



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2612 – Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:* 3906T001 – Mechatronika

*Autor práce:* **Bc. Jakub Jaroš**

*Vedoucí práce:* Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Influence of magnetic field of Halbach system on electrode behavior in liquid

## Master thesis

*Study programme:* N2612 – Electrotechnology and informatics

*Study branch:* 3906T001 – Mechatronics

*Author:* **Bc. Jakub Jaroš**

*Supervisor:* Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





## Zadání diplomové práce

# Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. Jakub Jaroš</b>
<i>Osobní číslo:</i>	M18000163
<i>Studijní program:</i>	N2612 Elektrotechnika a informatika
<i>Studijní obor:</i>	Mechatronika
<i>Zadávající katedra:</i>	Ústav mechatroniky a technické informatiky
<i>Akademický rok:</i>	<b>2019/2020</b>

### Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte model Halbachovy soustavy magnetů ve tvaru kruhového prstence pro DN40.
2. Realizujte Halbachovu soustavu magnetů.
3. Zjistěte vliv magnetického pole na chování elektrod ve vodě (bez průtoku a při maximálním dosažitelném průtoku).

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
40–50 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

- [1] Dědek L., Dědková J.: Elektromagnetismus. VUTIUM Brno, 2000, ISBN 80-214-1548-7.
- [2] Coey, J. M. D.: Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge University Press, 2010, ISBN: 9780511845000.
- [3] Vlastnosti současných permanentních magnetů, URL: <http://www.neomag.cz>,  
<http://magnety.info/6.php>
- [4] Návod programu Comsol Multiphysics, URL: <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/pps-comsol/documents/User%20Guide%20and%20Examples/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>

*Vedoucí práce:*


Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*


10. října 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

18. května 2020

  
prof. Ing. Zdeněk Pliva, Ph.D.  
děkan



  
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2019

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3.1.2020

Podpis:



## Abstrakt

Tento výzkum se opět věnuje průtokoměrům a navazuje jak na bakalářskou práci, tak na ročníkový projekt v navazujícím studiu. Úkolem bylo zjistit, jaký vliv má Halbachova soustava magnetů na průtokoměrné čidlo a sumarizovat výhody a nevýhody záměny za jeden pár neodymových magnetů. První kapitola se věnuje samotné Halbachově soustavě na teoretické rovině. Vysvětluje princip fungování a objasňuje klady i zápory jejího použití. V druhé a třetí kapitole se již tradičně snažím stručně popsat návrh simulačního programu v Comsolu. Tentokrát jsem musel od samotného počátku navrhnout Halbachovu soustavu. Ve třetí kapitole jsem použil návrh průtokoměru z ročníkového projektu a částečně ho upravil. Došlo k odstranění páru neodymových magnetů a doplnění modelu o druhý pár elektrod, pootočený vůči současným elektrodám o  $90^\circ$  v ose potrubí. Poté už zbývalo jen naimportovat Halbachovu soustavu vytvořenou v předchozí kapitole a geometrie celkového návrhu byla vytvořena. Po doplnění dalších náležitostí potřebných pro vypočtení studie jsem vytvořil grafy magnetické indukce a vypočetl její konkrétní hodnotu ve středu. Ve čtvrté kapitole vytvářím úplně nový model. Ten z předchozích kapitol bohužel nebylo v našich silách vyrobit. Došlo tedy o úpravu programů z předchozích dvou kapitol. Dále práce pokračuje vložím druhé fyziky s laminárním prouděním, výpočtem intenzity elektrického pole a jejím integrováním až k napětí na elektrodách. V šesté kapitole je realizace navrženého průtokoměru v laboratoři a měření napětí na elektrodách. Porovnávají se také různé materiály elektrod. Cílem je určit nejlepší možný materiál pro zabránění vlivům zeta potenciálu. V závěru jsou zhodnoceny jednotlivé body zadání.

**Klíčová slova** Halbachova soustava magnetů, Průtokoměr, Laminární proudění, Magnetická indukce, Intenzita elektrického pole, Indukované napětí, Comsol

## Abstract

This research is again devoted to flow meters and follows both the bachelor's thesis and the year project in the follow-up study. The task was to determine the effect of the Halbach magnet system on the flow meter and to summarize the advantages and disadvantages of replacing it with one pair of neodymium magnets. The first chapter deals with the Halbach system itself on a theoretical level. It explains the principle of operation and clarifies the pros and cons of its use. In the second and third chapters, I traditionally try to briefly describe the design of a simulation program in Comsol. This time I had to design the Halbach system from the very beginning. In the third chapter I used the design of a flow meter from the annual project and partially modified it. A pair of neodymium magnets was removed and the model was supplemented with a second pair of electrodes, rotated  $90^\circ$  relative to the current electrodes in the axis of the pipe. Then all that was left was to import the Halbach system created in the previous chapter and the geometry of the overall design was created. After completing the other details needed to calculate the study, I created graphs of Magnetic Induction and calculated its specific value on Wednesday. In the fourth chapter I create a completely new model. Unfortunately, it was not in our power to produce the one from the previous chapters. Thus, the programs from the previous two chapters were modified. Furthermore, the work continues by inserting the second physics with laminar flow, calculating the intensity of the electric field and integrating it up to the voltage at the electrodes. The sixth chapter is the implementation of the proposed flow meter in the laboratory and voltage measurement at the electrodes. Different electrode materials are also compared. The aim is to determine the best possible material to prevent the effects of zeta potential. In the end, the individual points of the assignment are evaluated.

**Keywords** Halbach magnet system, Flow meter, Laminar flow, Magnetic induction, Electric field strength, Induced voltage, Comsol

## Poděkování

Děkuji všem, kteří mi při realizaci diplomové práce předávali odborné znalosti a poskytovali materiální podporu. Konkrétně děkuji Ing. Lubomírovi Slavíkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, cenné rady a pomoc při laboratorním měření. Taktéž děkuji Ing. Petru Bílkovi, Ph.D. za možnost využívat jeho aplikaci v LabVIEW pro měření napětí na elektrodách. Na závěr patří díky i Ing. Bc. Michalu Malíkovi, Ph.D. a Ing. Bc. Jiřímu Primasovi, Ph.D. za praktické poznámky k chování magnetických polí, uplatňování elektrického napětí na elektrodách a nežádoucímu zeta potenciálu.



# Obsah

Seznam obrázků	12
Úvod	13
<b>1 Teoretické znalosti</b>	<b>14</b>
1.1 Halbachova soustava magnetů . . . . .	14
1.2 Důležité veličiny a vztahy [3] . . . . .	15
<b>2 Halbachova soustava magnetů - Comsol</b>	<b>17</b>
2.1 Geometrie . . . . .	18
2.2 Materiály, Fyzika, Síť, Studie . . . . .	19
2.3 Výsledky . . . . .	21
<b>3 Halbachova soustava a průtokoměr - Magnetická indukce</b>	<b>23</b>
3.1 Úprava modelu průtokoměru, Importování soustavy . . . . .	23
3.2 Materiály, Fyzika, Síť, Studie . . . . .	24
3.3 Výsledky . . . . .	25
<b>4 Nová Halbachova soustava</b>	<b>26</b>
4.1 Měření soustavy . . . . .	27
4.2 Ověření soustavy v Comsolu . . . . .	30
<b>5 Laminární proudění, Studie</b>	<b>31</b>
5.1 Přidání proudění - Získání Intenzity elektrického pole . . . . .	31
5.2 Výsledky . . . . .	32
5.3 Elektrické napětí indukované na elektrodách . . . . .	33
<b>6 Realizace v laboratoři</b>	<b>34</b>
6.1 Zprovoznění . . . . .	34
6.2 Vliv různých materiálů elektrod na naměřené napětí . . . . .	38
6.3 Finální průtokoměrná trubice . . . . .	40
Závěr	42
Literatura	43

<b>A Přílohy</b>	<b>44</b>
A.1 Obsah na CD . . . . .	44

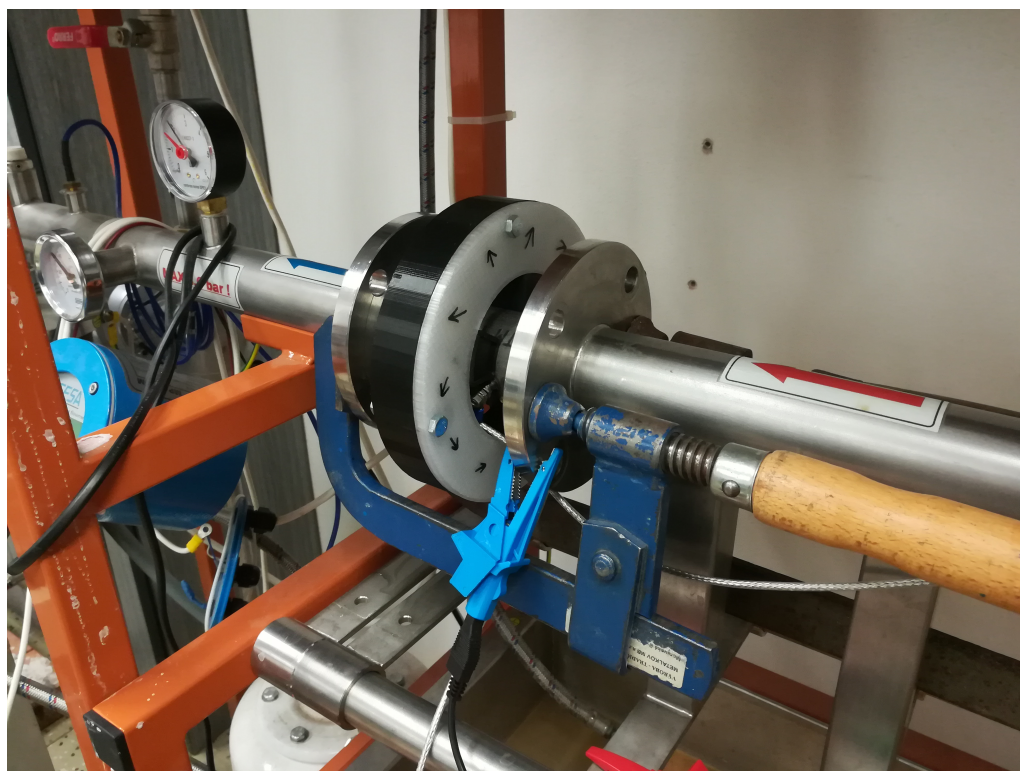
## Seznam obrázků

1	Prototyp průtokoměru s Halbachovou soustavou magnetů . . . . .	13
1.1	Lineární a kruhová Halbachova soustava [2] . . . . .	14
1.2	Soustava s $N = 12$ a různými $k$ [5] . . . . .	15
2.1	Geometrie Halbachovy soustavy . . . . .	18
2.2	Určení směru magnetizace - úhel magnetizace $45^\circ$ , $k = 2$ . . . . .	19
2.3	Určení směru magnetizace - úhel magnetizace $90^\circ$ , $k = 4$ . . . . .	20
2.4	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace $45^\circ$ , $k = 2$ . . . . .	21
2.5	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace $90^\circ$ , $k = 4$ . . . . .	22
2.6	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace $22.5^\circ$ , $k = 1$ . . . . .	22
3.1	Naimportovaná geometrie Halbachovy soustavy k upravenému modelu průtokoměru DN40 . . . . .	23
3.2	Nasítovaný model . . . . .	24
3.3	Graf magnetické indukce . . . . .	25
4.1	3D model racku . . . . .	26
4.2	Zhotovená soustava . . . . .	27
4.3	Probíhající měření . . . . .	27
4.4	Měření hlavního pole - graf 1 . . . . .	28
4.5	Měření hlavního pole - graf 2 . . . . .	28
4.6	Měření vedlejšího pole - graf 1 . . . . .	29
4.7	Měření vedlejšího pole - graf 2 . . . . .	29
4.8	Siločáry nové Halbachovy soustavy . . . . .	30
4.9	Siločáry nové Halbachovy soustavy s průtokoměrem . . . . .	30
5.1	Z složka rychlosti proudění v rovině elektrod . . . . .	31
5.2	Intenzita elektrického pole v rovině elektrod . . . . .	32
6.1	První pokus . . . . .	35
6.2	Druhý pokus . . . . .	36
6.3	První náměry opakovatelnosti . . . . .	37
6.4	Průtokoměry v tandemu . . . . .	38
6.5	Různé materiály elektrod . . . . .	39

6.6	Finální prototyp průtokoměru a připojenými hlavními elektrodami ze skelného karbonu . . . . .	40
6.7	Naměřené hodnoty pro průtokoměr s elektrodami ze skelného karbonu	41

## Úvod

Za téma diplomové práce jsem si zvolil Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině. Výzkum navazuje na mé dvě předchozí práce. Každý další ročník se snažím obohatit či zdokonalit stávající řešení o nové principy i pohledy na věc. Předpokládám, že je čtenář seznámen s předchozími publikacemi[3][4]. Jelikož je to s velkou pravděpodobností má poslední práce na FM TUL, dal jsem si za cíl zprovoznit funkční čidlo na použitelné úrovni a zužitkovat tak veškerý svůj výzkum za poslední roky. Úkolem bylo vytvořit kruhový model Halbachovy soustavy magnetů vhodný pro průměr průtokoměru 40 mm s vhodnějším magnetickým polem pro tyto účely. Dále tento model realizovat, provést měření a zjistit vzájemné vlivy magnetické indukce a napětí na elektrodách.

