovač částic

Od doby popisu složení hmoty pomocí atomů, jako nedělitelných částic, do dnešní doby, kdy je znám standardní popis atomu s jeho elementárními složkami, uplynula řada let. Nicméně ty nejnovější poznatky o objevech elementárních částic jsou z poměrně nedávné doby. Ze středoškolské fyziky víme, že se atom skládá z jádra a obalu a umíme ho popsat pomocí Bohrova modelu, podle něhož jsou v jádře protony a neutrony a v obalu atomu jsou elektrony. Jaderné částice jsou dále složeny z kvarků a gluonů, tj. subatomárních částic. Elektrony jsou již nedělitelné a budeme je také nazývat subatomárními částicemi.

Částice jako je elektron a proton lze využít v urychlovačích částic, protože na ně, jako částic s nábojem, můžeme působit silným magnetickým a elektrickým polem. Zde se zaměříme na urychlovač zvaný cyklotron. Největší a nejmodernější urychlovač LHC zde popisovat nebudeme, protože jeho základ funkčnosti je rovněž vázán na pohyb v magnetickém poli, vytvořeného pomocí supravodivých magnetů. Jisté modifikace urychlovačů nalezneme v lékařství při výrobě radioizotopů pro potřeby nukleární medicíny nebo v chemii pro zobrazovací techniky. [1]

Cyklotron lze představit jako urychlovač částic, tj. protonů nebo elektronů. V obecném pojetí záleží na hmotnosti dané částice a velikosti magnetického pole (k popisu kruhové trajektorie), které v cyklotronu působí. Tabulkové hodnoty pro hmotnosti protonu a elektronu nám poskytují informace o tom, že proton má zhruba o 4 řády větší hmotnost nežli elektron, tudíž při zrychlování protonu budeme potřebovat větší poloměr dráhy. [1]

Tradiční popis konstrukce cyklotronu, který by korespondoval s učivem o elektřině a magnetismu na středních školách, vychází z tvaru polokruhových válců, které nazýváme duanty. Jsou vyrobeny z neferomagnetického vodivého materiálu (nejběžnější je měď, tj. měděné plechy). Duanty tvoří součásti elektrického oscilátoru, který mezi nimi vytváří střídavé napětí. Polarita se tedy mění, pokud částice přechází z jednoho duantu do druhého a naopak. Komora, respektive válec cyklotronu se nachází mezi velkými póly elektromagnetu, které dosahují až několik metrů. [1]

Budeme uvažovat, že se ve středu válce (mezi dvěma duanty) nachází zdroj odkud vylétne proton. Prvně vlétne do levého (záporného) duantu. Pohyb protonu bude již zrychlený, avšak bez působení elektrického pole, protože je zde stíněno – v duantu. Zde začne působit na proton homogenní magnetické pole elektromagnetu. Protože je duant vyroben z diamagnetické látky, tak se proton bude pohybovat prostřednictvím tohoto vnějšího pole po kruhové trajektorii.

Trajektorie o poloměru  $r$  závisí na rychlosti  $v$  protonu a jeho hmotnosti  $m$ , proto bude platit vztah:

$$r = \frac{mv}{|Q|B}. \quad (27)$$

Vlivem měnící se polarity elektrického pole mezi duanty, proton stále zrychluje, než se dostane k okraji jednoho z duantů a pomocí vychylovací destičky je z cyklotronu vymrštěn ven.

V obecném charakteru musí být splněna podmínka, že musí být frekvence protonu obíhajícího v magnetickém poli rovna frekvenci elektrického pole oscilátoru. Této podmínce se říká rezonanční podmínka  $f = f_{osc}$ , pro níž platí:

$$f = \frac{|Q|B}{2\pi m}, \quad (28)$$

tedy

$$|Q|B = f_{osc}2\pi m. \quad (29)$$

Použití cyklotronu v lékařství spočívá v použití deuteronů a následně beryliových terčů. Deuterony<sup>8</sup> po vystřelení z cyklotronu dopadají na beryliový terč. Jakmile dojde k interakci deuteronů s plochou terčíku, dojde k uvolnění neutronů z terčíku. Svazek neutronů následně dopadá na pacientovo tělo do oblasti výskytu nádorové tkáně. Tyto neutrony způsobují to, že se v oblasti nádoru předají svou energii tkáni a mění DNA nádorových buněk. Tím dochází k jejich eliminaci. [1]

---

<sup>8</sup> Deuteron je tzv. těžká voda, která má chemickou značku  $D_2O$ . Jedná se sloučeninu, která obsahuje místo atomů vodíků izotop deuteria, tj. vodík s jádrem, kde je 1 proton a 1 neutron.



Obrázek 29 – ukázka aplikace cyklotronu v lékařství [1]

#### 1.4.2. Nukleární magnetická rezonance a zobrazení magnetickou rezonancí (MRI)

Magnetismus našel praktické využití v chemii, biologii a biochemii jako spektroskopická analytická metoda zvaná nukleární magnetická rezonance, (dále NMR). Jedná se o analytickou metodu, která díky absorpci radiofrekvenčního záření zkoumaným vzorkem umístěným v magnetickém poli, podává údaje o složení vzorku.

NMR spektroskopie na základě radiofrekvenčního pulzu, který působí na jádra vzorku spolu se silným konstantním magnetickým polem vyvolá excitaci jaderných spinů v zkoumaném vzorku. Po pulzním ozáření dojde k deexcitaci, kterou následně změří spektrometr. NMR spektrum se zobrazí jako pík nebo soustava píků, tedy signál, který charakterizuje chemický posun svého jádra vzhledem k intenzitě vysokofrekvenčního působení. Konstantní magnetické pole, které působí ve spektrometru umožňuje pozorovat signál, který je úměrný míře změny magnetizace vzorku.

Princip metody NMR je založen na štěpení energetických hladin jádra zkoumaného vzorku v konstantním magnetickém poli. Rozštěpené energetické hladiny jsou úměrné konstantnímu magnetickému poli působícímu ve spektrometru. Následným působením již zmiňovaného radiofrekvenčního pulzu sledujeme odezvy jader vzorků. Pokud frekvence proměnného magnetického pole (vysokofrekvenčního pole) odpovídá rozdílu energetických hladin, řekneme, že nastává rezonance jader. Tato rezonance je závislá na tzv. rezonanční frekvenci, tzv. Larmorově frekvenci, která má následující matematické vyjádření:

$$\omega_0 = \gamma B_0, \quad (30)$$

kde  $B_0$  popisuje konstantní působící magnetické pole o určité magnetické indukci a  $\gamma$  je gyromagnetický poměr. Gyromagnetický poměr je fyzikální veličina, která popisuje magnetické vlastnosti zdrojů magnetického pole z pohledu atomů a subatomárních částic.

Konstrukce spektrometru je tvořena cívkami o několika tisících závitů, kterými protéká elektrický proud s velikostí až 100 A. Magnetické pole, které je například ve spektrometru na obr. 30, má magnetickou indukci o velikosti 4 – 18 T. Tato indukce během měření zkoumaného vzorku je konstantní. [25], [35]



Obrázek 30 – ukázka laboratorní NMR [25]

V medicíně se můžeme setkat s metodou, založenou na stejném fyzikálním základě jako u NMR, pod názvem magnetická rezonanční tomografie se zkratkou MNT (magnetic nuclear tomography) nebo zobrazení magnetickou rezonancí se zkratkou MRI. Zobrazování pomocí nukleární magnetické rezonance poskytuje anatomickou informaci o normálních a abnormálních tkání s kontrastní a detekční citlivostí vyšší než u rentgenové počítačové tomografie v lidské hlavě, pánvi a částech kardiovaskulárního a muskuloskeletálního systému.



Lze tedy říct, že se používá zejména pro zobrazení měkkých tkání lidského těla. Předpokladem pro spektroskopickou metodu je to, že se lidské tělo skládá z 55 – 70 % vody. [1]

Princip metody je založen na působení magnetického pole, vyvolaného supravodivým magnetem, obvykle o magnetické indukci do 3 T, který indukuje síťovou protonovou magnetizaci v podélné ose pacienta. K narušení této magnetizace se používají pulzy radiofrekvenčního elektromagnetického pole. Její uvolnění zpět do původní velikosti a směru produkuje elektrický signál v přijímací cívce, který obklopuje hlavu pacienta, pokud je vyšetřován např. mozek. K prostorovému kódování detekovaného signálu se používají další gradientní magnetická pole. Pozorují se detekce hustoty protonů v tkáních prostřednictvím zmiňovaných gradientních polí, které jsou uvnitř mechanismu přístroje, a díky tomuto mechanismu vybereme vhodný řez dané tkáně (šedé hmoty mozkové, mozkomíšního moku, žilního oběhu v noze aj.). Rekonstrukce obrazu se provádí tzv. Fourierovou transformací. [25]

Podrobný popis a pochopení fungování principu NMR (MRI) je na nad rámec středoškolské fyziky a bylo by třeba zvládnout aparát kvantové mechaniky a statistické fyziky a matematiky.



Obrázek 31 – ukázka přístroje pro nukleární magnetickou tomografii v nemocnici [1]

#### 1.4.3. Elektrická kytara

Magnetismus našel další uplatnění i v oblasti, se kterou se člověk setkává běžně, například v reproduktorech nebo v elektrických kytarách.

