



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Elmotordesign för elektriska flygplan

Electric motor design for aviation

Jakob Andreasson
Jonas Berlin
Marcus Bohlin
Adam Helsing
Alexander Lindvall
Simon Rimborg

Handledare: Göran Stigler
Examinator: Anders Forslund

Kandidatarbete inom industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2018

Sammandrag

För att reducera de framtida koldioxidutsläppen från flygindustrin krävs ett skifte mot eldrivna flygfarkoster. Den här rapporten som har genomförts på Chalmers tekniska högskola undersöker hur BLDC-motorer påverkas av de olika parameterintervall som görs under designprocessen. Projektet har ämnat att besvara frågor om hur BLDC-motorer fungerar och hur de ingående parametrarna påverkar motorns prestanda samt massa.

Det erhållna resultatet visar hur en BLDC-motor fungerar och ger den teoretiska bakgrunden till de olika parameterintervallen. Det som inte lyckades besvaras var hur parameterintervallen påverkade varandra och vilken inverkan som interaktionerna hade på motorprestandan. Däremot har enskilda parameterintervall med positiv inverkan på motorprestandan identifierats och ett flertal rekommendationer framförts. Projektet har ej analyserat styrsystem eller kombinationen av motor och propeller.

Abstract

In order to reduce the future carbon dioxide emissions produced by aviation a shift towards electric propulsion aircraft is required. This paper has been produced at Chalmers University of Technology and examines BLDC-motor design and the impact of different motor parameters on performance and mass.

The project has successfully examined how a BLDC-motor functions and the theoretical background of motor parameters. However, the impact of the interactions between the different motor parameters on performance has not been fully answered. Instead, individual design choices that increase motor performance have been identified, and recommendations are made regarding design choices for electric aircraft propulsion. The paper has not considered the motor control system nor the combination of motor and propeller.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Mål	2
1.3	Frågeställningar	3
1.4	Uppgift och problem	3
1.5	Avgränsningar	3
1.6	Resurser	4
1.7	Etiska aspekter	4
2	Metod	5
2.1	Praktisk övning	5
2.2	Litteraturstudie	5
2.3	Intervjuer	5
2.4	Simulering	6
2.5	Prototyp tillverkning	6
3	Teori	7
3.1	Elmotorns historia	7
3.2	Elmotorns grundprinciper	7
3.3	BLDC-motorn	8
3.3.1	Motorkonstanter	9
3.3.2	Motelektromotorisk kraft	9
3.3.3	Motortyper	10
3.3.4	Faser	11
3.3.5	Poler	11
3.3.6	Rotor- och statorradie	12
3.3.7	Luftgap	13
3.3.8	Anslutning	13
3.4	Stator	14
3.4.1	Lindningstyper	15
3.4.2	Lindningstrådegenskaper	17
3.5	Rotor	18
3.5.1	Permanentmagneter	18
3.5.2	Magnetuppsättning	22
3.6	Kylning	23
4	Simuleringar	25
4.1	Permanentmagneter	25
4.2	Kylning	26
5	Resultat och diskussion	27
5.1	Hur fungerar en BLDC-motor och hur ser de tekniska parametrarna ut för dagens BLDC-motorer?	27

Innehåll

5.2	Vad är det som sätter begränsningarna för BLDC-motorer?	28
5.3	Vilka tekniska parametrar har störst påverkan på BLDC-motorer? . .	28
5.3.1	Motortyper	28
5.3.2	Poler	29
5.3.3	Faser	29
5.3.4	Lindningar	29
5.3.5	Anslutning	29
5.3.6	Magneter	30
5.3.7	Kylning	34
6	Prototyp tillverkning	35
7	Slutsats	39
A	Datablad	41
B	Ritningar	43
	Referenser	47

Ordlista

Koercivitet	Den magnetiska fältstyrkan som krävs för att totalt avmagnetisera en magnet
Konduktivitet	Ett mått på materials elektriska ledningsförmåga
Kuggmoment	Momentet som uppstår på grund av den magnetiska interaktionen mellan permanentmagneter och statortänder
Permeabilitet	Ett mått på materials förmåga att upprätthålla ett magnetiskt fält
Reluktans	Magnetiskt motstånd i en magnetisk krets
Remanens	Den magnetisering som är kvar hos ett ferromagnetiskt material efter att ett externt magnetiskt fält har avlägsnats
Rippel	Periodiska variationer i vridmomentet som uppstår på grund av kuggmoment eller koncentrerade lindningar

1. Inledning

I dag står den globala flygindustrin för 2 % av det totala koldioxidutsläppet. Den procentsatsen förväntas öka till mellan 12-27 % innan år 2050 beroende på efterfrågan [1], [2]. Elbilar och förnyelsebar energiproduktion har fått stort utrymme i media och det läggs stora resurser på att utveckla nya lösningar inom dessa områden, vilket exempelvis kan ses på Volvo Cars offentliga aspirationer för elektrifiering [3]. Flygindustrin ligger efter när det gäller att skifta till elektriska lösningar [4].

De förbränningsmotorer som används i dagens flygplan har utvecklats sedan den kommersiella luftfartens begynnelse på 1930-talet [5]. Sedan dess har verkningsgraden och bränsleförbrukningen förbättrats, främst på grund av att gasturbinerna har gjorts större. I dag har förbränningsmotorerna nått en kritisk storlek där ytterligare förstoringar skulle leda till att de krafter som uppstår på grund av luftmotståndet, i kombination med den ökade vikten, skulle ha en negativ inverkan på verkningsgraden [6]. För att ytterligare förbättra verkningsgraden måste flygindustrin därför utforska nya metoder.

Elektriska flygplan är ett möjligt framtida alternativ till traditionella jetdrivna flygplan. Borstlösa permanentmagnetiserade motorer (BLDC-motorer) används i dagens elflygplan på grund av sin låga massa och höga pålitlighet [7]. Att optimera BLDC-motorer är därför ett relevant ingenjörspå problem. I dagens flygplan står bränslet för cirka 40 % av startvikten [8], och flygbränslet har betydligt högre energidensitet än dagens litiumjonbatterier [9], [10], [11]. Det här betyder att om förbränningsmotorerna byts ut mot elmotorer skulle batterilasten vara så stor att utrymmet för passagerare eller annan last blir minimalt. Därav är det viktigt att optimera BLDC-motorerna i mån att kunna utnyttja den begränsade batterikapaciteten i största möjliga utsträckning [12]. På grund av den lägre energidensiteten i batterierna har elflygplan en kortare räckvidd jämfört med traditionella flygplan. Ungefär 40 % av alla flygturer inom Europa är kortare än 75 mil och skulle kunna trafikeras av elflygplan [13], vilket är en mer realistisk räckvidd för eldrivna passagerarflygplan.

Nästa steg ned i storleksordningen från eldrivna kortdistansflyg är farkoster eller drönare avsedda för en eller ett fåtal individer. Tanken med dessa farkoster är att de skall ha en räckvidd på cirka 100 kilometer, vara helt autonoma och ha som syfte att transportera personer inom tätbebyggda områden. I dagsläget finns det ett flertal företag som arbetar med det här, exempelvis Airbus och Volocopter, Volocopters drönare kan ses i figur 1.1. Även Uber lägger ned stora resurser på att utveckla en lösning för hur dessa farkoster skall kunna integreras i dagens stadsbild [14].



Figur 1.1: Volocopter 2X. Från [15], CC-BY.

Trots det ökade antalet fordon på vägarna i städerna förblir transportmöjligheterna i luftrummet mestadels outnyttjat [16], bland annat på grund av bullerlagarna som finns för flygtrafik [17]. Med de tystare BLDC-motorerna kommer det däremot vara möjligt att utnyttja luftrummet. Det är motorer till dessa kortdistansflyg och drönare som rapporten kommer att behandla.

1.1. Syfte

Projektets övergripande syfte är att bidra till en mer miljövänlig flygindustri. Projektet ämnar att undersöka vilka faktorer som har störst påverkan på massa och prestanda i BLDC-motorer för flygtillämpningar.

1.2. Mål

Målet med projektet är att genom en ingenjörsmässig arbetsgång ta reda på vilka parametrar som har störst påverkan på dagens elmotorer anpassade för elektriska flygplan. Målet är även att redovisa vilka av dessa parametrar som sätter begränsningarna för att kunna tillverka effektivare elmotorer. De kunskaper som inhämtas under arbetets gång skall sedan användas för att generera en prototyp på en optimerad BLDC-motor. Dessa mål skall vara uppfyllda före den första juni 2018.