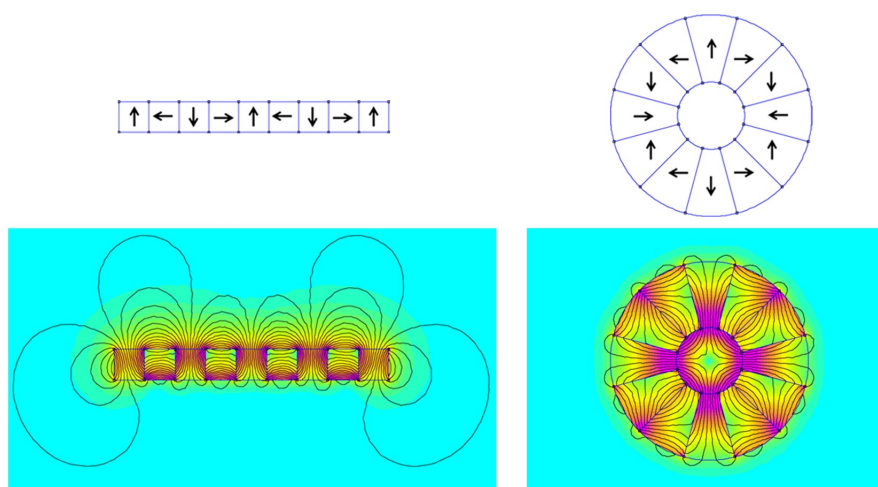


Obrázek 1: Prototyp průtokoměru s Halbachovou soustavou magnetů

# 1 Teoretické znalosti

## 1.1 Halbachova soustava magnetů

Halbachova soustava je speciální uspořádání pěti permanentních magnetů, případně rozšířená o celé násobky čtyř. Je pojmenována po fyzikovi Klausu Halbachovi, který ji vymyslel v roce 1985, tedy relativně nedávno. Původně měl být tento systém použit pouze pro urychlovač částic, který Klaus Halbach stavěl. Přišlo se však na to, že ho lze s velkými výhodami používat v dopravě jako pasivní magnetická ložiska pro tzv. maglev, neboli magnetickou levitaci. Často se také lze setkat s patentovaným pojmem Inductrack. Také NASA se jím zabývá pro konstrukci katapultu pro start raketoplánů a kosmických raket. Vyznačuje se tím, že z jedné strany vytváří mimořádně silné magnetické pole oproti straně druhé. Uspořádání je dáno směrem magnetizace jednotlivých magnetů a je třeba ho cyklicky opakovat. Používají se dva tvary soustavy, lineární a kruhový.[1]

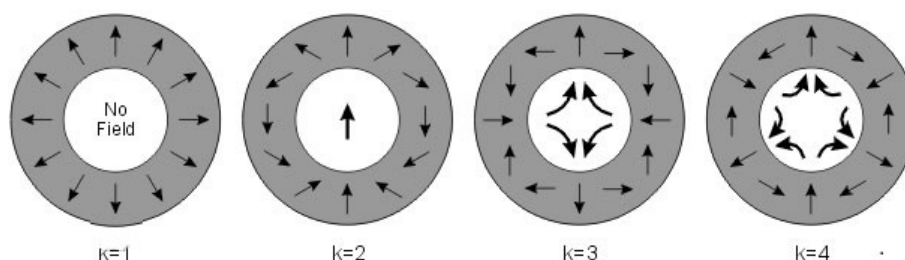


Obrázek 1.1: Lineární a kruhová Halbachova soustava [2]

V mém případě přichází v úvahu kruhový tvar okolo těla průtokoměru, přičemž vnitřní průměr Halbachovy soustavy je větší než vnější průměr těla průtokoměru. To je z důvodu přístupu k elektrodám. Počet magnetů  $N$  a číslo  $k$ , které vyjadřuje počet magnetů s magnetizací stejného směru, se volí. Jedno základní uspořádání je složeno z pěti magnetů. Úhel mezi magnetizacemi dvou magnetů tedy vypočítáme jako:

$$\alpha = k \cdot (360/N) \tag{1.0}$$

Zároveň musí být splněna podmínka celočíselného dělení pro  $N / k$ .



Obrázek 1.2: Soustava s  $N = 12$  a různými  $k$  [5]

## 1.2 Důležité veličiny a vztahy [3]

Magnetická indukce  $\vec{B}$  [T]

Vektor udávající velikost silových účinků magnetického pole na částici s nábojem nebo magnetickým momentem v pohybu.

Magnetizace

Vektor, který charakterizující magnetické vlastnosti látkového prostředí, vystaveného vnějšímu magnetickému poli. Magnetizace představuje objemovou hustotu magnetického dipólového momentu v prostředí.

Gaussmetr

Přístroj s Hallovou sondou pro měření magnetické indukce.

Rychlost proudění  $v$  [m / s]

Měří se vždy k profilu kolmém k proudnici. Při zanedbání stlačitelnosti vody (při tlaku 2 bar si můžeme dovolit) je možné přepočítat na průtok [l / min].

Intenzita elektrického pole  $\vec{E}$  [V/m]

Vektorová fyzikální veličina popisující směr a velikost elektrického pole.

Elektrické napětí  $U$  [V]

Je rozdíl elektrických potenciálů dvou bodů. V proměnném elektromagnetickém poli může vzniká elektromagnetickou indukci. V našem případě je to důsledek statického magnetického pole a proměnného proudění.

Vzorec (1.1) pro Intenzitu elektrického pole říká, že vzniká jako následek rychlosti proudění kolmé na magnetickou indukci. Vektor výsledného pole je kolmý na oba tyto vektory.

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{b} \tag{1.1}$$

Dá se odvodit z definice Lorentzovy síly (1.2). Ta je součtem elektrické a magnetické síly. Při položení obou sil do rovnosti lze intenzitu elektrického pole vyjádřit.

$$Q \cdot \vec{E} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \tag{1.2}$$

Podle vzorec (1.3) je možné určit velikost napětí na elektrodách. Vypočítá se jako integrál z intenzity elektrické pole přes vzdálenost mezi elektrodami. Vychází z obecně známého vzorce pro intenzitu elektrického napětí definované jako podíl elektrického napětí  $U$  a vzdálenosti  $l$ .

$$U = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \tag{1.3}$$



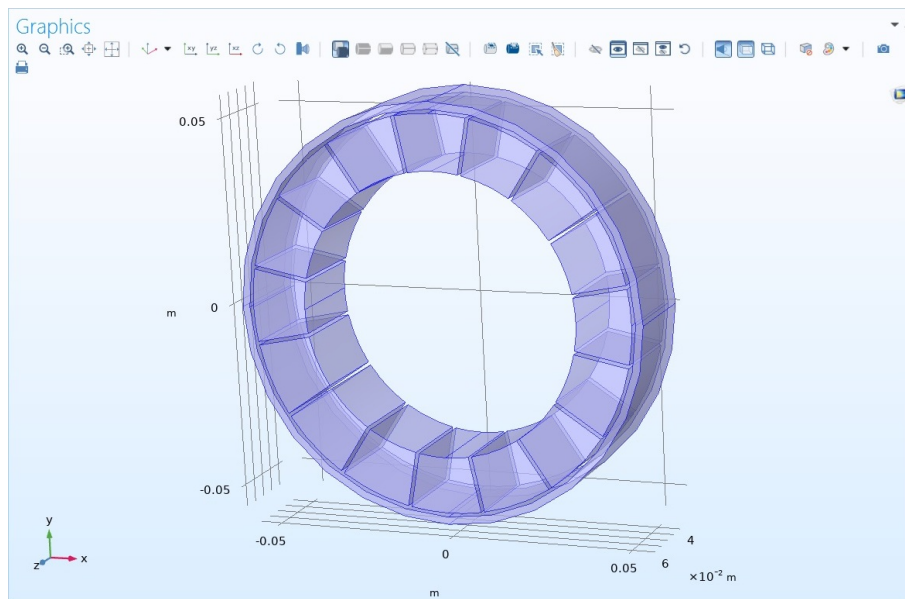
## 2 Halbachova soustava magnetů - Comsol

Většina kruhových soustav, které jsem našel, byly složeny z dvanácti magnetů. Objevil jsem ale i výjimky z osmi, šestnácti nebo dokonce i dvaceti osmi magnetů. Já si zvolil šestnáctičlennou soustavu. Abych měl co porovnávat, napadlo mě pracovat s různými rozdíly úhlu magnetizace mezi dvěma sousedními magnety, tedy různými  $k$ . Jak jsem psal v první kapitole, není možné libovolně volit počty magnetů. Stejně tak budou pro dané  $N$  určeny i možné úhly mezi dvěma magnetizacemi. Existuje omezené množství úhlů, jinak by se nepovedlo dodržet základní uspořádání Halbachovy soustavy. Pro  $N = 16$  a  $k = 1$  až 4 jsou možné 3 různé polarizace a to  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Pro  $k = 3$  není splněna podmínka celočíselného dělení. Je logické, že při použití většího počtu magnetů stejných parametrů bude i pole uvnitř silnější. Rozdíly budou jistě vytvářet i různé magnetizace. Určitě se bude lišit jak velikost výsledného pole, tak i jeho tvar.

Dle mé úvahy bude pro homogennější pole lepší zvolit vyšší počet magnetů a malé rozdíly v úhlu magnetizace. Dva magnety se budou nejlépe odpuzovat právě tehdy, kdy směr magnetizace bude opačný. Tím se vlastně budou rušit jejich silové účinky z vnějšího pohledu a bude to mít negativní vliv na celkové magnetické pole. Když budu mít v kruhu malé množství magnetů, tak úhel magnetizace mezi dvěma sousedními magnety bude logicky velký, aby se magnetizace natočila o celých  $360^\circ$  při jedné otočce. U většího počtu nebude docházet k tak velkému vzájemnému rušení magnetického pole. Jednoduše řečeno si myslím, že magnetická indukce ve středu soustavy bude největší ve chvíli, kdy budeme mít největší počet magnetů a konstantu  $k$ . Zvolil jsem si proto soustavu s šestnácti magnety a pro demonstraci vytvořím čtyři modely, přičemž bude pokaždé jiný úhel magnetizace a zjistím, který případ je schopný vytvořit největší magnetickou indukci ve středu a nejlineárnější pole. Prakticky dojde k ověření obrázku 1.2.