Lze konstatovat, že běžná akustická kytara využívá principu šíření zvuku v duté části kytary, který představuje akustický rezonátor kmitů strun. Námi uvažovaná elektrická kytara snímá kmity elektrickými senzory. Mechanické podněty kmitající kovové struktury přetransformuje na elektrický signál a ten se postupně zesiluje pomocí reproduktorů. Snímač je tvořen cívkou, která je navinutá na malý permanentní magnet. V části, kde jsou kovové struny má magnet severní a jižní pól, tudíž zde se magnetické pole zesiluje. Jakmile brkneme o strunu, začne struna kmitat a její pohyb vůči cívce se mění v magnetický indukční tok, z čehož plyne, že se v cívce indukují proud. Struna, která příčně kmitá vzhledem k cívce, vyvolá signál odpovídající změně indukovaného proudu. [1]

#### 1.4.4. Supravodiče a levitace – jevy popisující chování látek v magnetickém poli

Supravodivost objevil Heike Kamerlingh Onnes v roce 1911. Jedná se o velmi specifický fyzikální jev, který souvisí s ochlazením určitého materiálu pod danou teplotu, zpravidla blízko absolutní nuly K. Jako důsledek ochlazení, materiál vykazuje dvě základní vlastnosti, a těmi jsou téměř nulový odpor při vedení elektrického proudu a dokonalé vytěsnění magnetického pole ze svého objemu. Druhá vlastnost, tj. vytlačení magnetického pole ze svého objemu, byla prokázána až později v roce 1933. Tento jev se označuje jako Meissnerův – Ochsenfeldův jev. Projevuje se jako perfektní diamagnetismus. V současné době mezi nejlepší supravodivé materiály lze zařadit slitiny niobu a slitiny germania ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) s kritickou teplotou  $T_c = 23 \text{ K}$  nebo ze skupiny vysokoteplotních supravodičů nejrozšířenější je sloučenina oxidů s mědí a barya v podobě oxidu yttriumbarnatomeidického ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) s kritickou teplotou  $T_c = 90 \text{ K}$ , avšak jsou používány i další slitiny keramických oxidů železa s kobaltem nebo niklu a kritickou teplotu kolem  $140 \text{ K}$ . Za extrémních tlaků ( $2,8 \cdot 10^6 \text{ atm.}$ ) bylo v roce 2020 dosaženo supravodivosti při teplotě  $14^\circ\text{C}$  u vodíku. Extrémní podmínky dosažení tohoto jevu a použitý prvek však patrně vylučuje využití tohoto jevu v běžné praxi.

Supravodiče se využívají především v podobě součástek pro letecký průmysl, kabelů v jaderných elektrárnách nebo pro účinnější přenos elektrické energie. Využívá se jich také jako komponent do setrvačnicků pro vesmírné družice. Ve vesmíru teploty dosahují velmi nízkých teplot, tudíž zde naleznou supravodiče efektivní využití. Přítomnost supravodivých magnetů je také v urychlovačích částic (LHC). Se supravodiči souvisí zařízení SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Tento přístroj slouží k měření velmi malých změn a projevů magnetického pole. Slouží k určování susceptibility materiálů, nebo také díky tomuto přístroji lze změřit velikost magnetického pole v mozku. [22]

Supravodiče, které nevykazují Meissnerův efekt, umožňují parciální proniknutí magnetických siločar do svého objemu pomocí tzv. vortexů (někdy také označované jako fluxony). Vortex<sup>9</sup> umožní to, že magnet umístěný nad supravodič (kov) je jednak odpuzován, ale také udržovaný ve stabilní poloze. Tento jev se nazývá levitace. Princip levitace spočívá v tom, že se levitující magnet nad supravodičem dokáže točit bez tření a být zpomalovaný pouze třením vzduchu.

Levitace, ale na magnetickém „polštáři“ (bez působení supravodivosti) našla využití v technickém a dopravním průmyslu. V dopravním průmyslu v podobě kolejové dopravy. Jedná se o levitující vlak, který má po bocích vlaku umístěné silné magnety. Vlak se pohybuje pouze v určitém místě, kde se nacházejí cívky. Jakmile dojde k průchodu elektrického proudu, v cívkách se vytvoří magnetické pole, které se posouvá ve směru pohybu vlaku. Levitující vlak nese název Maglev. V současné době jej nalezneme v Japonsku, kde dosahuje rychlosti až 450 km/h. Na obrázku č. 32 je zachycený prototyp vlaku Maglev. [22], [37]



Obrázek 32 – Maglev - vlak využívající pohon levitace [37]

#### 1.4.5. Magnetické zaznamenávání dat

Tento technický jev je ve srovnání s předešlými jevy starší, nicméně se stále rozvíjí a uplatňuje v modernějším používání. První používání tohoto zaznamenávání dat je spojený s kazetovými páskami pro audio nahrávky a později i pro zaznamenávání obrazu a následně s tzv. disketami. V současné době se záznam dat používá u hard disků.

Záznamu je využito v počítačích, magnetofonech nebo VHS přehrávačích. Poslední dva příklady jsou již méně obvyklé. Záznam vychází z principu trvalého zmagnetování vrstvy feromagnetika na plastické pásce pomocí elektromagnetu. Feromagnetikum tvoří například oxid železa nebo oxid křemíku. Elektromagnet má funkci jako záznamová a následně čtecí hlava nad danou páskou. Hlavu tvoří cívka, která má tvar neuzavřeného prstence. Tento

---

<sup>9</sup> Význam slova *vortex* je spojovaný s fyzikálními anomálními projevy ve smyslu jakéhosi víru.

neuzavřený prostor vyplňuje nemagnetická látka, například bronz. Danou cívkou prochází elektrický proud, který je závislý na časovém průběhu zaznamenávaného signálu. To následně odpovídá proměnnému magnetickému poli, jehož indukční čáry vystupují z místa štěrbinu nad povrchem jádra. Před štěrbinou se pohybuje konstantní rychlostí páska z feromagnetika, na němž vzniká trvalý záznam v podobě řady, která je tvořena zmagnetovanými místy s proměnnou hodnotou ve směru magnetické indukce. [4]

Přehrávání zvuku probíhá inverzním postupem. Zmagnetovaná páska se pohybuje v okolí záznamové hlavy, konkrétněji v blízkosti štěrbinu, která plní snímací funkci a dokáže ve snímací hlavě vyvolat elektrické proudy (signály), které jsou v reproduktorech přeneseny jako zvuk. Uplatňuje se opět princip elektromagnetické indukce.

#### 1.4.6. Magnetické mikročástice

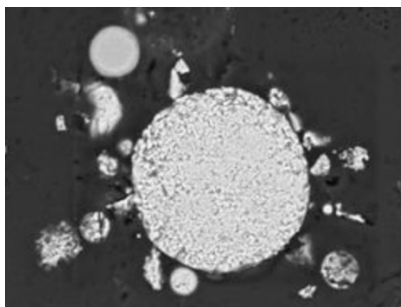
Magnetické mikročástice v podobě oxidů železa ( $FeOFe_2O_3$  – magnetit nebo  $\alpha-Fe_2O_3$  – maghemit) se vyskytují kolem nás. Uvedené mikročástice mohou být přírodního i technického původu.

Mezi přírodní zdroje magnetických mikročástic lze zařadit horniny vulkanického původu nebo horniny vzniklých z procesů probíhajících v půdách. Mezi další možný zdroj přírodního původu lze zařadit působení atmosféry. Mezi uměle produkováné mikročástice patří vliv průmyslu nebo dopravy. Pokud je koncentrace částic obou případů velmi vysoká a dochází k trvalé emisi, potom to může mít na zdraví člověka negativní vliv. Magnetické částice mají na zdraví člověka podobný vliv jako těžké kovy (např. olovo nebo kadmium). Pokud je člověk vystavován trvalé a výrazné emisi magnetickými částicemi, dojde ke zhoršení zdravotního stavu v podobě respiračních problémů, nebo také lidé obývající průmyslovější oblasti mohou být náchylnější ke kancerogenním<sup>10</sup> onemocněním.

Na základě výzkumu, který provedl Geofyzikální ústav AV ČR, se prokázalo to, že výrazně větší emise magnetických částic probíhá v lokalitách s těžkým průmyslem, ale také v zabydlenějších oblastech nežli např. v horských oblastech. Tato problematika se dá vyřešit například filtracemi (motorů, komínů) nebo omezením používání dopravních prostředků tak, abychom nepřispívali k znečišťování ovzduší těžkými kovy. Na obrázku č. 33 je zobrazena částice, která byla zachycena na filtru křemíku při zkoumání kvality ovzduší a přítomnosti oxidů železa. [21]

---

<sup>10</sup> Příčina vyvolávající rakovinu.

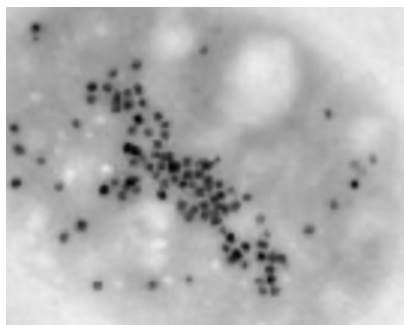


Obrázek 33 – částice oxidů železa zachycená na křemíkovém filtru na stanici Bartovice v Ostravě [21]

#### 1.4.7. Magnetotaktické bakterie

Významným fenoménem z pohledu magnetismu a nanotechnologií se staly magnetotaktické bakterie. Jedná se o jednobuněčné mikroorganismy žijící v poloslaných a slaných vodách, nicméně výskyt takových organismů je velmi vzácný. Tyto organismy mají tzv. orientační senzor podle magnetického pole Země. Lze říct, že jejich buňky obsahují magnetozomy, tedy nanokrystaly buď oxidu železnato-železitého, tedy magnetitu nebo sirníku greigitu. Sirník i oxid jsou železité biominerály, které jsou magnetické, proto se v daném místě tyto mikroorganismy chovají jako jehla v kompasu, neboť se pomocí tohoto mechanismu dokážou orientovat ve vnějším magnetickém poli Země.

