

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**VIKTOR  
HEKLÍČEK**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejliček** Jméno: **Viktor** Osobní číslo: **491503**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Teplozně a radiačně odolné Hallovy senzory pro fúzní elektrárny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Temperature and radiation resistant Hall sensors for fusion power plants**

Pokyny pro vypracování:

Senzory magnetického pole tvoří jednu z důležitých částí diagnostického vybavení fúzních reaktorů. Obsahem bakalářské práce je rešerše aktuálního stavu fúzních reaktorů, rešerše výzkumu Hallových senzorů s citlivou vrstvou z bismutu a analýza výsledků testování Hallových senzorů.

Obsah práce:

Teoretická část

- 1) Rešerše výzkumu termojaderné fúze.
- 2) Popis magnetické diagnostiky fúzních reaktorů.
- 3) Hallovy senzory.

Praktická část

- 1) Popis vyvíjených bismutových Hallových senzorů.
- 2) Vyhodnocení experimentálních dat měření bismutových Hallových senzorů.

Seznam doporučené literatury:

S. Entler, I. Ďuran, Kovové Hallovy senzory, Čes. časopis pro fyziku 67 (2017) 91-101.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Slavomír Entler, Ph.D. ústav energetiky**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Slavomír Entler, Ph.D.

podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Anotační list

---

<b>Jméno autora:</b>	Viktor Hejlíček
<b>Název BP:</b>	Teplotně a radiačně odolné Hallovy senzory pro fúzní elektrárny
<b>Anglický název:</b>	Temperature and radiation resistant Hall sensors For fusion power plants
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Ústav/Odbor:</b>	Ústav energetiky/TZSI
<b>Vedoucí BP:</b>	Ing. Slavomír Entler, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 34 Počet obrázků: 22 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	Fúze, fúzní reaktor, Hallův senzor
<b>Keywords:</b>	Fusion, fusion reactor, Hall sensors
<b>Anotace:</b>	Práce se zabývá problematikou termonukleární fúzní reakce a zabývá se vývojem teplotně a radiačně odolných Hallovyh senzorů, které budou umístěny ve fúzním reaktoru ITER. Zkoumá různé konfigurace geometrie, uložení a sběru dat Hallova senzoru a porovnává naměřená data při těchto konfiguracích.
<b>Abstract:</b>	This thesis deals with issue of thermonuclear fusion reaction and deals with the development of temperature and radiation resistant Hall sensors to be placed in the ITER fusion reactor. It investigates differenet configutations of Hall sensor geometry, orientation and data acquisition and compares the measured data in these configurations.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 1. 6. 2022 .....

Viktor Hejlíček

# Obsah

Zkratky .....	1
Značení izotopů .....	1
Symboly .....	1
<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>5</b>
2.1 Hmot a energie .....	5
2.2 Fúze a štěpení .....	5
2.2.1 Fúze vodíku .....	6
2.2.2 Trojný alfa proces .....	7
2.2.3 Fúze těžších prvků .....	7
2.3 Udržení .....	8
2.3.1 Typy udržení .....	9
2.3.2 Magnetické udržení .....	9
2.3.3 Inerciální udržení .....	9
2.4 Palivo pro Fúzi .....	11
2.4.1 D-T fúze .....	11
2.4.2 D-Helium-3 .....	12
2.5 Počátky a experimenty .....	12
2.6 Toroidální zařízení s magnetickým udržením .....	13
2.7 Tokamak .....	14
2.7.1 Nestability a nečistoty .....	14
2.7.2 Diagnostika .....	15
2.8 Magnetická diagnostika .....	17
2.8.1 Hallův jev .....	17
2.8.2 Hallové senzory .....	18
2.8.3 Polovodičové senzory .....	19
2.8.4 Kovové senzory .....	19
2.8.5 Vytvoření Hallových senzorů pro ITER .....	19
<b>3 Praktická část</b>	<b>23</b>
3.0.1 Popis experimentu .....	23
3.0.2 Vyhodnocování .....	24
<b>4 Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Literatura</b>	<b>31</b>

## Obrázky

2.1 Vazebná energie na nukleon . . . . .	6
2.2 Lawsonovo kritérium pro D-T reakci . . . . .	9
2.3 Druhy magnetického udržení [14]	10
2.4 Princip zapálení při inerciálním udržení [14] . . . . .	10
2.5 D-D fúzní reakce [13] . . . . .	11
2.6 Porovnání reakce D-T a $D-^3He$ .	12
2.7 ZETA pinč [12] . . . . .	13
2.8 Stelarátor [11] . . . . .	14
2.9 Tokamak [6] . . . . .	15
2.10 Diagnostika tokamaku COMPASS [9] . . . . .	16
2.11 Schématický náčrt citlivé vrstvy senzoru [7] . . . . .	19
2.12 První série bismutových senzorů [7] . . . . .	20
2.13 Substrát s bismutovou deponovanou vrstvou a měděnými kontaktními dráty[7] . . . . .	21
2.14 Hallové senzory uloženy ve vakuové komoře (červené tečky) [7]	21
2.16 Sensorová jednotka [7] . . . . .	22
2.15 Dvě testované geometrie Hallova senzoru [7] . . . . .	22
3.1 Testování Hallových senzorů v květnu 2016[4] . . . . .	24
3.2 Porovnání stejné geometrie při různých úhlech . . . . .	24
3.3 Porovnání různé geometrie při stejných úhlech. . . . .	25
3.4 Porovnání AC metody pro stejné geometrie při různých úhlech . . . . .	26
3.5 Porovnání jednotlivých částí výsledného Hallova napětí . . . . .	27
3.6 Vypočítaný Hallův koeficient pro senzory 1-6 . . . . .	28

## Tabulky

3.1 Citlivost senzorů . . . . .	27
---------------------------------	----

---

## Zkratky

Zkratka	Význam
<i>AVČR</i>	Akademie věd České Republiky
<i>ITER</i>	International Thermonuclear Experimental Reactor
<i>ZETA</i>	Zero Energy Thermonuclear Assembly
<i>COMPASS</i>	Tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR

## Značení izotopů

Značka	Název
$n$	neutron
$^{235}\text{U}$	Izotop uranu 235
$^1\text{H}$	Izotop vodíku
$^2\text{H}$	Izotop vodíku Deuterium
$^3\text{H}$	Izotop vodíku Tritium
$^3\text{He}$	Izotop helia
$^4\text{He}$	Izotop helia
$^6\text{Li}$	Izotop lithia
$^7\text{Li}$	Izotop lithia
$^8\text{Be}$	Izotop beryllia
$^{12}\text{C}$	Izotop uhlíku
$^{13}\text{C}$	Izotop uhlíku
$^{15}\text{C}$	Izotop uhlíku
$^{13}\text{N}$	Izotop dusíku
$^{14}\text{N}$	Izotop dusíku
$^{15}\text{N}$	Izotop dusíku
$^{15}\text{O}$	Izotop kyslíku
$^{16}\text{O}$	Izotop kyslíku

---

## ■ Symboly

Symbol	Značení
$E$	Energie
$m$	Hmotnost
$c$	Rychlost světla
$p$	Proton
$n$	neutron
$\nu$	neutrino
$\gamma$	Gamma částice
$\beta^+$	pozitron
$n$	Počet jader
$T$	Teplota
$\tau_E$	Doba udržení
$U_H$	Normálové Hallovo napětí
$U_P$	Planární Hallovo napětí
$U_{out}$	Výstupní napětí senzoru
$R_{off}$	Offsetový odpor senzoru
$R_H$	Hallova konstanta pro normálový jev
$P_H$	Hallova konstanta pro planární jev
$B$	Vektor magnetického pole
$I$	Proud
$R$	Odpor
$t$	Tloušťka vodiče
$q$	Elektrický náboj volných nosičů náboje
$n$	Hustota elektrického náboje
$x$	Označení osy
$y$	Označení osy
$z$	Označení osy
$\alpha$	Úhel sklonu vektoru magnetického vůči ose $x$
$\beta$	Úhel sklonu vektoru magnetického vůči ose $y$
$\gamma$	Úhel sklonu vektoru magnetického vůči ose $z$



# Kapitola 1

## Úvod

Jedním z největších cílů lidstva je energetická soběstačnost na zásobách paliva nerostných surovin, potřebných pro výrobu elektrické energie. Zásoby uhlí, ropy, zemního plynu i uranu nejsou nevyčerpatelné. V některých případech proces přeměny nerostných surovin na palivo do elektrárny je velmi zatěžující proces vůči ovzduší a přírodě. Z využitím obnovitelných zdrojů, jako je voda, vítr a slunce, nejsme schopni vyrobit dostatek elektrické energie, potřebné pro pokrytí denní spotřeby lidstva. Najít a vyvinout způsob jak dosáhnout skoro nevyčerpatelného zdroje energie, a k tomu se udržet i v ekologických kritériích, by otevřelo mnoho nových cest lidstvu.

Posledních téměř sto let se vědci ze všech zemí zabývají myšlenkou termojaderné fúzní reakce. Při tomto procesu, se za obrovské energetické investice rozjede fúzní reakce, která jakmile je spuštěna, dodává energii do okolí, přesahující co do velikosti počáteční energetickou investici. To znamená, že bychom měli být schopni dostat z reakce víc, než jsme do ní vložili. Bohužel i přes desetiletí vývoje a výzkumu jsme stále v mnoha směrech omezení technologií naší doby. Z toho důvodu se neustále začínají nové výzkumy na zdokonalení technologií pro lehčí, snadnější dosažení a udržení fúzní reakce.

Samotná fúzní reakce probíhá v extrémních podmínkách ve srovnání s podmínkami nám známými. Do komory reaktoru operátoři budoucího reaktoru nevidí, proto jsme odkázáni zcela na diagnostiku různých metod. Jednou z nejdůležitějších diagnostik pro operování reaktoru je magnetická diagnostika. Ta má mimo jiné za úkol měření magnetického pole a jeho celkový popis v reaktoru. Pro tento účel nejlépe poslouží Hallova sonda.

Hallův senzor, neboli Hallova sonda, je široce používanou elektronickou součástí, která se využívá pro měření magnetického pole, vzdálenosti i otáček. Nachází se v zařízeních a strojích, každodenně používaných, ať už v měření otáček kola u automobilu, měření magnetického pole jako čidlo, nebo kontroluje, zda jsou dveře otevřené, či zavřené. Přestože je vývoj komerčních Hallových senzorů na vysoké úrovni, nemůžou být využiti v jaderném reaktoru, proto započal tuzemský vývoj radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů, které budou umístěny ve stavěném fúzním reaktoru ITER.