## 2.1 Geometrie

Halbachovu soustavu jsem začal modelovat v úplně novém projektu, abych ji mohl testovat zvlášť a po odladění ji jen naimportovat k průtokoměrné trubici. Pro přidání různých směrů magnetizace jsem musel jednotlivé magnety zvlášť vykreslit. Postupoval jsem vytvořením dvou válců. Průměr prvního byl požadovaný vnější průměr Halbachovy soustavy, druhý zase průměr vnitřní s ohledem na elektrody. Výška válců tvoří tloušťku soustavy. Nástrojem Compose (sjednocení) se poté vytvořilo mezikružší. Dále už jen stačilo definovat mezery a mezikružší rozdělit na jednotlivé magnety. Nakonec byl vytvořen i vnější prstenec, který bude magnety držet pohromadě.



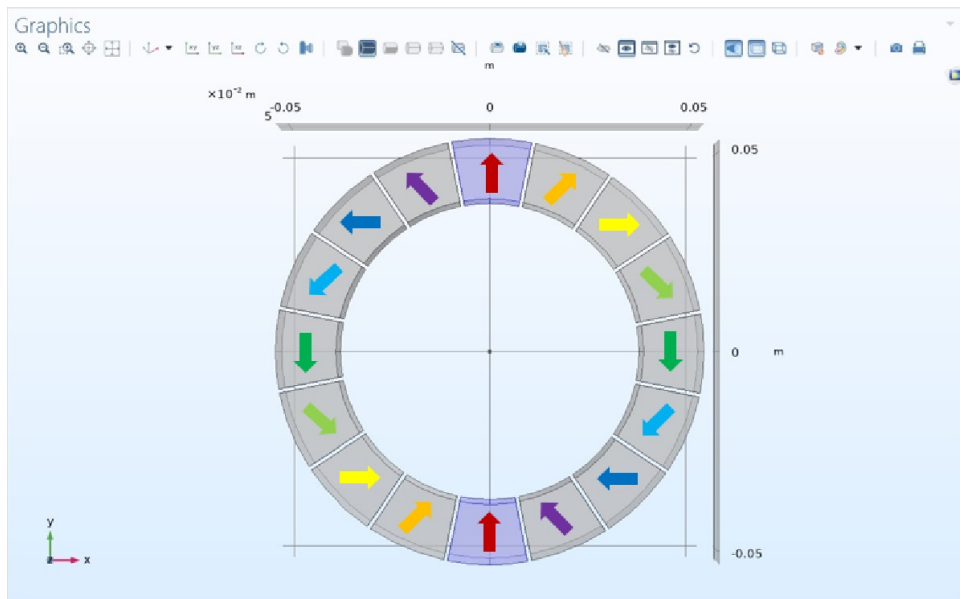
Obrázek 2.1: Geometrie Halbachovy soustavy

## 2.2 Materiály, Fyzika, Síť, Studie

Jako materiál vnějšího prstence jsem použil nerezovou ocel a pro okolní prostor vzduch. Magnetům, jako zdrojům, není třeba žádný materiál přiřazovat.

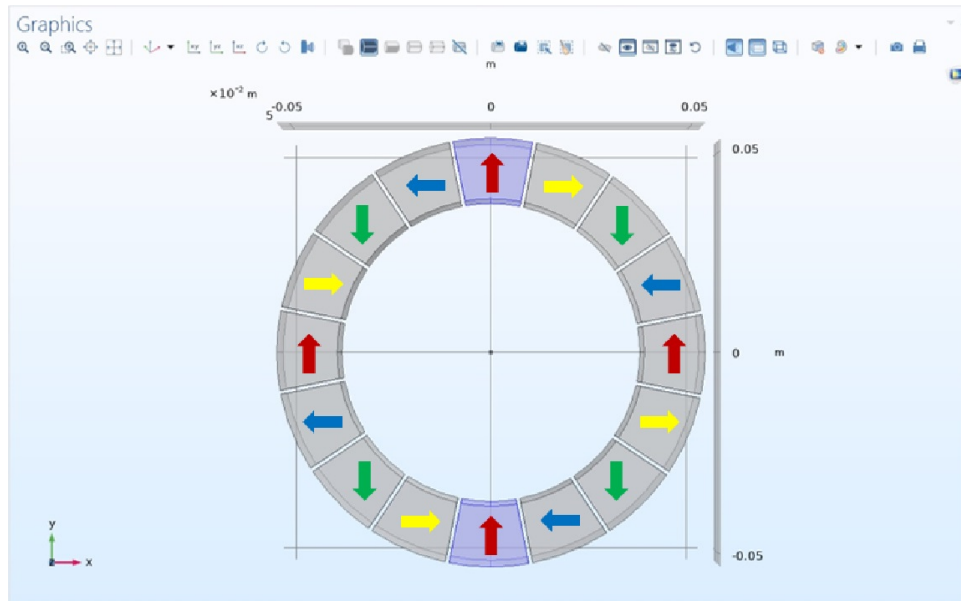
Důležité vlastnosti pro výpočty jsou přiřazeny ve fyzice Magnetic fields, No current. Podle obrázku 2.2 je potřeba nadefinovat směry magnetizace. Jako první jsem se rozhodl vytvořit model s  $k = 2$ . U prvního a osmého magnetu, na šesté a dvanácté hodině, míří magnetizace v kladném směru osy Y. Ve fyzice jsem proto přidal položku Magnetic Flux Conservation, zvolil pomocí domén tyto dva magnety a v položce Magnetic Field vybral Magnetization. V předchozích pracích jsem jako parametr používal experimentálně zjištěnou magnetizaci pro neodymový magnet těchto rozměrů o velikosti  $1000 \text{ kA} / \text{m}$ . Zadal jsem ji proto s kladným znaménkem do kolonky pro osu Y. U druhého a devátého magnetu míří magnetizace pod úhlem  $45^\circ$ . Když se magnetizace pod tímto úhlem rozpočítá pro osy X a Y, vyjdou hodnoty zhruba  $707.11 \text{ kA} / \text{m}$ . Obdobně jsem postupoval i u dalších magnetů. Stále jsem používal hodnoty  $707.11$  a  $1000 \text{ kA} / \text{m}$ . Pouze se střídají znaménka a umístění v osách X a Y. Magnetizace v ose Z, v ose průtoku, je vždy nulová.

Nastavení sítě i studie jsem použil výchozí. Comsol si tak sám určí vhodné parametry.



Obrázek 2.2: Určení směru magnetizace - úhel magnetizace  $45^\circ$ ,  $k = 2$

Dále jsem vytvořil modely pro dva extrémnější případy a to  $90^\circ$  (obrázek 2.3) a  $22.5^\circ$ . V případě  $22.5^\circ$  není obrázek nutný. Magnetizace má směr tečny kružnice protínající středu průtokoměr a těžiště magnetu. Je nejspíš jasné, že tato varianta nebude vůbec vyhovovat. Úhel je sice malý, ale magnetické pole bude "utíkat" do vnějšího prostoru a uvnitř bude nejmenší možné pole. Hodnota zadávané magnetizace je v případě  $90^\circ$  jen jedna. Plných  $1000 \text{ kA/m}$ , které se mění v osách X a Y at už v kladném nebo záporném směru. Stejnou logikou se řídíme i u  $22.5^\circ$ . Oproti  $45^\circ$  nám dvě hodnoty ještě přibudou ( $1000 \text{ kA/m}$  pod úhlem  $22.5^\circ$  je  $923.9 \text{ kA/m}$  pro X a  $382.7 \text{ kA/m}$  pro Y).



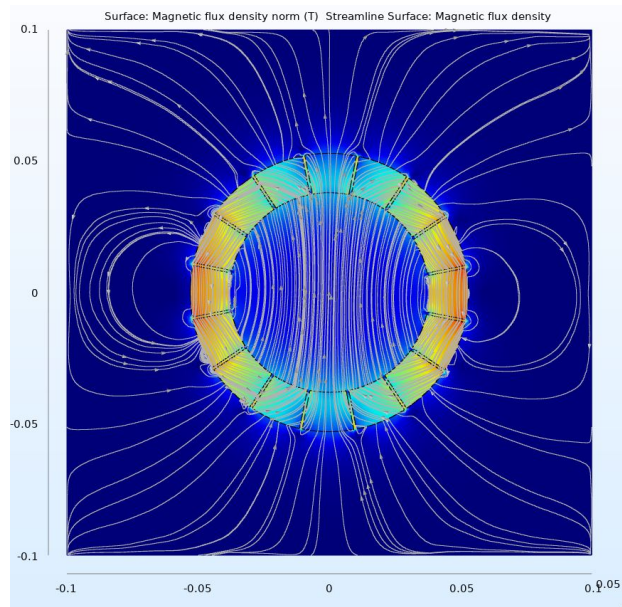
Obrázek 2.3: Určení směru magnetizace - úhel magnetizace  $90^\circ$ ,  $k = 4$

## 2.3 Výsledky

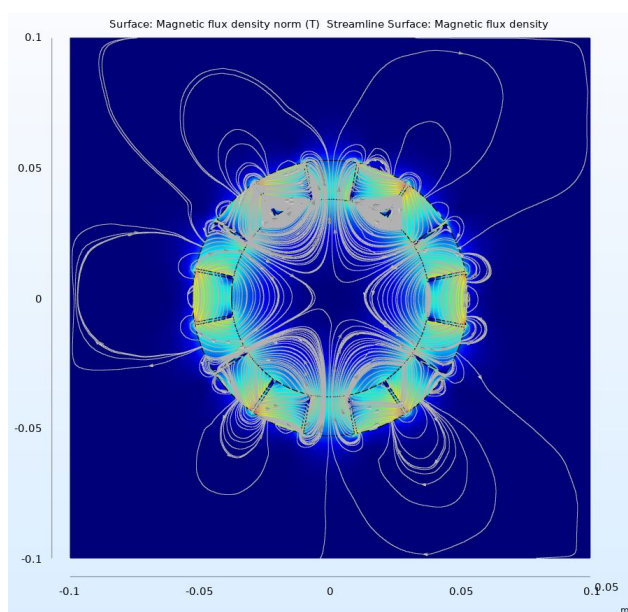
Jak je vidět na obrázku 2.4, magnetické pole znázorněné siločárami je uvnitř soustavy téměř lineární. Simulací jsem zjistil hodnoty 151.62 mT pro  $45^\circ$ , 11.129 mT pro  $90^\circ$  (obrázek 2.5) a pouhé 3.6419 mT pro  $22.5^\circ$  (obrázek 2.6). Netřeba asi zdůvodňovat, proč jsem se pro  $45^\circ$  ( $k = 2$ ) magnetizaci rozhodl. Jistá podobnost s obrázkem 1.2 je patrná. Pro  $k = 1$  je pole téměř nulové. Pro  $k = 4$  je velikost indukce nedostatečná a tvar také nevhodný.

Také nás napadl další experiment. Pokud by se přidal druhý pár elektrod o  $90^\circ$  otočený vůči původním a pole by bylo úplně lineární, znamenalo by to, že by se na kolmých elektrodám vůči magnetickému poli indukovalo pouze rušení a na druhém, hlavním páru jak rušení tak i chtěný signál. Tím by se možná dalo šum identifikovat a účinně ho oddělit od žádaného signálu. V mé bakalářské práci byl šum a rušení jedním z hlavních viníků nefunkčnosti průtokoměru.