1.3. Frågeställningar

Inom flygindustrin är det av största intresse att optimera den effekt som går att utvinna per massenhet, således kommer projektet fokusera på att ta reda på vad som har störst påverkan på motorns effekt, verkningsgrad och massa. Projektet ämnar att utreda och besvara följande frågeställningar.

1. Hur fungerar en BLDC-motor?
2. Hur ser de tekniska parametrarna ut för dagens BLDC-motorer?
3. Vad är det som sätter begränsningarna för BLDC-motorer?
4. Vilka tekniska parametrar har störst påverkan på BLDC-motorer?

Genom att besvara dessa frågeställningar avser projektgruppen att redogöra vad som kännetecknar en BLDC-motor väl anpassad för framtidens flygindustri.

1.4. Uppgift och problem

Elmotordesign består av flera design- och parameterval. Ett av designvalen är permanentmagneternas dimensionering och placering i rotorn, vilket påverkar magnetfältets styrka och riktning. Vidare är ett designval lindningarna på statorn och antalet faser, som skapar de elektromagnetiskafälten, vilka har undersökts. Parameterval för utformningen av stator och rotor har också analyserats för att kunna utröna de mest optimala valen för en BLDC-motor.

1.5. Avgränsningar

Endast BLDC-motorer behandlas under projektet då det är den elmotortyp som är bäst lämpad för flygapplikationer. Projektet behandlar endast motorkonstruktionen och därför undersöks inte reglersystem för styrning.

Projektet fokuserar på motorns elektromagnetiska egenskaper, således kommer det ej tas hänsyn till kombinationen motor och propeller då det är ett komplext område som det ej finns utrymme att undersöka. Vidare faller driftsäkerhet samt underhåll utanför ramen för projektet på grund av den bristande möjligheten att samla in pålitliga data, eftersom det skulle kräva att motorn körs i olika typer av miljöer med verklighetstroga laster under en längre tid. Maskinelement såsom kullager, skruvförband samt axlar är mycket viktiga för att nå en hög verkningsgrad och god hållfasthet. På grund av att det är en vetenskap i sig kommer inte några djupare analyser inom maskinelement göras. Materialval och produktionsmetoder kommer inte att kostnadsoptimeras. Produkten anses ändå ligga inom en rimlig produktionskostnad.

1.6. Resurser

Projektet har tillgång till material för upp till 2 000 SEK genom Maskinsektionens prototypverkstad. Därtill kan extra resurser efterfrågas via institutionen för Industri- och materialvetenskap. Trä- och metallkonstruktion kan utföras i prototypverkstaden under schemalagd tid. Detaljer kan printas kontinuerligt med prototypverkstadens 3D-skrivare genom handledare Göran Stigler, vars kunskaper om additiv tillverkning finns tillgängliga. För modellering och simulering finns CATIA V5 och ANSYS tillgängliga. Även personal på Chalmers tekniska högskola med kompetens inom området kan kontaktas för vägledning eller intervjuer.

1.7. Etiska aspekter

En framtid där fler flygplan drivs av elektricitet istället för traditionellt flygbränsle kommer leda till lägre totalutsläpp. I stället för att använda flygbränsle kommer batterier nyttjas för att driva motorerna. Om förbränningsmotorer nyttjas på samma vis som i dagsläget kommer inte EU:s klimatmål Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 eller 4.5 att uppnås. Dessa mål behandlar i vilken mån växthusgasers koncentration väntas öka eller stagnera årligen [18]. Projektet har viss potential att minska de globala koldioxidutsläppen då en övergång till elektriska flygplan krävs för att uppnå en hållbar framtid.

I dagsläget är det litiumjonbatterier som i huvudsak används i till exempel mobiler, datorer och elfordon. Dessa batterier innehåller ämnen såsom nickel och kobolt vilka i tillverkningsprocessen kan bidra till miljö- eller hälsofara [19]. Det finns även vissa magneter som innehåller kobolt för att få bättre temperaturtoleranser [20]. I dagsläget bryts 51 % av världens kobolt i Kongo-Kinshasa [21] och UNICEF upplyser att det råder dåliga arbetsförhållanden och barnarbete i dessa gruvor [22]. Framsteg inom elmotorapplikationer kan öka efterfrågan på kobolt och därmed bidra till den etiska utvinningen av tungmetallen.

Genom att flygindustrin skiftar från jet- till elmotorer kommer även bullernivån att sänkas. En minskad bullernivå kommer att leda till en bättre levnadsstandard för människor som i dag störs av flygplansljud och kan även bidra till ett rikare djurliv i områden som tidigare haft en hög bullernivå [23]. Ytterligare en fördel med den minskade bullernivån från flygplatser är att de kan byggas närmare städer och på så vis minska utsläppet från fordon som transporterar personer och gods fram och tillbaka till flygplatsen.

2. Metod

För att bygga kunskap om elmotordesign gjordes litteraturstudier, intervjuer och simuleringar. Inledningsvis utfördes en praktisk övning där en motor tillverkades efter givna instruktioner. Som ett slutmoment tillverkades även en prototyp för att visa på några av de parametrar som är lämpliga för en BLDC-motor för flygapplikationer.

2.1. Praktisk övning

Som ett inledande moment konstruerades och analyserades Christoph Laimers 600W motor. Bygginstruktioner hämtades från webbsidan Instructables [24]. Färdiga CAD-filer fanns redo för 3D-skrivning och en inköpslista på resterande komponenter nödvändiga till motorn fanns tillgänglig. Övningen hade som enda syfte att ge förståelse om BLDC-motorer samt de problem som kan uppstå vid tillverkningen av en fysisk prototyp.

2.2. Litteraturstudie

Genom litteraturstudier hämtades kunskap om BLDC-motorers uppbyggnad, ingående komponenter och deras designmöjligheter. Studier av relevanta faktaböcker och forskningspublikationer genomfördes för att hitta teoretiska samband som beskriver fördelar och nackdelar av dessa designmöjligheter. Med hjälp av litteraturstudien togs det fram utförliga beskrivningar av en BLDC-motors designmöjligheter vilka redogörs i kapitel 3.

För att få en överblick över hur BLDC-motorer ser ut i dagsläget genomfördes även en analys av elmotormarknanden. BLDC-motorer kartlades och ett datablad med motorernas parametervärden sammanställdes och analyserades. Databladet finns presenterat i appendix A. Process syftade till att samla kunskap om trender och belysa vilka aspekter av motorer som bestämmer prestandan.

2.3. Intervjuer

För att få fördjupad kunskap och kunna diskutera det som tagits fram i litteraturstudien genomfördes två intervjuer. Den första var med Thomas Hammarström, tekniklektor på Elkraft vid Chalmers tekniska högskola. Thomas har forskat på lindningar till elmotorer. Den andra intervjun gjordes med Johan Åström, forsknings- och utvecklingsingenjör på Aros Electronics AB. Aros utvecklar och säljer elmotorer för industri- och fordonsapplikationer. Intervjuerna var semistrukturerade i syfte att få intervjupersonens tankar på de problem som finns vid design av BLDC-motorer.

2.4. Simulering

På grund av komplexiteten som uppstår i designen av en BLDC-motor är det inte möjligt att optimera vissa parametrar med analytiska uttryck. Därför används analyser med finita elementmetoden (FEM) för att undersöka hur permanentmagneternas form och konfiguration påverkar det kringliggande magnetiska fältet, samt hur stor skillnad kylflänsar på motorn gör för att kyla motorn. Beskrivningar av dessa simuleringar finns under kapitel 4.

2.5. Prototyp tillverkning

Med den kunskap som tagits fram om BLDC-motorer genererades ett koncept som var anpassat för flygapplikationer. Utifrån konceptet gjordes en CAD-modell i CATIA V5. En utförlig beskrivning av prototypens tillverkningsprocess ges i kapitel 6.

3. Teori

Det här kapitlet syftar till att redogöra för den kunskap om BLDC-motorer som anskaffats genom de litteraturstudier som har utförts under projektets gång. Avsnittet inleds med en historisk bakgrund av elmotorn samt en förklaring till varför det skett ett skifte från nyttjandet av borstade elmotorer till borstlösa likströmsmotorer. Därefter presenteras den underliggande teorin samt de olika designmöjligheter som finns hos en BLDC-motor.