Nejpodstatnějším faktem je to, že ve svých buňkách dokáží syntetizovat zrníčka magnetitu nebo greigitu a to v závislosti na prostředí, ve kterém se nacházejí. V současné době existuje několik významných nalezišť těchto mikroorganismů. Jedním z nich je solná pláň zvaná Badwater v severní Kalifornii nebo Laguna del Carbón v Argentině. Na obrázku č. 34 je patrná buňka bakterie, která vytvořila krystaly sirníku greigitu. [19] Vědci jsou také schopni magnetické bakterie chovat v umělém prostředí a využívat magnetosomů z jejich nitra. Tato umělá produkce se využívá pro bionanotechnologické aplikace, jako magnetické nanočástice s biokompatibilní vrstvou pro vazbu protilátek. Tato aplikace je využívána v lékařství pro cílenou léčbu např. tumoru (nádorů nebo otoků).



*Obrázek 34 – buňka bakteriální linie, která vytvořila krystalky sírníku greigitu [19]*

## 2. Praktická část

V této části práce popíšu některé experimenty nebo možné výrobky související s magnetismem ve spojení s tradičními školními pokusy, které představím v následujícím odstavci. Abychom postupovali uceleně, problematiku experimentů rozdělíme na tři části. První částí by bylo prokázání magnetických vlastností těles, druhou skupinu by zastupovaly experimenty související s prokázáním stacionárního magnetického pole kolem vodiče a třetí skupinu by tvořily experimenty související s nestacionárním magnetickým polem.

Mezi tradiční experimenty s magnetismem, v kategorii prokázání magnetických vlastností těles, patří například: prokázání existence Curieovy teploty feromagnetických látek, znázornění magnetického pole kolem magnetu, prokázání vlastností u feromagnetických, paramagnetických a diamagnetických látek, prokázání magnetizace feromagnetických látek, ukázka magnetické hystereze. Do druhé kategorie pokusů lze zařadit například ukázky magnetického pole kolem proudovodiče, magnetické pole cívky nebo sestavení prototypu elektromagnetu. Do třetí skupiny experimentů lze zařadit školní pokusy, jako například závislost indukovaného napětí na počtu závitů v cívce nebo elektromagnetickou indukci s cívkou. [33]

Uvedený výčet experimentů je možné ve školním prostředí jistě rozšířit, nicméně se jedná o návaznost na teoreticky uvedené jevy, které jsou zmíněny v této práci v hlavní kapitole č. 1.

Já se v této práci budu zabývat následujícími experimenty: prokázání pólů u magnetů, zmagnetování feromagnetické látky magnetem, ověření Curieovy teploty feromagnetické látky, prokázání magnetického pole přímého vodiče, demonstrace magnetické hysterezní smyčky feromagnetického materiálu a vytvoření elektromagnetu s běžně dostupných pomůcek.

### 2.1. Prokázání pólů u magnetů

Tento experiment lze uskutečnit jako frontální ukázkou nebo je možné jej zařadit do spektra individuálních experimentů pro žáky na základní nebo střední škole.

**Cílem** tohoto experimentu bude ověření znalosti, že se dva stejné póly odpuzují a dva odlišné póly přitahují, a tudíž jeden magnet má dva póly.

**Potřebnými pomůckami k realizaci experimentu** jsou dva permanentní magnety stejné délky, předmět tvaru autíčka a vhodná podložka.

### **Realizace experimentu a pracovní postup:**

1. Na vhodnou podložku umístíme autíčka, do kterých vložíme magnety.
2. V první fázi experimentu přiložíme k sobě magnety se stejnými póly, abychom si ukázali, jaké mají vlastnosti dva stejné póly magnetů. Jako je na obrázku č. 36.
3. V druhé fázi experimentu přiložíme k sobě magnety s opačnými póly, abychom si demonstrovali, jaké mají vlastnosti dva odlišné póly magnetů. Jako je na obrázku č. 35.

**Výstupem měření** bude vyplnění pracovního listu, který je v příloze č. 1. Žáci si zakreslí rozdíly mezi póly dvou magnetů a popíší jejich pravidla přitažlivých sil, a také provedou teoretickou diskusi k tématu magnetů.<sup>11</sup>

### **Výsledek měření:**

V našem případě výsledkem, respektive výstupem měření jsou fotografie na obrázcích č. 36 a č. 35.



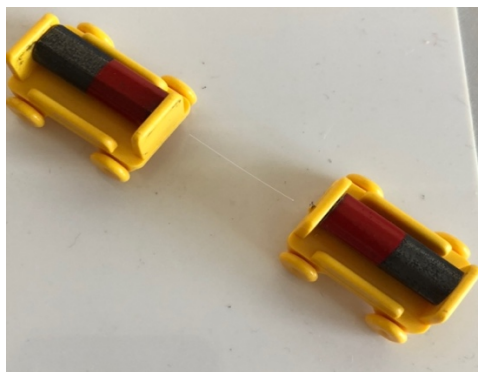
*Obrázek 35 – experiment 1 – dva stejné póly magnetu*

---

<sup>11</sup> Otázky ke zpracování:

1. Z jakého materiálu jsou vyrobeny magnety?
2. Jak reaguje střílka kompasu na magnetické pole země?
3. Kde se v domácnosti setkáme s magnety?
4. Co je magnet?





Obrázek 36 – experiment 1 – dva rozdílné póly magnetu

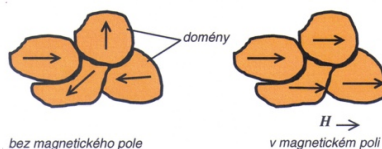
## 2.2. Zmagnetování feromagnetické látky magnetem

Tento experiment lze uskutečnit jako frontální pokus nebo je možné jej zařadit do samostatných experimentů. **Princip** experimentu je takový, že budeme mít k dispozici jeden permanentní magnet, pomocí něhož dojde ke zmagnetování feromagnetické látky. Teorie k tomuto pokusu vychází z problematiky magnetických vlastností těles, již zde uvedených v této práci.

**Potřebnými pomůckami k realizaci experimentu** budou železné piliny, feromagnetikum – železný hřebík a trvalý umělý magnet (např. tyčového tvaru) v ideálním případě neodymový magnet.

### **Realizace experimentu a pracovní postup:**

1. V prvním kroku si nasypeme železné piliny na vhodnou podložku. K pilinám přiložíme hřebík nebo jiné feromagnetické těleso, abychom zjistili, že těleso piliny nepřitahuje. Jako je na obrázku č. 38.
2. Následně trvalým magnetem začneme přejíždět jedním směrem po feromagnetiku. Po několika tazích (10 – 15 tahů) se v tělese magnetické domény orientují jedním směrem, tj. směrem tahu, což způsobí zmagnetizování dané látky. Toto je vyobrazeno na obrázku č. 37.
3. Po zmagnetizování, hřebík přiložíme k železným pilinám a zjistíme, že jsou k němu přitahovány.



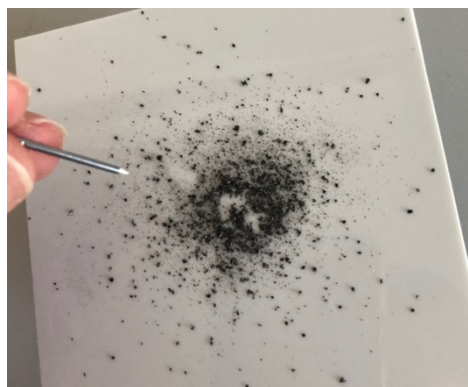
Obrázek 37 – orientace magnetických domén ve feromagnetické látce [4]

**Výstupem měření** bude vyplnění pracovního listu, který je v příloze č. 1. Zde budeme diskutovat schématický nákres orientaci domén v tělese. Žáci si také musejí uvědomit význam feromagnetické látky v praxi. Charakterizují druh látky, která je silně magnetická, a kde se využívá a proč je důležitá.

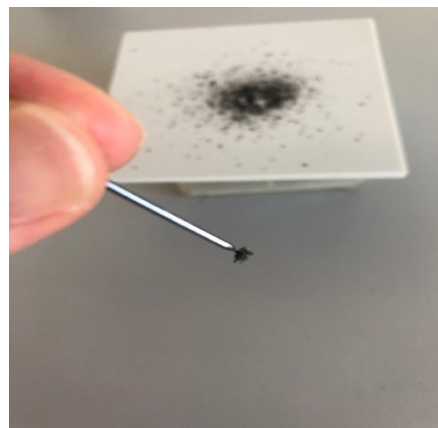
Žák si v souvislosti s danou demonstrací uvědomí závislost počtu tahů po feromagnetiku magnetem, tj. aby byla dosáhnuta stejná orientace domén v látce a došlo k jejímu zmagnetování. V rámci výstupu žák popíše způsoby odmagnetování daného hřebíku.