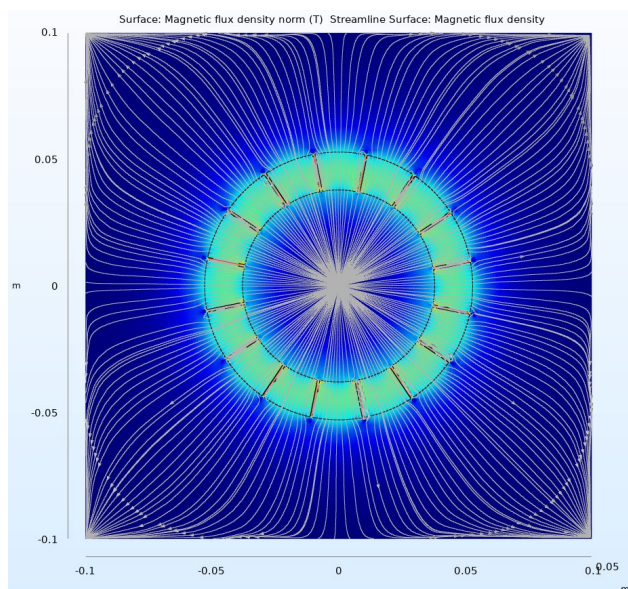
Jelikož jsem obdržel slibný výsledek simulace, exportoval jsem geometrii do souboru mph, abych ji mohl dále použít.



Obrázek 2.4: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace  $45^\circ$ ,  $k = 2$



Obrázek 2.5: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace  $90^\circ$ ,  $k = 4$



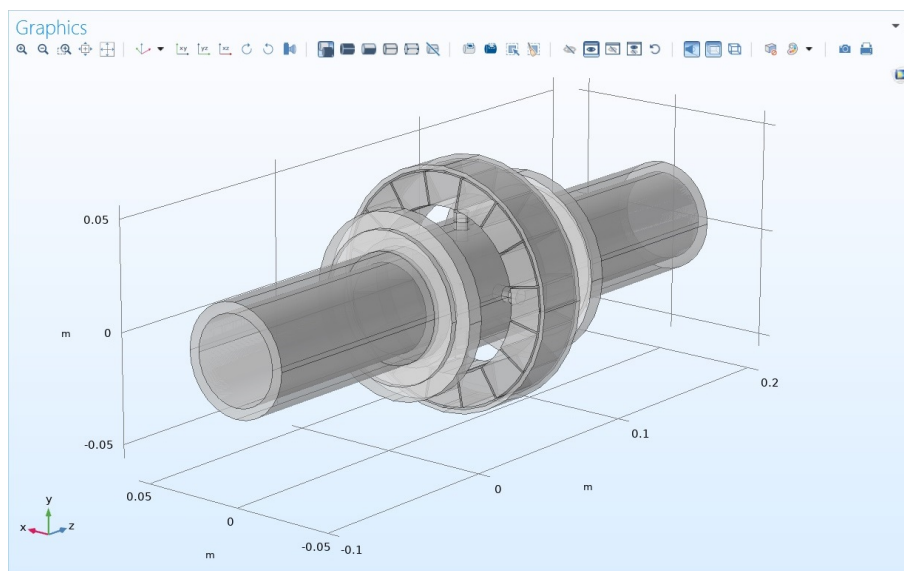
Obrázek 2.6: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou - úhel magnetizace  $22.5^\circ$ ,  $k = 1$

## 3 Halbachova soustava a průtokoměr - Magnetická indukce

Jelikož testujeme stále na stejném těle průtokoměru, použil jsem návrh z ročníkového projektu Model chování kapaliny v elektromagnetickém poli [4] pro DN40.

### 3.1 Úprava modelu průtokoměru, Importování soustavy

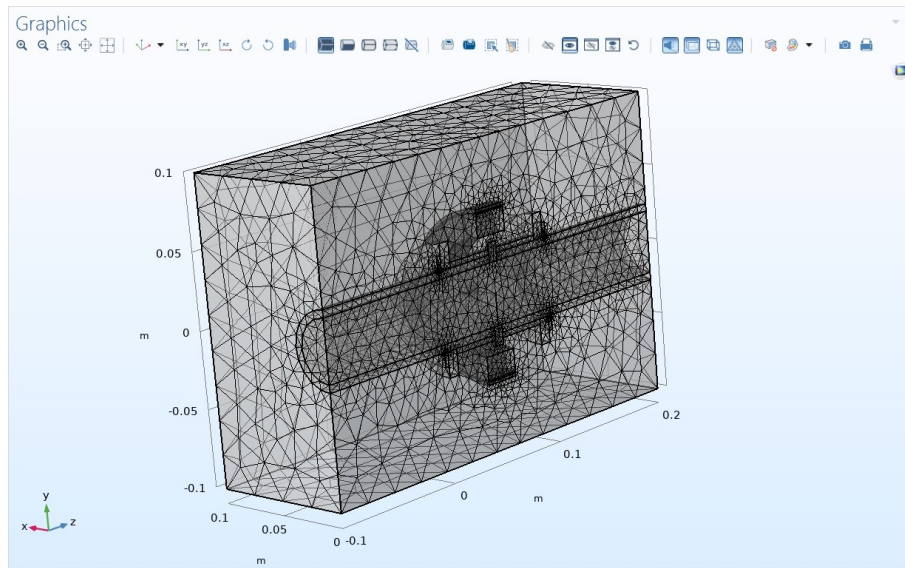
Z modelu jsem použil vše až na neodymové magnety a jejich nástavce. Jak prozradila kapitola 2.3, domodeloval jsem druhý pár elektrod. Dále jsem přímo v geometrii použil import souboru mph a vložil tak k průtokoměru Halbachovu soustavu magnetů. Tu stačilo pouze vhodně natočit a posunout v osách X, Y a Z na správné místo. Výsledný model jsem ořízl na polovinu pro úsporu výpočetního času. Model v postprocessingu opět ozrcadlím.



Obrázek 3.1: Naimportovaná geometrie Halbachovy soustavy k upravenému modelu průtokoměru DN40

## 3.2 Materiály, Fyzika, Síť, Studie

Jako materiál průtokoměru a elektrod jsem ponechal nerezovou ocel. Vnitřní potrubí je teflonové, okolí průtokoměru tvoří vzduch a vnitřek voda. Veškeré nastavení fyziky Magnetic fields, no current jsem použil z předchozí kapitoly. Co se sítě týče, zvolil jsem velikost Fine (jemná) pro celou soustavu a automatickou velikost pro okolí. V místě styku vody a průtokoměru, kde do budoucna očekávám střet dvou fyzik je hrubost sítě velikosti Finer (jemnější). Nastavení studie je i v tomto případě výchozí.

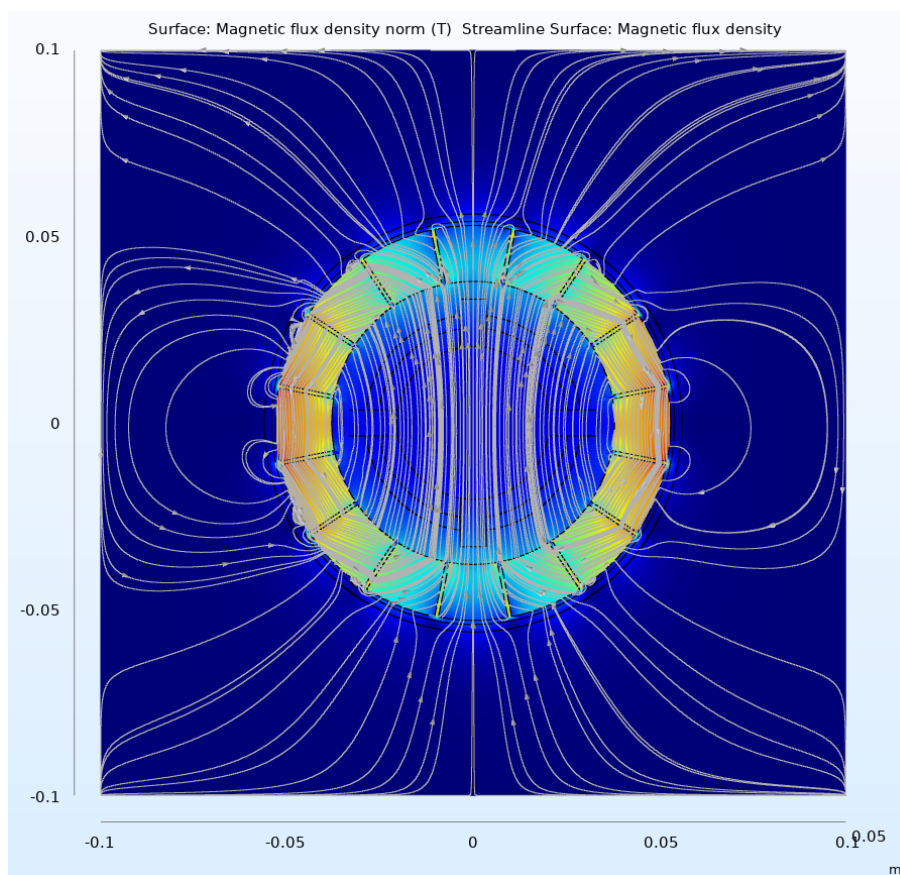


Obrázek 3.2: Nasítovaný model



### 3.3 Výsledky

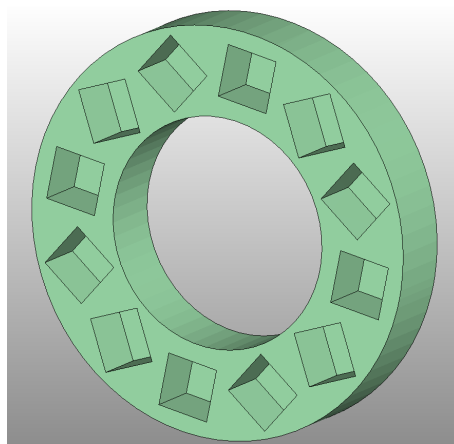
Jak je vidět na obrázku 3.3, Halbachova soustava soustředí magnetické pole hlavně uvnitř. Tělo průtokoměru i potrubí má permeabilitu blízkou jedné a tak pouští do středu průtokoměru téměř veškeré magnetické pole. I tak je ale ve středu zjištěna hodnota 151.385 mT tedy o 0,16 % menší hodnota než samotná soustava bez průtokoměru - ten pole přeci jen mírně ruší. Oproti dvěma neodymovým magnetům je to velký nárůst (48,2 mT [4]). Větší magnetická indukce umožní naindukovat větší napětí na elektrodách a tím snad i zvýšit rozdíl mezi žádaným signálem a šumem. K žádanému signálu napomůže i signál z druhého páru elektrod, na kterém se indukuje pouze rušení.



Obrázek 3.3: Graf magnetické indukce

## 4 Nová Halbachova soustava

Bohužel došlo k velkému zvratu. Navrženou soustavu byl schopný vyrobit pouze jediný z šesti poptaných výrobců magnetů v ČR. Naneštěstí byl ale zaneprázdněn a nebylo by možné práci dokončit v tomto semestru. Důvod byly magnety velmi specifického tvaru, které se musejí vyrobit na zakázku. Vydal jsem se tedy novou cestou. Rozhodl jsem se, že si Halbachovu soustavu vyrobím sám z magnetů tvaru krychle. Nemusím tak řešit orientaci magnetů až do finálního sestavení. Rack (držák magnetů), do kterého se magnety budou vkládat, jsem chtěl udělat z jediného kusu pro jednodušší návrh a tisk. Byl jsem tak limitován vnějším průměrem přírub průtokoměru. Dále jsem řešil počet magnetů. Vzhledem k rozměrům se zdálo nejvhodnější přejít z šestnácti na dvanáct magnetů. Tomu odpovídaly krychle s délkou hrany 20 mm. Pro zjištění úhlu magnetizace jsem opět použil vzorec 1.0,  $k$  jsem na základě kapitoly 2.3 zvolil rovné dvěma. Výsledný tvar pole by tedy měl být totožný s polem na obrázku 1.2 pro  $k = 2$ , jelikož se jedná o stejný počet magnetů. Předpoklad tohoto řešení je následovný. Vzhledem k mezerám mezi magnety nebude pole uvnitř tak silné ani tak homogenní jako soustava simulovaná v předešlé kapitole. Po konzultaci s Ing. Bc. Jiřím Primasem jsme však došli k závěru, že rozdíl nebude pro naše účely takový a ani homogenita nijak závažně neutrpí. Nehledě na to, že tato soustava bude několikanásobně levnější. Rack se povedlo vytisknout na školní 3D tiskárně a magnety stály okolo tisíce korun českých. Oproti tomu odhad ceny předchozí soustavy se pohyboval kolem dvacetinásobku.