3.1. Elmotorns historia

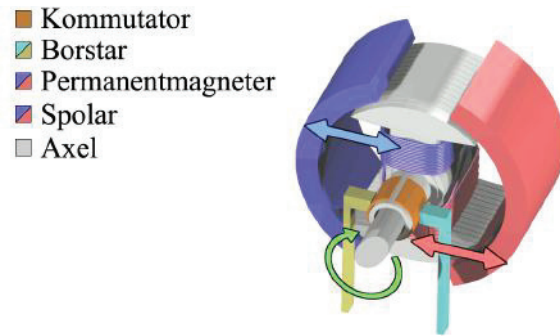
Den första elektriska motorn utvecklades i mitten på 1800-talet av den tyske uppfinnaren Ernst Werner von Siemens [25]. Von Siemens elmotor bestod av, likt dagens elmotorer, permanent- och elektromagneter men även så kallade borstar och kommutatorer. Designen benämns som borstad elmotor. Det dröjde fram till början på 1960-talet innan T.G. Wilson och P.H. Trickey uppfann den borstlösa likströmsmotorn [25]. Det var en uppfinning som innebar att det ej behövdes någon fysisk kontakt mellan den roterande och stationära delen, alltså inga borstar eller kommutatorer. Avlägsnandet av de komponenterna innebar en ökad livslängd och minskad komplexitet som i sin tur ökade pålitligheten. Borstade elmotorer används trots detta fortfarande i produkter som inte har betydande krav på driftsäkerhet och service, till exempel leksaker.

3.2. Elmotorns grundprinciper

Borstade och borstlösa elmotorer har många likheter och grundprincipen för den roterande rörelsen är densamma. Rotorns rörelse uppstår då spolarna strömförs och blir elektromagneter. Permanentmagneterna i kretsen rör sig mot läget av lägst reluktans. Ju tätare det magnetiska flödet är desto kraftigare blir rörelsen. Permanentmagneterna kan antingen repelleras eller attraheras av elektromagneterna, vilket nyttjas för att få motorn att rotera.

För en borstad motor är permanentmagneterna och borstarna stationära under drift medan spolarna, lindade runt en kärna, och kommutatorerna roterar, se figur 3.1. Spolarna och kommutatorerna är anslutna till varandra och kommutatorerna är i kontakt med borstarna, det är borstarna som är anslutna till en likströmskälla. Under kontakten mellan kommutatorn och borsten går en ström genom spolen vilket skapar en elektromagnet. Elektromagneten repelleras av permanentmagneten och rotation uppstår. På grund av rotationen så kommer kommutatorn i kontakt med den andra borsten, strömmen går i andra riktningen i spolen, polariteten ändras i elektromagneten och repelleras av den andra permanentmagneten. Händelseförloppet upprepas vilket resulterar i en roterande

rörelse tills spänningskällan stängs av. Som tidigare nämnt är principen liknande för borstlösa motorer. Skillnaden är avsaknaden av borstar och kommutatorer, vilket resulterar i mindre fysisk kontakt och således även mindre slitage. På en borstlös motor är det spolarna som är stationära och permanentmagneterna roterar.



Figur 3.1: Kommutator och borstar. Permanentmagneterna omsluter spolarna, från [26], CC-BY-SA.

3.3. BLDC-motorn

BLDC-motorer består av två huvuddelar, en stator och en rotor. Statorn, se figur 3.2, är den stationära delen och består av ett antal spolar lindade runt en kärna. Rotorn, figur 3.3, är den roterande delen som permanentmagneterna är monterade på. I BLDC-motorer är det permanentmagneterna som roterar medan spolarna är stationära, vilket är en mer balanserad och driftsäker lösning jämfört med borstade likströmsmotorer där spolarna roterar. Driftsäkerheten är en av de främsta anledningarna till den ökade populariteten hos BLDC-motorer [27, s. 4]. För att få en jämn drift används ofta sensorer och en elektronisk kontroll för att reglera när spolarna strömförs och i vilken riktning strömmen skall ledas. Figur 3.4 visar en stator och en rotor monterade. Utförligare beskrivningar av statorn finns i avsnitt 3.4, liksom av rotorn i avsnitt 3.5.



Figur 3.2: En stator som är lindad med koppartråd



Figur 3.3: Rotor med permanentmagneter och axel



Figur 3.4: Stator och rotor monterade

3.3.1 Motorkonstanter

Det finns tre huvudsakliga motorkonstanter för att mäta prestanda hos en elmotor. Den första är motorhastighetskonstanten, K_v som ges av

$$K_v = \frac{\omega}{U} \quad (3.1)$$

där ω är vinkelhastigheten och U är den pålagda spänningen [27, s. 108]. Konstanten K_v beskriver hur många varv per minut en motor roterar när 1 V är pålagd. Nästa motorkonstant är motorvridmomentskonstanten, K_t som ges av

$$K_t = \frac{\tau}{I} \quad (3.2)$$

där τ är vridmomentet och I är den tillförda strömmen. Konstanten K_t beskriver vilket vridmoment som erhålls per ampere. Ekvationen antyder dock att strömmen som tillförs motorn kan ökas, vilket är möjligt i teorin men sällan tillämpningsbart i praktiken. Vanligtvis bestäms strömmen i kretsen av spänningskällan och resistansen i kretsen. Konstanten är oftast given av motortillverkaren vilket underlättar då motorer från olika tillverkare skall jämföras.

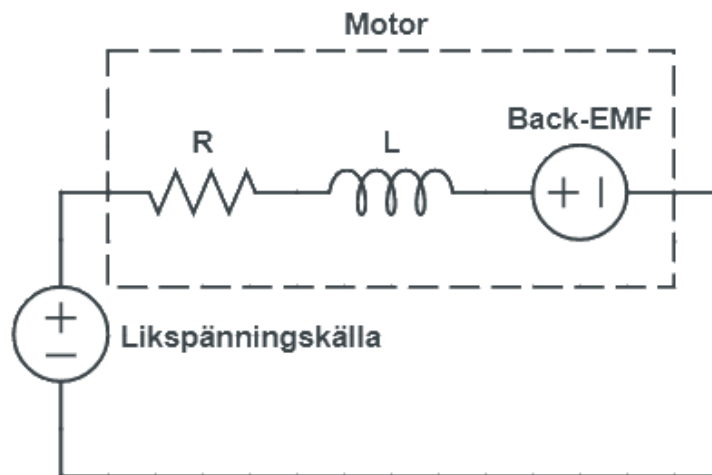
Den tredje motorkonstanten K_m , är en utökning på K_t som relaterar vridmomentet till resistativa effektförlusten i motorn och ges av

$$K_m = \frac{\tau}{\sqrt{P}} = \frac{K_t I}{\sqrt{I^2 R}} = \frac{K_t}{\sqrt{R}} \quad (3.3)$$

där P är effekten, R är resistansen och I är strömmen genom faserna. Motorkonstanten definierar elmotorns förmåga att omvandla elektrisk energi till mekanisk energi [28].

3.3.2 Motelektromotorisk kraft

Vid rotation finns det en relativ rörelse mellan permanentmagneterna och elektromagneterna vilket inducerar en spänning i elektromagnetens spolar. Den inducerade spänningen kallas för motelektromotorisk kraft (mot-EMK) och är direkt proportionell mot motorns vinkelhastighet ω . Ett förenklat kretsschema av en DC-motor visas i figur 3.5. I figuren illustreras hur den inducerade mot-EMKn motverkar likspänningskällan vilket resulterar i en lägre nettospänning i kretsen. Vid en viss vinkelhastighet nås en punkt där mot-EMKn är lika stor som spänningskällan, därmed är potentialen i kretsen noll. Om potential i kretsen är noll kan motorn inte producera något vridmoment och avstannar därför i sin acceleration [27, s. 76].



Figur 3.5: Krettschema för en DC-motor.

3.3.3 Motortyper

BLDC-motorer kan delas upp i två huvudkategorier, motorer med extern rotor (outrunner) och motorer med intern rotor (inrunner). På inrunners är rotorn innerst och är omsluten av statorn medan outrunners är konstruerade så att rotorn är ytterst och istället omsluter statorn, se figur 3.6. Outrunner-motorer arbetar generellt vid lägre varvtal och med högre vridmoment [29]. Centrifugalkraften verkar på permanentmagneterna och pressar dem mot sin plats i rotorn, vilket gynnar en driftsäker montering av permanentmagneterna. För inrunners gäller det omvända scenariot, permanentmagneterna upplever en centrifugalkraft som verkar i radiell riktning ut från rotorn. Fenomenet kan leda till att permanentmagneterna riskerar att lossna från rotorn och ökar risken för motorhaveri. Den roterande massan i en inrunner är mindre vilket ger upphov till ett lägre tröghetsmoment samt lägre reaktionskrafter i lager och infästning. Elektromagneternas placering i inrunner-motorer är gynnsamt för kylningen [27, s. 120]. Kylning av de olika motortyperna beskrivs mer utförligt i 3.6.



Figur 3.6: Till vänster en inrunner, till höger en outrunner.

