

**Passiiviset magneettilaakerit**  
**Passive magnetic bearings**  
Janne Pokki

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Janne Pokki  
**Passiiviset magneettilaakerit**

2019

Kandidaatintyö.

21 s.

Tarkastaja: DI Jouni Vuojolainen

Työssä selvitetään mitä passiiviset magneettilaakerit ovat ja kuinka käyttökelpoisia ne ovat verrattuna vaihtoehtoiseen tekniikkaan. Vaihtoehtoisena tekniikkana käytetään aktiivisia magneettilaakereita ja hybridejä magneettilaakereita, ja vähemmässä määrin myös mekaanisia laakereita. Työssä käydään myös läpi eri laskutapoja ja niiden soveltuvuutta laskettaessa passiivisten magneettilaakereihin liittyviä laskuja, kuten myös erilaisia magneettien kasaustekniikoita ja muilla tekniikoilla kuin kestopagneeteilla toteutettuja passiivisia magneettilaakereita. Lisäksi käydään läpi, minkä suuruiset mittasuhteet laakereilla ja niihin liitettyillä magneeteilla pitäisi olla. Lopussa käydään läpi auttaisiko johtava kerros staattorin tai roottorin magneettien välissä, tehdään johtopäätökset verrattuna aktiivisiin- ja hybrideihin magneettilaakereihin ja tehdään yhteenveto passiivisen magneettilaakeritekniikan nykyasemasta.

Työ on kirjoitettu lähinnä IEEE- ja Elsevier-tietokannoista löytyvillä dokumenteilla, etsien passiivisiin magneettilaakereihin ja edellä mainittuihin tutkimuskohteisiin viittaavia dokumentteja. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksen muodossa. Työssä on lähteenä myös Suomen eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan julkaisu, jossa selvitettiin kitkattomien pintojen ja levitaation yleiskuvausta ja etenemistä.

Työn lopputuloksena on selvitys passiivisista magneettilaakereista ja niiden hyödyistä ja haitoista, mutta myös siitä, että tekniikka vaatii lisää tutkimusta, jotta sitä voitaisiin käyttää suuremmassa määrin teollisuudessa. Passiivisilla magneettilaakereilla on vielä monia heikkouksia mekaanisiin laakereihin, aktiivisiin magneettilaakereihin ja hybrideihin magneettilaakereihin verrattuna ja kyseiset heikkoudet karsivat niiden käyttökohteita. Heikkouksien lisäksi passiivisilla magneettilaakereilla on kuitenkin monia hyviä puolia, joiden vuoksi niitä käytetään ainakin osana monenlaisissa prosesseissa. Johtava kerros staattorin tai roottorin magneettien välissä vaikuttaa erittäin lupaavalta parannukselta passiiviseen magneettilaakeritekniikkaan, vähentäen sen negatiivisia puolia. Ei ole olemassa laakerityyppejä, joka sopisi parhaiten kaikissa tilanteissa, vaan parhaan laakerin valinta riippuu vahvasti tarvittavista ominaisuuksista kyseisessä yksittäisessä prosessissa.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Janne Pokki

### **Passive Magnetic Bearings**

2019

Bachelor's Thesis.

21 p.

Examiner: M.Sc. Jouni Vuojolainen

In this study it is explained what passive magnetic bearings are and how useful they are compared to alternative technology. Active magnetic bearings and hybrid magnetic bearings are used as alternative technology, also with a lesser importance, mechanical bearings. This study also goes through different mathematical methods and their superiority while calculating calculations concerning passive magnetic bearings, as well as different kind of assembly techniques, and passive magnetic bearings made with other techniques than permanent magnets. In addition, the study goes through what kind of dimensions the bearings and combined magnets should have. In the end, the study goes through if a conductive layer between the stator's or rotor's magnets would help, reach conclusions compared to active and hybrid magnetic bearings and summarize the current position of the magnetic bearing technology.

The study is mostly written with documents from the IEEE- and Elsevier-databases, searching for documents concerning passive magnetic bearings and above-mentioned research subjects. The study is done in a form of a literature overview. The study also has a source from the Finnish Committee for the Future, which investigated the overview and progression of frictionless surfaces and levitation.

The result of this study is an explanation of passive magnetic bearings and their advantages and disadvantages, but also that the technology needs more research for it to be used to a greater extent in the industry. Passive magnetic bearings still have many disadvantages compared to mechanical bearings, active magnetic bearings and hybrid magnetic bearings, and those disadvantages cut down on their applications. In addition to the disadvantages passive magnetic bearings have many advantages, because of which they are used at least as a part in many different processes. A conductive layer between stator's or rotor's magnets seems like a very promising improvement to the passive magnetic bearing technology, reducing it's downsides. There is no single type of bearing which would fit best for every situation, but the choice of the best kind of bearing depends strongly of the necessary features in a single separate process.

## SISÄLLYSLUETTELO

### Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Passiivinen magneettilaakeri .....	6
2.1	Käyttökohteet .....	7
2.2	Passiiviset magneettilaakerit verrattuna mekaaniseen laakerointiin .....	7
2.3	Passiivinen magneettilaakeri verrattuna aktiiviseen- tai hybridilaakerointiin.....	8
2.4	Passiivisten magneettilaakereiden eri laskutavat.....	9
3.	Halbach Array -tekniikka, suprajohteet ja vakaa levitaatio.....	10
4.	Radiaalinen ja aksiaalinen asettelu ja johtava kerros ilmaraossa .....	12
4.1	Ilmarako.....	12
4.2	Sisempi rengas .....	14
4.2.1	Korkeus.....	14
4.2.2	Leveys.....	15
4.3	Ulompi rengas .....	16
4.4	Johtava kerros staattorin tai roottorin magneettien välissä.....	17
5.	Johtopäätökset .....	19
6.	Yhteenveto.....	20
	Lähteet .....	21

## **KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

AMB	Active Magnetic Bearing, aktiivinen magneettilaakeri
HMB	Hybrid Magnetic Bearing, hybridi magneettilaakeri
PMB	Passive Magnetic Bearing, passiivinen magneettilaakeri

## 1. JOHDANTO

Tässä työssä selvitetään mitä passiiviset magneettilaakerit ovat, miten ne toimivat, ja mihin niitä käytetään. Passiivisia magneettilaakereita vertaillaan mekaanisiin laakereihin, aktiivisiin magneettilaakereihin ja hybrideihin magneettilaakereihin. Työssä käydään myös läpi erilaisia laskentatekniikoita, Halbach-arrayn vaikutus laakerointiin, suprajohteet ja vakaa levitaatio passiivisilla magneettilaakereilla. Lisäksi käydään läpi optimaaliset mittasuhteet, jotka saadaan aikaan 3D-semianalyttisellä laskutavalla, ja tulokset johtavan kerroksen lisäämisestä passiivisen magneettilaakerin ilmarakoon.

Työ on tehty kirjallisuuskatsauksena passiivisiin magneettilaakereihin, koska asiasta ei ole riittävästi suomenkielistä tietoa saatavilla. Tutkimus on tehty vertailemaan passiivisia magneettilaakereita erityisesti aktiivisiin ja hybrideihin magneettilaakereihin, koska kaikkien näiden eri tyyppisten magneettilaakereiden joukosta passiiviset magneettilaakerit ovat parhaimpia hyötysuhteeltaan ja siten haluttuja monenlaisiin eri prosesseihin, vaikka niillä on heikkouksia kumpaankin muuhun verrattuna. Työn tavoitteena on saada kuvaus siitä, mihin passiivinen magneettilaakeri sijoittuu muiden laakerien joukossa. Tämän tavoitteen pohjalta muodostuivat keskeisimmät työn tutkimuskysymykset,

*Mitä ovat passiiviset magneettilaakerit ja mitkä niiden ominaisuudet ovat?*

*Miten niiden ominaisuudet vertautuvat aktiivisiin ja hybrideihin magneettilaakereihin?*

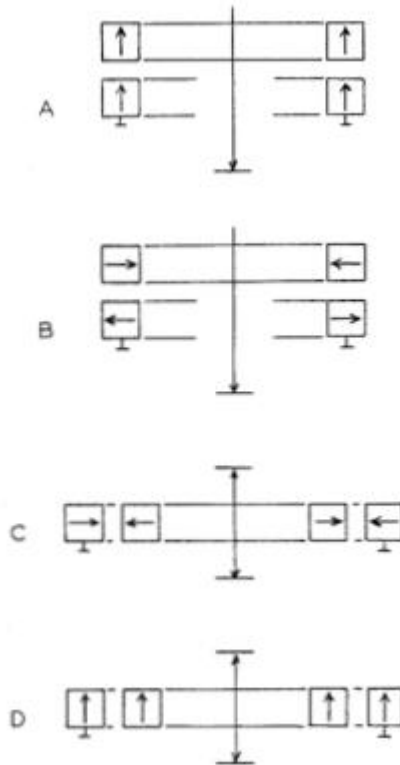
*Onko jokin laakerityyppi paras kaikenlaisiin prosesseihin?*

Tutkimus on suoritettu suurimmaksi osaksi IEEE- ja Elsevier-tietokannoista etsityillä edellä mainittuihin aihealueisiin liittyvillä dokumenteilla. Työssä on myös etsitty suomenkielistä virallista tietoa aiheisiin liittyen, ja lähteenä onkin käytetty Suomen eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan julkaisua, jossa on selvitetty kitkattomien pintojen ja levitaation yleiskuvausta ja etenemistä.