V teoretické části bakalářské práce se budu zabývat vysvětlením principu fúzní reakce, paliva potřebná pro reakci a typy udržení fúzní reakce. V neposlední řadě se zaměřím na magnetické udržení fúzní reakce v tokamaku a jeho diagnostiku. Nakonec rozeberu princip



## Kapitola 2

### Teoretická část

#### 2.1 Hmota a energie

Již na počátku 20. století Albert Einstein za použití rovnic o zachování energie a hybnosti předložil, že atom po radioaktivním přechodu, při kterém uvolní energii ve formě záření, bude mít menší hmotnost, než měl před vyzářením energie. Tedy: „Pokud těleso odevzdá energii  $E$  ve formě záření, jeho hmotnost se zmenší o  $E/c^2$ .“[1]

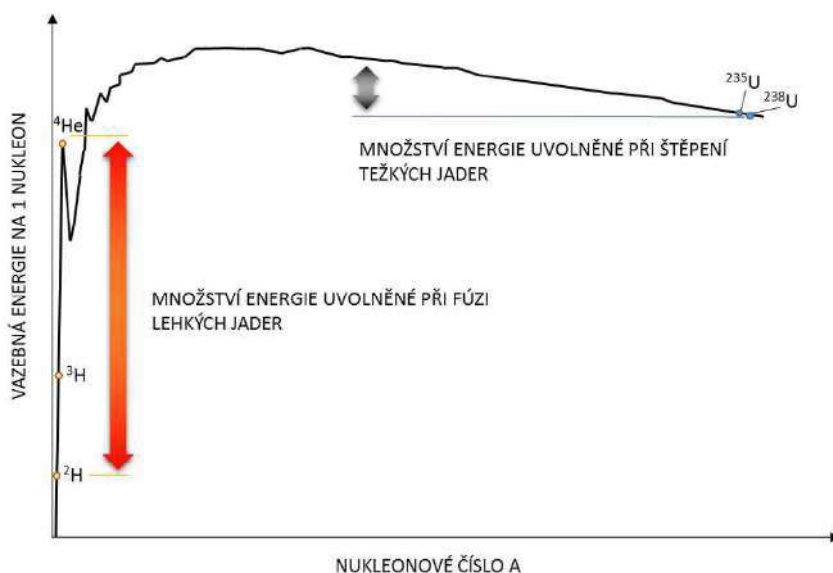
$$E = m * c^2 \quad (2.1)$$

Z rovnice (2.1) je patrné, že hmotnost je jen jiná forma energie. I když se na hmotu a energii podíváme běžným pohledem, tak si všimneme jejich provázanosti. Například spalování uhlí, které ohřeje vodu na vodní páru, která roztáčí turbínu generátoru, a ta vyrábí elektrickou energii, vodou poháněné vodní elektrárny, tuhým palivem poháněný raketový motor. Provázanost hmoty a energie neznámá, že dokážu změnit vodu v láhvi na elektrickou energii, kterou budu pohánět domácnost. Okolní podmínky musí být vždy nakloněny přeměně, tedy voda musí mít polohovou energii, aby ji mohla přeměnit na energii kinetickou, kterou předá turbíně, stejně tak musí být tuhému raketovému palivu k zážehu dodán počáteční výboj, například palník, nebo nálož.[1][2]

#### 2.2 Fúze a štěpení

Nečekaný výsledek změřil Francis Aston, nositel Nobeovy ceny za chemii v roce 1922. Zjistil, že hmotnost jednotlivých izotopů neodpovídá přesnému násobku izotopu vodíku. Při spojení protonu a neutronu do jádra bylo změřeno, že hmotnost jádra je o něco menší, než součet hmotností protonu a neutronu. Pokud rozdíl, který se nazývá hmotnostní úbytek, vynásobíme druhou mocninou rychlosti světla, získáme množství energie, odpovídající síle, která drží jádra prvku pohromadě.[1]

Hvězdná termonukleární fúzní reakce probíhá v jádru hvězd při teplotě kolem 14 miliónů stupňů celsia a obrovském tlaku. Tento proces pohání a dodává energii každé hvězdě v celém nám známém vesmíru a stojí za vznikem všech prvků. Samotná fúze probíhá od vodíku po



**Obrázek 2.1:** Vazebná energie na nukleon

nejstabilnější prvky, jako je železo, nikl a kobalt. Prvky těžší, až po uran, vznikly při výbuchu supernov za přítomnosti obrovské teploty a velkého množství vyzářených energetických neutronů. Díky zmíněným supernovám byly prvky rozprášeny po celém vesmíru ve formě prachu, z kterého pak vznikaly hvězdy a planety.

Na Zemi se nám zatím nedaří vytvořit udržitelné podmínky pro fúzní reakci. Oproti tomu reakci štěpnou, v rámci které se neutronem s vysokou energií trefíme do jádra prvku, jako je například uran  $^{235}\text{U}$  a díky tomu se uvolní poměrně dost energie, již provozujeme a využíváme po celém světě nejen v jaderných elektrárnách.[1]

V obrazu závislosti vazebné energie na nukleon 2.1 lze vidět uvolněnou energii, při fúzní reakci lehčích prvků od vodíku po železo, nebo štěpnou reakci těžkých prvků těžších po železo. [1][?]

### 2.2.1 Fúze vodíku

Přeměna vodíku na helium odpovídá přeměně 4 protonů, neboli izotopů vodíku  $^1\text{H}$ , na helium  $^4\text{He}$ . Tato přeměna neprobíhá v jednom kroku, ale nastává postupně. V prvním kroku proběhne reakce mezi dvěma protony  $p$ , kde se jeden proton změní na neutron. Během této změny se vyzáří pozitron  $\beta^+$ . Dále se neutron s protonem za reakce promění v těžké jádro izotopu vodíku  $^2\text{H}$ , neboli deuterium. Při celé této reakci si také vyzáří neutrino  $\nu$  (2.2). Jádro deuteria se dále sloučí s protonem a vznikne lehký izotop helia  $^3\text{He}$  nazývaný helium-3. (2.3). Při posledním kroku jsou dvě jádra helia-3 sloučena na helium-4  $^4\text{He}$  a dva uvolněné protony (2.4).[1]





Energie uvolněná třemi reakcemi v procesu přeměny vodíku na helium je přibližně  $19.6\text{MeV}$ . [2]

### ■ 2.2.2 Trojný alfa proces

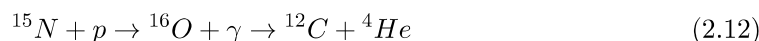
Po té, co je vytvořeno helium  ${}^4\text{He}$ , je potřeba dosáhnout dalšího prvku, uhlíku  ${}^{12}\text{C}$ . Jedna z cest jak dosáhnout uhlíku, se nazývá „Trojný alfa proces“. Probíhá ve dvou krocích, neboť je velice nepravděpodobné, aby se srazily v jeden okamžik 3 jádra  ${}^4\text{He}$ . První krok přeměny je fúze dvou jader  ${}^4\text{He}$  na jádro  ${}^8\text{Be}$ . Jádro berylia je ale vysoce nestabilní a rozpadá se zpět na dvě jádra helia během  $10^{-16}\text{s}$ . Tento proces je znázorněný rovnicí (2.5) [3]. Doba životnosti izotopu je dostatečná k tomu, aby při veliké hustotě částic se spojil s dalším jádrem helia a přeměnil se ve fúzní reakci na uhlík  ${}^{12}\text{C}$  dle reakce (2.6). [3]



### ■ 2.2.3 Fúze těžších prvků

Uhlíkový cyklus je další řetěz reakcí, který přemění vodík na helium. Jedná se o cyklus fúzních reakcí, který nezávisle na sobě navrhli Carl von Weizsäcker a Hans Bethe v roce 1938 a dnes se domníváme, že k němu dochází ve hmotnějších a teplejších hvězdách. [1] Vychází z izotopu uhlíku, který pokračuje ve fúzi s částicemi alfa na těžší prvky. [3]





Fúzní reakce pokračuje dál fúzí jader uhlíku  ${}^{12}\text{C}$ , nebo fúzí jader kyslíku  ${}^{16}\text{O}$ . Při dalších reakcích, které následují po vzniku kyslíku, se uvolňuje čím dál méně energie, což je patrné z obrazu 2.1. Teplota na reakci je třeba vyšší a stabilita prvků stoupá. Při posledních fúzních reakcích vzniká železo, kobalt a nikl.[1][2]

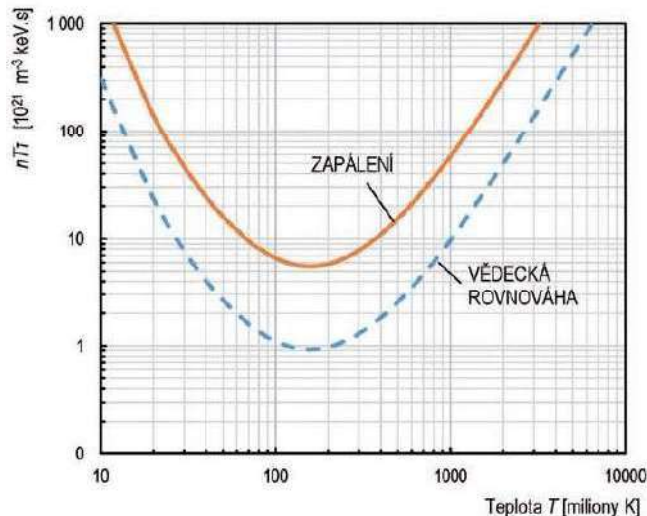
## 2.3 Udržení

John David Lawson, fyzik z britského Ústavu pro výzkum atomové energie v Harwellu, v padesátých letech 20. století spočítal, že: „je třeba, aby součin hustoty plazmatu a doby jeho udržení byl větší než určitá hodnota“. Lawson jako první zformuloval kritérium pro energetické využití jaderné fúze. Původní Lawsonovo kritérium zjednodušeně říká, že palivo pro fúzi musí dosáhnout na dostatečně dlouhou dobu hustoty a teploty takové, aby četnost fúzních jaderných reakcí zajistila celkový energetický zisk.[6]

Lawsonovo kritérium v dnešní době označuje rovnice energetické rovnováhy fúzního paliva a kritéria pro fúzní reaktor, jež je potřeba splnit, aby se dosáhlo příslušné energetické rovnováhy. Jelikož je Lawsonovo kritérium poměrně náročné na splnění, zpracovalo se jednodušší kritérium a to tzv. vědecké vyrovnání (*scientific breakeven*), které popisuje, proběhlou fúzní reakci. Vědecké vyrovnání nám označuje rovnováhu mezi fúzním výkonem a výkonem ohřevu plazmatu. Rovnováha mezi hrubým výkonem fúzní elektrárny a vlastní spotřebou elektrárny se nazývá inženýrské vyrovnání (*engineering breakeven*). Toto vyrovnání nám zaručí, že si elektrárna v budoucnu na svůj energetický spotřebu vyrobí dostatek energie. Pokud se dosáhne rovnováhy mezi fúzním výkonem absorbovaným v plazmatu a ztrátovým výkonem plazmatu, nastane zapálení, neboli (*ignition*). Jednoduše řečeno, pokud se dostaneme na tuto rovnováhu, fúzní reakce bude probíhat bez naší pomoci.[6]