3.3.4 Faser

En motor kan konstrueras med en eller flera faser. En fas är en elektrisk ledare som lindas till spolar runt statortänderna. När spolarna strömförs skapas motorns elektromagneter. Faserna strömförs separat för att aktivera elektromagneterna vid olika tillfällen, och därmed skapa rotation i motorn.

Enfasmotorer har få praktiska applikationer på grund av att de inte alltid går att starta från stillastående läge. Permanentmagneten och spolen kan hamna i ett sådant läge att när spolen strömförs uppstår ingen roterande kraft utan endast en kraft i radiell riktning, det vill säga vinkelrätt mot rotorns vägg. I ett sådant läge genereras inte något vridmoment och motorn kan därmed inte starta. De flesta BLDC-motorer drivs därför av tre faser för att i alla lägen kunna generera vridmoment [27, s. 9]. Även den motelektromotoriska kraften (mot-EMK) och vridmomentet blir jämnt distribuerade. Att ha tre faser är fördelaktigt då ripplet endast är 15 % av det som bildas vid en fas. Det finns möjlighet att använda sex och tolv faser vilka genererar ett rippel på 7% respektive 3% [30]. Ytterligare en fördel med att använda tre eller flera faser är möjligheten att strömföra två faser samtidigt med olika polaritet. Motorn får då en attraktion-repulsion karaktäristik (push-pull configuration), där den första fasen attraherar medan den andra fasen repellerar permanentmagneten och ett kraftigare vridmoment produceras. Fler faser ställer högre krav på motorns styrsystem, den ringa förbättringen kontra komplexiteten resulterar att motorer sällan drivs av fler än tre faser [27, s. 9].

3.3.5 Poler

Med poler menas antingen statorpoler (elektromagneter) eller rotorpoler (permanentmagneter). För en given ström ökar generellt det producerade vridmomentet med antalet rotorpoler, till en punkt där avståndet mellan varje magnet tar upp en betydande del av rotorytan [27, s. 9]. Det optimala valet av poler är komplext och det finns krav på hur dessa får väljas. För trefasmotorer

skall antalet statorpoler vara en multipel av tre för att fylla hålrummen (slots) mellan statortänderna med lindningar och varje fas består av lika många statorpoler. I en optimal trefasmotor ska varje fas producera en mot-EMK med samma form och amplitud samt förskjuten 120 elektriska grader ($^{\circ}E$) från de övriga faserna, där $^{\circ}E = \frac{P}{2} ^{\circ}M$, P är antalet statorpoler och $^{\circ}M$ är mekaniska grader [27, s. 127]. För vissa rotor- och statorpolkombinationer är det omöjligt att helt uppfylla dessa krav. För att enkelt definiera hur effektivt dessa krav är uppfyllda införs en konstant, lindningsfaktorn K_w som antar ett värde mellan 0 och 1. K_w ska vara så nära värdet 1 som möjligt. Lindningsfaktorn för en given polkombination går att hitta tabulerat på exempelvis emetor.com [31]

3.3.6 Rotor- och statorradie

En större rotorradie ger en längre hävarm vilket ökar både vridmomentet och tröghetsmomentet hos motorn. τ beskriver det vridmoment som skapas när en kraft F appliceras på avståndet r relativt rotationsaxeln genom

$$\tau = Fr \tag{3.4}$$

Tröghetsmomentet J_0 hos en cylinder beskrivs av

$$J_0 = \frac{1}{12}m(3r^2 + L^2) \tag{3.5}$$

där m är massan, r är radien och L är tjockleken. Det finns ett optimalt förhållande mellan rotorns och statorns ytterradier för att maximera motorkonstanten K_m , och därmed verkningsgraden. Förhållandet finns tabulerat i [27, kap. 10].

Vridmomentet kan även beräknas med hjälp av diametern d och tjockleken L genom

$$\tau = k \cdot d^2 \cdot L \tag{3.6}$$

där k är en konstant. Konstanten är en approximation av hur väl motorn producerar vridmoment per volymenhet. En motor med en given tjocklek producerar ett visst vridmoment. Ökas motortjockleken med en faktor 2 produceras det dubbla vridmomentet. Således finns ett linjärt förhållande mellan motortjockleken och vridmomentet, undantaget då motortjockleken är så liten att randförlusterna blir dominerande [27, s. 13].

3.3.7 Luftgap

För att möjliggöra rotation i en motor måste det finnas ett luftgap mellan statorn och rotorn. Enligt Biot-Savarts lag, som ges av

$$B \propto \frac{1}{r^3} \quad (3.7)$$

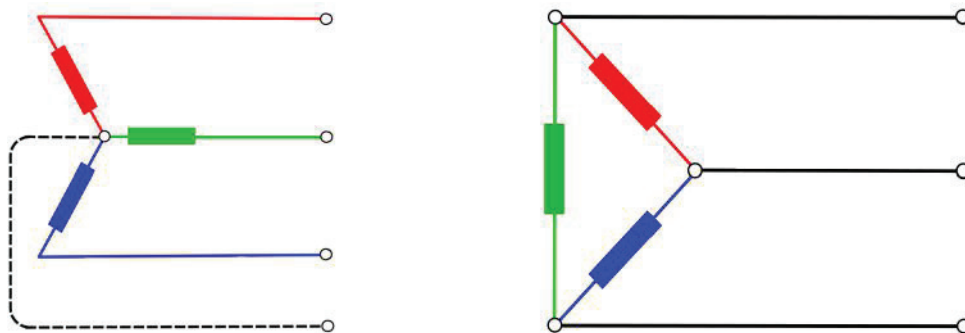
är den magnetiska flödestätheten, B , omvänt proportionell mot avståndet från den magnetiska källan, r , i kubik [32]. Ekvation (3.7) visar på vikten av att luftgapet mellan stator och rotor minimeras, i och med att interaktionen mellan stator- och rotorpolernas magnetfält minskar kraftigt då luftgapets storlek ökar. Vidare har luft låg permeabilitet, vilket försämrar det magnetiska flödet i luftgapet. Den relativa permeabiliteten av luft, $\mu_{r,l}$, ges av

$$\mu_{r,l} = \frac{\mu_l}{\mu_0} \approx 1 \quad (3.8)$$

där μ_l och μ_0 är permeabiliteten för luft respektive vakuum. Kvoten mellan permeabiliteterna är mycket nära 1, vilket visar på luftens oförmåga att leda magnetiska fält. Utrymmet mellan permanentmagneterna och statortänderna bör därmed vara så litet som möjligt utan att riskera motorhaveri. En metod för att minimera luftgapet diskuteras i 3.5.1.1.

3.3.8 Anslutning

I ett trefas-system kan ledarna anslutas i Y-anslutning (även kallat stjärnanslutning) eller Δ -anslutning (även kallat D- eller triangelanslutning). Kretsscheman för Δ -anslutning och Y-anslutning kan ses i figur 3.7.



Figur 3.7: Till vänster är kretsschemat för en Y-anslutning och till höger en Δ -anslutning. Från [33], CC-BY-SA.

Valet av anslutning påverkar motorkonstanterna K_t och K_v . En Δ -ansluten motor med konstanterna $K_{t,\Delta}$, och $K_{v,\Delta}$ skulle få en förändring enligt

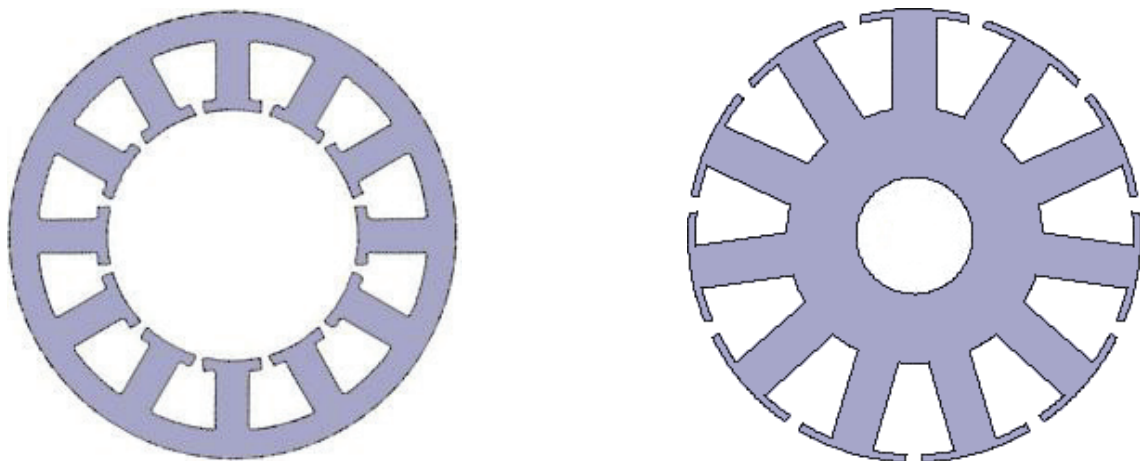
$$K_{t,Y} = \sqrt{3}K_{t,\Delta} \quad (3.9)$$

$$K_{v,Y} = \frac{1}{\sqrt{3}}K_{v,\Delta} \quad (3.10)$$

om motorn löds om till en Y-anslutning. En Δ -ansluten motor får alltså högre rotationshastighet men producerar mindre vridmoment i jämförelse med en Y-ansluten motor. Valet mellan de två anslutningarna är därför ett val mellan vridmoment och rotationshastighet.