## 2. PASSIIVINEN MAGNEETTILAAKERI

Idea passiivisista magneettilaakereista on esitetty jo vuonna 1842 Earnshawin teoreeman kautta, mutta ensimmäiset passiiviset magneettilaakerit tehtiin teollisuuteen vasta 1930-luvun puolessa välissä (Tir 2014). Ensimmäiset laitteet tehtiin käyttäen attraktiota, mutta myöhemmin kun esimerkiksi  $\text{SmCo}_5$ -magneetit tulivat markkinoille, pystyttiin laakereita luomaan käyttäen myös repulsiota. Alussa myös suurin osa kehitetyistä laakereista käytti radiaalisesti magnetoituja renkaita (Yonnet 1978). Passiivisessa magneettilaakerissa laakerointi toteutetaan nimensä mukaisesti magneetikentän avulla. Kaksi tai useampi rengasmaista magneettia pitää staattorin ja rottorin osumasta toisiinsa magneettisella voimalla ja mahdollistaa kitkattoman pyörinnän. Useampaa erilaista magneettien asettelutyyliä voidaan käyttää, esimerkiksi aksiaalista tai radiaalista suuntausta, kuten myös attraktiota tai repulsiota, tai niiden monia eri kokoonpanovaihtoehtoja. Yleisimmin mekaaninen laakerointi korvataan rottorin ja staattorin magneettikehillä, joissa magnetointi on radiaalisuuntaan, minkä tarkoituksena on vähentää kitkaa (Tänase 2014). Tämän magneettisen laakeroinnin edut, kestoikä, kitkan puute ja hyötysuhde herättävät kiinnostuksen käyttää tekniikkaa mahdollisimman monissa käyttötarkoituksissa parantamaan tehokkuutta.

Neljä eri passiivisen magneettilaakerin, eli PMB:n, konfiguraatiota, joista kaksi attraktiolla ja kaksi repulsiolla, on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 A- ja B-konfiguraatiot attraktiolla toimivasta passiivisesta magneettilaakerista ja C- ja D-konfiguraatiot repulsiolla toimivasta passiivisesta magneettilaakerista. A- ja D-konfiguraatiot aksiaalisella magnetoinnilla ja B- ja C-konfiguraatiot radiaalisella magnetoinnilla (Yonet 1978).

## 2.1 Käyttökohteet

Passiivisia magneettilaakereita käytetään tarkkuutta vaativissa ja järeissä applikaatioissa, kuten moottoreissa, pumpuissa, turbolaitteistoissa, generaattoreissa ja vauhtipyörää käyttävissä energiansäilöntäjärjestelmissä (Tänase 2014). Niillä on useita tulevaisuuden käyttökohteita, esimerkiksi tuulimyllyissä (Kumbernuss 2012). Niistä on maininta myös eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan julkaisussa (Linturi 2018). Julkaisu kertoo yhteiskunnan toimintamallit uudistavista radikaaleista teknologioista. Siinä mainitaan tekniikan menestyksekkäasoveltaminen Hyperloop-koeradoilla ja teknologian kehittäminen teollisuuden käyttöön.

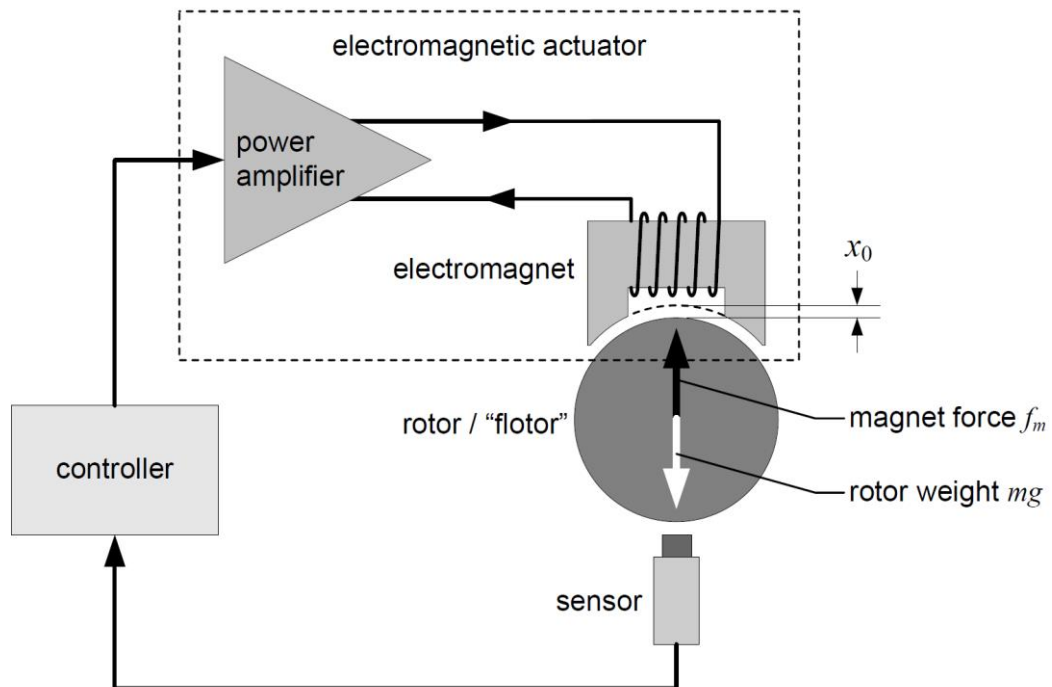
## 2.2 Passiiviset magneettilaakerit verrattuna mekaaniseen laakerointiin

Tässä kappaleessa verrataan kestmagneeteilla toteutettua passiivista magneettilaakeria mekaaniseen laakeriin. Magneetikentän käyttäminen laakeroinnissa fyysiseen kontaktiin verrattuna antaa useita hyötyjä. Ensinnäkin niissä on vähemmän kuluvia osia, joten käyttöikä ja toimintavarmuus ovat parempia kuin mekaanisella laakeroinnilla. Lisäksi magneettilaakerointi ei tarvitse huoltoa voitelun muodossa (Tänase 2014). Ne soveltuvat hyvin vaikeisiin käyttöolosuhteisiin, kuten todella suuriin pyörimisnopeuksiin, alhaiseen lämpötilaan, korkeaan säteilyyn ja tyhjiökäyttöön. Niillä on myös käytössä olematon momenttiresistanssi, joten ne toimivat paremmalla hyötysuhteella kuin mekaaniset laakerit. (Tir 2014)

Magneettilaakerointiin liittyy myös haittoja, esimerkiksi niiden voima ja jäykkyys, jotka ovat paljon pienemmät kuin mekaanisten laakereiden, ja huonon voima-amplitudin takia passiiviset magneettilaakerit eivät pysty kestäämään korkeita kuormia (Tir 2014). Myös huonon jäykkyysamplitudin takia akseli värisee, eli vaimennus on huonoa. Myöskään ilman Halbach array -tekniikkaa kaikkia vapausasteita ei pystytä hallitsemaan, joten joitain vapausasteita täytyy tukea mekaanisesti (Bachovchin 2013).