Pro dosažení energetické rovnováhy, jako je vědecké, nebo inženýrské, určí Lawsonovo kritérium minimální hodnotu součinu jader  $n$  a doby udržení  $\tau_E$  při teplotě  $T$  dle rovnice 2.13. Součin hustoty a doby udržení na levé straně umožňuje podmínku splnit dvěma způsoby. Velmi vysokou hustotou jader za velmi krátký časový úsek, nebo nižší hustotou za značně delší dobu. První způsob se označuje inerciální udržení a druhý způsob magnetické udržení, o nichž bude řeč v kapitole 2.3.2 a 2.3.3. Z grafu závislosti Lawsonova kritéria 2.2 vidíme, že pro reakci D-T při magnetickém udržení je nejsnážší dosáhnou fúze při teplotě přibližně  $170\text{mil.K}$ . [6]

$$nT\tau_E \geq f(T) \quad (2.13)$$



Obrázek 2.2: Lawsonovo kritérium pro D-T reakci

### 2.3.1 Typy udržení

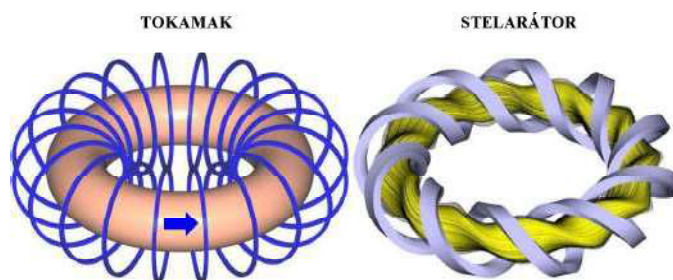
Jsou tři přístupy jak dosáhnout kontrolované, udržitelné fúzní reakce. Gravitační, magnetické a inerciální udržení. Při gravitačním udržení jsou Coulombické odpudivé síly mezi jádry překonány samotnou gravitační silou a tlakem. Například vodík ve Slunečním jádře je stlačen na hustotu asi 10x větší, než má olovo, a samotné jádro má teplotu přibližně 14 milionů stupňů Celsia. Gravitační síla je nejslabší ze sil jaderné fyziky, tudíž dokáže udržet horké plazma jen v případě, že je jeho hmotnost velmi velká. To platí ve známém vesmíru u těžších objektů, jako jsou například hvězdy, proto se tímto udržení nebudeme zabývat.[1][5]

### 2.3.2 Magnetické udržení

Přístup magnetického udržení se považuje za nejsnadnější pro úspěšné udržení fúzní reakce. V principu se palivo ohřeje na vysokou teplotu, při které se palivo stane plně ionizovaným plazmatem. Ionty a elektrony pak už lze svázat pomocí magnetického pole. Při magnetickém udržení, se doba udržení energie plazmatu pohybuje v řádu sekund, a tedy jeho hustota kolem  $10^{19} - 10^{20}$  jader na metr krychlový. Konfigurace, kde se fúze bude udržovat, se nazývá tokamak, o kterém se budeme zabývat v kapitole 2.7.[1][5][6]

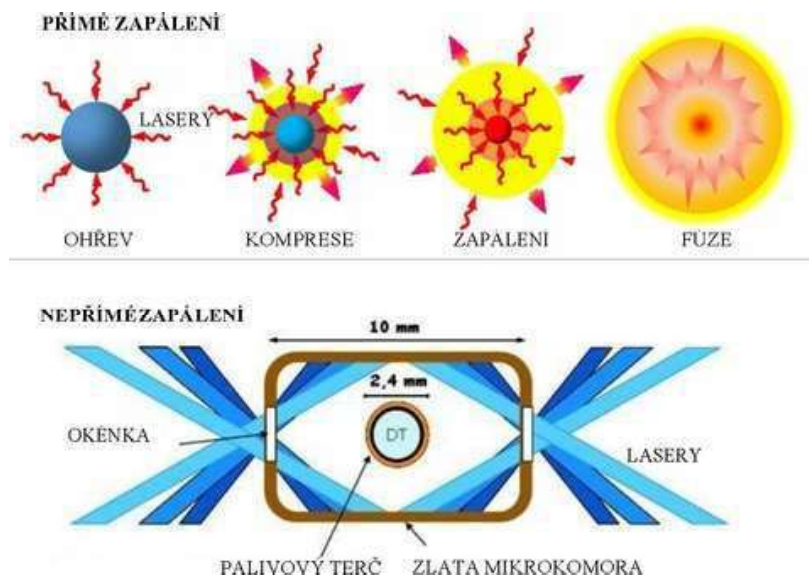
### 2.3.3 Inerciální udržení

Jedna z ambiciózních cest, jak dosáhnout udržitelné fúze, je cesta inerciálního udržení. Palivo se stlačí a ohřeje tak rychle, že dosáhne podmínek k zapálení fúze dříve, než se rozletí, a tedy inerce neboli setrvačnost paliva zabrání okamžitému rozletění. Oproti magnetickému udržení, fúzní reakce v inerciálním systému probíhá několik desetin z miliardtiny sekundy, takže hustota musí být přibližně  $10^{31}$  jader na metr krychlový.[1]



Obrázek 2.3: Druhy magnetického udržení [14]

Zapálení při inerciálním udržení lze dosáhnout dvěma cestami. Přímé zapálení spočívá v rovnoměrném ozáření terčíku laserovými svazky, které rovnoměrně ozáří a zahřejí povrch palivového terčíku. Palivový terčík obsahuje D-T plyn, v kterém by měla započít fúzní reakce. Při nepřímém zapálení se dosáhne rovnoměrného ozáření pomocí rentgenového záření, které vzniká na stěnách dutiny nazývané hohlraum, poté co se laserové paprsky srazí s materiálem stěny. [1]



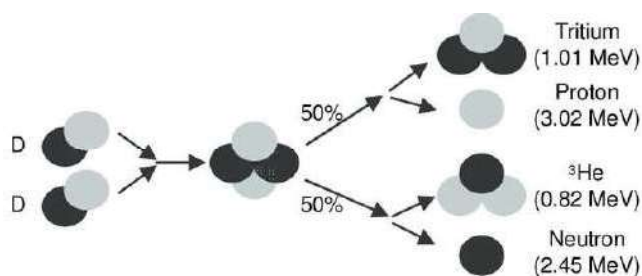
Obrázek 2.4: Princip zapálení při inerciálním udržení [14]

Inerciální udržení je určitě zajímavý způsob dosažení fúzní reakce, ale bohužel v dnešní době je tato metoda zpomalena vývojem potřebných komponent a to hlavně laserů. Chybí nám dostatečně výkonné lasery na zprovoznění fúze, které by dokázaly udržet rychlejší a silnější frekvenci výbojů.



## 2.4 Palivo pro Fúzi

Fúzní reakce ve hvězdách začíná spojením dvou protonů na deuterium, přičemž jeden z protonů se přemění na neutron jak znázorňuje rovnice (2.2). Pro naše první pokusy na výrobu energie pomocí fúze na Zemi se tato reakce moc nehodí, neboť trvá poměrně dlouho. Další článkem v řetězci je fúze deuteria, která může pokračovat dvěma cestami. Při jedné se přemění na vzácné *helium* – 3 s neutronem. Druhá cesta je přeměna na *tritium*, s kterým se uvolní proton. Obě dvě možné reakční cesty jsou vidět na obrázku 2.5. Součet hmotností výsledných produktů jednotlivých reakčních cest je o něco menší, než součet hmotností deuteria před reakcí, tudíž se díky hmotnostnímu úbytku uvolňuje při reakci energie. Výsledky reakce D-D, tritium a helium, se dále mohou slučovat s deuteriem za vzniku *Helia* – 4 a jednoho protonu, nebo neutronu dle rovnice (2.14) a rovnice (2.15).[1][4]



Obrázek 2.5: D-D fúzní reakce [13]



### 2.4.1 D-T fúze

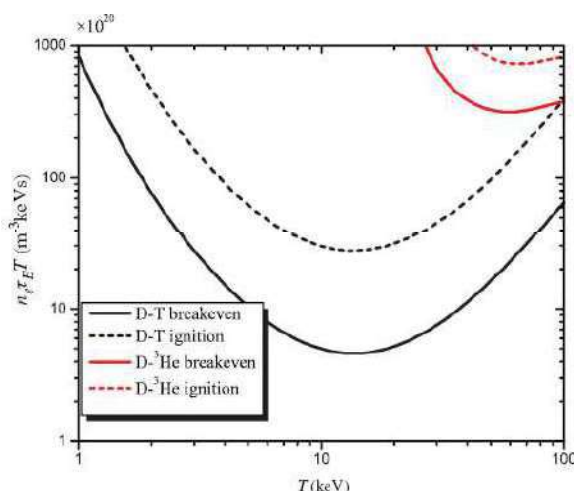
S deuteriem-tritiem se ve výzkumné sféře počítá jako s hlavním palivem pro počátek fúze. Reaguje při nejnižších teplotách, má vysokou pravděpodobnost reakce při nižších energiích, než v porovnání s reakcí D- ${}^3\text{He}$  a reakcí D-D. Při reakci D-T vznikají vysoko energetické neutrony, které zvyšují radiační poškození a radioaktivitu v reaktoru. Tedy se zvyšují nároky na údržbu reaktoru oproti například reakci D- ${}^3\text{He}$ . Jednou z hlavních překážek je, že tritium se volně na Zemi nevyskytuje, má poločas rozpadu 12,3 roku a tudíž se bude muset vyrábět reakcí neutronů s přirozeně se vyskytujícími izotopy lithia, dle rovnic (2.16) a (2.17). Reakce  ${}^6\text{Li}$  je nejpravděpodobnější a exotermická a uvolňuje se při ní energie, na rozdíl od reakce  ${}^7\text{Li}$ . [1][4]





### 2.4.2 D-Helium-3

Reakce  $\text{D}-{}^3\text{He}$  oproti reakci D-T neprodukuje žádné neutrony, a tedy je šetrnější a životnost materiálů reaktorové komory je delší a snižuje se náročnost údržby. V této reakci, když opomeneme reakci D-D, je veškerá energie fúze uvolněná v nabitých částicích, které v určité konfiguraci můžeme s vysokou účinností přeměnit na elektrickou energii. Nevýhodou je oproti D-T, že potřebuje alespoň 50x vyšší hustotu udržení a je tedy náročnější a hůř dosažitelná než reakce D-T.[4]



Obrázek 2.6: Porovnání reakce D-T a  $\text{D}-{}^3\text{He}$

Největší překážkou v reakci  $\text{D}-{}^3\text{He}$  je fakt, že se *helium – 3* nevyskytuje na Zemi, zatímco se vyskytuje v celém vesmíru. Na obrázku 2.6 lze vidět porovnání požadované teploty pro zapálení (*ignition*) a energetické vyrovnání (*breakeven*) mezi reakcí D-T a  $\text{D}-{}^3\text{He}$ . [4]