#### **Výsledek měření:**

V našem případě výsledkem provedení experimentu jsou fotografie, které jsou na obrázku č. 38 a č. 39. Pokud bychom chtěl předmět odmagnetovat, hřebík bychom zahřáli na vysokou teplotu například pomocí svíčky.



Obrázek 38 – experiment 2 – nezmagnetované feromagnetické těleso



Obrázek 39 – experiment 2 – zmagnetované feromagnetické těleso

## 2.3. Ověření Curieovy teploty feromagnetické látky

Jak jsme uvedli v teoretické části této práce, každá feromagnetická látka má svoji kritickou teplotu, u které ztrácí své magnetické vlastnosti (tzv. Curieho bod). V tomto experimentu půjde o ověření této skutečnosti.

**Cílem** bude odmagnetování feromagnetické látky za pomoci tepelného působení svíčky.

**K realizaci experimentu budeme potřebovat** trvalý umělý magnet (např. tyčového tvaru), feromagnetickou látku v našem případě malý kovový hřebík a čajovou svíčku, tabulky.

### **Realizace experimentu a pracovní postup:**

1. V prvním kroku se přesvědčíme o tom, že látka, kterou máme k dispozici je feromagnetická, tudíž je magnetem přitahována.
2. Následně si umístíme magnet s kovovým předmětem tak, aby svíčka, kterou zapálíme byla umístěna pod magnetem se špendlíkem.
3. Jakmile uděláme tyto kroky a zapálíme svíčku, zapneme stopky, abychom zjistili, po jaké době se tenký malý kovový předmět uvolní z magnetu. V tu chvíli se projeví princip Curieovy teploty pro daný materiál. Měření času je orientační, abychom si udělali představu, za jakou dobu se magnetické vlastnosti vlivem tepla změní, respektive zaniknou. V ideálním případě by bylo vhodné použít infračervený teploměr (tj. bezkontaktní teploměr s detekcí teploty až 1 200°C), abychom věděli, při jaké teplotě se těleso od magnetu uvolní. My však budeme předpokládat, že teplota rozhořelé svíčky dosahuje 600°C.<sup>12</sup>
4. Následně si po dvou minutách, jakmile dojde k ochlazení zkoumaného a již „odpadlého“ tělesa od magnetu, ověříme, magnetickou vlastnost tělesa tak, že je opět magnetem přitahováno.

**Výstupem měření bude** vyplnění pracovního listu, který je v příloze č. 1. Zde žáci provedou úvahu nad Curieovým bodem více druhů materiálů, např. nikl, kobalt a jiné kovové slitiny. Tento úkol provedou za pomoci tabulek nebo webových stránek, kde naleznou kritickou teplotu pro každý druh kovu. Zjištěné informace si zaznamenají do pracovního listu. Dále do výsledků měření bude zaznamenána časová hodnota působícího tepla na materiál, který se vlivem tepla od svíčky uvolnil. Klíčovou informací pro diskusi pokusu bude opětovné zmagetování uvažovaného materiálu.

---

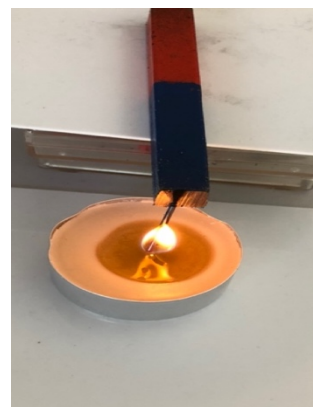
<sup>12</sup> Teplota svíčky je proměřena v tomto experimentu: [https://www.neulog.cz/index.php?option=com\\_attachments&task=download&id=15](https://www.neulog.cz/index.php?option=com_attachments&task=download&id=15), [online], informace ke dni 2021-04-14.

### Výsledky měření:

V našem případě výstupem ukázky experimentu jsou obrázky č. 40, 41, 42 a 43. K odmagnetování feromagnetika došlo v časovém intervalu  $t = 26$  minut, při zmiňované teplotě  $T = 600^\circ\text{C}$ .



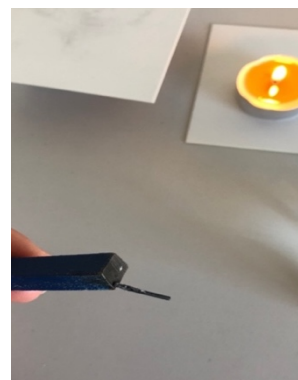
Obrázek 40 – experiment 3 – magnet a feromagnetikum před zahřátím



Obrázek 41 – experiment 3 – magnet a feromagnetikum při zahřívání



Obrázek 42 – experiment 3 - projev Curieovy teploty



Obrázek 43 – experiment 3 - opětné zmagnetování

## 2.4. Magnetické pole přímého vodiče

**Princip** experimentu je založen na tom, že se prokáže existence magnetického pole prostřednictvím magnetických indukčních čar kolem vodiče, kterým protéká elektrický proud. Magnetické indukční čáry budou modelovány železnými pilinami. Tím ověříme teoretickou znalost, že zdrojem magnetického pole je proud ve vodiči.

**K realizaci experimentu budeme potřebovat** zdroj stejnosměrného proudu do 20 A, vodič tvaru přímé krátké tyče, který prochází průhlednou neferomagnetickou a nevodivou podložkou, propojovací kabely a železné pily.

### Realizace experimentu a pracovní postup:

Budeme zde uvažovat kvantitativní popis magnetického pole fyzikální veličinou  $B$  magnetickou indukci podle vztahu:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}, \quad (31)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua<sup>13</sup>,  $I$  je elektrický proud,  $d$  vzdálenost (poloměr) magnetické indukční čáry kolem vodiče.

1. Budeme postupovat tak, že zdroj proudu spojíme propojovacími kabely s vodičem, který se nachází ve vertikální poloze vůči podložce. Na podložku nasypeme železné piliny podle obr. 44.
2. Zapneme zdroj a začneme na podložku klepat tak, aby se piliny přemísťovaly do magnetického pole vodiče. Jakmile k tomuto dojde, zdroj vypneme. [33]

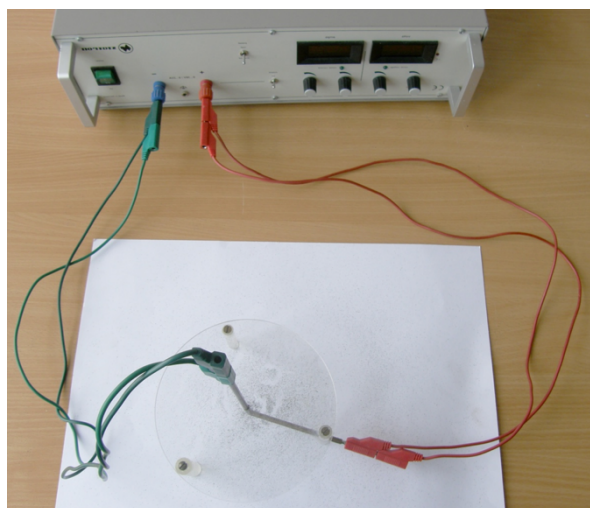
**Výstupem experimentu** bude vyplnění pracovního listu, který je v příloze č. 1 v němž bude diskuse o závislosti fyzikální veličiny proudu, tj. při vyšším proudu bude ve vodiči magnetická indukce větší a naopak. Očekáváme, že při vyšším proudu ve vodiči bude kolem něj větší magnetické pole a naopak, což se projeví pomocí magnetických indukčních čar. Magnetické indukční čáry kolem vodiče budou hustší oproti nízkému proudu. Žák také analyzuje, jaké jsou zdroje magnetického pole a toto pole kolem vodiče, kterým protéká elektrický proud se pokusí načrtnout směr magnetických indukčních čar za pomoci Ampérova pravidla pravé ruky.

#### **Výsledky měření:**

V našem případě jsme výsledek měření zobrazili do obrázku č. 45. Jedná se o detailnější pohled na magnetické pole kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud. Platí úměrnost elektrického proudu vůči magnetické indukci. Čím je vyšší proud, tím je magnetické pole intenzivnější, tudíž je magnetická indukce silnější, což se projeví prostřednictvím magnetických indukčních čar. V obr. 45 jsme červenými šipkami popsali směr magnetických indukčních čar na základě směru proudu.

---

<sup>13</sup> tabelovaná hodnota pro permeabilita vakua  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$



Obrázek 44 – experiment 4 – příprava aparatury k pokusu [33]



Obrázek 45 – experiment 4 – detail magnetických indukčních čar vodiče, kterým prochází elektrický proud [33]

## 2.5. Demonstrace magnetické hysterezní smyčky feromagnetického materiálu

Tento experiment prokazuje závislost magnetické indukce na magnetické intenzitě a charakterizuje vlastnosti magnetik.

**Princip** magnetické hystereze jsme již uvedli v teoretické části práce a teoreticky jsme znázornili magnetickou hysterezní smyčku na obrázku č. 28.

**Potřebnými pomůckami pro realizaci experimentu** jsou dvě cívky, jedna s počtem závitů 600 a druhá 75, propojovací kabely, rezistor o hodnotě  $R = 1 \cdot 10^5 \Omega$ , kondenzátor o hodnotě  $C = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ , software RC 2000 režim OSCILOSKOPE nebo (ve středoškolském prostředí) osciloskop, generátor střídavého napětí a železné jádro.

### Realizace experimentu a pracovní postup:

Princip experimentu je založen na prokázání vlastností magnetických látek a hodnot intenzit magnetického pole (napětí zdroje), kterých dosahují určité feromagnetické látky, abychom je dokázaly dokonale zmagnetizovat a demonstrovat následně u magneticky tvrdých látek jev zvaný remanentní indukce.