### 2.3 Passiivinen magneettilaakeri verrattuna aktiiviseen- tai hybridilaakerointiin

Aktiivinen magneettilaakeri on sähkömagneeteilla ohjattu versio magneettisesta laakerista, ja se vaatiikin ohjausjärjestelmän kehittämistä kyseiselle laakerille. Ohjausjärjestelmään kuuluu muun muassa kalliita kaistanleveyden vahvistimia, herkkiä muuntimia ja monimutkaisia ohjausohjelmistoja (Tänase 2014). Sen lisäksi ohjausjärjestelmässä on paikkasensoreita, tai ainakin paikan estimointia, jos ohjaus toteutetaan ilman sensoreita. Paikkamittauksilla tai paikan estimoinnilla voidaan säätää aktiivisia suuntia tai muun muassa tarkkailla roottorin epätasapainoa käyttämällä säädintä ja laakeria kompensoimaan roottorille halutunlaisia voimia. Hybridilaakerointi on passiivisen ja aktiivisen laakeroinnin yhdistelmä, jossa käytetään kestopagneetteja ja aktiivista ohjausta laakeroinnin saavuttamiseksi. Samoin kuin PMB, AMB, eli aktiivinen magneettilaakeri ja HMB, eli hybridi magneettilaakeri, toimivat hyvin vaikeissa olosuhteissa, korkeissa lämpötiloissa ja tyhjiössä (Maslen 2009). Yksinkertainen esimerkki aktiivisesta magneettilaakerista on esitetty kuvassa 2.3.1.



Kuva 2.3.1 Yksinkertaistettu kuva aktiivisesta magneettilaakerista. Kuvassa on sensori, ohjain, roottori ja aktuaattori, joka sisältää tehovahvistimen ja sähkömagneetin. Tämä laakeri pystyy hallitsemaan vain yhden vapausasteen. Sensori mittaa roottorin muutoksen referensiasennostaan. Sen jälkeen mikroprosessori hoitaa paikkasäädön ja luo tarvittavan virtaohjeen, joka stabiloi roottorin referenssitason (Maslen 2009).



Passiivisen magneettilaakerin hyödyt aktiiviseen ja hybridilaakerointiin verrattuna ovat yksinkertaisempi rakenne, ne eivät tarvitse energiaa toimiakseen ja niillä ei ole tarvetta monimutkaisille ohjausjärjestelmille. AMB on siten vikaherkempi ja sähkökatkot ovat ongelma (Tänase 2014). Ohjausjärjestelmien takia AMB ja siten HMB ovat myös kalliimpia (Bachovchin 2013). Sähkön tarpeen vuoksi aktiiviset ja hybridit magneettilaakerit eivät siis sovellu niin hyvin muun muassa avaruuskäyttöön, jossa passiivinen laakerointi olisi erittäin varteenotettava vaihtoehto hyötyjensä puolesta.

Passiivisilla magneettilaakereilla on suhteessa huono jäykkyys värähtelyjen kontrollin puutoksen ja aksiaalisen siirtymän takia (Tänase 2014). Ne voivat yleisesti stabilisoida roottorin vain yhdessä vapausasteessa ja voivat aiheuttaa horjuttavia vaikutuksia muissa suunnissa (Safaeian 2019). Passiivisilla magneettilaakereilla on valmistuksen jälkeen kiinteät ominaisuudet, kun taas AMB:n ja HMB:n ominaisuuksia saadaan muutettua uudelleenohjelmalla kontrolleria. Uudet digitaaliset ohjaussysteemit sallivat yleensä arvojen uudelleenohjelmoinnin, vaikka laakeri on käytössä (Maslen 2009). Aktiiviset magneettilaakerit voivat kompensoida muun muassa staattisen ja dynaamisen jäykkyyden, vaimennuksen, kuormasta riippumattoman staattisen asennon ja roottorin käyttöasennon, riippumatta jäykkyydestä ja ulkoisesta kuormasta (Maslen 2009). Sensorien ja aktuaattorien käyttö aktiivi- ja hybridilaakeroinnissa mahdollistaa myös muita hyötyjä, kuten monitoroinnin ilman lisälaitteita. Ohjausjärjestelmien puute on siis osaltaan hyöty ja haitta passiivisten magneettilaakerien käyttökohteissa. Lisäksi Earnshawin teoreeman mukaan jokin muu voima, kuten mekaaninen laakeri, aktiivinen sähkömagneetti, suprajohde, tai diamagneettinen aine, tarvitaan stabiloimaan ainakin yhden vapausasteen käytettäessä passiivista magneettilaakeria, joten pelkän PMB:n käyttö on harvinaista (Maslen 2009).

Yli 30 vuoden teollisuuskäytön jälkeen on tullut selväksi, että aktiiviset magneettilaakerit ovat selvästi suositumpia kuin passiiviset magneettilaakerit. Passiiviset magneettilaakerit ovat yllä mainittujen negatiivisten puolien takia jääneet vähemmälle käytölle. Niitä käytetään kuitenkin useampaa eri laakerityyppiä sisältävissä laitteissa kuten esimerkiksi turbomolekyylipumpuissa. Kun PMB upotetaan kokonaan nesteeseen, saadaan aikaan vaimennus muulla keinolla kuin itse laakerilla, joten passiivisesta magneettilaakerista tuleekin varteenotettava vaihtoehto. Näin tehdään esimerkiksi veripumpuissa, tai mekaanisissa sydämissä, jossa vaimennus on vähemmän tärkeää, koska veren virtaus itsessään aiheuttaa tarvittavan vaimennuksen. (Maslen 2009)

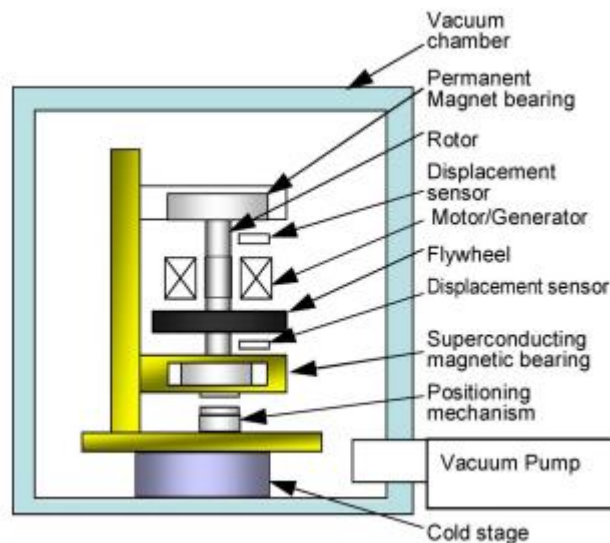
#### **2.4 Passiivisten magneettilaakereiden eri laskutavat**

Passiivisille magneettilaakereille on olemassa useita eri laskutapoja ja siten useita eri tavalla saatuja tuloksia parhaasta kokoonpanosta. Tässä työssä käytettävä laskutapa PMB:n renkaiden mittasuhteisiin liittyen on 3D-semianalyttinen. Muitakin laskentatapoja on olemassa, esimerkiksi 2D-analyttinen ja numeerinen. Kaksiulotteisessa analyttisessä laskentatavassa renkaiden mittasuhteiden optimointi on helppoa, mutta se ei ole kovin tarkkaa, jos renkaiden säde on pieni. Numeerisessa laskentatavassa ongelmana on laskennan suuri laskennallinen hinta ja suurempi epätarkkuus. Näiden kahden jälkimmäisen laskutavan heikkouksien takia tässä työssä käytetään ensimmäistä laskutapaa, 3D-semianalyttistä. (Ravaud 2009)