## 2.5 Počátky a experimenty

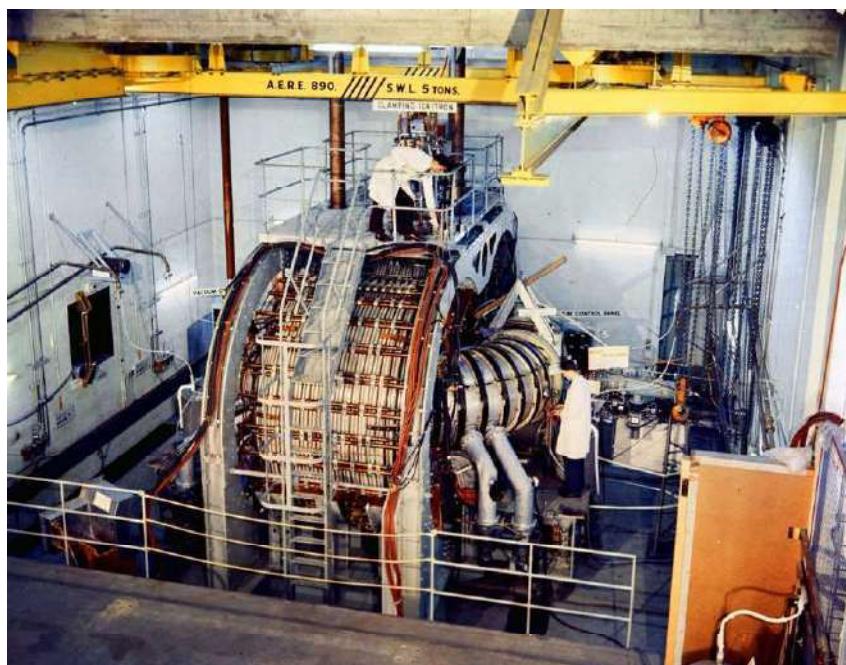
První experimenty, které zkoumaly, jak udržet plazma vycházely z pinč-efektu. Zjistilo se, že pokud udeří blesk do dutého hromosvodu, zůstane vodič hromosvodu trvale zmáčknutý. Pokud by byl proud dostatečně velký, dokázal by udržet i plazma. Prochází-li vodičem elektrický proud, vytváří se magnetické pole, jehož siločivky otáčí směr proudu. Pokud je proud dostatečně intenzivní, vytvořené magnetické pole bude natolik silné, že stlačí neboli pinčuje vodič, v tomto případě plazma, a odtrhne ho od stěny výbojové trubice. Jedny z prvních sestav byly lineární magnetické konfigurace na udržení. S lineárními konfiguracemi, jakožto možným směrem fúzní elektrárny, se již nepočítá, ať už z důvodu zmíněných nestabilit, nebo volných konců. Pořád se v některých zařízeních doposud zkoumají nestability, slouží jako zdroj hustého plazmatu pro základní výzkum, nebo by mohli pracovat jako možné zapalovače fúze s inerciálním udržením.[1]

## 2.6 Toroidální zařízení s magnetickým udržením

### Toroidální pinč

Jeden z prvních experimentů na magnetické udržení byl toroidální pinč, který používal pro udržení plazmatu hlavně poloidální magnetické pole, vytvářeno silným proudem tekoucím v plazmatu. Silný proud tekoucí plazmatem, plazma stlačuje, neboli "pinčuje" a odtrhuje od stěny komory. Tato metoda vytváří značné nestability, jako je prohýbání, nebo zaškrcování plazmatu. Na zvýšení stabilizace se proto přidalo slabší toroidální magnetické pole, generováno vnějšími cívkami, které zdokonalilo chování toroidálního pinče.[1]

Nejznámější toroidální pinč, je ZETA pinč 2.7, navržený a postavený v Harwellu v roce 1957. Díky experimentům provedených na ZETA pinči, se dosáhlo důležitých kroků k pochopení chování fúzního plazmatu.[1]

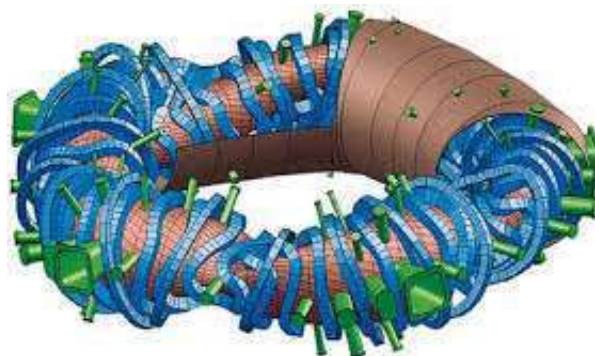


Obrázek 2.7: ZETA pinč [12]

### Stelarátor

Jelikože se konfigurace toroidální pinče ukázala jako poměrně nestabilní, na počátku 50. let 20. století, sestrojil Lyman Spitzer zařízení s názvem stelarátor. Toto zařízení udržuje plazma pomocí velmi silného toroidálního pole, generované vnější toroidální cívkou, neboli solenoidem. Aby se zabránilo rozpínání plazmatu, bylo přidáno vnitřní, helikální, šroubovicové vinutí, které stáčí výsledné silokřivky do tvaru šroubovice, která drží plazma ve schránce. Toroidální pole ve stelarátoru je mnohem silnější než poloidální pole, což se liší od konfigurace toroidálního

pinče. Narozdíl od toroidálního pinče a tokamaku, plazmatem neproudí žádný elektrický proud, tudíž je schopen pracovat nepřetržitě v ustáleném režimu. Typy stelarátorů se liší podle konfigurace a počtu helikálních vinutí.[1]



**Obrázek 2.8:** Stelarátor [11]

Na obrázku 2.8 je vidět největší stelarátor na světě *WendelsteinW7 – X*, který byl postaven v roce 2014, důkaz, že se ve světě pokračuje ve výzkumu stelarátorů jako konkurencí tokamaků.[1]

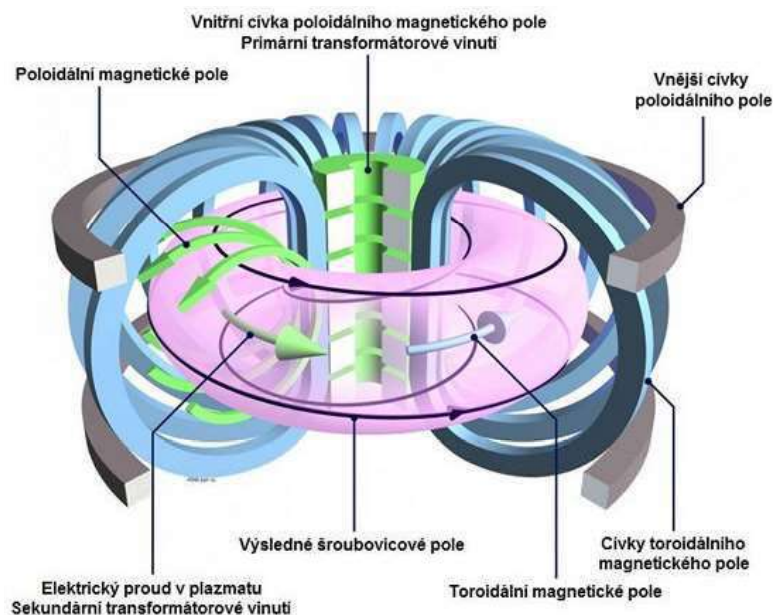
## 2.7 Tokamak

Třetí, a doposud nejúspěšnější konfigurace toroidálního magnetického udržení, je takzvaný tokamak, vyvinutý v padesátých letech v Moskvě. Má dvě hlavní magnetická pole, toroidální a poloidální. Obdobně jako pinč, ale s tím rozdílem, že má mnohem větší toroidální pole, než pole poloidální. Kombinuje toroidální magnetické pole generované velkými cívkami a poloidální magnetické pole, které je generováno elektrickým proudem tekoucím v plazmatu. V kombinaci těchto dvou magnetických polí se vytváří pole helikálního, neboli šroubovicového tvaru. Poloidální magnetické pole plazma ohřívá. [1][6]

Tokamak se ukázal jako nejefektivnější a nejlevnější zařízení, které by mělo zvládnout fúzi, proto se na něj zaměřila většina světového výzkumu zabývající se fúzí, s cílem postavit první termonukleární fúzní elektrárnu, tudíž se touto konfigurací budeme zabývat nejpodrobněji.[1]

### 2.7.1 Nestability a nečistoty

Plazma je samo o sobě vnitřně nestabilní a snaží se uniknout magnetickému poli v tokamaku. Nestability mohou zapříčinit okamžitou ztrátu plazmatu a snižují dobu udržení energie. I když nestability zhoršují práci s plazmatem a snižují šance na dosažení a udržení fúze, je třeba zdůraznit, že nestability plazmatu jakéholiv typu nepředstavují žádné nebezpečí, které by zapříčinilo výbuch, nebo únik nebezpečných látek.[1]



Obrázek 2.9: Tokamak [6]

Disrupce nastává, když se zvýší nestabilita plazmatu. Dochází při ní k velkým rázům na strukturu komory.[1]

### 2.7.2 Diagnostika

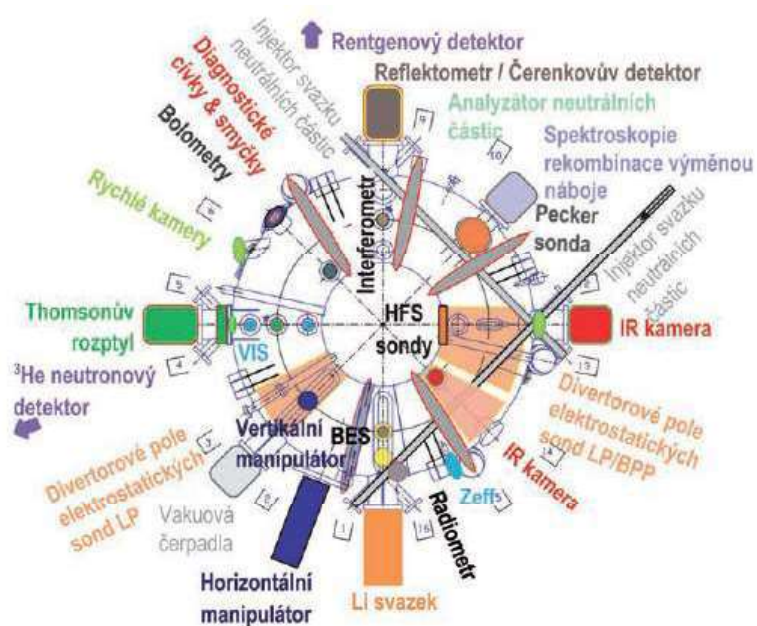
Diagnostika je jednou z nejdůležitějších částí experimentálních zařízení i budoucích fúzních elektráren. Jelikož v komoře fúzního reaktoru dochází k extrémním podmínkám v teplotě a záření, musí být měřicí přístroje odolné a robustní. Z toho vyplývá, že jediným způsobem jak kontrolovat a řídit fúzní reakci v reaktoru, jsou diagnostické systémy. Diagnostika u stavěného fúzního reaktoru ITER bude obsahovat diagnostiku magnetickou, neutronovou, optickou, mikrovlnnou, plazmovou, provozní a bolometrické a spektroskopické systémy.[8]