1. Z počátku měření jsme vycházeli z literatury [36]. Sestavíme si obvod dle schématu na obrázku č. 46, který je z uvedené literatury.

2. Po zapojení obvodu spustíme program RC2000 OSCILOSKOPE, ve kterém se vykreslí naše uvažovaná křivka na základě zvyšování vstupního elektrického napětí.
3. Následně zapneme zdroj elektrického napětí, které postupně budeme zvyšovat až do hodnoty 150 V, tj. budeme se nacházet v intervalu  $< 0; 150 > \text{V}$ .
4. Jakmile se napětí rovná 150 V dojde k nasycení železného jádra. Na ose X se bude zobrazovat napětí na rezistoru o hodnotě  $R = 1 \cdot 10^5 \Omega$ , což bude úměrné elektrickému proudu protékající na primárním vinutí cívky  $N_1$  a to znamená, že je úměrné intenzitě magnetického pole  $H$ . Na ose Y se zobrazuje napětí, které prochází integračním článkem, tedy rezistorem o hodnotě  $R = 1 \cdot 10^5 \Omega$  a kondenzátorem o hodnotě  $C = 1 \cdot 10^{-6} \text{F}$ . Počet závitů na primární a sekundární cívce je  $N_1 = 600$  a  $N_2 = 75$ , jádro je železné a jeho průřez je roven  $S = 9 \text{cm}^2$ .

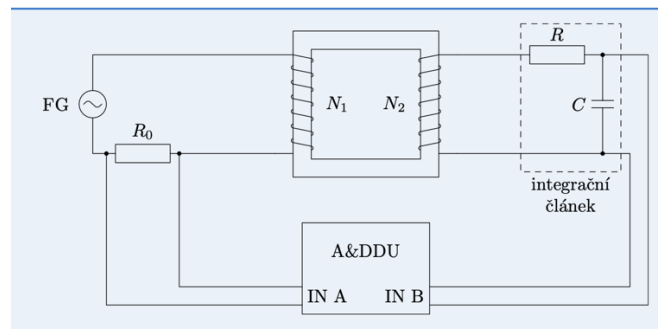
**Výstupem měření** bude vyplněný pracovní list, který je v příloze č. 1. Stěžejním bude graf v osciloskopu, který vykreslí hysterezní smyčku. Jako je na obrázku č. 47. Žáci si tento graf popíší a označí na něm body, které charakterizující vlastnosti feromagnetika, tj. jádra cívky. Osu X si popíší jako intenzitu magnetického pole, osu Y jako magnetickou indukci, z čehož lze usoudit závislost indukce na intenzitě. Body, které by měli žáci vyznačit jsou remanentní indukce, bod úplného nasycení, koercitivní intenzitu a bod opačného významu jako bod úplného nasycení. [33], [36] Déle se pokusí objasnit rozdíl mezi magneticky měkkými a magneticky tvrdými látkami. V souvislosti s tímto experimentem se žáci seznámí s transformátorem a jeho funkcí (tato úvaha by stála za samostatnou úlohu), a také popíší jeho vlastnosti a využitelnost v praxi. Posledním dílčím úkolem bude diskuse o elektromagnetu a jeho principu fungování. Žáci se pokusí po zmagnetování jádra na podložku nasypat železné piliny a tou se přiblíží k jádru. Tímto úkolem se přesvědčí o vlastnosti zmagnetování jádra, avšak tato úloha spadá do oblasti demonstrace elektromagnetu. Uvedený dílčí úkol o prokázání zmagnetizování jádra souvisí s dalším teoretickým rozбором, který vyplývá z teoretické části této práce.

#### **Výsledky měření:**

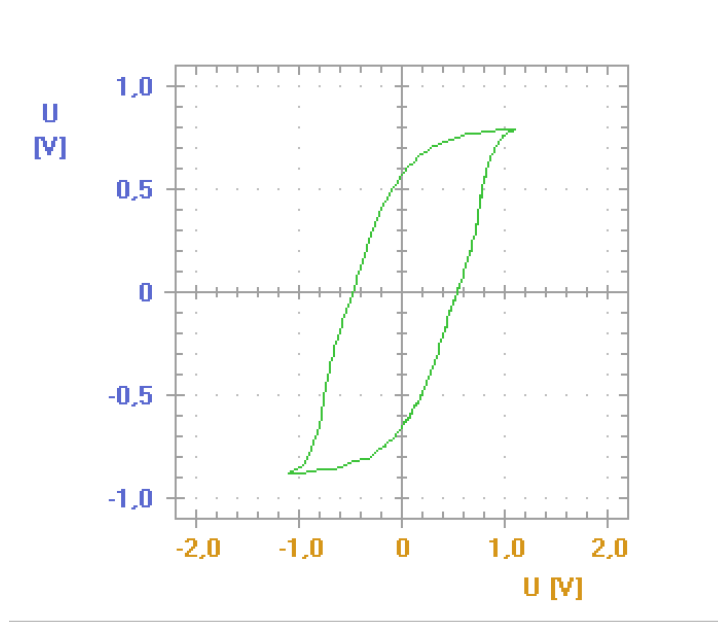
V našem případě výstupem měření je graf, který charakterizuje vlastnost feromagnetického jádra – železného jádra. Udává nám body jako je *nasycení jádra*, tedy při vstupním napětí 150 V, což je bod charakterizující maximální zmagnetování jádra a v tu chvíli se chová jako elektromagnet, dalším významným bodem je protnutí osy y napětí (tj. napětí na integračním článku, dle schématu), jedná se o *remanentní indukci*, která představuje magnetickou indukci. Tento fyzikální jev se projevuje u magneticky tvrdých



látek a díky ní, jádro dokáže být magnetické i při nulovém proudu. Modrá osa napětí je úměrná magnetické indukci a oranžová osa napětí je úměrná intenzitě magnetického pole.



Obrázek 46 – experiment 5 – schéma zapojení obvodu [36]



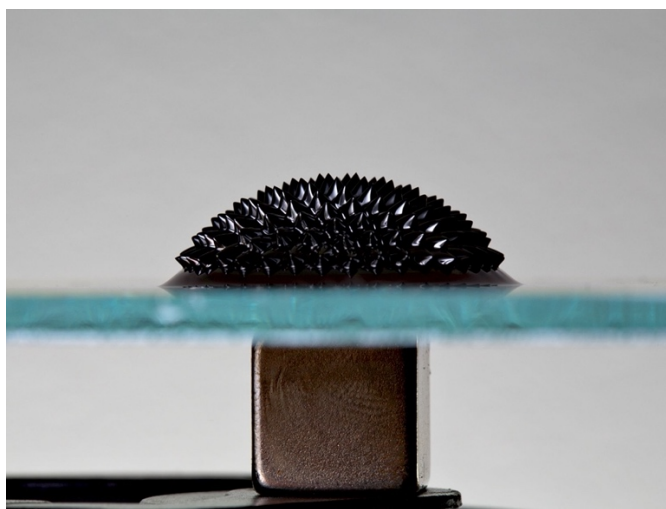
Obrázek 47 – experiment 5 – graf hysterezní smyčky z osciloskopu [vlastní měření]



## 2.6. Ferrofluid

Jedná se o tekutou suspenzi<sup>14</sup> látky z magnetických nanočástic (v tomto případě se jedná o rozpouštědlo, například olej, ve kterém se nachází magnetit). V některých školních experimentech ji lze používat pro demonstraci magnetického pole. Tento experiment lze demonstrovat jako frontální ukázkou, jiné metody pro zobrazení magnetického pole.

Všeobecně se tato látka používá v průmyslu a strojírenství jako tzv. vehikulum, tj. mazivo nebo jako ochrana před zahřívání součástek strojů.



Obrázek 48 – suspenze ferrofluidu na skle, pod sklem je umístěn magnet, který charakterizuje magnetické indukční čáry [45]

## 2.7. Výroba elektromagnetu a jeho využití

**Princip** elektromagnetu jsem již popsal v teoretické kapitole. V podstatě tato úloha souvisí s úlohou o magnetické hysterezi, která vysvětluje přemagnetování magnetika.

**Cílem** tohoto experimentu bude sestavit svůj elektromagnet na základě jednoduchých pomůcek, ověření závislosti, že se magnetické elektromagnetu zvyšuje přímoúměrně počtu závitů a velikosti proudu, který jimi prochází.

**Potřebnými pomůckami pro realizaci experimentu** budou 3 delší šrouby (délky alespoň 5 cm), 3 kusy měděného drátu, z nichž jeden bude délky 0,5 m; druhý délky 1 m a třetí 1,5 m; izolepa, baterie 9 V, tužková baterie 1,5 V, napájecí konektor s vývody a větší množství kancelářských sponek a smirkový papír.

---

<sup>14</sup> Suspenze je směs pevné látky, která se vyskytuje v kapalině.