### 3. HALBACH ARRAY -TEKNIikka, SUPRAJOHTEET JA VAKAA LEVITÄÄTIO

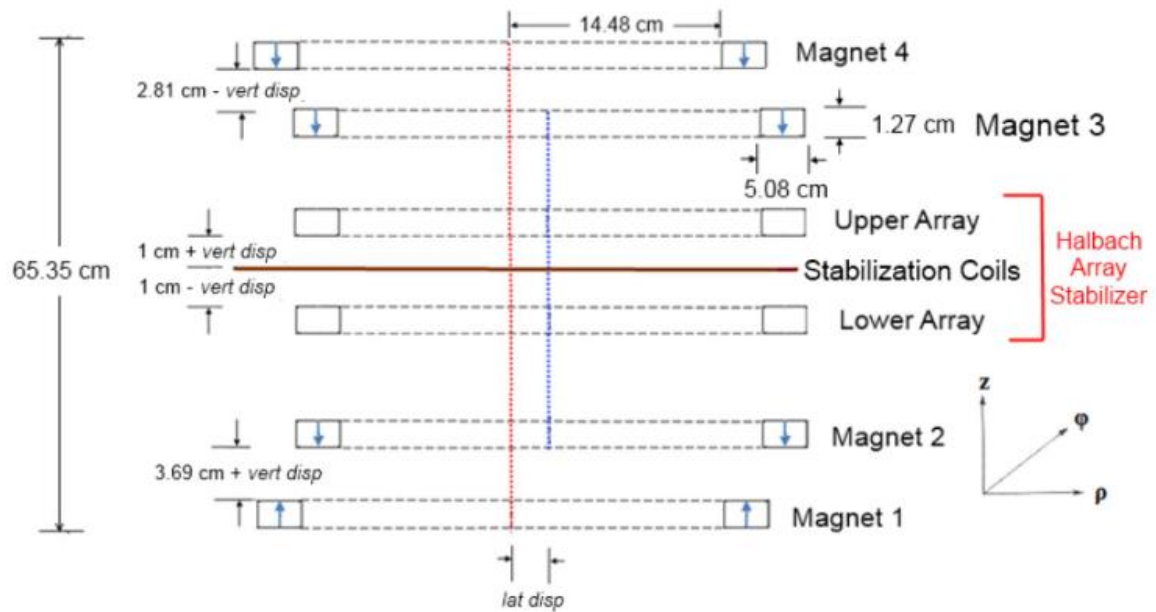
Halbach array -tekniikassa magnetisaatiot vuorottelevat magneetikappaleesta toiseen vahvistaakseen magneettikenttää yhdellä reunalla, kun ne samalla melkein kumoavat magneettikentän toisella reunalla. Kehä on siis muodostettu useista pienistä eri suuntaan magneetoiduista magneetikappaleista. Pienillä ilmaraoilla magneettikenttä voi olla kymmenkertainen verrattuna saman kokoiseen ja samasta magneettisesta materiaalista tehtyyn rengasmuotoiseen magneettiin.(Bachovchin 2013)

Earnshawin teoreeman mukaan on mahdotonta levitoida kappaletta vakaasti kaikissa suunnissa käyttäen vain magneettikenttiä kiinteistä virroista tai kestopagneeteista. Tätä teoreemaa voidaan kuitenkin passiivisilla magneettilaakereilla sivuttaa joko käyttämällä suprajohteita tai lisäämällä laakerointiin Halbach array -tekniikkaa. Korkean lämpötilan suprajohteita käytetään monissa käyttökohteissa, muun muassa passiivisissa magneettilaakereissa (Siddhart 2015). PMB voi myös käyttää matalan lämpötilan suprajohteita, kuten kuvassa 3.1 on osoitettu (Murakami 2007). Suprajohteilla on diamagneettisia ominaisuuksia, joten ne ohittavat Earnshawin teoreemaan ja voivat vakaasti levitoida kappaletta kaikkiin suuntiin.(Bachovchin 2013)



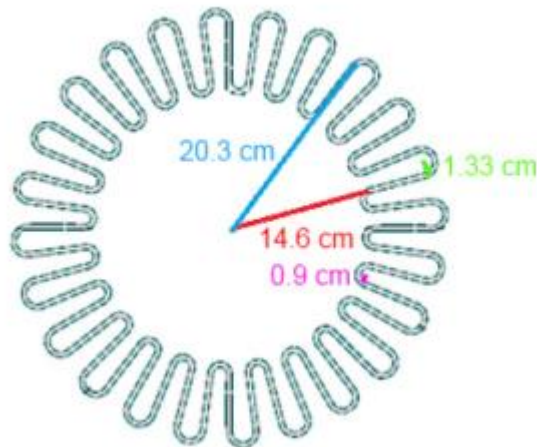
Kuva 3.1 Matalan lämpötilan suprajohtava magneettilaakeri on lisätty passiivisen magneettilaakerin sisältävään systeemiin (Murakami 2007).

Ilman suprajohteita vakaan levitaation passiiviset magneettilaakerit voidaan luoda käyttämällä Halbach array -vakauttajaa. Yksi muoto tällaiselle kaikissa suunnissa stabiilille laakerille on tehdä laakeri, jossa on alempi levitaatiomagneettipari, joka aiheuttaa hylkivän voiman ylöspäin ja ylempi magneettipari, joka aiheuttaa ylöspäin kohdistuvan vetovoiman rootoriin. Tällaisen vakauttajan geometria on esitetty kuvassa 3.2.(Bachovchin 2013)



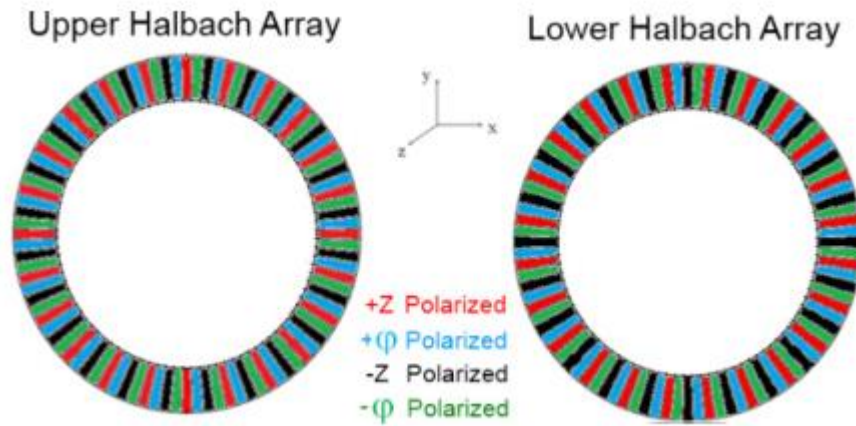
Kuva 3.2 Vakaasti levitoivan magneettilaakerin kuvaus. Halbach array -vakauttaja koostuu kahdesta eri käämistä. Levitaatiosysteemi koostuu neljästä eri magneetista 1-4 (Bachovchin 2013).

Tällainen magneettilevitaatiosysteemi on vakaa lateraaliin muutoksiin, mutta epävakaata vertikaaliin muutoksiin, joten se tarvitsee vakauttajaa vakauttamaan epästabiilit suunnat. Vakauttaja koostuu kahdesta vakauttajakelasta, jotka ovat molemmat keskitetty pystysuunnassa kahden pyörivän Halbach arrayn väliin. Tällainen vakauttajakela on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3 Yksi vakauttajakeloista kuvattuna yläpuolelta. Vakauttajakelan tarkoituksena on vakauttaa epästabiilit suunnat vakaasti levitoivassa magneettilaakerissa. (Bachovchin 2013).

Silloin kun vakauttajakelat ovat täysin keskitettynä Halbach arrayden välissä, magneettivuot kelojen läpi ylemmässä ja alemmassa arrayssa kumoavat toisensa, eikä virtaa indusoidu. Jos kuitenkin stabilisaatiokelat eivät ole täysin keskitettynä, aikavariantti vuo indusoi virran molempiin keloihin. Tämä virta on sitten vuorovaikutuksessa Halbach arrayn magneettikentän kanssa muodostaen stabilisoivan voiman roottoriin pystysuunnassa. Ylempi ja alempi Halbach array on näytetty kuvassa 3.4.(Bachovchin 2013)



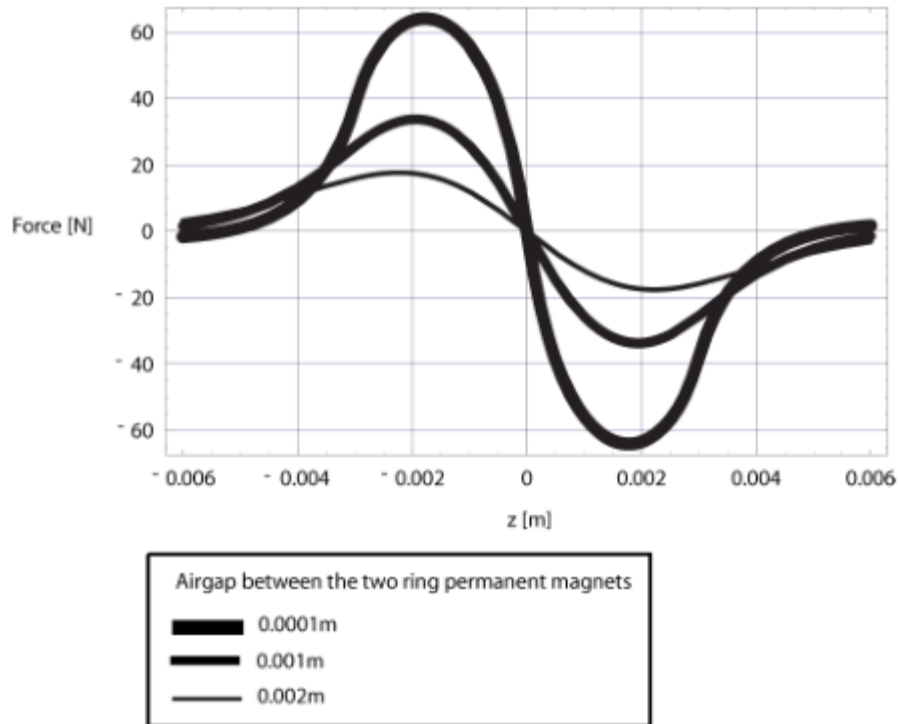
Kuva 3.4 Kuvassa on esitettyä ylempi ja alempi Halbach array. Magnetisaatiot vaihtelevat z-suunnan ja atsimuuttisuuntien välillä molemmissa arrayssa (Bachovchin 2013).