3.4. Stator

Statorn är den del i en BLDC-motor som är stationär under drift och det är på statorn som spolarna är lindade. Utformningen av en godtycklig stator för inrunners och outrunners kan ses i figur 3.8.



Figur 3.8: Till vänster: Stator för inrunner. Till höger: Stator för outrunner.

Statorn består av ett magnetiskt ledande material med hög permeabilitet. Den höga permeabiliteten i kontrast till den omgivande luften tillåter de magnetiska fältlinjerna att vara koncentrerade i kärnan vilket förstärker magnetfältet som genereras av elektromagneterna. Materialet måste dock kunna upprätthålla den magnetiska flödestätheten från elektromagneterna utan att bli mättat. Mättnad av materialet innebär att ett externt magnetfält inte kan öka magnetiseringen i statormaterialet. Det är viktigt att optimera materialvalet för att undvika överdimensionering i fallet att materialet skulle kunna upprätthålla ett magnetiskt flöde som är större än flödet det externa magnetfältet innehåller.

På grund av att statorn är en magnetisk kärna induceras virvelströmmar till följd av förändringar i magnetfältet, virvelströmmarna leder till värmeförluster. Värmeförlusten P_v i magnetiska kärnor beräknas enligt

$$P_v = \frac{\pi^2 B_p d^2 f^2}{6\rho D} \quad (3.11)$$

där B_p är det maximala magnetflödet, d är tjockleken på kärnan, f är magnetfältförändringens frekvens, ρ är materialets resistivitet och D är materialets densitet.

För att motverka effekten av virvelströmmar görs därför statorkärnan i tunna laminat belagda med elektrisk isolering. Lamineringen av kärnan gör att värmeförlusten minskar påtagligt då förlusten är proportionell mot tjockleken av statorkärnan i kvadrat vilket kan ses i (3.11).

Statorn utsätts för den största värmeutvecklingen i en BLDC-motor eftersom spolarna är den huvudsakliga värmekällan [27, s. 217]. Det är därför viktigt att på ett effektivt sätt kyla spolarna och således sänka motorns drifttemperatur. Kylningen av BLDC-motorer beskrivs mer ingående i avsnitt 3.6.

Statorn är ofta gjord av metall och bidrar till en stor del av motorns vikt. Det är därför relevant att viktoptimera statorn. Genom FE-analys kan överflödigt material identifieras för att sedan elimineras utan att minska hållfastheten eller permeabiliteten.

3.4.1 Lindningstyper

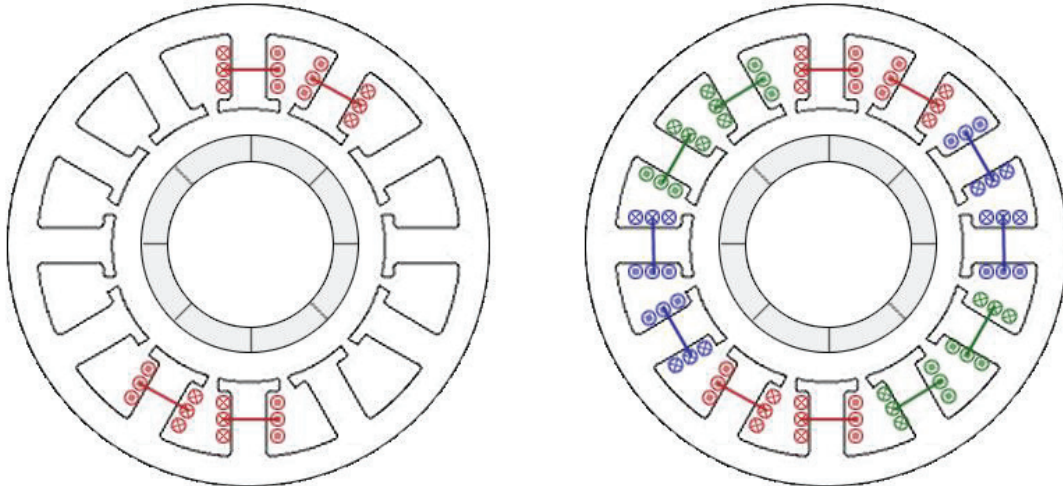
För att magnetfälten i en motor ska bildas krävs det att lindningstråden lindas till spolar (elektromagneter). Spolarnas utformning och lindningsmönster kan variera beroende på vilka egenskaper som efterfrågas.

3.4.1.1 Koncentrerad lindning

Vid koncentrerad lindning lindas tråden ett bestämt antal varv runt en statortand avskilt från de andra lindningarna [27, s. 9]. Från statortanden dras sedan tråden vidare och lindas runt nästa statortand i samma fas. Lindningarna för den första fasen, A, illustreras i figur 3.9. Ett lindningsschema för en motor med koncentrerad lindning där samtliga faser är inkluderade kan ses i figur 3.10. Lindningsändarna i koncentrerade lindningar kräver signifikant lägre volym koppartråd samt ger lägre kopparförluster. Lindningsändarna är den delen av koppartråden som är belägen på statortändernas kortsidor och inte direkt bidrar till det radiella magnetflödet. Koncentrerade lindningar minskar motorns totala längd, har en generellt högre fyllnadsfaktor och den enkla motorgeometrin är fördelaktig ur produktionssynpunkt [35].

Nackdelen med koncentrerade lindningar är den något lägre verkningsgraden som orsakas av den relativt höga magnetiska virvelströmsförlusten.

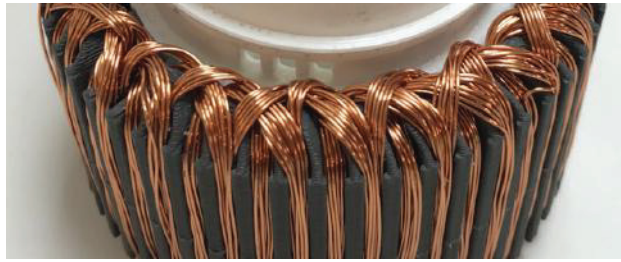
Virvelströmsförlusterna ökar kvadratisk med varvtalet [36]. Ytterligare en nackdel är ripplet som uppstår vid låga varvtal. Faktumet att koppartråden är så koncentrerad runt respektive statortand försvårar kylningen. Kombinationen av antalet rotorpoler och antalet slots är viktigt om koncentrerad lindning nyttjas, eftersom endast vissa kombinationer resulterar i en hög lindningsfaktor [37].



Figur 3.9: Lindningsschema fas A för koncentrerad lindning. **Figur 3.10:** Koncentrerad lindning med tre faser.

3.4.1.2 Utspridd lindning

Utspridda lindningar är en mer komplicerad lindningsmetod än koncentrerad lindning då samtliga faser överlappar varandra mellan varje statortand. Överlappningen av faser ger upphov till ett flätat mönster i lindningsändarna, fenomenet kan ses i figur 3.11. Utspridda lindningar nyttjas på grund av sin höga verkningsgrad och jämna vridmomentsproduktion [37]. Den magnetiska virvelströmsförlusten i en utspridd lindning är marginell vilket är av stor betydelse då virvelströmsförlusten är kvadratisk proportionella mot hastigheten i en koncentrerad lindning [36]. De utspridda lindningarna fördelas jämnt över statorn och bildar en jämn yta. Den jämna ytan leder till ett uniformt luftgap vilket eliminerar ripplet samt att mot-EMK signalen får en sinusformad vågform [38]. Den komplicerade motorstrukturen är svår att producera och driver upp produktionskostnaderna [27, s. 180]. Komplexiteten är även ett problem då datormodeller och beräkningar skall göras. Utöver den ökade komplexiteten krävs det också en större motor och mer koppartråd i lindningen för att uppnå samma effekt som erhålls för en motor med koncentrerad lindning [36].



Figur 3.11: Lindningsändarna på en stator med utspridd lindning.