Diagnostika Thomsonova rozptylu měří základní charakteristiku plazmatu. Vyhodnocuje elektronové hustoty a teploty v průřezu plazmatu, kontroluje efekt ohřevu plazmatu a dopad nečistot v plazmatu na teplotu a hustotu. Jedná se o neinvazivní diagnostickou metodu, tedy neovlivňuje pozorované plazma. Princip metody spočívá v použití nekoherentního Thomsonova rozptylu laserových záření v volných elektronech, kde intenzita rozptýleného záření je přímo úměrná hustotě elektronů.[9]

Mikrovlnná diagnostika se používá na bezkontaktní zkoumání horkého plazmatu uvnitř tokamaku. Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o vlnové délce od  $30\text{cm}$  do  $1\text{mm}$  a tedy frekvence od  $1\text{GHz}$  do  $300\text{GHz}$ . Přístroje používané při mikrovlnné diagnostice používají polovodičové součástky, které jsou poměrně nenáročné na údržbu a provoz. Tato diagnostika používá mikrovlny a zkoumá jejich průchod plazmatem (*interferometrie*), jejich odraz (*reflektometrie*) a měření intenzity mikrovlnného záření generovaného v plazmatu (*radiometrie*).[9]

Další diagnostika se nazývá infračervená termografie, která se používá ke studiu tepelného namáhání první stěny tokamaku. Zkoumá tepelné toky na okraji plazmatu a slouží k ochraně komponent uvnitř vakuové komory. Také se tato diagnostika využívá ke sledování extrémních lokalizovaných tepelných toků.[9]

Jedna z aktivních diagnostických metod je emisní spektroskopie na svazku neutrálních atomů. Je založena na vstřikování svazku neutrálních atomů do plazmatu a následně jejich analyzování. Při průchodu neutrálních atomů plazmatem se srážejí s ionty a elektrony, dochází tak excitaci elektronů neutrálních atomů do vyšších energetických stavů a k postupné ionizaci. Excitované atomy vyzařují elektromagnetické záření na charakteristických vlnových délkách. Elektromagnetické záření je následně detekováno citlivými polovodičovými detektory. Z intenzity vyzařovaného světla a ze znalosti srážkově-radiačního modelu interakce svazku s plazmatem, jsme schopni zjistit hustotu plazmatu podél dráhy svazku.[9]



Obrázek 2.10: Diagnostika tokamaku COMPASS [9]

Analýza neutrálních částic je jedním z nejstarších diagnostických systémů tokamaku. Zkoumá energetické spektrum neutrálních částic, které vylétají z plazmatu. I přes vysokou teplotu a téměř pořád plnou ionizaci, se v plazmatu nachází neutrální částice, vzniklé například výměnou náboje mezi ionty při srážce v plazmatu, nebo při ohřevu plazmatu pomocí neutrálních svazků. Magnetické pole neovlivňuje pohyb neutrálních částic bez elektrického náboje a při srážce neutrálních částic s nabitou částicí vylétávají ven z plazmatu. Mají podobnou energii jako ionty. Pomocí měření energetického spektra neutrálních částic vylétávajících z plazmatu, lze zjistit energetické spektrum iontů v plazmatu. Analýzou naměřených hodnot lze změřit iontovou teplotu plazmatu.[9]

Bolometrické systémy, situované po celé vakuové nádobě, sbírají informace o prostorovém rozložení vyzářeného výkonu v oblasti hlavního plazmatu a divertoru pomocí topografie. [citace stránky ITER]

Celé zařízení tokamaku má samozřejmě rozsáhlejší škálu diagnostických zařízení, které kontrolují, ovládají a sbírají informace o tokamaku. V této kapitole, jsou uvedené ty nejdůležitější, které byly použity při výzkumu na tokamaku COMPASS a budou použity i při výzkumu na tokamaku ITER. Přehled veškeré diagnostiky u tokamaku COMPASS je znázorněn na obrázku 2.10. Jedna z nejdůležitějších diagnostik, která bude řídit i celý fúzní reaktor, je magnetická. O ni bude řeč v kapitole. 2.8

## 2.8 Magnetická diagnostika

Magnetická diagnostika je jedna z nejdůležitějších, je to základní diagnostika, potřebná k řízení výbojů v tokamaku. Do magnetické diagnostiky hlavně spadají měřicí cívky, které kontrolují parametry plazmatu i jeho procesy. Jak už bylo řečeno, měření a celkové diagnostice se staví do cesty vysoká teplota, které z valné většiny vylučuje kontaktní měřicí metody. Magnetická diagnostika měří oscilace až do frekvence  $1\text{MHz}$  v různých módech, identifikuje rotující i nerotující struktury v plazmatu i různé poruchy magnetického pole. Další důležitá funkce magnetické diagnostiky je detekce ukazatelů možných problematických dějů, jako je například disrupce umožňující reagovat včas, aby se nestabilitě předešlo. Analyzováním magnetického pole lze určit celkový proud v plazmatu, lokální proudové hustoty, energii obsaženou v plazmatu a identifikovat magnetohydrodynamické nestability.[7][9]

### 2.8.1 Hallův jev

Hallův jev byl experimentálně objeven roku 1897 Edwinem Herbertem Halleem, při studiu vlivu magnetického pole na elektrický odpor. Při experimentu nastavil tenkou zlatou fólii na skleněný podklad, nechal jí protékat elektrický proud a vystavil ji magnetickému poli. Všiml si, že na stranách fólie začalo vznikat elektrické napětí, které je přímo úměrné elektrickému proudu, protékající fólií. Při působení elektrického a zároveň magnetického pole dochází ve vodičích a polovodičích k oddělení kladného a záporného náboje, vytváří se tzv. Hallovo pole. Síla, která náboje usměrňuje na jednu, nebo na druhou stranu, je Lorentzova síla, ta působí na veškeré volné nosiče náboje tvořící elektrický proud a vychyluje nosiče. Vychýlením se vytvoří rozdílné potenciály na fólii. Tento proces vede ke vzniku elektrického pole, které působí proti silovému působení magnetického pole a generuje elektrické napětí orientované kolmo ke směru elektrického proudu. Výsledné napětí, vyvolané složkou magnetického pole kolmou k rovině vodiče se nazývá normálové a jev, který to zapříčiní, je normálový Hallův jev.[7]

Výsledné napětí vzniklé normálovou složkou popisuje rovnice (2.18). Kde  $U_H$  je napětí způsobené normálovým Hallovým jevem,  $I$  je proud,  $B$  magnetické pole působící kolmo ke směru vodiče,  $t$  tloušťka vodiče.  $R_H$  je Hallova konstanta, kterou popisuje rovnice (2.19), kde  $q$  je elektrický náboj volných nosičů náboje a  $n$  je jejich hustota.[7]

$$U_H = R_H \frac{IB}{t} \quad (2.18)$$

$$R_H \approx \frac{1}{qn} \quad (2.19)$$

Druhá složka, která se musí vzít v potaz, je způsobena tzv. planárním Hallovým jevem. Ten vzniká při působení magnetického pole v rovině vodiče. Obdobně jako u normálového jevu, díky Lorentzově síle, která působí na volné nosiče náboje, vzniká elektrické napětí kolmo k toku proudu. Vzniklé napětí, neboli planární Hallovo napětí, úměrné druhé mocnině velikosti magnetického pole, je popsáno rovnicí (2.20).  $B$  je magnetické pole, působící v rovině vodiče pod úhlem  $45^\circ$  ke směru toku elektrického proudu.  $P_H$  je Hallova konstanta a stejně jako u normálového jevu, je obecně nelineárně závislá na teplotě vodiče a na velikosti magnetického pole.[7]

$$U_P = P_H \frac{IB^2}{2t} \quad (2.20)$$

### 2.8.2 Hallový senzory

Senzory, které využívají Hallův jev k měření magnetického pole, se jmenují Hallové senzory. Napětí, které naměříme na výstupu senzoru, se skládá ze superpozice normálového Hallova napětí, planárního Hallova napětí a offsetového napětí. Superpozice je potřeba udělat, neboť nikdy nenastane konfigurace, při které by na senzor působil jenom normálový, nebo jenom planární Hallův jev. Offsetové napětí je závislé na geometrii senzoru a na reálném provedení senzoru.[7]

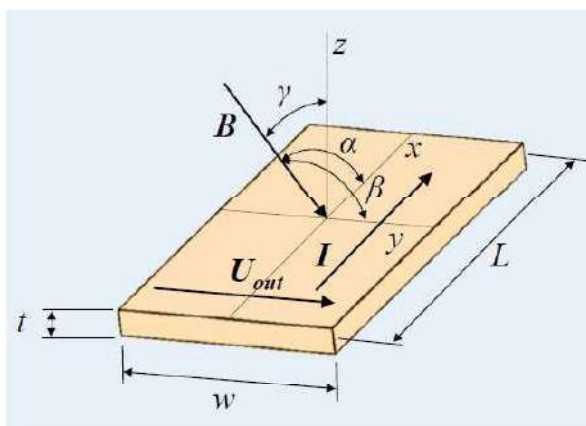
$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j} + R_H [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] + P_H (\mathbf{j} \cdot \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B} \quad (2.21)$$

Rovnice (2.21) popisuje vektorově elektrické pole naměřené na Hallovém senzoru.  $\rho$  je měrný odpor,  $\mathbf{j}$  je proudová hustota,  $R_H$  je Hallova konstanta,  $\mathbf{B}$  popisuje magnetické pole a  $P_H$  je planární Hallova konstanta. Rovnice (2.22) je přepsaná rovnice z vektorového tvaru do skalárního.[7]

$$U_{out} = R_{off} I + \frac{R_H}{t} IB \cos \gamma + \frac{P_H}{t} IB^2 \cos \alpha \cos \beta \quad (2.22)$$

Zde  $U_{out}$  je výstupní napětí senzoru,  $R_{off}$  je offsetový odpor senzoru,  $I$  je napájecí elektrický proud,  $t$  je tloušťka citlivé vrstvy senzoru a úhly v rovnici popisují sklon mezi vektorem  $\mathbf{B}$  a hlavními osami. Druhý člen představuje normálové Hallovo napětí úměrné velikosti vektoru magnetického pole  $B$  a třetí člen je planární Hallovo napětí úměrné tentokrát  $B^2$ . Na obrázku 2.11 lze vidět schematický náčrt citlivé vrstvy Hallového senzoru.[7]





Obrázek 2.11: Schématický náčrt citlivé vrstvy senzoru [7]