#### 4. RADIAALINEN JA AKSIAALINEN ASETTELU JA JOHTAVA KERROS ILMARAOSSA

Tässä kappaleessa käydään läpi voima ja jäykkyys aksiaalisen ja radiaalisen magnetoinnin passiivisissa magneettilaakereissa. Päätelmät radiaalisessa ja aksiaalisessa asettelussa on tehty käyttäen 3D-semianalyttistä laskutapaa.

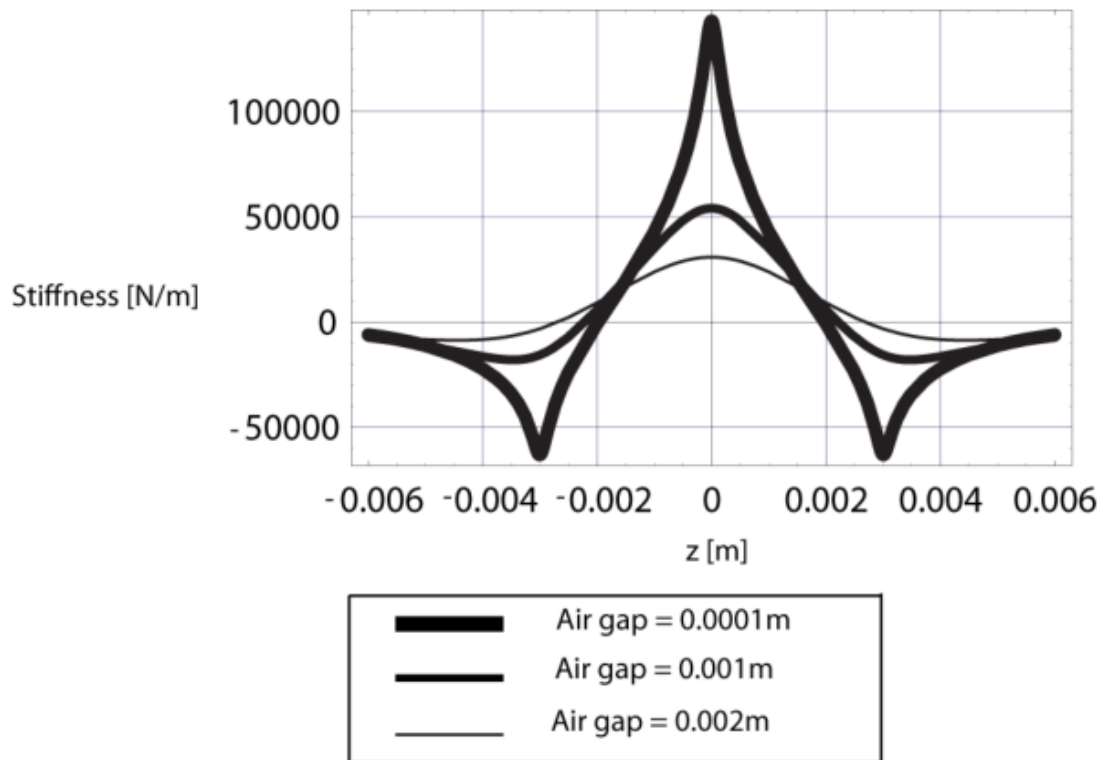
##### 4.1 Ilmarako

Ilmaraon mittasuhteiden vaikutus passiivisten magneettilaakereiden toimintaan on merkittävä. Mitä pienempi ilmarako kestopagneettien välillä on, sitä suurempi aksiaalinen voima on. Siten on yritettävä saada tehtyä mahdollisimman pieni ilmarako. Maksimaalinen voima riippuu ilmaraon leveydestä, joten magneettien kaarevuus on otettava huomioon suunnittelussa, jos haetaan tarkasti piste, jossa saadaan maksimaalinen voima magneettien välille. On siis valittava magneettien suhteellinen korkeus ilmaraon leveyden suhteen. Aksiaalisen voiman suuruudet eri ilmaraon pituuksille on esitettyä kuvassa 4.1.1.(Ravaud 2009)



Kuva 4.1.1 Magneettisen voiman aksiaalinen komponentti kahden kestmagneetin välissä verrattuna sisemmän renkaan aksiaaliseen siirtymään eri ilmaraon pituuksilla. Kuvasta nähdään se, että mitä pienempi ilmaraako on, sitä suurempi magneettinen voima on (Ravaud 2009).

Laakerin jäykkyys riippuu suuresti ilmaraon leveydestä. Mitä pienempi ilmaraon leveys on, sitä suurempi on aksiaalinen jäykkyys. Aksiaalinen voima on minimissään, kun aksiaalinen jäykkyys on nolla. Tämä ilmaraon vaikutus jäykkyyteen on esitetty kuvassa 4.1.2.(Ravaud 2009)



Kuva 4.1.2 Magneettisen voiman aksiaalinen jäykkyys kahden kestopagneetin välissä verrattuna sisemmän renkaan aksiaaliseen siirtymään eri pituisille ilmaraoille. Kuvasta nähdään se, että mitä pienempi ilmarakon pituus on, sitä suurempi aksiaalinen jäykkyys on, ja se, että aksiaalinen jäykkyys on suurimmillaan nollassiirtymällä (Ravaud 2009).

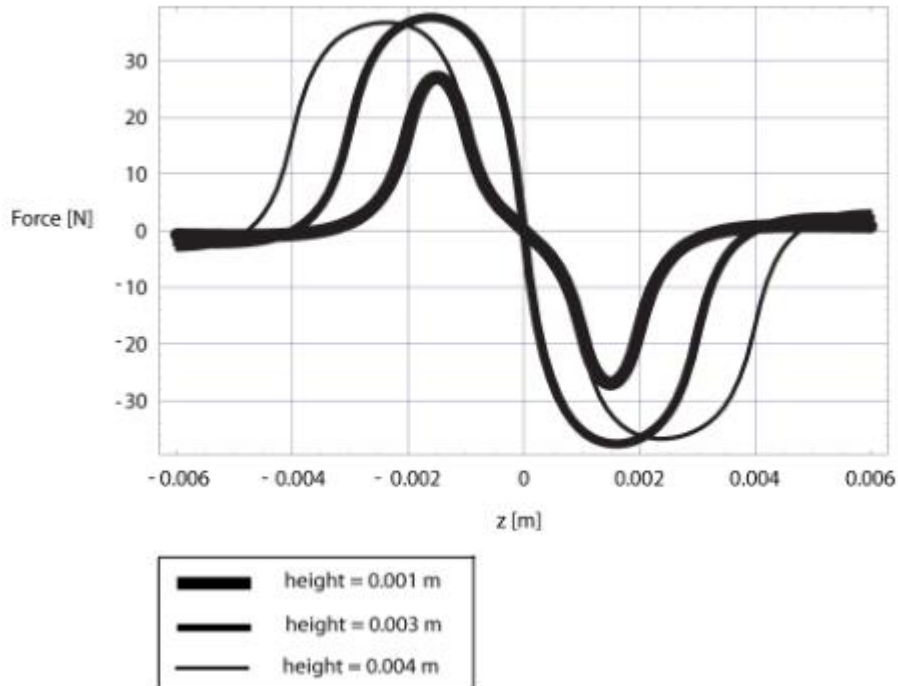
## 4.2 Sisempi rengas

Passiivisissa magneettilaakereissa on tärkeää valita sisemmän renkaan mittasuhteet oikein, jotta saadaan mahdollisimman suuri jäykkyys tai voima. Sisemmän renkaan mittasuhteita pitää verrata ulomman renkaan mittasuhteisiin, jos halutaan optimoida järjestelmän parametreja. Aksiaalisessa ja radiaalisessa magnetoinnissa ei ole eroja näiden optimointien lopputulosten suhteen, paitsi kohdissa, joissa se on erikseen mainittu. (Ravaud 2009)