### Realizace experimentu a pracovní postup:

1. V první fázi budeme potřebovat jeden šroub a k němu metrový kus měděného drátu, který omotáme kolem šroubu. Na každé straně šroubu, tj. levé i pravé necháme přibližně 5 – 10 cm volného „čouhajícího“ drátu, který např. smirkovým papírem nebo nožem očistíme od laku.
2. Následně tyto konce izolepou připevníme k napájecímu konektoru s vývody, kde bude připojena 9 V baterie.
3. Ve chvíli, kdy připojíme k sestavené konstrukci prototypu elektromagnetu baterii a kolem něj umístíme feromagnetické kancelářské sponky, pozorujeme, že budou zmagnetováním šroubu přitahovány.
4. Jakmile baterii odpojíme, magnetické pole v jádře cívky zaniká, tudíž uvažované sponky přestávají být zmagnetizované.
5. Uvedený krok zopakujeme, avšak s kusem měděného drátu o délce 0,5 metrů.
6. Ve třetím případě zopakujeme algoritmus sestavení elektromagnetu znovu, avšak s 1,5 m měděným drátem.
7. Následně cívku s jádrem, tj. elektromagnet odpojíme od napájecího konektoru a odpojíme baterii s napětím 9 V, a ke koncům drátů připojíme baterii o velikosti 1,5 V. Uvidíme, že vyrobený elektromagnet přitáhne určité množství sponek, ale menší než u 9 V baterie.

**Výstupem měření** bude vyplněný pracovní list, který je v příloze č. 1 na základě teorie a pokynů pracovního postupu a samotné výroby svého elektromagnetu. Žák provede úvahu, nad tím, co ovlivňuje velikost magnetického pole v jádře cívky (př. počet vinutí cívky – sestrojí graf vypovídající o závislosti počtu zdvižených sponek na délce drátu, nebo dalším aspektem ovlivňující magnetické pole je velikost proudu v elektromagnetu, a tuto velikosti stanoví na základě vztahu  $I = \frac{U}{R_i + R}$ ), kde  $I$  je proud,  $U$  vstupní napětí,  $R_i$  vnitřní odpor baterie a  $R$  odpor drátu (cívky). Vypočítané odpory drátu a vnitřní odpory baterií jsou v následujících tabulkách:<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Odpor drátu jsme spočítali na základě vztahu:  $R = \rho \frac{l}{S}$ , kde  $\rho$  je měrný elektrický odpor pro daný materiál,  $l$  je délka drátu a  $S$  je plocha drátu,  $S = r^2 \pi$ .

Tabulka 4 – Vypočítaný odpor drátu (cívky) pro jednotlivé délky

Délka drátu [m]	Odpor drátu [Ω]
0,5	0,0177
1	0,0354
1,5	0,0531

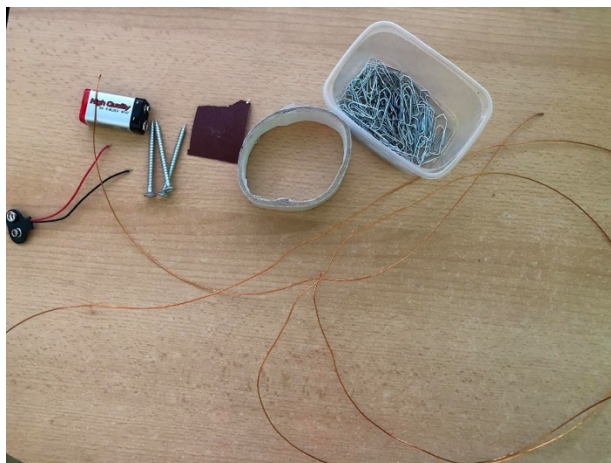
Hodnoty vnitřního odporu baterie byly stanoveny výrobcí v balení:

Tabulka 5 – Určení vnitřního odporu baterií na základě příbalových informací

Typ baterie	Hodnota vnitřního odporu [Ω]
plochá baterie	1,76
tužková baterie	0,91

### Výsledky měření:

V našem případě výstupem experimentu jsou tabulky, kde uvedeme pro příslušný počet závitů (délky drátu) a proud ve vinutí cívky, počet sponek, které jsou elektromagnetem přitahovány. Výstupem bude výpočet elektrického proudu v cívce na základě vztahu  $I = \frac{U_e}{R_1 + R}$  pro obadva zdroje napětí, tyto hodnoty interpretujeme do tabulek. Také v této části uvádíme obrázky, které souvisejí jednak s instrukcemi a jednak s finálním vyrobeným elektromagnetem.



Obrázek 49 – experiment 6 - potřebné pomůcky k výrobě elektromagnetu



Obrázek 50 –experiment 6 - navnutí měděného drátu o délce 0,5 m na jádro



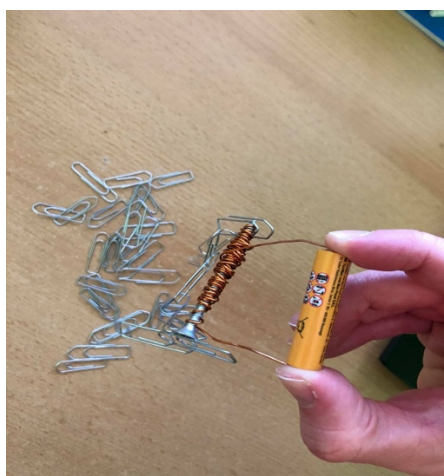
Obrázek 51 –experiment 6 - navnutí měděného drátu o délce 1 m na jádro



Obrázek 52 –experiment 6 - navinutí měděného drátu o délce 1,5 m na jádro



Obrázek 53 – experiment 6 - fungující elektromagnet o délce 0,5 m napájen 9 V

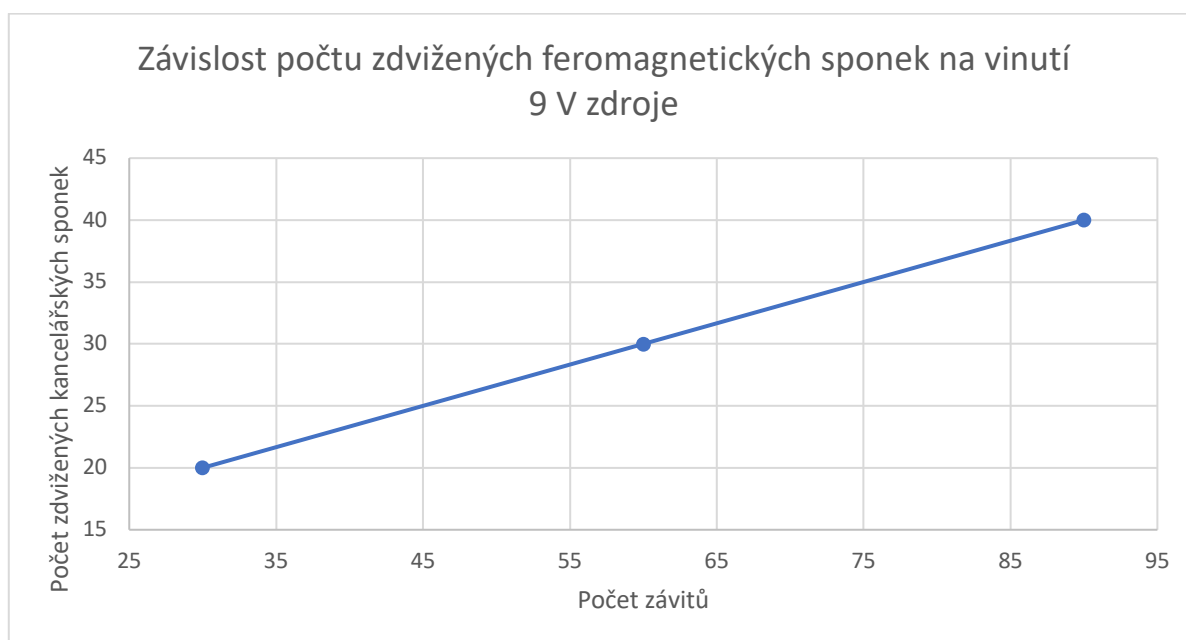


Obrázek 54 –experiment 6 - fungující elektromagnet o délce 1 m napájen 1,5 V

Vysvětlivky: vinutí s počtem závitů 30 představuje měděný drát o délce 0,5 m; vinutí s počtem závitů 60 představuje měděný drát o délce 1 m a vinutí s počtem 90 závitů představuje drát o délce 1,5 m.

Tabulka 6 – Tabulka k obrázku č. 55

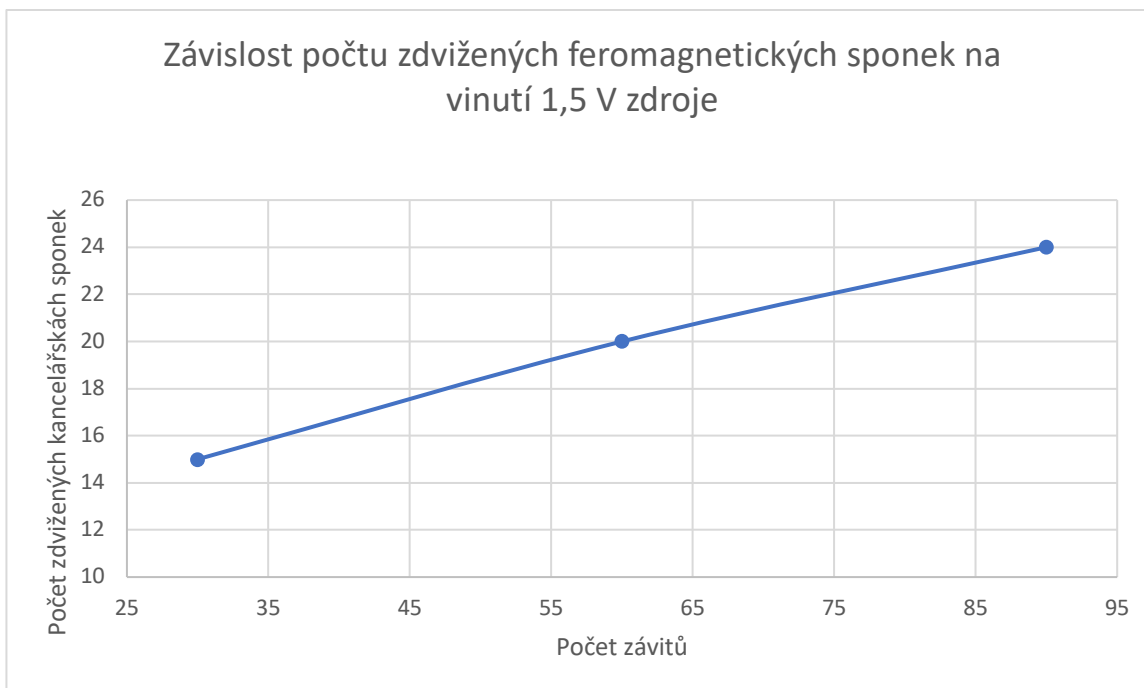
Počet závitů	Počet zdvižených feromagnetických sponek
30	20
60	30
90	40