### 2.8.3 Polovodičové senzory

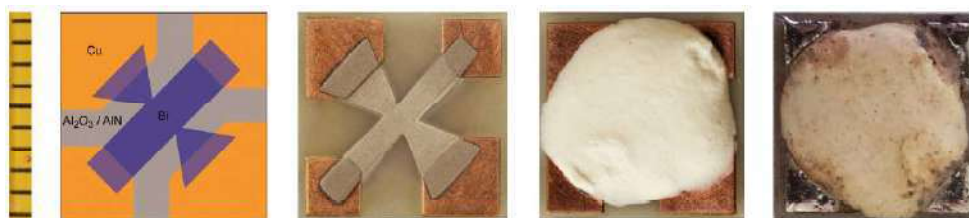
Hallův senzor je jeden z nejpoužívanějších a nejrozšířenějších senzorů, který se používá na měření magnetického pole. Vyskytuje se v počítačích, autech, mobilech, používá se jako kontrolní senzor v průmyslu. Jeho provedení se liší od požadovaného využití, od malých, na desku s plošnými spoji navařených senzorů, po robustní provedení, které velmi dobře odolává nárazům, vibracím a dokáže měřit v nehostinných místech. Hallové senzory, průmyslově vyráběné pro veškeré zmíněné použití, jsou polovodičové, to jim zaručuje vysokou citlivost na měření magnetického pole. Pro polovodičové senzory je dále charakteristické, že se měření odvíjí od teploty a při překročení specifické teploty dochází ke zničení polovodiče. Vedle tohoto charakteristického rysu jsou polovodičové senzory velmi náchylné na intenzivní ionizující záření. Radiační záření zapříčiní změny hustoty volných nosičů náboje a vyšší radiační dávky senzor zničí. [7][8]

### 2.8.4 Kovové senzory

Hallův jev se neobjevuje jenom v polovodičových vrstvách, ale i v čistě kovových, popřípadě keramicko-kovových. Kovy jsou více teplotně i radiačně odolné, než zmíněné polovodiče. Tuto výhodu kompenzuje u většiny kovů o 6 a více řádů nižší citlivost na magnetické pole. Bismut jako jediný z kovů dosahuje jenom o 2 nižší řády citlivosti než polovodiče, na druhou stranu jeho poměrně nízká teplota tání,  $271,5^{\circ}$ , přináší komplikace ohledně aplikace ve vyšších teplotách. [7]

### 2.8.5 Vyvíjení Hallových senzorů pro ITER

Tato práce se bude zabývat kovovými Hallovými senzory, vyvinutými na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, přímo pro pracovní podmínky měření magnetického pole ve fúzním reaktoru ITER. Fúzní reaktor ITER, tokamak s cílem prokázání technické realizovatelnosti využití termojaderné fúze k získání energie, bude obsahovat 3 sekce, ve kterých budou Hallové senzory měřit tangenciální a normálovou složku magnetického pole. V oblastech, ve kterých budou senzory nastavené, se bude pracovní teplota pohybovat v rozmezí  $90 - 100^{\circ}\text{C}$  a v průběhu



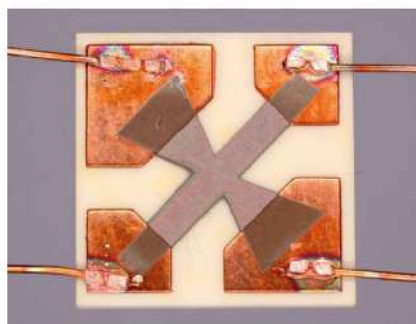
**Obrázek 2.12:** První série bismutových senzorů [7]

vypékání vakuové komory může teplota dosáhnout až  $220^{\circ}\text{C}$ . [7]

Při tuzemském vývoji Hallovyých senzorů s měděnou detekční vrstvou se projevila očekávaná radiační a tepelná stabilita, ale také nevýhodná poměrně nízká citlivost na magnetické pole a nízký výstupní signál. Kombinace nízkého výstupního signálu v řádu  $\mu\text{V}$  a vysokého napájecího napětí se prokázala jako neideální z důvodu velkého poměru šumu vůči užitečnému signálu a může komplikovat měření i v laboratorních podmínkách. Jelikož konfigurace měděných senzorů nevyhovovala, přešlo se ve vývoji na Hallové senzory s bismutovou detekční vrstvou. První série vyvinutých bismutových senzorů měla rozměry  $9,6 \times 9,6 \text{ mm}$  a tloušťku  $\sim 4,5 \mu\text{V}$ . Citlivost bismutových senzorů je o několik řádů vyšší, než citlivost měděných senzorů. Při ověření radiační odolnosti, byly senzory ozářeny neutronovou fluencí  $8 * 10^{22} \text{ n/m}^2$ , kde postradiační analýza nezjistila velké výchylky v citlivosti senzorů. Pro porovnání se neutronová fluence za celou předpokládanou dobu životnosti senzorů v reaktoru ITER blíží přibližně k  $1,3 * 10^{22} \text{ n/m}^2$ . Teplotní testy senzorů také dopadly úspěšně a díky těmto výsledkům se uzavřela smlouva mezi Ústavem FP AV ČR a ITER organization o společném vývoji kovových Hallových senzorů pro fúzní reaktor ITER. [7]

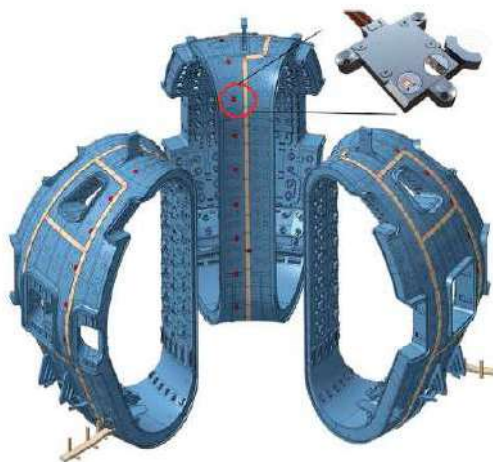
Návrh senzoru je vidět na obrázku 2.12, kde jako podkladový substrát byl zvolen keramický nitrid hliníku  $\text{AlN}$  o tloušťce  $0,63 \text{ mm}$ . Keramický nitrid hliníku byl zvolen díky jeho relativně vysoké tepelné vodivosti ( $\sim 170 \text{ W/mK}$  při  $20^{\circ}\text{C}$ ). Z obou stran byl senzor pokryt technologií *Direct Bonded Copper*, která nanasla měděnou vrstvou o tloušťce  $127 \mu\text{m}$  a na vrchní straně byly v mědi vyleptány plošné kontakty. Samotná bismutová detekční vrstva byla nanasena magnetickým naprašováním. Druhý obrázek zleva 2.12 ukazuje nanesenou ochrannou keramickou vrstvu na senzoru a poslední obrázek ukazuje senzor po ozáření v jaderném reaktoru. [7]

Bismutová vrstva se při dimenzování nanášela v rozmezí  $0,45 - 4,5 \mu\text{m}$  a až při testech se ukázalo, že optimální tloušťka bismutové vrstvy se pohybuje  $\sim 1 \mu\text{m}$  a optimální teplota deponace je  $200^{\circ}\text{C}$ . Měděné dráty drátového připojení senzorů byly přivařeny na měděnou kontaktní plochu pomocí termokomprese, viz. obrázek 2.13 [7]



**Obrázek 2.13:** Substrát s bismutovou deponovanou vrstvou a měděnými kontaktními dráty[7]

V termonukleárním fúzním reaktoru ITER budou senzory instalovány ve třech sektorech vakuové komory, na vnějším plášti ve štěrbině mezi komorou a tepelným štítem, obr. 2.14 Maximální výška senzoru by měla být  $1\text{cm}$ . Každý sektor, bude mít 20 sensorových jednotek. Každá jednotka bude obsahovat dvojici senzorů, umístěných kolmo k sobě tak, aby jednotka nejefektivněji změřila tangenciální a normálovou složku magnetického pole. Z důvodu malé dovolené výšky senzoru se přistoupilo k miniaturizaci senzoru. Finální rozměry senzoru se zmenšily na  $6,4 * 6,4\text{mm}$ . Sensor byl dále uzpůsoben pro lepší uložení do pouzdra tak, že se kontaktní plochy přesunuly na jednu stranu senzoru, tím se vytvořily volné zbývající strany.[7]

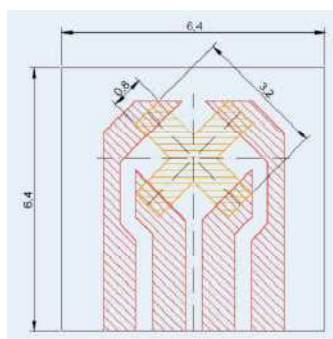


**Obrázek 2.14:** Hallové senzory uloženy ve vakuové komoře (červené tečky) [7]

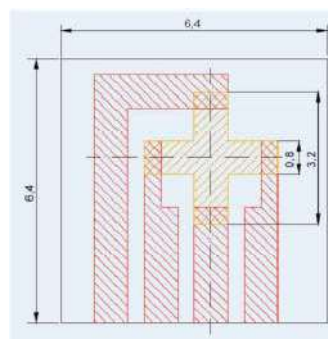
Jelikož měření výsledného magnetického pole je závislé jak na planární, tak na normálové složce Hallova napětí, závisí při uložení senzoru také na jeho geometrii. Proto při testování a vyhodnocování budu porovnávat dvě geometrie, kde jeden senzor má otočené osy křížku rovnoběžné s úhlopříčkami senzoru a druhý má osy rovnoběžné se stranami senzoru jako je znázorněné na obrázku 2.15. V sensorové jednotce v jaderném reaktoru budou vloženy dva senzory, z důvodu měření normálové i tangenciální složky magnetického pole. Na obrázku 2.16 je vidět naznačení a popis sensorové jednotky, která bude použita v reaktoru ITER.[7]



Obrázek 2.16: Senzorová jednotka [7]



(a) : Hallův senzor pootočen o 45°



(b) : Hallův senzor pootočen o 90°

Obrázek 2.15: Dvě testované geometrie Hallova senzoru [7]

## Kapitola 3

### Praktická část

Nejjednodušší metoda měření a zpracování signálu je DC metoda, kdy je senzor napájen stejnosměrným napětím a výstupní signál je měřen s pomocí přesného DC voltmetru. Při takovém měření magnetického pole se v jaderném reaktoru pomocí Hallových senzorů objevují komplikace. Sensory v reaktoru měří v mikrovlnném rozsahu, radiační tepelná zátěž reaktoru nedovoluje umístit u senzoru žádná elektronická zařízení, tudíž k senzoru vede kabelové připojení až 170 m dlouhé. Vznikají zde radiofrekvenční rušení a rušivá DC napětí, offset senzoru závisí na teplotě senzoru v danou chvíli a v neposlední řadě zde také interferuje planární hodnota Hallova napětí. Z těchto důvodů se používá jiný způsob sběru dat, a to kombinace metody synchronní detekce a proudové rotace.