### 4.2.1 Korkeus

Kun sisemmän renkaan korkeus on pienempi kuin uloimman niin, mitä pienempi sisemmän renkaan leveys on, sitä pienempi magneettivoiman aksiaalinen komponentti on. Kun taas sisemmän renkaan korkeus on suurempi kuin ulomman niin, mitä suurempi sisemmän renkaan leveys on, sitä pienempi magneettivoiman aksiaalinen komponentti on. Siten magneettisen voiman aksiaalinen komponentti on suurimmillaan, kun sisemmän renkaan korkeus on

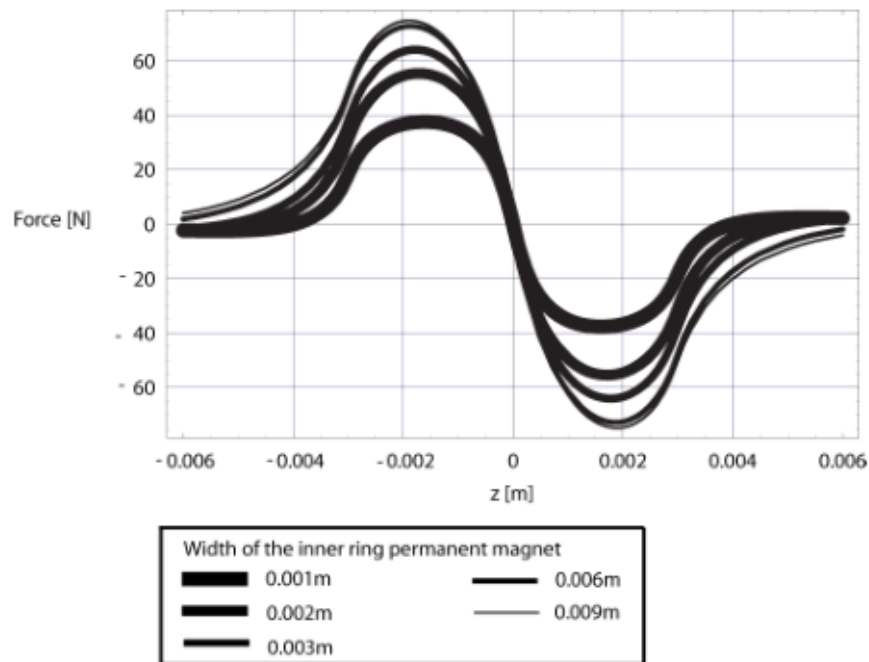
yhtä suuri kuin uloimman renkaan korkeus. Tämä magneettivoiman vertaus aksiaaliseen siirtymään on esitetty kuvassa 4.2.1.1. (Ravaud 2009)



Kuva 4.2.1.1 Magneettisen voiman aksiaalinen komponentti kahden kestopagneetin välissä verrattuna sisemmän renkaan aksiaaliseen siirtymään eri sisemmän renkaan korkeuksilla. Kuvassa uloimman magneettirenkaan korkeus on 0.003 metriä. Kuvasta nähdään se, että maksimaalinen voima saadaan, kun sisemmän renkaan korkeus on yhtä suuri kuin ulomman renkaan korkeus (Ravaud 2009).

## 4.2.2 Leveys

Sisemmän renkaan leveydellä on suuri vaikutus magneettivoiman aksiaaliseen komponenttiin. Mitä suurempi sisemmän renkaan leveys on, sitä suurempi magneettivoiman aksiaalinen komponentti on. Kun otetaan huomioon magneetin hinta ja vähenevät hyödyt leveyden kasvaessa, hyvä kompromissi sisemmän renkaan leveydeksi on kaksi kertaa sen korkeus. Magneettivoiman aksiaalinen komponentti kahden kestopagneetin välissä verrattuna sisemmän renkaan aksiaaliseen siirtymään eri sisemmän renkaan leveyksillä on esitetty kuvassa 4.2.2.1.(Ravaud 2009)



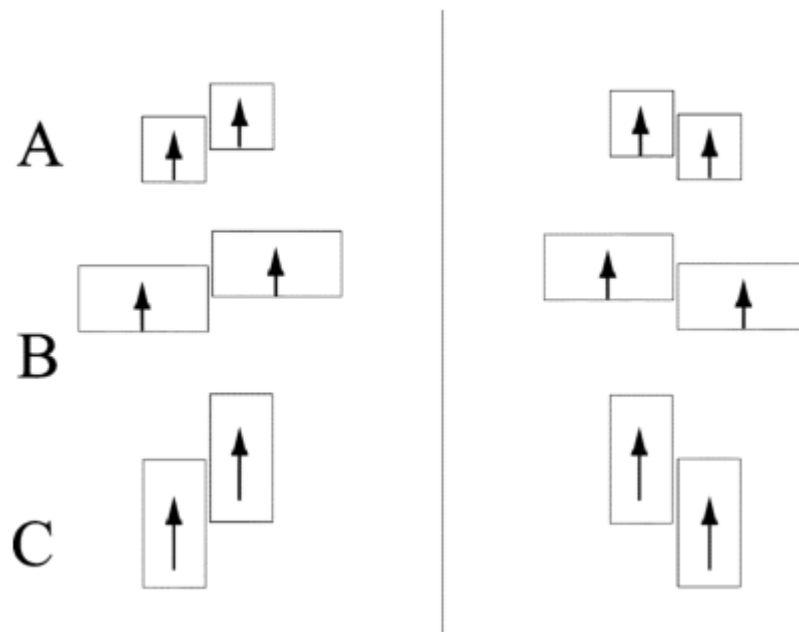
Kuva 4.2.2.1 Magneettivoiman aksiaalinen komponentti kahden kestmagneetin välissä verrattuna sisemmän renkaan aksiaaliseen siirtymään eri sisemmän renkaan leveyksillä. Kuvassa käytetyn sisemmän magneettirenkaan korkeus on 0.003 metriä. Kuvasta nähdään se, että suurempi kuin kaksi kertaa sisemmän magneettirenkaan korkeus magneettirenkaan leveydelle ei tuo enää merkittäviä lisäyksiä magneettivoimaan (Ravaud 2009).

### 4.3 Ulompi rengas

Ulomman renkaan mittasuhteiden optimointi on tärkeä osa passiivisen magneettilaakerin toiminnan optimointia. Vaihtoehtoina renkaat A, jossa poikkileikkaukset ovat neliöitä. Toisena vaihtoehtona B, jotka ovat suorakulmioita, joiden leveys on kaksi kertaa suurempi kuin niiden korkeus. Kolmantena vaihtoehtona C, joiden poikkileikkaukset ovat suorakulmioita,



joissa korkeudet ovat kaksi kertaa suuremmat kuin leveydet. Kuva näistä renkaista aksiaalisessa magnetoinnissa on esitetty kuvassa 4.3.1.(Ravaud 2009)