3.4.2 Lindningstrådegenskaper

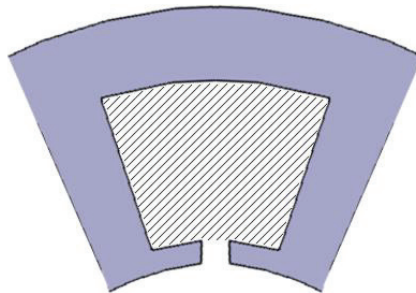
Valet av lindningstråd är viktigt för motorns prestanda då de utgör motorns spolar. Lindningstråden ska ha en hög konduktivitet, σ , vilket ger en god elektrisk ledningsförmåga och leder till att spolarna kan producera ett starkare magnetfält. Det är viktigt med en hög konduktivitet eftersom det uppstår effektförluster P_{cu} i lindningstråden när spolarna strömförs och kan beräknas genom

$$P_{\text{cu}} = I^2 \frac{L}{\sigma A} \quad (3.12)$$

där I är strömmen genom spolen, L och A är längden respektive tvärsnittsarean på lindningstråden och σ är lindningstrådens konduktivitet.

Den möjliga lindningsarean, A_w , som illustreras i figur 3.12 ska fyllas ut maximalt med koppar för att maximera elektromagneternas styrka. Fyllnadsfaktor är ett begrepp som kan anta ett värde mellan 0 och 1 och påvisar hur stor del av A_w som fyllts med koppar, där 0 är tomt och 1 är att hela arean är kopparfylld. Idealt ska fyllnadsfaktorn anta värdet 1, men lindningstråden är isolerad för att undvika kortslutning mellan faserna och statorn vilket resulterar i en fyllnadsfaktor mindre än 1. Även formen på tråden har betydelse gällande hur mycket av lindningsarean som kan fyllas ut. Tråden kan ha ett rektangulärt eller cirkulärt tvärsnitt, där det rektangulära tvärsnittet kan fylla ut lindningsarean i större utsträckning än det cirkulära tvärsnittet på grund av att lindningstrådarna kan placeras närmare varandra [39].

▣ A_w



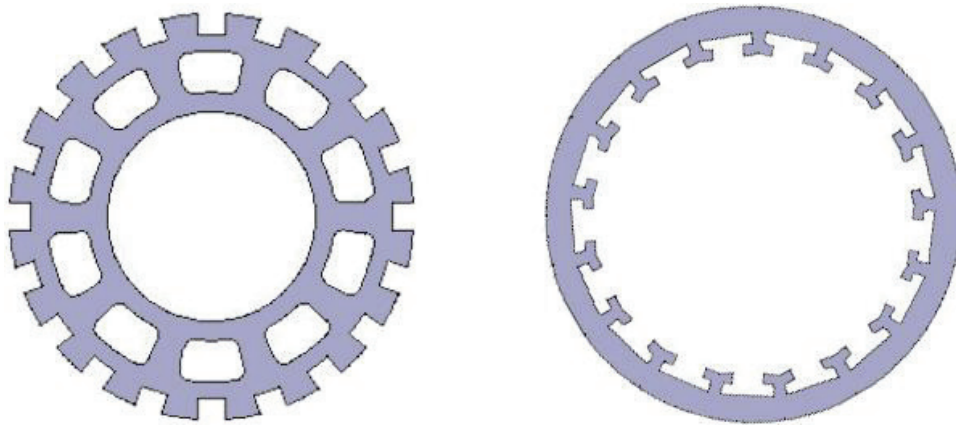
Figur 3.12: Lindningsarean, A_w .

3.5. Rotor

Rotorn på en BLDC-motor är den del där permanentmagneterna är monterade och som roterar under drift, det är även den del av motorn som axeln är monterad på och därav den del som överför vridmomentet från motorn till axeln.

Om rotorn är tillverkad av ett material med hög permeabilitet bidrar det på samma sätt som för statorn till att rotorn upprätthåller det magnetiska fältet, vilket genererar ett starkare magnetiskt flöde i luftgapet.

Eftersom tröghetsmomentet är relaterat till massan finns det därför skäl till att viktoptimera rotorn för att lättare kunna ändra rotationshastigheten på motorn. Med FE-analys kan överflödigt material elimineras utan att försämra hållfastheten. Ett exempel på det visas till vänster i figur 3.13, där hålrum har gjorts i rotorn för att minska vikten.



Figur 3.13: Till vänster en generell rotor för en inrunner och till höger för en outrunner.

3.5.1 Permanentmagneter

För att kunna skapa rotation i en BLDC-motor krävs en uppsättning permanentmagneter i rotorn som kan interagera med de genererade magnetfälten i kopparlindningarna. Ett tätare magnetiskt flöde mellan statorn och rotorn är det enklaste sättet att höja motorkonstanten K_m [27, s. 207], vilket visar på vikten att optimera permanentmagneternas geometri, material och konfiguration.

3.5.1.1 Geometri

En BLDC-motor kan modelleras som en cylinder med konstant tvärsnitt, där kopparlindningar löper intill stavformade magneter. Enligt (3.6) varierar vridmomentet linjärt med motortjockleken, vilket gör att magnetgeometrin kan reduceras till ett 2D-problem.

I avsnitt 3.3.7 beskrivs att luftgapet mellan rotor och stator ska minimeras på grund av luftens låga permeabiliteten. Ett designval är att använda en magnetgeometri där

en rundad yta är vänd mot statortänderna. Magneter med en rundad yta resulterar i bågformade magneter som i en konfiguration bildar en jämn ring, se figur 3.14. Jämfört med en platt yta minimerar en rundad yta avståndet som magnetfältet behöver ledas genom luften och bevarar magnetfältets styrka.



Figur 3.14: Till vänster: en magnet med ett rektangulärt tvärsnitt. Till höger: en magnet med ett bågformat tvärsnitt.

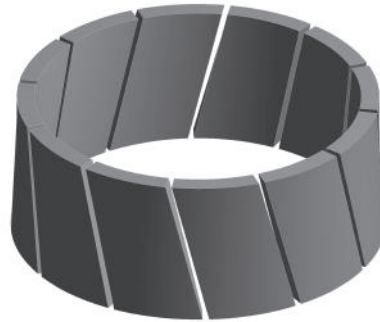
Eftersom det finns luftutrymmen mellan statortänderna kommer reluktansen i den magnetiska kretsen inte vara densamma för alla rotorpositioner. Vid rotation kommer permanentmagneterna att interagera med de utstickande statortänderna och ge upphov till ett kuggmoment, T_{kugg} , som ges av

$$T_{\text{kugg}}(\theta) = -\frac{1}{2}\phi_1^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (3.13)$$

där ϕ_1 är det magnetiska flödet i luftgapet och R är reluktansen som flödet passerar genom [27, s. 112]. Kuggmomentet orsakar en pulsering i vridmomentet som kan ge upphov till vibrationer och oljud [40]. Genom att förändra permanentmagnetgeometrin kan kuggmomentet reduceras. Avrundade hörn eller en sned magnetform kan användas för att undvika stora förändringar i reluktans under drift, se figur 3.15 och 3.16. Derivataternas storlek i (3.13) skulle då minskas, och höga kuggmoment skulle därmed undvikas. Sneda magneter medför dock höga utgifter och tillverkningssvårigheter [41], och motorns verkningsgrad sänks när magneternas hörn rundas av [42]. Kuggmomentet har störst inverkan vid uppstart av motorn samt drift vid låga varvtal. Vid högre varvtal minskar kuggmomentets inverkan på grund av rotorns tröghet [43].



Figur 3.15: En cirkulär magnetkonfiguration med avrundade permanentmagnetkanter.

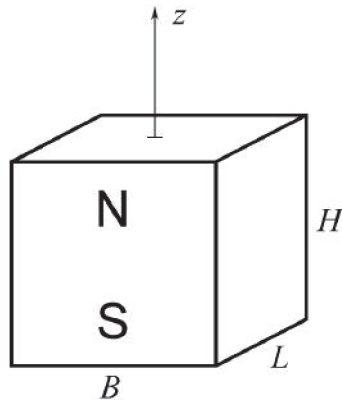


Figur 3.16: En cirkulär magnetkonfiguration med sneda permanentmagneter.