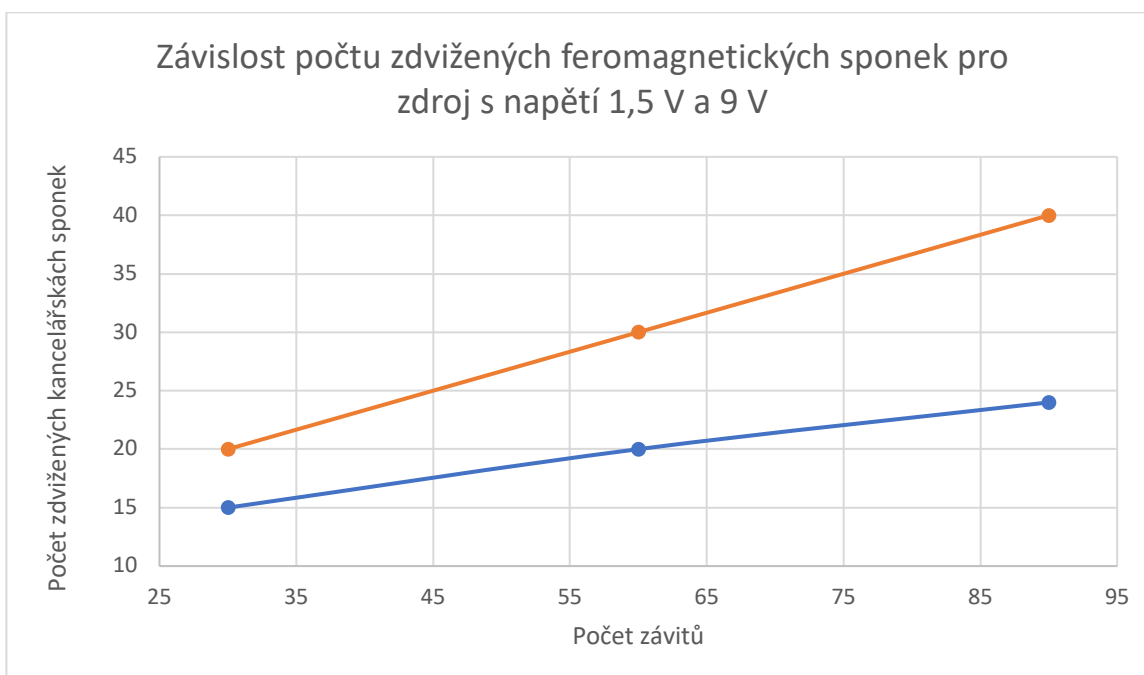
Obrázek 55 – graf závislosti počtu zdvižených sponek na počtu závitů

Tabulka 7 – Tabulka k obrázku č. 56

Počet závitů	Počet zdvižených feromagnetických sponek
30	15
60	20
90	24



Obrázek 56 – graf závislosti počtu zdvižených sponek na počtu závitů



Obrázek 57 – graf spojených křivek z obrázku č. 55 a 56

V grafu č. 3 oranžová křivka představuje elektromagnet s napětím 1,5 V a modrá křivka představuje elektromagnet s napětím 9 V.

Tabulka 8 – Určení elektrického proudu drátu při napětí 9 V

Délka drátu [m]	Velikost elektrického proudu [A]
0,5	5,06
1	5,01
1,5	4,96

Tabulka 9 – Určení elektrického proudu drátu při napětí 1,5 V

Délka drátu [m]	Velikost elektrického proudu [A]
0,5	1,61
1	1,58
1,5	1,55

V tabulkách 9 a 10 jsme interpretovali hodnoty proudu v cívce. Jedná se o hodnoty, které jsme spočítali na základě vztahu  $I = \frac{U_e}{R_i + R}$ , kde  $U_e$  je elektromotorické napětí zdroje (baterek),  $R$  vypočítaný odpor pro jednotlivé délky drátu a  $R_i$  je vnitřní napětí zdroje.



## Závěr

Protože je magnetismus v nejrůznějších formách patrně nejvyužívanějším fyzikálním jevem v oblasti vědy a techniky, musíme jej žákům již na základních a následně na středních školách dobře interpretovat a vysvětlovat s využitím praktických aplikací.

Všeobecně je známo to, že přírodní vědy ve srovnání s humanitními vědami jsou méně oblíbené a žákům od základní školy přijdou náročné na porozumění jejich zákonitostí. K tomu není ani potřebné například šetření MŠMT, ale jedna odučená hodina v předmětu fyziky na základní či střední škole. Stále je třeba mít na paměti, že klíčem k dobrému a kvalitnímu vzdělání, je to, aby děti měly radost z pozorování, aby je bavilo a zajímalo bádání, sebevzdělávání a všeobecně motivace k těmto úkonům. Zejména v přírodovědných předmětech je však možné vyhnout se „biflování“ informací a využít zábavnějších vyučovacích metod. Proto, abychom dobře motivovali žáky k vzdělávání v přírodovědných předmětech, doporučuje se v českém školství tzv. montessori vzdělávací a výchovný přístup, tedy „pomoz mi, abych to dokázal sám“. K pomoci pro získání a osvojení určitých dovedností a znalostí ve školním předmětu, musí být žákovi poskytnuta kvalitní literatura, ve které si bude vyhledávat informace nebo ověřovat již získané poznatky. Nelze se ale vyhnout roli učitele, jako průvodce vzděláváním v dané oblasti, zejména v přírodních vědách jako je fyzika, biologie, chemie nebo geografie, kde si žák může určité znalosti a zákonitosti ověřit pomocí experimentů.

V této práci jsem se snažil v uspořádané formě představit a shrnout problematiku vybrané oblasti fyziky, v mém případě magnetismu. V souladu s cíli bakalářské práce jsem shrnul historický vývoj magnetismu, definoval pojmy a exaktní zákonitosti, provedl jsem výčet fyzikálních vztahů využívaných na středních školách a v neposlední řadě provedl rekapitulaci výstupů v oblasti magnetismu pro základní a střední školu. Také jsem uvedl několik příkladů využití magnetismu, které průřezově zasahují do různých oblastí techniky a vědy. V praktické části jsem představil některé experimenty, které se dají snadno realizovat ve škole, i bez špičkového vybavení laboratoře fyziky. Tyto experimenty mají návaznost na problematiku řešenou v teoretické části práce.

Při zpracování bakalářské práce jsem se snažil využít didaktický přístup se snahou poskytnout ucelený přehled o učivu magnetismu, ve smyslu historické aspekty – teoretické poznatky – experimenty – využití v praxi. Jedno z hledisek bylo rovněž to, abych souhrnně zpracovaný text mohl v blízké budoucnosti využít ve své učitelské praxi.

# Seznam použité literatury

## 1. Knižní zdroje

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1
- [2] HEŘMAN, Josef. *Od jantaru k tranzistoru: elektřina a magnetismus v průběhu staletí.* Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-11-1
- [3] KUBÍNEK, Roman. *Elektřina a magnetismus: studijní modul.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3360-8.
- [4] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia: elektřina a magnetismus. 5., přeprac. vyd.* Praha: Prometheus, 2000. ISBN 80-7196-202-3
- [5] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy.* Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-7196-264-3
- [6] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus.* Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1004-1, str. 199
- [7] SVOBODA, Ludvík. *Encyklopedie antiky.* 1973. Praha: Academia, 1973. ISBN 21-003-73
- [8] ŠTOLL, Ivan. *Dějiny fyziky.* Praha: Prometheus, 2009. ISBN 978-80-7196-375-2.
- [9] VACHEK, Jaroslav. *Fyzika: přehled učiva základní školy.* 3. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1981. Knižnice všeobecného vzdělání

## 2. Internetové zdroje

- [10] BUREŠ J., ConVERTOR fyzici. *William Gilbert*, [online]; [cit.: 2020-08-17]. Dostupné na: <http://www.converter.cz/fyzici/gilbert.htm>
- [11] CANOV, M. 2005. *Canov.jergym.cz. Hans Christian Oersted*, [online]; [cit.: 2020-09-05]. Dostupné na: <http://canov.jergym.cz/objevite/objev2/oer.htm>, internetový zdroj obrázku.
- [12] Citáty slavných osobností. *Hans Christian Orsted citát*, [online]; [cit.: 2020-09-01]. Dostupné na: <https://citaty.net/citaty/1733706-hans-christian-orsted-the-agreement-of-this-law-with-nature-will-be-bett/>
- [13] ClipArt ETC. *Jehla ukazující odchylku, E. Halley*, [online]; [cit.:2020-08-23]. Dostupné na: [https://etc.usf.edu/clipart/20100/20142/dippingneedl\\_20142.htm](https://etc.usf.edu/clipart/20100/20142/dippingneedl_20142.htm), internetový zdroj obrázku.
- [14] conVerter – fyzici. *Michael Faraday*, [online]; [cit.: 2020-09-13]. Dostupné na: <http://www.converter.cz/fyzici/faraday.htm>, internetový zdroj obrázku.