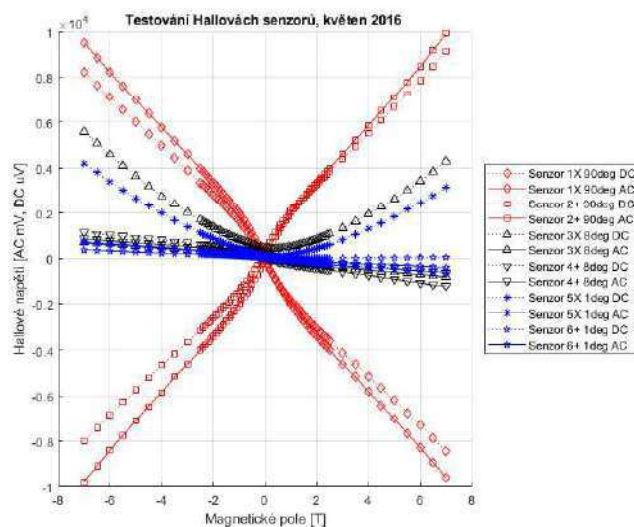
Synchronní detekce měří amplitudu velmi malých signálů i pod úroveň šumu. Měří rozdíl mezi referenčním signálem a výstupním signálem o stejné frekvenci. Kontrolér napájí senzory referenčním sinusoidálním signálem o frekvenci 5 kHz a následně je porovnává s naměřeným výstupním signálem. Rušivé signály na jiných frekvencích jsou přitom odstraněny. Proudová rotace automaticky potlačuje offsetové napětí senzoru střídáním funkce ramen senzoru. Při střídání napájeného a měřeného ramene dochází ke změně polarit měřeného offsetového napětí, zatímco Hallovo napětí zůstává beze změny. Proudová rotace potlačuje také planární složku Hallova napětí, která je charakteristická opačnou polaritou v kolmých směrech, tedy dochází při proudové rotaci ke střídání polarit měřeného planárního Hallova napětí a k jeho vyrušení při integraci signálu obdobně jako u offsetového napětí.[7]

#### 3.0.1 Popis experimentu

Při experimentu bylo použito 6 Hallových senzorů s vrstvou z bismutu ve dvou různých geometriích viz. graf 2.15 a každá geometrie byla otestována ve třech polohách a to v  $90^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $1^\circ$  vůči vektoru  $B$  magnetického pole. Měření probíhalo za konstantní teploty, tudíž napěťový offset, který vzniká, byl roven konstantě. Při reálném měření v reaktoru je napěťový offset závislý na teplotě. Velikost bismutové vrstvy byla  $1 \mu\text{m}$  a napájecí proud senzorů byl  $4 \text{ mA}$ . Magnetické pole se pohybovalo během experimentu  $\langle -7; 7 \rangle T$ . Měření bylo provedeno dvěma metodami sbírání dat. Při první metodě byly senzory napájeny stejnosměrným proudem a při druhé metodě střídavým proudem.

Při DC metodě se ve výsledném Hallovém napětí projeví zmíněná superpozice všech členů Hallova jevu, tedy jak napěťový offset, tak planární a normálový jev. Při této superpozice

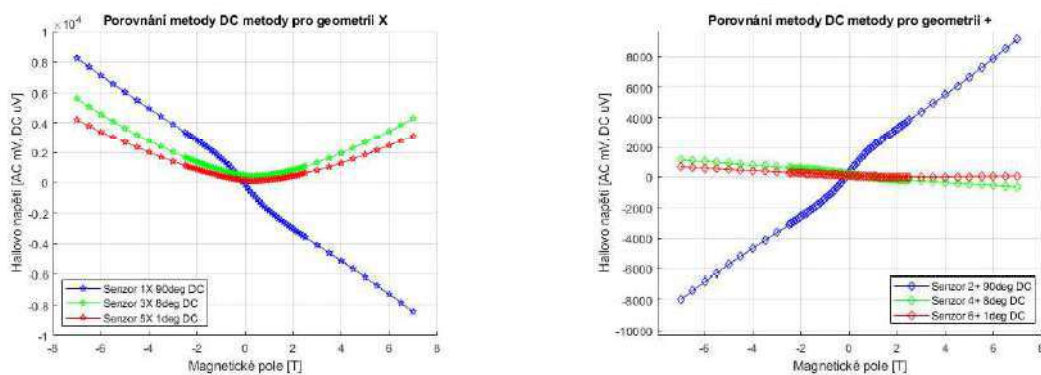
musíme data odfiltrovat, abychom získali normálovou část Hallova napětí. Offset nám posouvá funkci v ose  $y$  do kladných, nebo záporných hodnot a planární jev nám krotí funkci z téměř lineární do paraboly. AC metoda zahrnující proudovou rotaci by měla zajistit čistší data a výsledné napětí by mělo být očištěné od napětového offsetu a planárního Hallova napětí.



Obrázek 3.1: Testování Hallova napětí v květnu 2016[4]

### 3.0.2 Vyhodnocování

Z naměřených dat jsem odfiltroval data ve stejné konfiguraci geometrie, ale v různých úhlech. Vyhodnocoval jsem závislost vlivu polohy senzoru při DC metodě, tedy porovnal jsem odděleně data v konfiguraci  $X$  a + při úhlech  $90^\circ$ ,  $8^\circ$  a  $1^\circ$ . Výsledné grafy lze vidět v obrázku 3.2.



(a) : Geometrie senzoru  $X$  při různých úhlech

(b) : Geometrie senzoru  $+$  při různých úhlech

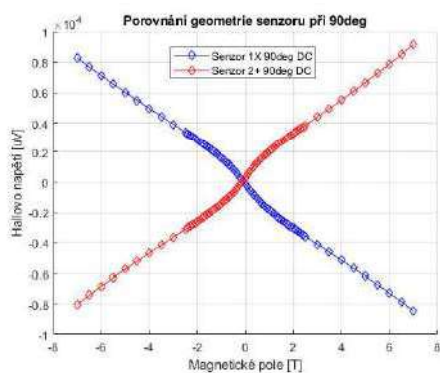
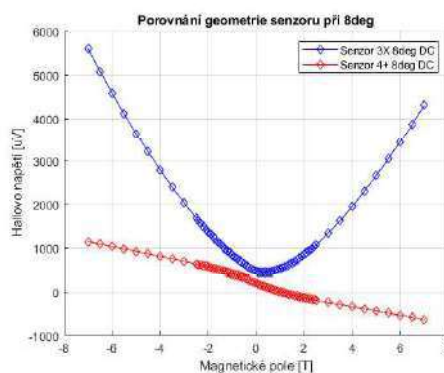
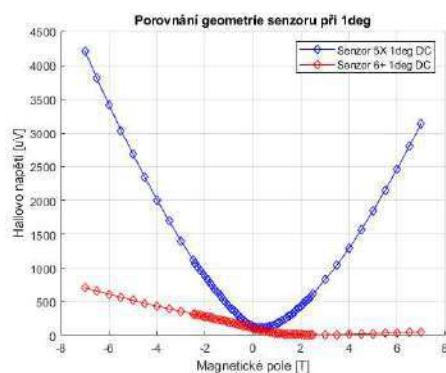
Obrázek 3.2: Porovnání stejné geometrie při různých úhlech

Při použití geometrie  $X$  viz. graf 3.2a je patrné, že při  $90^\circ$  sklonu vektoru magnetického

pole  $B$  vůči ploše senzoru, je výsledná funkce naměřeného napětí téměř lineární a nadále se projevu při tomto sklonu maximální normálové napětí. Nelineární část se pohybuje v rozmezí magnetického pole  $< -1; 1 > T$ , která je zapříčiněná materiálovými vlastnostmi detekční vrstvy senzoru. Zvyšujícím se magnetickým polem se zmenšuje tzv. Larmorův poloměr pohybu nosičů pod úroveň délky jejich rozptylu, tudíž závislost se při vyšším magnetickém poli stává lineární.[7] Při úhlu  $90^\circ$  nastává maximální normálové Hallovo napětí a tedy planární složka je minimální. Snižujícím se úhlem interferuje do výsledného napětí i plánární složka Hallova napětí. Ta je nejvyšší při  $45^\circ$  úhlu vektoru magnetického pole  $B$ .

U konfigurace geometrie typu  $+$  viz. graf 3.2b je na první pohled patrné, že při  $90^\circ$  sklonu vektoru je nejvyšší hodnota výstupního napětí. Planární složka se při této geometrii tolik neprojevuje v naměřených hodnotách. To lze zpozorovat při sklonu  $8^\circ$  a  $1^\circ$ , kde funkce jsou lineárnější a nabývají menších hodnot. Všechny tři funkce v geometrické konfiguraci  $+$  nemají parabolický průběh, ale mají průběh téměř lineární.

Jako další jsem porovnával výstupní napětí senzorů s odlišnou geometrií, tedy  $X$  a  $+$ , při stejných úhlech. Zase veškerá porovnaná data jsou měřena DC metodou, viz. grafy 3.3

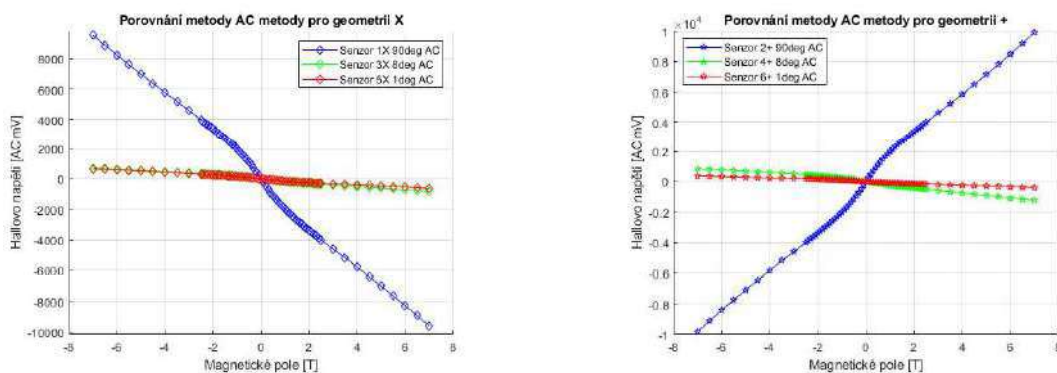
(a) : Porovnání při  $90^\circ$ (b) : Porovnání při  $8^\circ$ (c) : Porovnání při  $1^\circ$ **Obrázek 3.3:** Porovnání různé geometrie při stejných úhlech.

Porovnání geometrie při  $90^\circ$ , tedy v grafu 3.3a, lze vidět, že naměřená data jsou symetrická jak dle osy  $x$  tak dle osy  $y$ . Liší se hlavně polaritou, která může být zapříčiněná zapojením, nebo natočením senzoru. Konfigurace  $+$  má znatelnější maximum, to může být způsobeno

geometrií senzoru vůči vektoru magnetického pole, a tedy projevením planárního jevu do výsledného měřeného napětí. Domnívám se, že použití senzoru v  $90^\circ$  natočením vůči vektoru magnetického pole, není měření ovlivněno geometrií senzoru a je téměř jedno, jakou z možných geometrií při měření použili.

Při měření v  $8^\circ$  náklonu, 3.3b, lze vidět parabolické natočení funkce výstupního napětí senzoru  $X$ . Oproti tomu u geometrie senzoru  $+$ , lze vidět po vyfiltrování offsetu, že je funkce téměř symetrická dle počátku a projevuje se obdobně jako funkce normálového napětí. V grafu 3.3c je poslední porovnání geometrií DC metody při  $1^\circ$ . Při takovém naklonění vektoru je normálová část výsledného napětí téměř minimální. Průběh funkce  $X$  je podobně jako v předešlém případě parabolický, opět se zde projevuje planární složka. U funkce senzoru s geometrií  $+$ , při kladném magnetickém poli, nepadá naměřené napětí do záporných hodnot, a při velikosti magnetického pole kolem  $1\text{ T}$  začíná funkce divergovat a vzdalovat se od osy  $x$ . To může být zapříčiněno poměrně malým úhlem mezi vektorem  $B$  a deskou senzoru.