Den magnetiska flödestätheten B i magnetfältet kring en permanentmagnet varierar olinjärt med permanentmagnetens höjd. Ett analytiskt uttryck för B i en punkt framför nordpolen av en räblocksförmad magnet ges av

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{LB}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + B^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{LB}{2(H+z)\sqrt{4(H+z)^2 + L^2 + B^2}} \right) \right] \quad (3.14)$$

där B_r är permanentmagnetens remanens, L , B och H är permanentmagnetens längd, bredd respektive höjd, och z är avståndet mellan nordpolens yta och punkten längs centrumaxeln där B mäts (se figur 3.17) [44]. En kubisk magnet med sidan 10 millimeter vars höjd fördubblas får enligt (3.14) en 10 % större flödestäthet en millimeter framför nordpolens yta. Liknande resultat har erhållits i annan forskning där det undersöktes hur höjden av permanentmagneterna i en linjärmotor påverkade vridmomentet [45]. Den marginella ökning av flödestätheten vid en fördubbling av magnetens höjd, och därmed även massa, gör att högre permanentmagneter inte är ett självklart val för en applikation där motorns vikt måste minimeras.



Figur 3.17: Illustration av variablerna som ingår i (3.14).

3.5.1.2 Material och egenskaper

Permanentmagneters prestanda rangordnas efter den maximala energiprodukten BH_{\max} som är ett mått på energitätheten i magneten. Den starkaste magnetsorten på marknaden i dag är neodymmagneter som är tillverkade av en legering av neodym, järn och bor [46]. Bland neodymmagneter är N52 den starkaste klassen [47]. Neodymmagneter av kategori N börjar dock förlora sina magnetiska egenskaper vid temperaturer mellan 65 °C och 80 °C. Ökas temperaturen ytterligare kan förlusten bli irreversibel [48], vilket skulle permanent försvaga motorn. I en motor som når sådana temperaturer måste neodymmagneter av en mer värmetålig kategori användas, exempelvis SH. Värmetåliga kategorier har dock lägre energitäthet. De starkaste permanentmagneterna inom N- och SH-kategorierna presenteras i tabell 3.1.

Magnetklass	BH_{\max} [kJ/m ³]	Max. arbetstemp. [°C]
N52	380 - 422	65
45SH	342 - 358	150

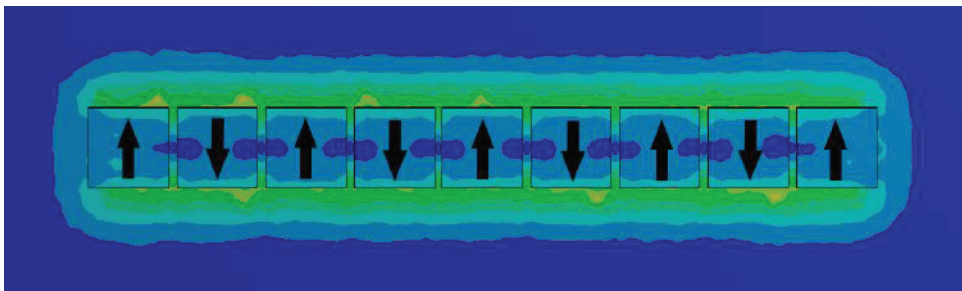
Tabell 3.1: Egenskaper för magnetklasserna N52 och 45SH. N52 har en högre energiprodukt, men 45SH tål högre temperaturer.

3.5.1.3 Magnetkonfiguration

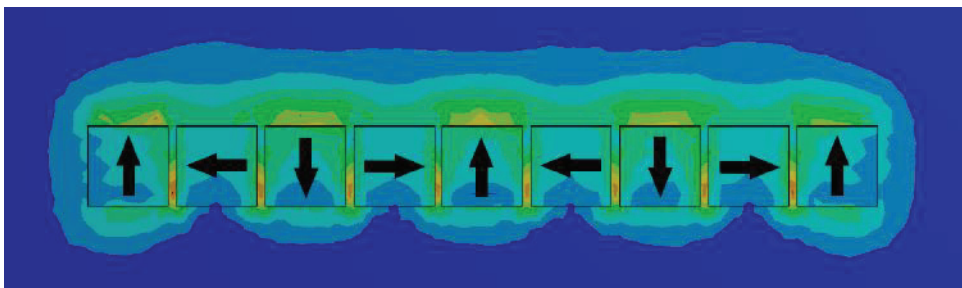
Permanentmagneternas magnetfält kan manipuleras genom att ändra magnetkonfigurationen, det vill säga magnetiseringsriktningen för de individuella magneterna. Det finns främst två olika metoder för att rikta magneterna. Antingen placeras magneterna med växlande poler mot statorn. Det andra alternativet är att placera magneterna i en så kallad Halbachkonfiguration. I en Halbachkonfiguration är varje magnet roterad 90°M från de intilliggande magneterna. Det resulterar i att magnetfältet förskjuts och ger ett tätare magnetiskt flöde på ena sidan av konfigurationen. Magneterna vars magnetiseringsriktning pekar mot de

intelligande magneterna benämns ”riktningsmagneter” och de magneter vars magnetiseringsriktning pekar mot eller från statorn benämns ”huvudmagneter”.

I figur 3.18 och figur 3.19 visas tvärsnitt av permanentmagneter i en växlande konfiguration respektive en Halbachkonfiguration där de magnetiska fältens utbredning kan observeras. Pilarna visar magnetiseringsriktningarna och konturerna visar magnetflödestätheten. I Halbachkonfigurationen kan förskjutningen av det magnetiska fältet observeras. Om permanentmagneternas magnetfält skiftas mot statorn fås ett tätare magnetiskt flöde mellan statorn och rotorn, vilket bidrar till ett högre vridmoment [27, s. 207]. Halbachkonfigurationer och deras påverkan på den magnetiska flödestätheten undersöks vidare i avsnitt 4.1.



Figur 3.18: Ett tvärsnitt av en växlande konfiguration. Magnetflödestätheten är distribuerad lika på båda sidor.

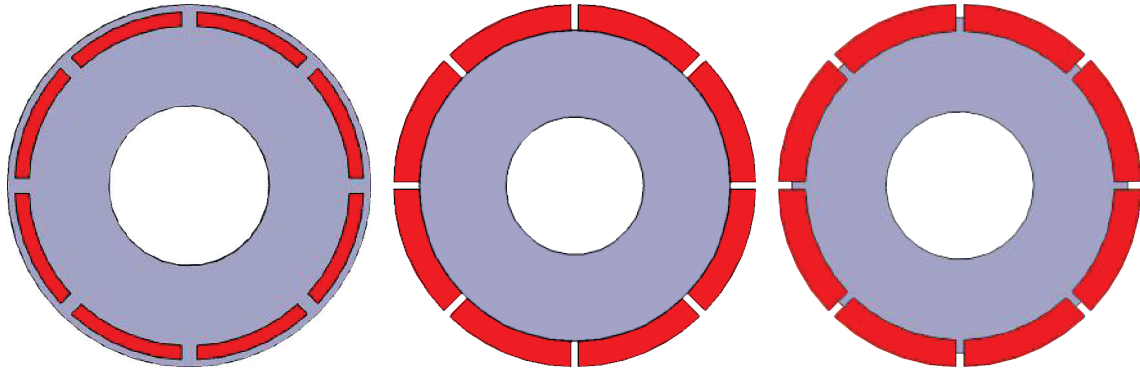


Figur 3.19: Ett tvärsnitt av en Halbachkonfiguration. Den tätare magnetiska flödet ovanför magnetkonfigurationen påvisar Halbacheffekten.

3.5.2 Magnetuppsättning

Det finns flera olika sätt att montera permanentmagneterna på rotorn. I en ”Interior Permanent Magnet”-uppsättning (IPM) är magneterna helt inneslutna i rotorn, till skillnad från en ”Surface Permanent Magnet”-uppsättning (SPM) där magneterna är placerade längs med rotorns ytterradie, se figur 3.20 och figur 3.21. I en SPM är permanentmagneterna antingen monterade direkt på rotorytan eller delvis insjunkna i rotorn (Inset Permanent Magnet), som illustreras figur 3.22. En fördel med SPM är att avståndet mellan permanentmagneterna och lindningarna minskas. Vid höga varvtal ökar dock centrifugalkrafterna i rotorn, vilket ställer

krav på rotorns mekaniska hållfasthet. För höghastighetsapplikationer är IPM-konfigurationens inneslutna magneter ett säkrare val jämfört med de fastlimmade magneterna i SPM [49].



Figur 3.20: Interior Permanent Magnet.

Figur 3.21: Surface Permanent Magnet.

Figur 3.22: Inset Permanent Magnet.