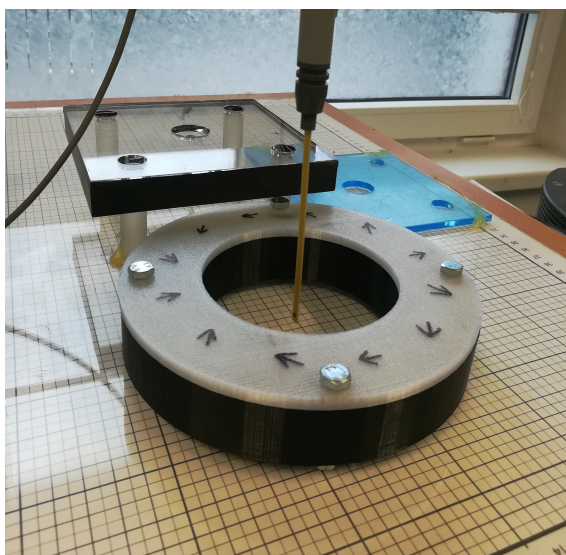
Obrázek 4.1: 3D model racku



Obrázek 4.2: Zhotovená soustava

## 4.1 Měření soustavy

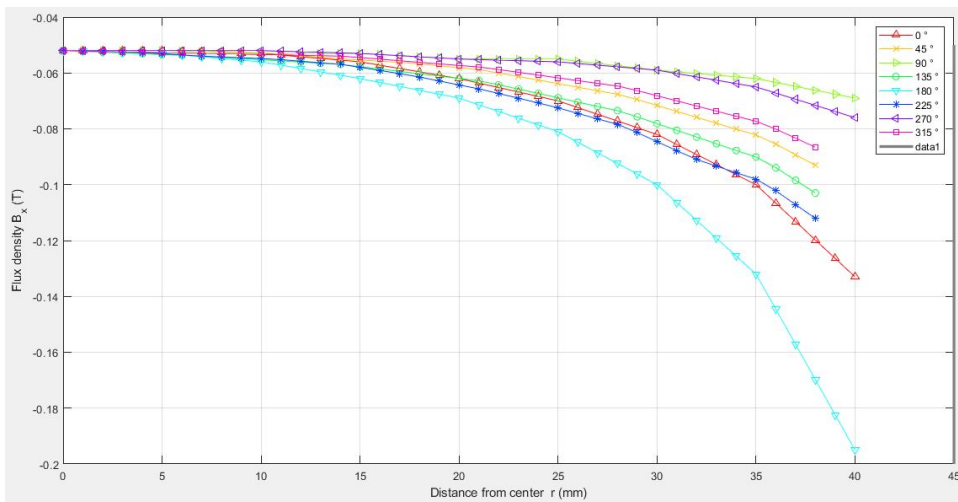
Po sestavení soustavy jsem s Ing. Miroslavem Novákem, Ph.D. soustavu přeměřil na stejném přípravku obsahující gaussmetr, který jsme použili k měření pole v mé bakalářské práci [3] a zároveň jsem vytvořil nový model, abych mohl porovnat odsimulované a měřené hodnoty.



Obrázek 4.3: Probíhající měření

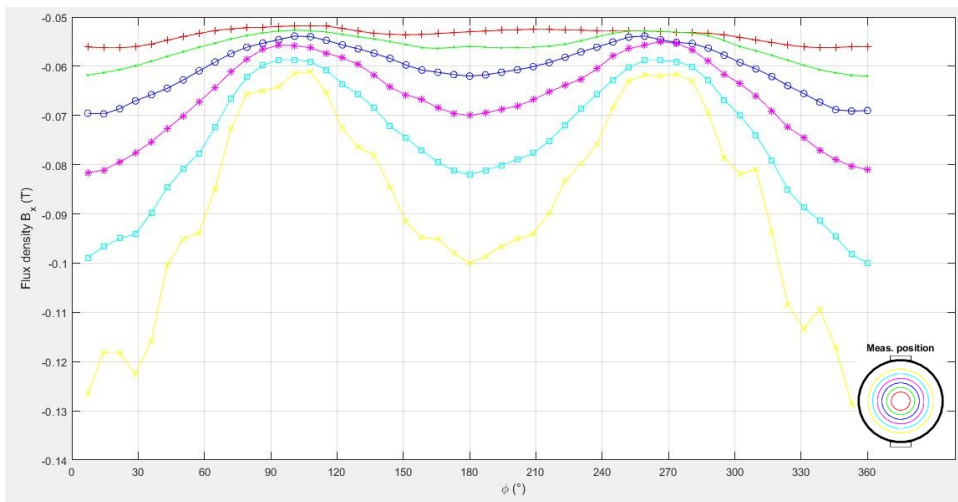
Na obrázku 4.4 je především patrné, že soustava není úplně dokonalá. Graf  $0^\circ$  a  $180^\circ$  by se měli překrývat. Stejně tak úhly  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  atd. Příčin nedokonalosti je několik. Především tedy šrouby držící rack a víko pohromadě nejsou z nerezové oceli.

Dále jsem navrhl příliš velké vůle v uložení magnetů a ty se tak silným polem mírně natočili, i když vůle byla v řádech desetin milimetru. Později byla ještě zmenšena tenkou folií. Posledním důvodem mohla být odchylka natočení souřadného systému přípravku a soustavy magnetů. Nicméně ve středu je více než 50 mT a v hlavní ose ( $90^\circ$  a  $270^\circ$ ) indukce téměř konstantní. Oproti předchozí soustavě jsme tedy na třetině. To není tak špatný výsledek s ohledem na menší počet magnetů, velké mezery a celkově velké finanční úspore.



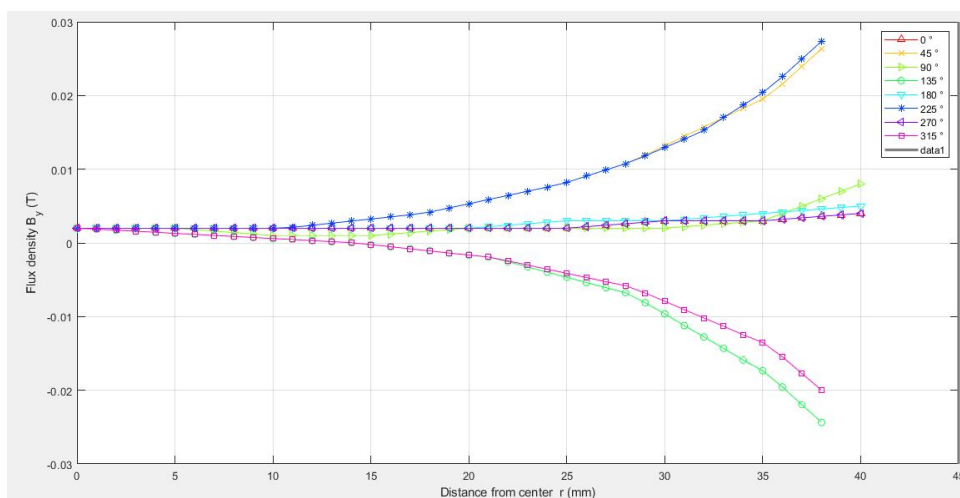
Obrázek 4.4: Měření hlavního pole - graf 1

Obrázek 4.5 je graf znázorňující velikost indukce na úhlu při konstantním průměru. Čím menší průměr, tím jsou hodnoty méně zvlněné. Dále je už příliš ovlivňováno jednotlivými magnety a tvoří jakousi sinusovku.



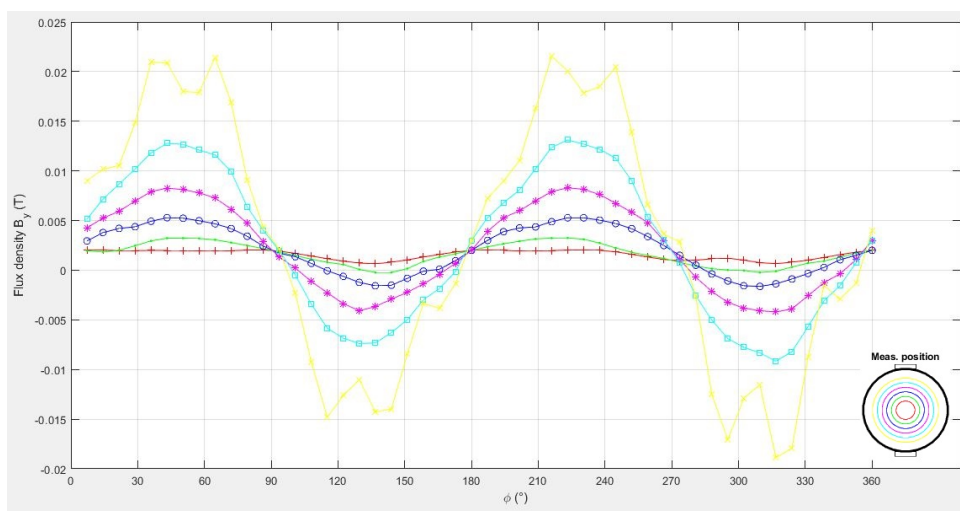
Obrázek 4.5: Měření hlavního pole - graf 2

U obrázku 4.6 byly souřadné systémy vzájemně seřizeny téměř přesně. Lze tak usuzovat z toho, že se hodnoty pro  $45^\circ$ ,  $225^\circ$  a pro  $135^\circ$  a  $315^\circ$  téměř překrývají. Indukce v ose kolmé na hlavní osu elektrod je zase téměř nulová.



Obrázek 4.6: Měření vedlejšího pole - graf 1

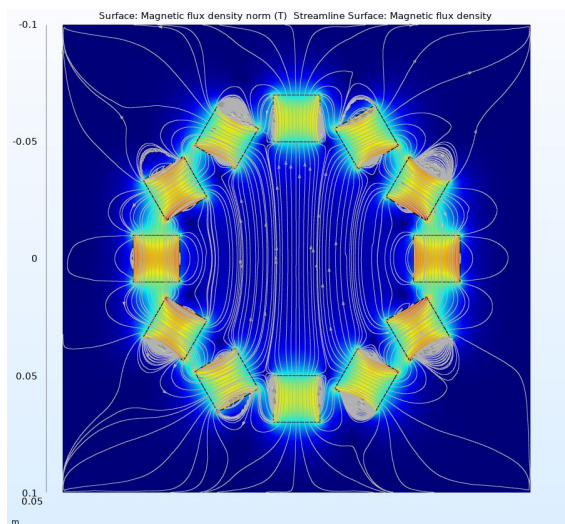
U obrázku 4.7, podobně jako u 4.5. Pouze hodnoty indukce jsou menší.



Obrázek 4.7: Měření vedlejšího pole - graf 2

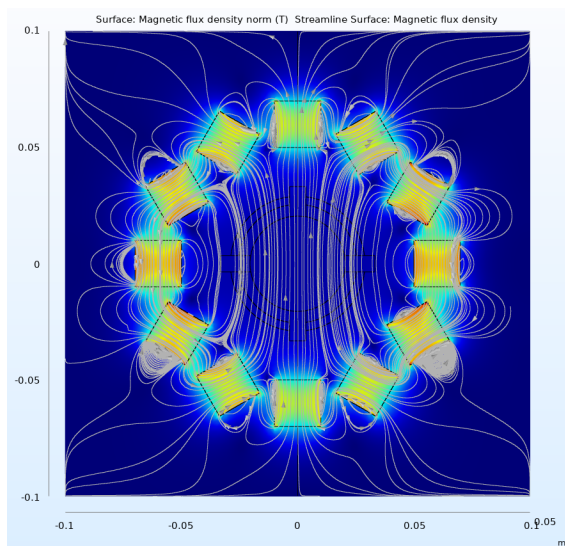
## 4.2 Ověření soustavy v Comsolu

Vytvoření modelu proběhlo úplně stejně jako vytvoření předchozí soustavy. Z časových důvodů jsem si ušetřil práci s kreslením racku. Materiály s permeabilitou blízkou jedné stejně magnetické pole téměř neovlivňují. Samotná soustava má ve středu 71.371 mT.