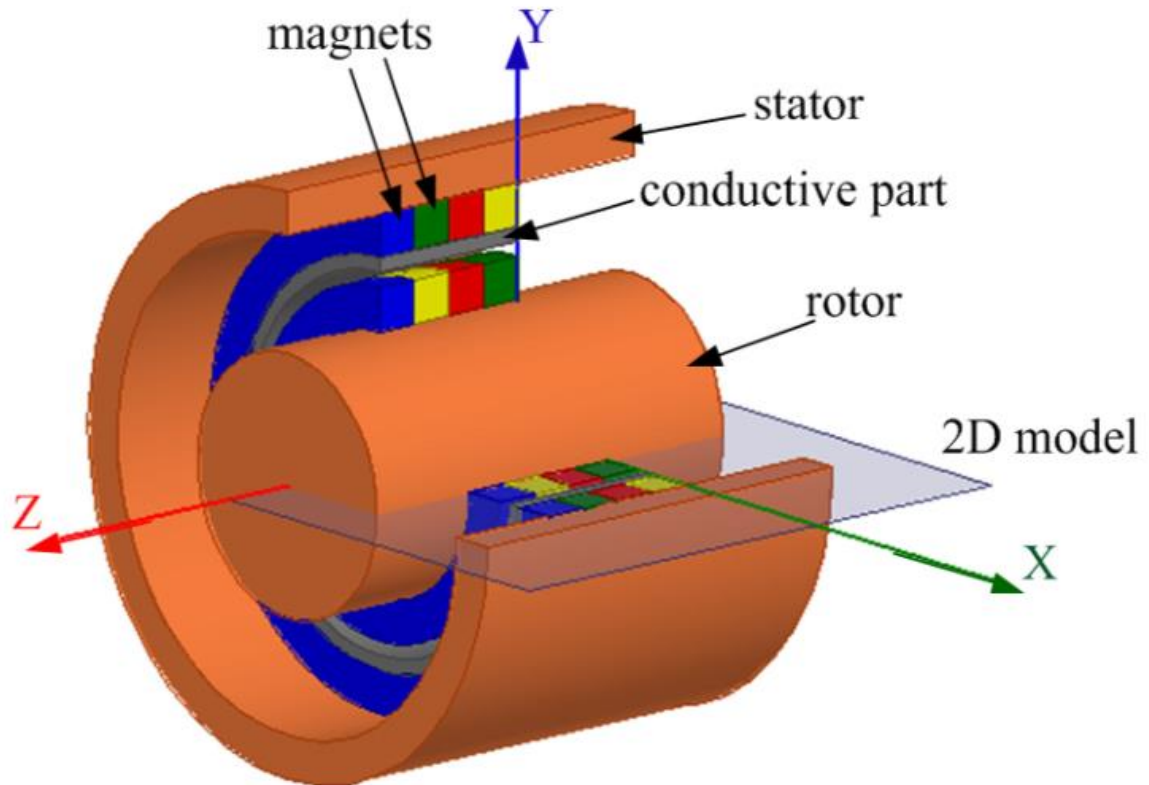


Kuva 4.3.1 Aksiaalisen magnetoinnin vaihtoehtoiset ulomman renkaan mittasuhteet A-C (Ravaud 2009).

Radiaalisella magnetisaatiolla kuvan 4.3.1 vaihtoehto B on näistä paras ja aksiaalisella magnetisaatiolla vaihtoehto B tai C ovat käyttökelpoisia, mutta B on niistä paras.(Ravaud 2009)

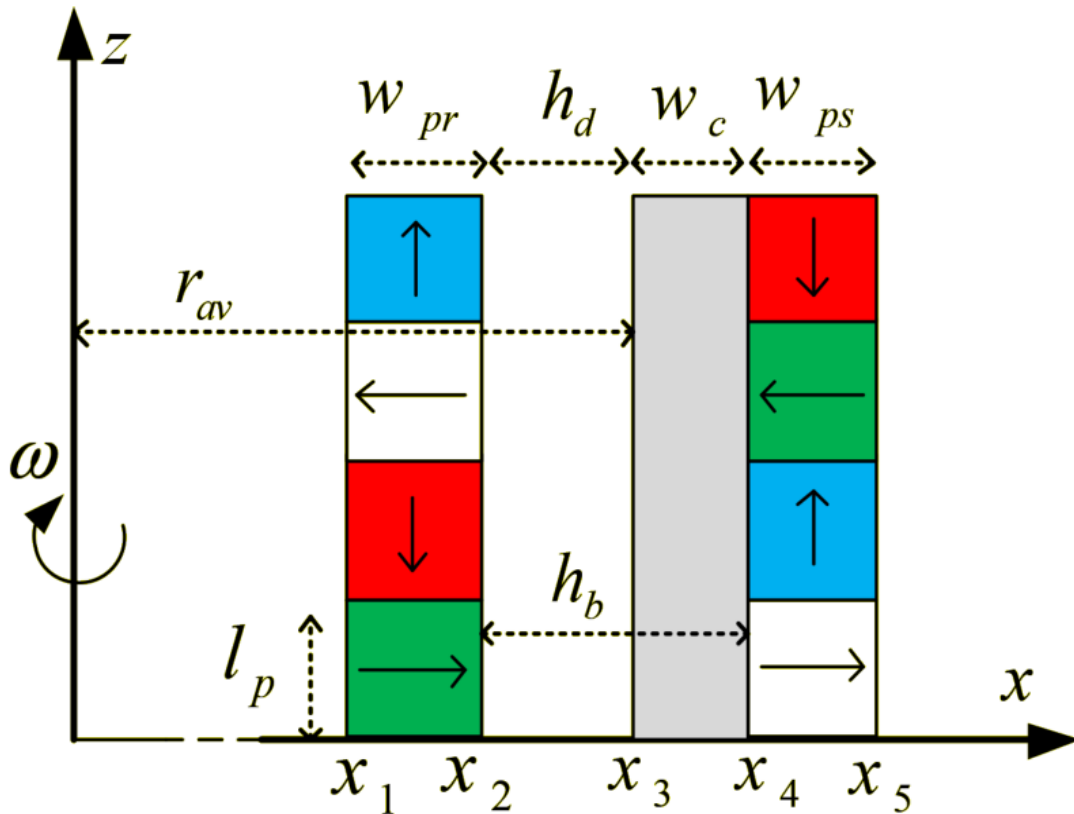
#### 4.4 Johtava kerros staattorin tai roottorin magneettien välissä

Passiivisten magneettilaakereiden suuri negatiivinen puoli on niiden suhteellisesti huono vaimennus verrattuna aktiivisiin magneettilaakereihin. Halbach array -tekniikka ja pehmeiden magneettisten materiaalien käyttö voi kasvattaa jäykkyyttä korkeisiin arvoihin. Muita tapoja parantaa vaimennusta on erillisten laakereiden ja vaimentimien käyttäminen, mutta se lisää laakerien ja todennäköisesti käytettävien magneettien kokoa. Johtavan kerroksen lisääminen staattorin tai roottorin magneettien väliin vähentää laakerin jäykkyyttä, koska se lisää ilmavälän pituutta. Vaimennuksen lisäys on kuitenkin huomattava ja jäykkyyden väheneminen on pientä. Johtava kerros saa aikaan aksiaalisen ja radiaalisen vaimennuksen, kun taas jäykkyys perustuu roottorin ja staattorin väliseen magneettiseen voimaan. Kolmiulotteinen malli ehdotetusta laakerista on esitetty kuvassa 4.4.1.(Safaeian 2019)



Kuva 4.4.1 Ehdotetun kompaktin passiivisen magneettilaakerin 3D-malli. Kuvassa esitettynä staattori, roottori, johtava kerros, magneetit ja 2D-mallin poikkileikkaus (Safaeian 2019).

Samankaltaiset kestmagneettirenkaat Halbach array -muodostelmassa ja ei-ferromagneettiset materiaalit roottorin ja staattorin magneettien takana muodostavat ehdotetun passiivisen magneettilaakerin. Jäykkyys muodostuu riippumatta roottorin nopeudesta ja voimasta kestmagneettien välillä, mutta kun roottori pyörii, niin johtavassa kerroksessa ilmaraossa muodostuu pyörrevirtoja magneettikentän variaatioiden takia. Näiden virtojen vuorovaikutus kokonaismagneettikenttiin muodostaa tarvittavan vaimennuksen. Aksiaalisen vaimennuksen kohdalla ei ole merkitystä, onko johtava kerros staattorissa vai roottorissa. Laittamalla johtavan kerroksen roottoriin, muodostuu kuitenkin vaihe-ero indusoidun virran ja magneettikentän välille. Laakerin kokonaispituutta saadaan lyhennettyä käyttämällä tätä mallia. Ehdotetun magneettilaakerin 2D-malli on esitetty kuvassa 4.4.2.(Safaeian 2019)



Kuva 4.4.2 2D-malli ehdotetusta magneettilaakerista. Kuvassa näkyy magneettien Halbach array -to- teutus, jossa pieniä magnetisoituja kappaleita asetellaan eri suuntiin magnetisoituna. Li- säksi nähdään harmaalla ehdotettu johtava kerros (Safaeian 2019).