Třetím cílem experimentu, bylo posouzení vlivu AC metody na výstupní signál pro stejnou geometrii. AC metoda měření by měla zajistit odstranění napětového offsetu a odfiltrování planárního Hallova napětí.



(a) : Geometrie senzoru  $X$  při různých úhlech

(b) : Geometrie senzoru  $+$  při různých úhlech

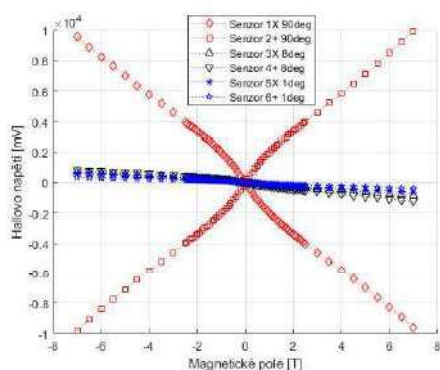
**Obrázek 3.4:** Porovnání AC metody pro stejné geometrie při různých úhlech

U výsledné funkce naměřených dat při použití geometrie  $X$  v grafu 3.4a a geometrie  $+$  v grafu 3.4b je patrné, že se jedná o vyfiltrovaná data o offsetovou a planární složku napětí. Průběhy jsou téměř lineární, až na anomálii funkce v rozmezí  $< -1; 1 > T$ , obdobně jako u DC metody. I při nižších úhlech funkce zůstává téměř lineární, ale nejvyšší hodnoty normálového výstupního napětí nastávají při sklonu  $90^\circ$ .

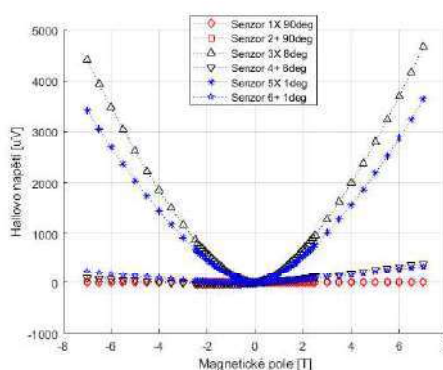
V neposlední řadě bylo cílem experimentu, odfiltrovat z hrubých dat naměřených metodou DC interferující složky. Výsledné normálové Hallovo napětí lze vidět v grafu 3.5.

Prvně jsem od naměřených dat metodou DC odečetl hodnotu jednotlivých funkcí při  $0\text{ T}$ , tím jsem dostal všechny funkce při nulovém magnetickém poli do počátku, a tedy byl odstraněn napětový offset. Je důležité připomenout, že veškerá měření se prováděla při stejné teplotě a proto se napětový offset rovnal konstantní hodnotě, neboť je závislý na funkci teploty. Dále jsem od sebe odečetl data naměřená AC a DC metodou a tímto krokem jsem získal





(a) : Normálové Haloovo napětí



(b) : Planární Haloovo napětí

**Obrázek 3.5:** Porovnání jednotlivých částí výsledného Haloova napětí

jednotlivé části výsledného Haloova napětí.

Při výpočtu citlivosti senzoru jsem vycházel ze statické převodní charakteristiky senzoru, která je dána funkční závislostí  $y = f(x)$ , mezi vstupní veličinou  $x$  a výstupní veličinou  $y$  v časově ustáleném stavu. Tuto závislost lze v ideálním případě zapsat jako vztah  $y = Kx$ . [10] Konstantu  $K$  jsem poté použil pro výpočet citlivosti  $S$ , kterou jsem dopočítal dle rovnice 3.1, kde  $A$  je napájecí proud,  $\gamma$  je úhel naklonění k ploše senzoru a rovnice je vydělena zesílením AC měřením hodnotou 1000. Výsledné hodnotě citlivosti byly posléze převedeny jednotky na základní. V tabulce 3.1 je dopočítaná citlivost jednotlivých senzorů pro normálový Hallův jev.

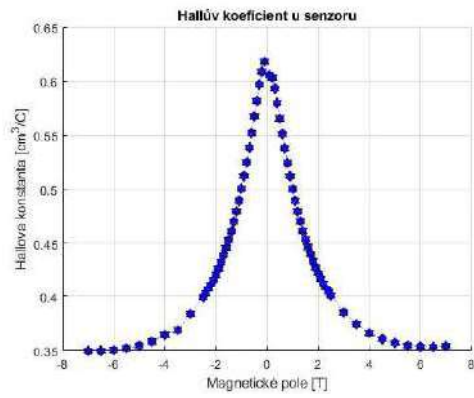
$$S = \frac{K}{I * 1000 * \cos(\gamma)} \quad (3.1)$$

Citlivost senzorů [V/(AT)]					
Senzor 1X	Senzor 2+	Senzor 3X	Senzor 4+	Senzor 5X	Senzor 6+
0.36	0.37	0.35	0.34	0.37	0.35

**Tabulka 3.1:** Citlivost senzorů

Pro výpočet Haloova koeficientu pro normálové napětí jsem použil rovnici 2.19. Tu jsem poupravil do tvaru 3.2, kde jsem vyjádřil pro výpočet Haloovu konstantu. Konstantní hodnoty ve výpočtu byly tloušťka  $t$  detekční vrstvy, která je  $1 \mu m$  a velikost napájecího proudu, která je  $4 mA$ . Velikost výstupního napětí se mění s velikostí magnetického pole. Výsledné hodnoty Haloové konstanty jsou znázorněny v grafu 3.6.

$$R_H = S * t \quad (3.2)$$



Obrázek 3.6: Vypočítaný Hallův koeficient pro senzory 1-6

## Kapitola 4

### Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval radiačně odolnými Hallovými senzory, které byly vyvinuty pro termojaderný fúzní reaktor ITER, Ústavem fyziky plazmatu akademií věd ČR. Tyto senzory jsou určeny k měření velikosti magnetického pole uvnitř reaktoru a celkovému řízení fúzní reakce. V teoretické části byla obecně popsána fúzní reakce, při jakých podmínkách se dá vytvořit, a byla popsána paliva a jejich následné jaderné reakce, které probíhají při zahájení fúzní reakce. Dále byly objasněny možnosti udržení fúzní reakce na zemi, jako je magnetické a inerciální udržení, jednotlivé konfigurace zařízení daných udržení jako je tokamak, stelarátor a toroidální pinč a jejich porovnání. V neposlední řadě v teoretické části byly charakterizovány diagnostiky termojaderných fúzních tokamaků. Teoretickou část jsem zakončil popsáním Hallova jevu, Hallových senzorů a jejich vývoje pro reaktor ITER.

Teoretická část mi posloužila jako podklad pro část praktickou, kde jsem ze získaných dat z vývoje zmíněného senzoru vyhodnocoval nejlepší konfiguraci. Porovnal jsem naměřená data ze 6 Hallových senzorů o tloušťce citlivé vrstvy  $1 \mu\text{m}$ , rozdělených dle dvou geometrií senzorů a to geometrie  $X$  a  $+$  vůči vektoru magnetického pole  $B$ . Senzory byly rozděleny do 3 poloh vůči vektoru  $B$  a magnetické pole se pohybovalo v rozmezí  $< -7; 7 > T$ . Při vyhodnocení vlivu geometrie senzoru a jeho polohy vůči vektoru magnetického pole  $B$  během DC metody sběru dat, se ukázalo, že nejvýhodnější geometrie senzoru vůči vektoru  $B$  je geometrie  $+$ , neboť při této konfiguraci dochází k minimálnímu planárnímu jevu, oproti natočení geometrie do  $X$ . Při natočení  $45^\circ$  dochází k nejvyššímu planárnímu jevu, obdobně jako při natočení celého senzoru o  $90^\circ$  vůči vektoru  $B$ , dochází k nejvyšší hodnotě normálového Hallova napětí.

Při porovnání vlivu AC metody na stejnou geometrii, bylo patrné, že se naměřená výstupní data liší nejvíce v polaritě výstupního napětí. Během AC metody se odfiltrují postupem měření interferující rušící složky jako je planární Hallovo napětí a offsetové napětí. AC metoda má mnoho výhod, při měření v podmínkách jaderného fúzního reaktoru, dokáže odfiltrovat rušivé signály a interferující napětí, tedy na výstupním napětí získáme požadované normálové Hallovo napětí. DC metoda vyniká při měření v normálních podmínkách, získané výstupní napětí naměřené přesným DC voltmetrem je přesné, ale při měření v podmínkách jaderného reaktoru do výstupního napětí interferují nežádané složky, které metoda sama neumí odfiltrovat.

V neposlední řadě jsem změřil a vypočítal hodnotu normálového Hallova jevu, odfiltrováním jednotlivých metod měření od sebe a získáním tak všech složek Hallova napětí.





## Literatura

- [1] McCracken, Garry., Stott, Peter., *Fúze Energie vesmíru*. Praha: Nakladatelství Academia, 2019. ISBN 978-80-200-2986-7
- [2] Harms, A. A., Schoepf, K. F., Miley, G. H., Kingdon, D. R. *Principles of Fusion Energy*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. ISBN 981-238-033-7
- [3] Kippenhahn, Rudolf., Weigert, Alfred., *Stellar structure and evolution*. Heidelberg: Springer Berlin. 1991. ISBN 978-364-261-5238
- [4] MOTEVALLI, Seyed Mohammad a Fereshteh FADAEL. *A Comparison Between the Burn Condition of Deuterium-Tritium and Deuterium-Helium-3 Reaction and Stability Limits*. Zeitschrift für Naturforschung A. 2015(7), 6.
- [5] Taitano, William. *Moment-Based Accelerators for Kinetic Problems with Application to Inertial Confinement Fusion*. Albuquerque, 2014. Dissertation. The University of New Mexico.
- [6] Entler, Slavomír., Ficker, O., Havlíček, J., Horáček, J., Hron, M., Mlynář, J., Pánek, R., Řípa, M., Stöckel, J., Varju, J., Weinzettl V., *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2019. ISBN 978-80-200-3007-8
- [7] Entler, Slavomír., Ďuran, Ivan. *Kovové Hallové senzory*. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2017.
- [8] Ramsden, Edward. *Hall-Effect Sensors : Theory and Application*. Elsevier Science Technology, 2006. ISBN 9780080523743
- [9] Entler, Slavomír., a kol. *Výtkum termojaderného plazmatu na tokamaku COMPASS*. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2019. ISBN 978-80-200-3109-9
- [10] Senzory [online]. Brno, 1997 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: [https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node16.html](https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html)
- [11] Řípa, Milan., Mlynář, Jan., Weinzettl., Vladimír., Žáček, František. *ŘÍZENÁ TERMO-JADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO* Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2011. ISBN 80-902724-7-9
- [12] ITER [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.iter.org/newsline/-/2905>