Obrázek 4.8: Siločáry nové Halbachovy soustavy

Soustava včetně průtokoměru jen 66.073 mT. Reálně bylo naměřeno kolem 50 mT . Na obrázku 4.8 a 4.9 je patrná menší linearita způsobená mezerami mezi magnety.

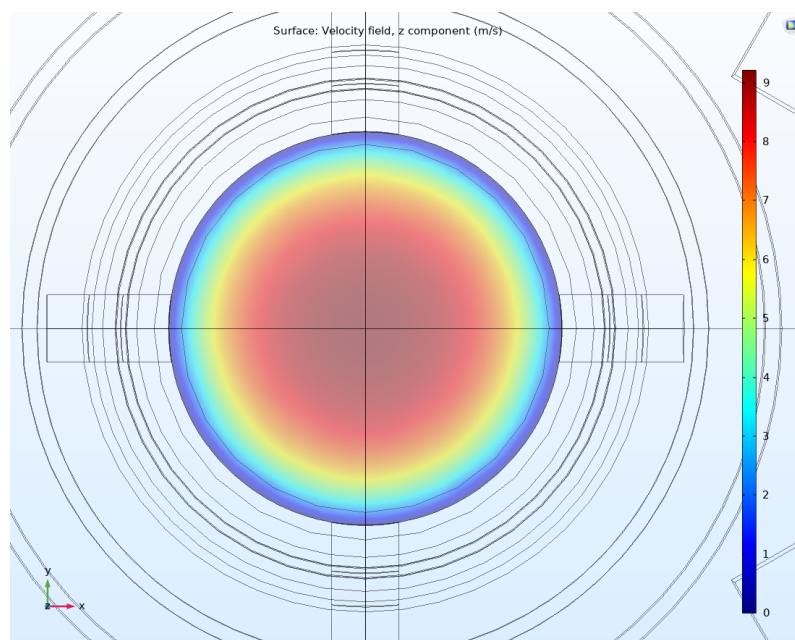


Obrázek 4.9: Siločáry nové Halbachovy soustavy s průtokoměrem

## 5 Laminární proudění, Studie

Následně jsem přidal druhou fyziku Laminar flow. Její nastavení není náročné. Zvolil jsem si rychlost proudění v trubici na 6 m/s ve směru osy Z, vstupní tlak 2 bar a zanedbatelně malou tlakovou ztrátou. Pro rychlé a efektivní vypočtení studie je nutné přidat druhý stacionární krok. Obě fyziky se tak nejprve propočítají zvlášť a poté se spočítají jejich vzájemné vlivy v místech, kde se prolínají, tedy pouze uvnitř teflonu. Model průtokoměru je již hotový a další práce budou probíhat pouze v postprocessingu.

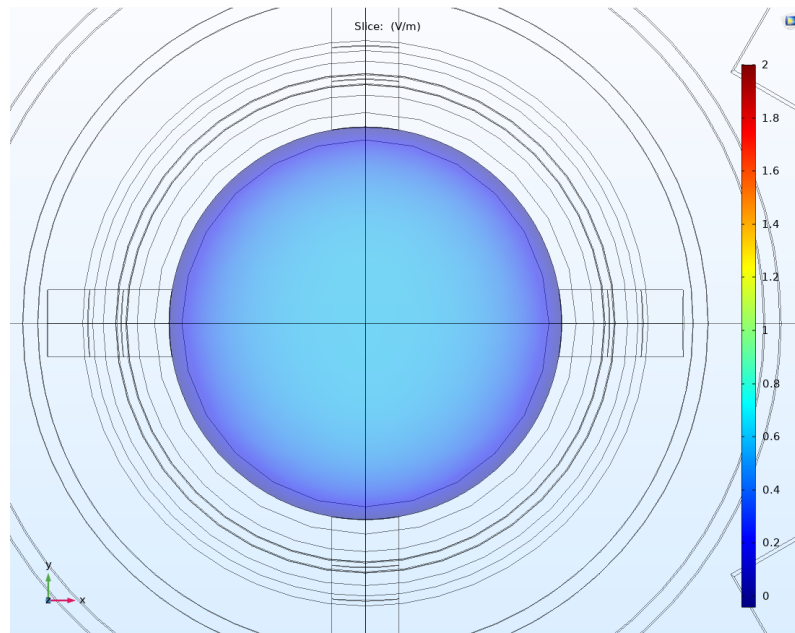
### 5.1 Přidání proudění - Získání Intenzity elektrického pole



Obrázek 5.1: Z složka rychlosti proudění v rovině elektrod

## 5.2 Výsledky

Intenzita ve středu průtokoměru je  $0.609 \text{ V/m}$  podle vzorce 1.1. Figuruje v něm rychlost proudění v ose Z a Y složka magnetické indukce. Jedná se spíše o grafický mezivýsledek.



Obrázek 5.2: Intenzita elektrického pole v rovině elektrod



## 5.3 Elektrické napětí indukované na elektrodách

Napětí na elektrodách by mělo reagovat pouze na změnu rychlosti proudění. Simulaci, která by ukázala přesné průběhy napětí, je s mými zkušenostmi bohužel nemožné vytvořit. Pro představu si alespoň nechám vypočítat hodnoty v ustáleném stavu, které pak mohu porovnat s reálnými náměry.

Z odsimulovaných hodnot napětí na elektrodách (tabulka 5.1) je patrné, že napětí s průtokem roste podle vzorce (1.3).

Tabulka 5.1: Tabulka odsimulovaných hodnot napětí na elektrodách v závislosti na rychlosti proudění

Rychlost proudění [m/s]	U1 [mV]	U2 [mV]
0	0	0
0.0001	$1.81 \cdot 10^{-4}$	$-1.41 \cdot 10^{-8}$
2	3.31	$-2.26 \cdot 10^{-4}$
4	6.62	$-4.58 \cdot 10^{-4}$
6	9.92	$-6.78 \cdot 10^{-4}$
8	13.23	$-9.04 \cdot 10^{-4}$
10	16.54	$-11.31 \cdot 10^{-4}$

$U1 = w * B_y$  je napětí hlavního páru elektrod

$U2 = w * B_x$  je napětí vedlejších páru elektrod

$w$  - složka rychlosti v ose Z;  $B_x, B_y$  - složka mag. indukce v dané ose

Napětí na hlavním páru elektrod je výrazně větší proto, že jejich osa je kolmá na celkové magnetické pole Halbachovy soustavy. Teoretický předpoklad říká, že se na obou párech elektrod bude uplatňovat stejné rušení, ale užitečný signál pouze na ty hlavní. Pokud tedy známe žádaný signál se šumem a šum samotný, lze přistoupit k filtracím a šumu se zbavit.

Tímto končí teoretická a simulační část mé práce. Nadále se pokusím o zprovoznění oběhového systému a ověření získaných hodnot. Bohužel má simulace v Comsolu vůbec nepočítá s elektrochemickými jevy. Na styku proudící tekutiny a elektrody vzniká nevodivá vrstva a vzniká nám tak kondenzátor. To je známo již z mé bakalářské práce a jak víme, stejnosměrný proud není kondenzátorem propouštěn. Nabízí se několik metod "rozbití" této vrstvy. Například velkým napětím. V holé podstatě nám jde o průraz dielektrické vrstvy.