- [15] ČERBA O., Oddělení geomatiky Západočeské univerzity v Plzni. *Historie měřické postupy při tvorbě nejstarších map Čech, Moravy a Slezska, středověký kompas*, [online]; [cit.: 2020-08-17]. Dostupné na: [https://kgm.zcu.cz/Stare\\_mapy/Web/mericke\\_postupy.html](https://kgm.zcu.cz/Stare_mapy/Web/mericke_postupy.html), internetový zdroj obrázku
- [16] Databazeknih.cz. *Immanuel Kant*, [online]; [cit.: 2020-09-05]. Dostupné na: <https://www.databazeknih.cz/zivotopis/immanuel-kant-1076>
- [17] Elektrina.cz. *Michael Faraday: Bez znalosti matematiky se stal geniálním fyzikem*, publikováno: 25. srpna 2014, [online]; [cit.:2020-09-03]. Dostupné na: <https://www.elektrina.cz/michael-faraday-bez-znalosti-matematiky-se-stal-genialnim-fyzikem>, internetový zdroj obrázku.
- [18] Fyzika, SMOULA, *Demonstrace magnetické síly*, [online], [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <http://fyzika.petrnovotny.at/data/images/magn6.jpg>, internetový zdroj obrázku.
- [19] GREGOROVÁ, D., *Bakterie se dvěma typy magnetických střelek*, portál OSEL Object Source E-Learning, publikováno: 3. ledna 2012, [online], [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <https://www.osel.cz/6064-bakterie-se-dvema-typy-magneticke-strelky.html>
- [20] JEDNOTKY.CZ. *Palec*, [online]; [cit.:2020-08-29]. Dostupné na: <https://www.jednotky.cz/delka/palec>
- [21] KAPIČKA, A., PETROVSKÝ, E., *Magnetické mikročástice kolem nás*, časopis Vesmír, Geofyzikální ústav AV ČR, publikováno: 9. června 2011, [online], [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2011/cislo-6/magneticke-mikrocastice-kolem-nas.html>
- [22] KOLÁŘ, Pavel. *Supravodivost a levitace*, Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, publikováno: 8. září 2017, [online], [cit.: 2020-02-15]. Dostupné na: <https://www.fzu.cz/aktuality/supravodivost-levitace>
- [23] KRÁLOVÁ, M., *Cívka*, Techmania Science Center, [online], [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/civka>, internetový zdroj obrázku.
- [24] KRUPIČKA S., 10/2007, Fyzikální ústav AV ČR. Magnetismus: Historie a současnost, od magnetitu a kompasu k magnetickému disku. *Historie magnetismu*, [online]; [cit.: 2020-08-03]. Dostupné na: [https://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka\\_0207.pdf](https://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf)
- [25] *NMR – nukleární magnetická rezonance*, Web o chemii, elektronice a programování, publikováno: 2013, [online], [cit.: 2020-11-27]. Dostupné v pdf na: <http://z-moravec.net/wp-content/uploads/2012/06/NMR.pdf>
- [26] MAGLAB HOME. *Hans Christian Orsted*, [online]; [cit.:2020-09-05]. Dostupné na: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/pioneers/hans-christian-orsted>
- [27] Magnetické pole. *Vznik a zobrazení magnetického pole*, [online]; [cit.: 2020-08-17]. Dostupné na: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>, internetový zdroj obrázku
- [28] MCU Mikroelektronika.cz. *André Maria Ampère*, [online]; [cit.:2020-09-13]. Dostupné na: <http://mcu.cz/news.php?extend.1168.26>, internetový zdroj obrázku

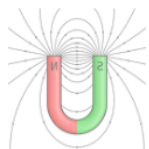
- [29] REICHL J., VŠETIČKA M., Encyklopedie fyziky. *Elektrina a magnetismus ve středověku*, [online]; [cit.: 2020-07-15]. Dostupné na: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1508-elektrina-a-magnetismus-ve-stredoveku>, internetový zdroj obrázku
- [30] REICHL J., VŠETIČKA M., Encyklopedie fyziky. *Magnetické pole rovnoběžných vodičů s proudem*, [online]; [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/289-magneticke-pole-rovnobeznych-vodicu-s-proudem>, internetový zdroj obrázku
- [31] REICHL J., VŠETIČKA M., Encyklopedie fyziky. *Magnetická hystereze*, [online]; [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>, internetový zdroj obrázku
- [32] REICHL J., VŠETIČKA M., Encyklopedie fyziky. *Zemský magnetismus*, [online], [cit.: 2020-07-15]. Dostupné na: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/992-zemsky-magnetismus>
- [33] SBÍRKA fyzikálních pokusů, *elektrina a magnetismus*, [online], [cit.: 2021-03-04]. Dostupné na: <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>
- [34] ThoughtCo. *James Clerk Maxwell, Master of Elektromagnetism*, [online]; [cit.:2020-09-13]. Dostupné na: <https://www.thoughtco.com/james-clerk-maxwell-inventor-1991689->, internetový zdroj obrázku
- [35] Vrba, Vlastimil. *Demonstrace principů NMR a jejího využití k zobrazování*. Olomouc, publikováno 6. června 2013. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra experimentální fyziky. Vedoucí práce: Mgr. Vítek Procházka, Ph.D., [online], [cit.: 2021-03-04]. Dostupné na: <https://theses.cz/id/hs511f/>
- [36] VŮJTEK, M., KRCHŇÁK, P., DVOŘÁKOVÁ, I., *Fyzikální praktikum 2, Elektrina a magnetismus*, Katedra experimentální fyziky, [online], [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/fp2.pdf>
- [37] Vysokorychlostní železnice. *Magalev rychlovlaky* [online], [cit.:2020-09-15]. Dostupné na: <https://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
- [38] Výukové materiály ZŠ Kaplice, Školní 226. *Elektrické jevy – magnetické pole elektrického proudu*, [online]; [cit.: 2020-09-11]. Dostupné na: <http://www.vyukovematerialy.cz/fyzika/7/elektro/mgpole.htm>, internetový zdroj obrázku
- [39] WIKIPEDIE. *Jantar, historie jantaru*, [online], [cit.: 2020-06-22]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Jantar#Historie>
- [40] WIKIPEDIE. *Kompas historie*, [online]; [cit.:2020-08-17]. Dostupné na: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompas#/media/Soubor:Model\\_Si\\_Nan\\_of\\_Han\\_Dynasty.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompas#/media/Soubor:Model_Si_Nan_of_Han_Dynasty.jpg), internetový zdroj obrázku
- [41] WIKIPEDIE. *Edmund Halley*, [online]; [cit.: 2020-09-05]. Dostupné na: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Edmund\\_Halley#/media/Soubor:Edmond\\_Halley\\_072.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Edmund_Halley#/media/Soubor:Edmond_Halley_072.jpg), internetový zdroj obrázku

- [42] WIKIPEDIE. *MAGNETISMUS*, [online]; [cit.: 2021-02-16]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetismus>, internetový zdroj obrázku
- [43] WIKIPEDIE. *William Gilbert*, [online]; [cit.: 2020-08-17]. Dostupné na: [https://cs.wikipedia.org/wiki/William\\_Gilbert#/media/Soubor:William\\_Gilbert.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert#/media/Soubor:William_Gilbert.jpg), internetový zdroj obrázku
- [44] WIKIPEDIE. *Ferrofluidy*, [online]; [cit.: 2021-03-29]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ferrofluid>, internetový zdroj obrázku.
- [45] WIKISOFIA. *Telegraf*, [online], [cit.: 2021-03-06]. Dostupné na: <https://wikisofia.cz/wiki/Telegraf>

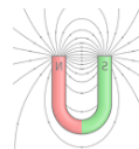
### 3. Legislativní zdroje

- [46] SVATOPLUK P., *RVP ZV\_2017\_červen*, [online]; [cit.: 2020-11-24]. Dostupné na: <https://www.msmt.cz/file/43792/>
- [47] KOUBEK P., *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*, [online]; [cit.: 2020-11-24]. Dostupné na <http://www.nuv.cz/file/159>
- [48] Zákon č. 561/2004 Sb., školský zákon

# Příloha



## Pracovní list k experimentálnímu měření



Název měření: \_\_\_\_\_

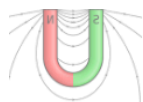
Datum měření: \_\_\_\_\_

**1. Cíl měření.**

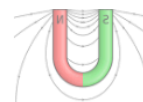
**2. Teorie měření.**

**3. Potřebné pomůcky k realizaci měření.**

**4. Postup měření v jednotlivých krocích.**



## Pracovní list k experimentálnímu měření



**5. Data a tabulky, obrázky a nákresy, vyhodnocení měření.**

**6. Závěr měření.**