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Passiivinen magneettilaakeri on tällä hetkellä vähemmän käytetty kuin aktiivinen magneettilaakeri teollisuuden käyttökohteissa. Aktiivisen ohjausjärjestelmän hinnat ovat laskeneet vuosi vuodelta alaspäin teknologian kehittyessä, ja se vähentää tarvetta käyttää passiivisia magneettilaakereita. PMB-tekniikan suurimmat huonot puolet ovat se, että värähtelyä ei pystytä kompensoimaan, ja se, että ne eivät kestä korkeita kuormia. Molempia näistä huonoista puolista voidaan kompensoida lisäämällä laakeriin aktiivista säätöä, joten AMB- ja HMB-tekniikka molemmat korjaavat, ainakin osittain, PMB-tekniikan suurimmat puutteet. Aktiivisen säädön lisääminen ei kuitenkaan onnistu jokaisessa käyttötapauksessa: ei esimerkiksi silloin, kun aktiivista säätöä vaativaa sähköä ei ole saatavilla, tai kun halutaan mahdollisimman pienet häviöt. Valinta passiivisen, aktiivisen tai hybridin magneettilaakerin väliltä käyttötarkoituksessaan on siis lopulta monimutkainen, koska mikään niistä ei ole paras kaikilla osa-alueilla, vaan jokaisella on omat hyötynsä ja heikkoutensa. Valinta eri laakerityyppien välillä on siis hyvin riippuvainen ominaisuuksista, joita prosessi vaatii ja ominaisuuksista mitä tietyllä laakerityypillä on, eikä voida yleisesti sanoa, että jokin laakerityyppi on aina paras kaikenlaisiin prosesseihin.

Tässä kappaleessa esitellään myös laakereiden etuja ja haittoja kuvaava taulukko 5.1. Taulukossa käsitellään passiiviset magneettilaakerit, mekaaniset laakerit, aktiiviset magneettilaakerit ja hybridit magneettilaakerit. Hinta nousee lisäkomponenttien kautta aktiivisissa magneettilaakereissa suurimmaksi. Voima ja jäykkyys jäävät passiivisen magneettilaakerin heikkoudeksi, mutta mekaanisen laakeroinnin parhaimmaksi puoleksi. Näissä kategorioissa HMB ja AMB ovat tasoissa, riippuen niiden toteutuksesta. PMB on paras hyötysuhteessa, siitä vähän jäljessä ovat AMB ja HMB, ja mekaaninen laakeri on selvästi huonoin. Sähkön ja huollon tarve taas ovat yksiselitteiset eri laakereiden komponenttivaatimusten perusteella. Taulukosta nähdään se, että passiiviset magneettilaakerit ovat huonoimpia voimassa ja jäykkyydessä, mutta jos prosessi saa kompensoitua ne jotenkin muuten, siitä tulee varteenotettava vaihtoehto. AMB ja HMB näyttävät taulukon mukaan olevan hyvä kompromissi kaiken suhteen. Mekaaninen laakeri taas kärsii muihin verrattuna tärkeimmässä ominaisuudessa, hyötysuhteessa.

Taulukko 5.1 Taulukko passiivisten magneettilaakereiden, mekaanisten laakereiden, aktiivisten magneettilaakereiden ja hybridien laakereiden eduista ja haitoista Numeroidut osat on numeroitu luvuin 1-4 tai 1-3; suurempi numero tarkoittaa suurempaa voimaa, jäykkyyttä tai hyötysuhdetta. Hinta on merkittynä käänteisesti, mekaanisen laakerin ollessa halvin ja aktiivisen magneettilaakerin ollessa kallein.

	PMB	Mekaaninen laakeri	AMB	HMB
Hinta	3	4	1	2
Voima	1	3	2	2
Jäykkyys	1	3	2	2
Hyötysuhde	3	1	2	2
Sähkön tarve	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Huollon tarve	Ei	Kyllä	Ei	Ei

## 6. YHTEENVETO

Kitkan voittaminen, tehokkuuden parantaminen ja levitaation mahdollistaminen ovat tavoitteita monissa eri käyttötarkoituksissa. Passiiviset magneettilaakerit ovat yksi tapa mahdollistaa tämä tavoite. Ne ovat hyötysuhteeltaan parempia kuin mekaaniset laakerit ja ohjausjärjestelmiltään, huollon tarpeeltaan ja hinnaltaan parempia kuin aktiiviset magneettilaakerit ja hybridit magneettilaakerit. Niillä on useita tulevaisuuden käyttökohteita, esimerkiksi tuulimyllyissä ja vauhtipyöräparistoissa. Eduskunnan tulevaisuusvaliokunnan mukaan tekniikka kuuluu yhteiskunnan toimintamallit uudistaviin radikaaleihin teknologioihin.

Työssä on selitetty mitä passiiviset laakerit ovat, miten ne toimivat, ja missä niitä käytetään. Työssä on myös selvitetty, miten passiiviset magneettilaakerit vertautuvat mekaanisiin laakereihin, ja AMB- ja HMB-tekniikkaan. Lisäksi käytiin läpi Halbach array -tekniikka, suprajohteet ja vakaa levitaatio. Työssä selvitettiin optimaaliset mittasuhteet ilmaraon pituudelle, sisemmän renkaan pituudelle ja leveydelle ja uloimmalle renkaalle. Sen lisäksi selvitettiin, että johtava kerros staattorin ja rottorin magneettien välissä parantaa laakerin vaimennusta huomattavasti.

Tämän työn tavoite tutkia passiivisten magneettilaakerien käyttökelpoisuutta verrattuna vaihtoehtoiseen tekniikkaan on enimmäkseen onnistunut. Puutteina työlle ja jatkokehitysmahdollisuutena on myös laskennan ja johtopäätöksiin johtaneiden yhtälöiden näyttäminen ja lisätutkinta yksittäisiin työn osa-alueisiin liittyen. Laskennat ovat yleisesti pitkiä, joten vain lopputulokset ja niihin johtaneet kuvaajat ovat esitettyinä.

## LÄHTEET

Bachovchin, K.D., Hoburg, J.F. & Post, R.F. 2013. Stable Levitation of a Passive Magnetic Bearing. *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 49, no 1, s. 609-617.

Kubernuss, J., Jian, C. Wang, J. et al. 2012. A novel magnetic levitated bearing system for Vertical Axis Wind Turbines (VAWT). *Applied Energy*, vol. 90, no 1, s. 148-153.

Linturi, R. & Kuusi, O. 2018. Suomen sata uutta mahdollisuutta 2018-2037. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.10.2019]. Saatavissa [https://www.eduskunta.fi/FI/tietoaeduskunnasta/julkaisut/Documents/tuvj\\_1%2B2018.pdf](https://www.eduskunta.fi/FI/tietoaeduskunnasta/julkaisut/Documents/tuvj_1%2B2018.pdf)

Maslen, E. H. & Schweitzer, G. 2009. *Magnetic Bearings*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Murakami, K., Komori, M. & Mitsuda, H. 2007. Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB. *IEEE Trans. Applied Superc.*, vol. 17, no 2, s. 2146-2149.

Ravaud, R., Lemarquand, G. & Lemarquand, V. 2009. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 1: Axial Magnetization. *IEEE Trans. Magnetics.*, vol 45, no 7, s. 2996-3002.

Ravaud, R., Lemarquand, G. & Lemarquand, V. 2009. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 2: Radial Magnetization. *IEEE Trans. Magnetics.*, vol 35, no 9, s. 3334-3342.

Safaeian, R., Heydari, H. 2019. Optimal design of a compact passive magnetic bearing based on dynamic modelling. *IET Electric Power Applications*, vol. 13, no 6, s. 773-782.

Siddhart, P. & Hearn, C. S. 2015. 3-D Transient Modeling of Bulk High-Temperature Superconducting Material in Passive Magnetic Bearing Applications. *IEEE Trans. Applied Superc.*, vol. 25, no 5.

Tănase, N & Morega, A.M. 2014. Passive magnetic bearings for flywheel energy storage - Numerical design. *Passive magnetic bearings design. Conf. Rec. IEEE ICATE, Craiova, Romania*. Oct. 23-25.

Tir, M.A., Mirimani, S.M. & Marignetti, F. 2014. A novel structure of passive magnetic bearing with axial magnetization. *Conf. Rec. PEDSTC, Tehran, Iran*. Feb 5-6. S.311-316.

Yonnet, J.-P. 1978. Passive magnetic bearings with permanent magnets. IEEE Trans. Magnetics., vol 14, no 5, s. 803-805.