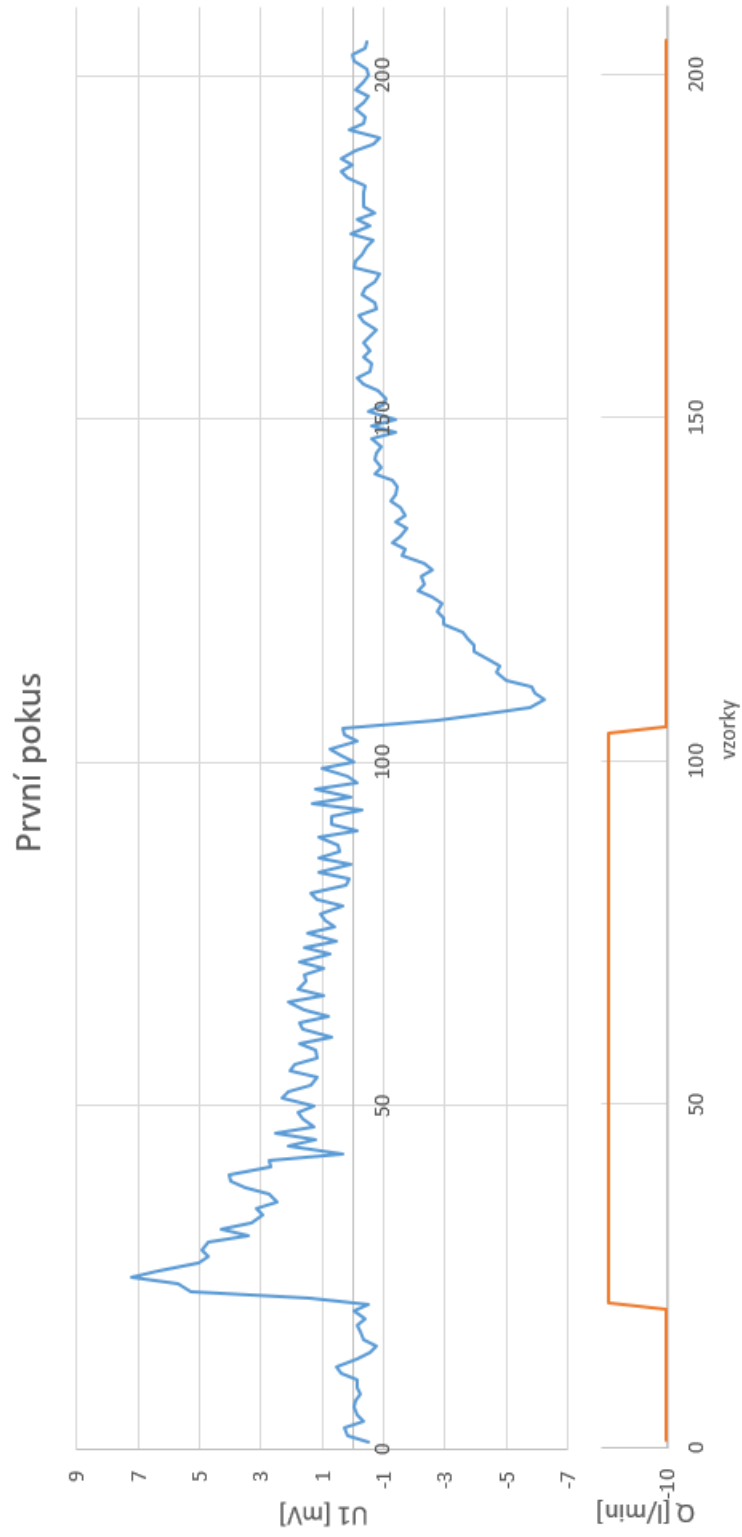
## 6 Realizace v laboratoři

### 6.1 Zprovoznění

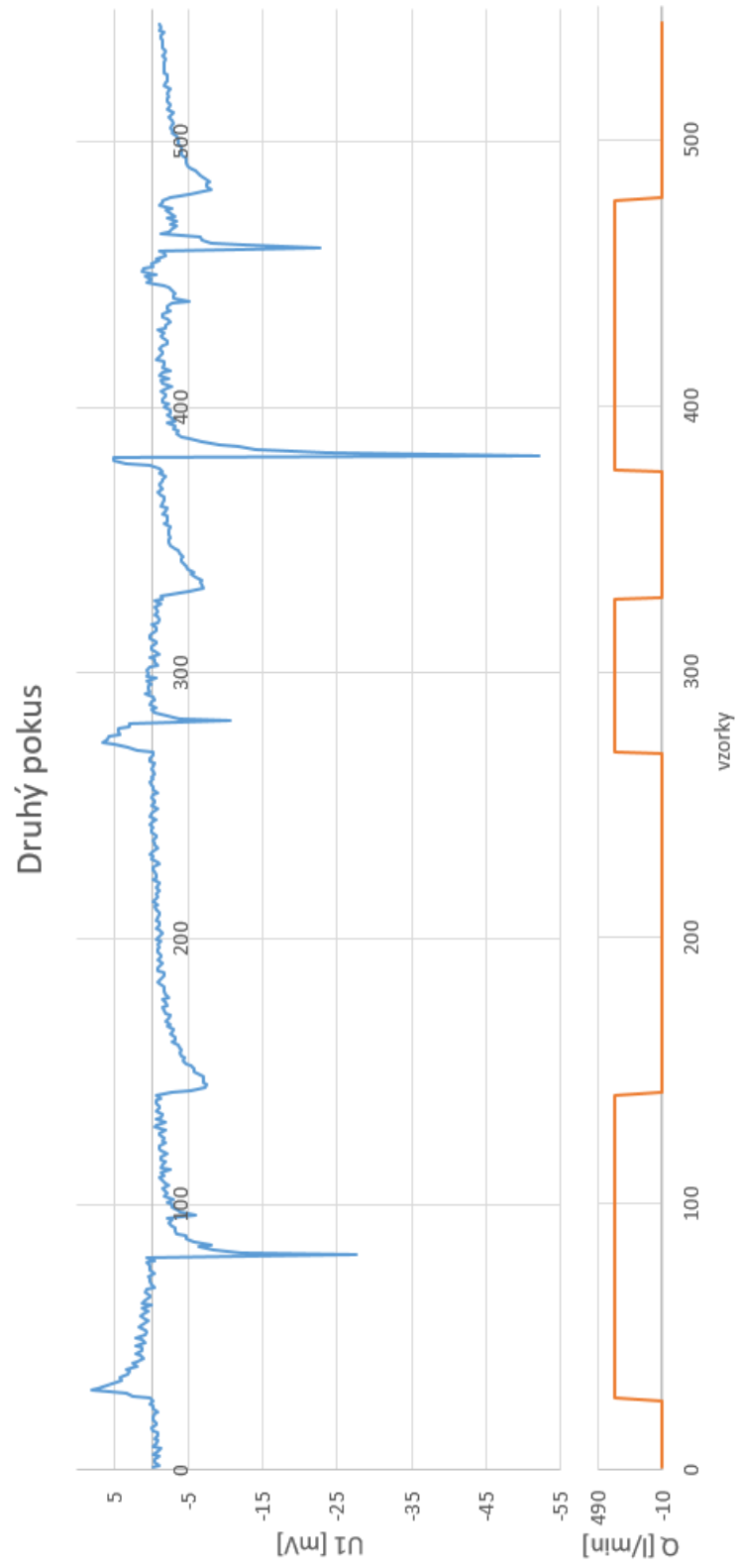
K zapojení se využila průtokoměrná linka v laboratoři Ing. Lubomíra Slavíka, Ph.D. a měřicí ústředna Keithley 3706. Na lince již přede mnou probíhala měření s několika průtokoměry v tandemu. Měření proběhlo se dvěma magnety, ne s Halbachovou soustavou. Bohužel přítomná čidla měla pouze jeden pár elektrod. Tím bylo znemožněno další porovnávání signálů obsahujících zašumělou informaci o průtoku a samotný šum. Měření jsem zprovoznil s paládiovými elektrodami (první a druhý pokus). První pokus vypadal velice slibně. Vzorkovací frekvence je přibližně 1 s. Na grafu je patrné, že napětí na elektrodách opravdu na změny průtoku reaguje. Průběh napětí je exponenciální a podobá se právě již zmíněnému kondenzátoru, respektive jeho vybíjení.

U druhého pokusu (obrázek 6.2) se již projevilo rušení v podobě pulzů, které dobíjeli kondenzátor uvnitř čidla, a chvíli trvalo, než došlo k opětovnému ustálení. Toto se projevilo ještě v jednom měření. Poté došlo k lepšímu uzemnění obvodu a pulzy se již neobjevili. Hodnoty napětí se limitně ustalovaly na stejných hodnotách. Ne vždy ale k ustálení došlo. Nyní už je patrné, že se tento typ průtokoměru bude hodit převážně pro sledování stále se měnících průtoků s velkými změnami. To nám však bylo známo již z teoretických předpokladů.

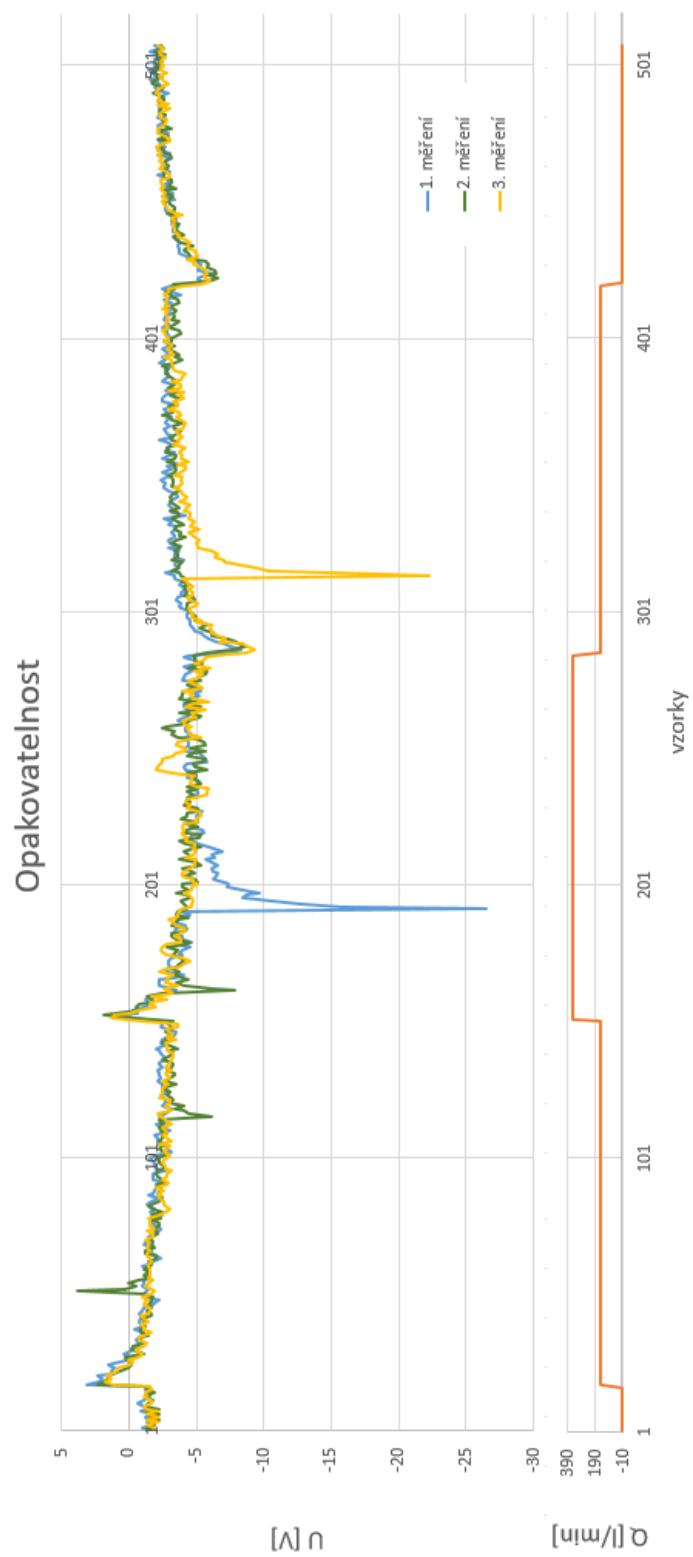
Pro stálost měření mi bylo doporučeno stejnou sekvenci zopakovat vícekrát po sobě (obrázek 6.3). Bohužel se opět objevily nežádoucí impulsy. Tentokrát naposledy. Měření je ale stále a opakovatelnost na pohled dobrá. Kromě impulsů a šumu není měřený signál ničím jiným ovlivňován. Jednoznačně se podařilo postoupit v průtokoměrech s permanentními magnety k velkému pokroku.



Obrázek 6.1: První pokus



Obrázek 6.2: Druhý pokus



Obrázek 6.3: První náměry opakovatelnosti

## 6.2 Vliv různých materiálů elektrod na naměřené napětí

Tato kapitola navazuje na můj ročníkový projekt [4]. Elektrody jsou z nerez, paladia, skleného karbonu a platiny.



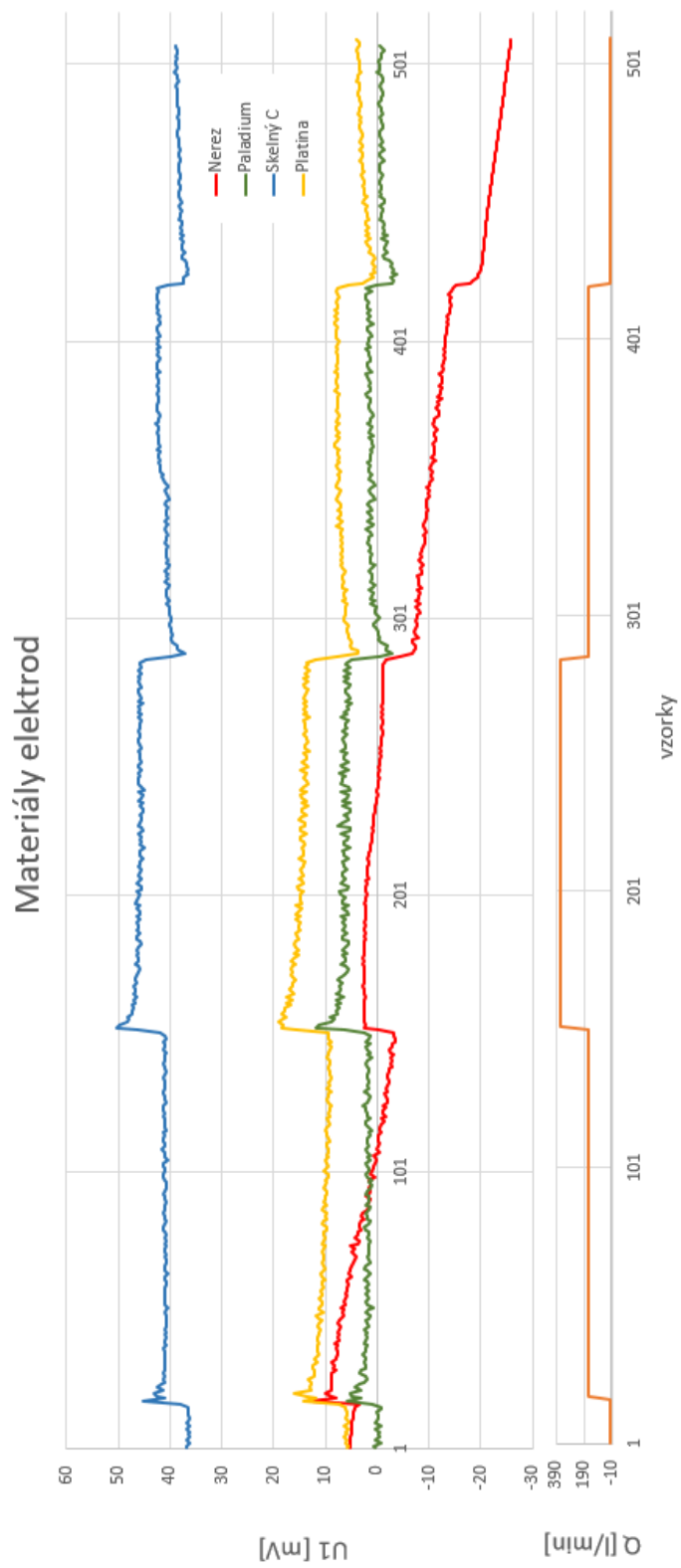
Obrázek 6.4: Průtokoměry v tandemu

Odsimulované hodnoty ustáleného napětí na hlavních elektrodách (tlak 2 bar, teplota 25°C):

Tabulka 6.1: Tabulka odsimulovaných hodnot napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na velikosti průtoku

Rychlost proudění [m/s]	Průtok [l/min]	U1 [mV]
0	0	0
0,212317	160	0.35204
0,477707	360	0.79061

Přepočítání z l/min na m/s je provedeno se zanedbáním stlačitelnosti kapaliny. V simulaci byl jako materiál použit nerez. Jak je vidět, hodnoty opravdu sedí. Hlavně hodnota pro 360 l/min. Nasimulováno bylo 0.8 mV, naměřená hodnota se v průběhu ustalování dostala ze zhruba 3 mV až lehce do záporných hodnot viz. graf na obrázku 6.5. Nejvíce se osvědčili elektrody ze skleného karbonu. Měřené napětí na změnu reagovalo a ustavovalo se rychle. Materiál byl doporučen Ing. Bc. Jiřím Primasem, Ph.D. Nerezové elektrody se neustálily na konstantní hodnotě vůbec.



Obrázek 6.5: Různé materiály elektrod

## 6.3 Finální průtokoměrná trubice

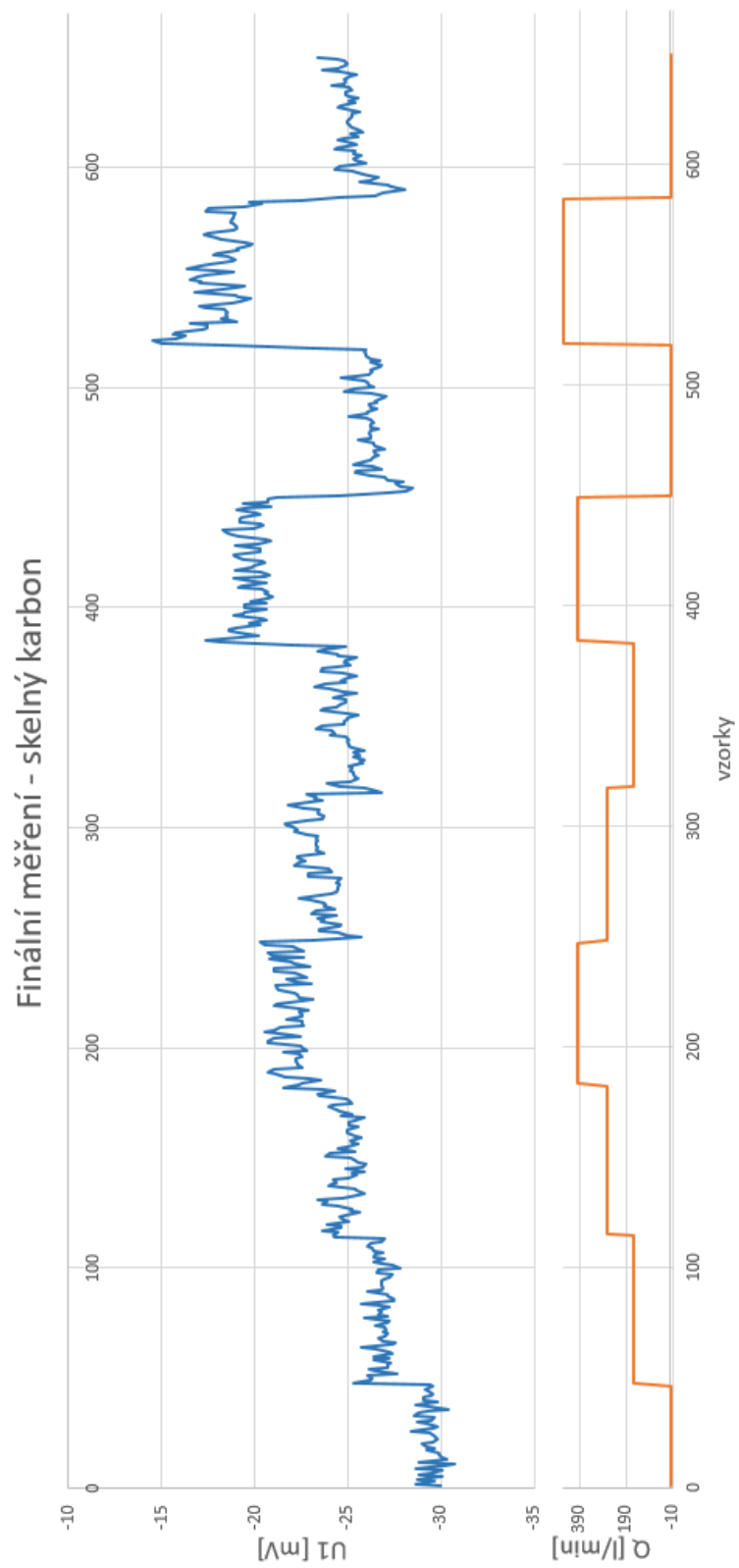
Pro finální čidlo jsem použil elektrody ze skleného karbonu a místo dvou magnetů Halbachovu soustavu. Signál je zašumělý, ale bude se s ním dáť pracovat.



Obrázek 6.6: Finální prototyp průtokoměru a připojenými hlavními elektrodami ze skleného karbonu

Průtokoměr se chová jako kondenzátor, reaguje pouze na změnu. Reakce jsou rychlé, ustálení však stále značně dlouhé. Pro měření pomalých změn a malých rozdílů průtoků bude nezbytné vymyslet nějaký doplňující princip. Například cyklické zkratování elektrod v době mezi vzorkováním. Rychlé změny by se podařilo zachytit stále a doby ustálení by se zkrátily.





Obrázek 6.7: Naměřené hodnoty pro průtokoměr s elektrodami ze skelného karbonu

## Závěr

V kapitole věnované teorii jsem popsal základní princip Halbachovy soustavy, druhy, stručnou historii a důležité vztahy pro dimenzování. Ve druhé kapitole jsem si navrhl vlastní soustavu a namodeloval ji v Comsolu. Z pohledu magnetizace jsem však navrhl tři různé soustavy. Zjistil jsem, že pro mé účely se nejvíce hodí soustava s  $k = 2$ , tedy rozdílem magnetizací dvou sousedních magnetů rovnému  $45^\circ$  pro 16-ti členou soustavu. Indukce ve středu byla 150 mT a uvnitř celé trubice se vytvářelo lineární pole. Následně jsem použil existující model DN40, patřičně ho upravil a naimportoval soustavu magnetů. Téměř stejně velkou indukci ukázala simulace i zde. V porovnání se dvěma magnety proti sobě je třikrát silnější a také lineárnější. Zde jsem se ale dostal do slepé uličky. Nedokázal jsem najít nikoho, kdo by soustavu vyrobil a to i přes dostatečnou časovou rezervu, kterou jsem měl. Rozhodl jsem se tedy pro vlastní výrobu jednodušší, levnější ale bohužel méně účinné soustavy. Důvodem menšího počtu magnetů, mezer mezi nimi a větší vzdálenosti od středu jsem se dostal na třetinovou indukci. Ve čtvrté kapitole jsem tuto soustavu nasimuloval a také ji spolu s Ing. Miroslavem Novákem, Ph.D. přeměřil. Žádné zásadní potíže nebyly zjištěny. Pole bylo pouze mírně zdeformované kvůli vůlím v uložení magnetů. Možná teď vyvstala otázka, zda nezůstat u dvou neodymových magnetů. Indukce je u nich sice přibližně stejná, ale značnou linearitu pole si jakákoliv Halbachova soustava nenechá upřít. Právě tu bude nezbytné mít v případě, že se podaří zkonstruovat čidlo s druhým párem elektrod. V další kapitole jsem provedl výpočet Intenzity elektrického pole. Dále jsem již integrálem získal napětí na elektrodách v ustáleném stavu při konkrétním průtoku.

Po simulacích jsem sestavil prototypové čidlo v laboratoři a pustil se do kontrolních náměrů. U prvních dvou pokusů bylo patrné, že princip funguje. Napětí mezi elektrodami reagovalo na změnu průtoku obstojně. I odezvy na opakovanou sekvenci průtoků se shodovaly. Následovalo měření, kterým jsem se pokusil zjistit, jaký materiál nejlépe odolává chemickým vlivům uvnitř trubice. Vybral jsem skelný karbon, který mi byl doporučen již v minulém roce. Také jsem porovnal hodnoty napětí pro nerezové elektrody s hodnotami ze simulace, kde jsem jako materiál použil též nerez a ty se shodovaly. V závěru jsem provedl měření s elektrodami ze skleného karbonu a měřil reakci na složitější sekvenci průtoků. Signál je rozkmitaný, ale myslím, že bude dobrým podkladem pro vývoj a testování elektroniky průtokoměru.

Body zadání, jak model Halbachovy soustavy, její realizaci i měření jsem splnil. Celkově hodnotím výzkum jako velmi úspěšný a mám radost, že se mi povedlo získat nepopíratelné důkazy funkčnosti průtokoměru s permanentními magnety. Doufám, že se bude má práce dále rozvíjet a dočkáme komerčního řešení.

## Literatura

- [1] PROF. ING. DANIEL MAYER, DRSC. Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? Odborné časopisy [online]. Pod Vodárenskou věží 1143/4, 182 00 Praha 8-Libeň: FCC Public, 2003, 12/2003 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave-14291>
- [2] Brief Introduction of Halbach Array. Magnet-SDM [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.magnet-sdm.com/2018/10/30/halbach-array/>
- [3] JAROŠ, Jakub. Studium permanentních magnetů. Liberec, 2018. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [4] JAROŠ, Jakub. Model chování kapaliny v elektromagnetickém poli. Liberec, 2019. Ročníková. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [5] Halbach Array Magnets. MPCO Magnetic Products [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mpcomagnetics.com/magnetic-components/halbach-array-magnets/>
- [6] PLÍVA, Zdeněk. Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://new.fm.tul.cz/files/Jak-psat-BP-DP.pdf>
- [7] SATRAPA, Pavel. Balík tul pro LATEX [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://www.nti.tul.cz/satrapa/vyuka/latex-tul>
- [8] SATRAPA, Pavel. LATEX pro pragmatiky [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://www.nti.tul.cz/satrapa/docs/latex/>

# A Přílohy

## A.1 Obsah na CD

1. Diplomová práce
2. Simulační programy Comsol v5.4:
  - A. Model Halbachovy soustavy - úhel magnetizace  $22.5^\circ$
  - B. Model Halbachovy soustavy - úhel magnetizace  $45^\circ$
  - C. Model Halbachovy soustavy - úhel magnetizace  $90^\circ$
  - D. Model Halbachovy soustavy - finální
  - E. Import soubor s geometrií Halbachovy soustavy
  - F. Import soubor s geometrií finální Halbachovy soustavy
  - G. Návrh kompletního průtokoměru s Halbachovou soustavou
  - H. Návrh kompletního finálního průtokoměru s Halbachovou soustavou
3. 3D tisk data Halbach