3.6. Kylning

Den huvudsakliga värmekällan i en BLDC-motor är kopparlindningarna till följd av den värmeutveckling som sker när en ström passerar genom en ledare, så kallad Joule heating. Kopparlindningarna är dessutom omgivna av isolering och ett luftgap, båda med låg värmekonduktivitet [50]. Samtidigt påverkar en BLDC-motors förmåga att avleda värme direkt motorns prestanda [51], vilket gör kylning viktigt. Kylning av en outrunner är svår på grund av att rotorn omger spolarna och fungerar som en isolator vilket minskar värmeledningen i motorn. På en inrunner är kopparlindningarna inte isolerade av rotorn vilket gör det enklare att leda bort värmen. Många inrunners använder sig av luftkylning då det är ett enkelt och effektivt sätt att leda bort värme. I miljöer där skillnaden mellan motortemperaturen och den omgivande temperaturen, ΔT , är effekten av luftkylning påtaglig. För att ytterligare öka effekten av luftkylning används kylflänsar på statorn. Kylflänsarna ökar kontaktytan med den omströmmande luften som genom konvektion för bort värme. Kylflänsar och deras påverkan på temperaturen i motorn undersöks vidare i avsnitt 4.2.

Kylflänsar är inte den bästa kylningsmetoden ur ett prestandaperspektiv [52]. Vätskekylning är en mer avancerad form av kylning som ofta görs genom att ett kylmedie passerar genom statorn eller genom att låta lindningsändarna vara i kontakt med kylmediet. Det finns även en mer effektiv form av vätskekylning där lindningarna är i direkt kontakt med kylmediet. Antingen genom att ledaren med kylvätska omsluts av spolarna eller genom att låta spolarna ligga i en kylvätska som är termiskt ledande men inte elektriskt ledande [53]. Vid de här två typerna av kylning är lindningarna i direkt kontakt med kylmediet.

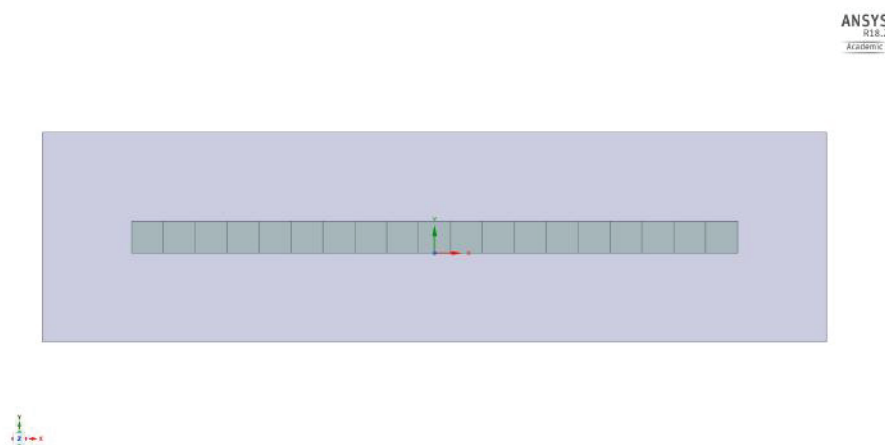
4. Simuleringar

För att närmare utreda hur permanentmagneternas geometri och konfiguration påverkar den magnetiska flödestätheten, samt hur tillägget av kylflänsar påverkar temperaturen i motorn, utförs FEM-analyser i ANSYS Workbench.

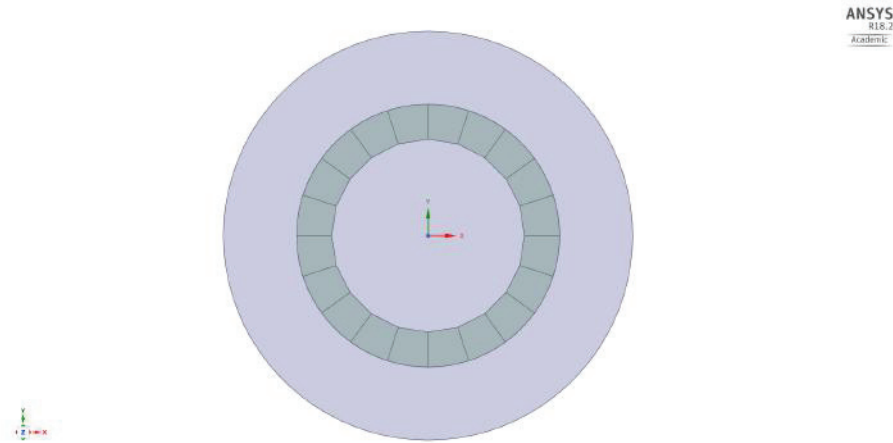
4.1. Permanentmagneter

För att analysera permanentmagnetgeometrins inverkan på magnetflödestätheten användes en magnetostatisk analys i ANSYS Workbench. Av intresse var skillnaden i prestanda mellan en Halbachkonfiguration och konfiguration med växlande poler, samt hur magneternas breddförhållande påverkar den magnetiska flödestätheten kring magneterna. Neodymmagneter av klass 45SH användes. Remanensen ansattes till 1,32 T och koerciviteten till 1003 kA/m i enighet med materialspecifikationer [54].

På grund av sättet som magnetiseringsriktningar definieras i ANSYS Workbench är det betydligt enklare att undersöka linjära konfigurationer, se figur 4.1, jämfört med cirkulära konfigurationer, se figur 4.2, som finns i rotorerna. I en luftomgivning ställdes en rad kubiska magneter med sidan 10 mm upp i en Halbachkonfiguration. Geometrins inverkan på den magnetiska flödestätheten kring magneterna undersöktes sedan genom att huvudmagneternas bredd b_h varierades i intervallet $0 \text{ mm} < b_h < 20 \text{ mm}$. För att hålla magnetradens volym konstant varierades även styrmagneternas bredd b_s enligt $b_s = 20 \text{ mm} - b_h$. Beräkningsnätet förfinades vid magnetytorna för att öka resultatets precision. För att möjliggöra unika lösningar sattes det magnetiska flödet genom de yttre gränserna av luftområdet till noll.



Figur 4.1: En linjär magnetkonfiguration i en luftomgivning.



Figur 4.2: En cirkulär magnetkonfiguration i en luftomgivning.

Den magnetiska flödestätheten mäts en millimeter framför magnetytorna i 100 punkter längs den starka sidan av Halbachkonfigurationen, och ett medelvärde tas. Mätavståndet valdes på grund av att det konventionella luftgapet i BLDC-motorer är en millimeter [55]. Uppmätningar vid det avståndet kan ge indikationer på vilka magnetgeometrier som är mest fördelaktiga för att bevara det magnetiska flödet genom luftgapet. För att verifiera resultatet jämförs ett urval av längdförhållandena mellan huvud- och styrmagneterna i en cirkulär konfiguration.

4.2. Kylning

För att analysera effekten av kylflänsar ställs ett värmeledningsproblem upp med hjälp av en Thermal Steady State-analys i ANSYS Workbench. Två olika motorgeometrier konstrueras i CATIA V5 för de två olika simuleringsfallen, en med och en utan kylflänsar. Problemet är konstant i axiellt led och kan därför reduceras till ett tvådimensionellt problem. På samtliga av strukturens ytor ansätts konvektionsvillkor med omgivningstemperaturen $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ samt värmeledningskoefficient $20\text{ W/m}^2\text{K}$, vilket är ett normalt värde för luft som strömmar över en yta vid låg hastighet [56]. På samtliga spolar ansätts randvillkor i form av värmegenerering på $57,5\text{ MW/m}^3$ per spole som ger en temperatur på spolarna på cirka $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, vilket ligger inom ett rimligt intervall för en BLDC-motors drifttemperatur.

5. Resultat och diskussion

De frågeställningar som ämnas att besvaras beskrivs i avsnitt 1.3 och återges nedan. I följande kapitel kommer frågorna att besvaras och resultaten att diskuteras.

1. Hur fungerar en BLDC-motor?
2. Hur ser de tekniska parametrarna ut för dagens BLDC-motorer?
3. Vad är det som sätter begränsningarna för BLDC-motorer?
4. Vilka tekniska parametrar har störst påverkan på BLDC-motorer?

5.1. Hur fungerar en BLDC-motor och hur ser de tekniska parametrarna ut för dagens BLDC-motorer?

Hur en BLDC-motor fungerar besvaras utförligt i avsnitt 3.2 och 3.3. De tekniska parametrarna för BLDC-motorer beskrivs i resterande delar av kapitel 3 där teorin bakom parametrarna redovisas var för sig.

En undersökning av de BLDC-motorer som finns på dagens marknad genomfördes. Undersökningen resulterade i ett datablad där tekniska parametrar från 42 olika BLDC-motorer sammanställdes, se appendix A. De tekniska parametrarna av intresse var främst motorkonstanter, olika designmöjligheter som exempelvis motortyper, magnetkonfiguration och lindningsmetod, samt prestandaparametrar som effekt, varvtal, massa och verkningsgrad.

Olika tillverkare presenterade dock olika parametrar och de flesta specificerade inte sina designval, vilket gjorde det svårt att utföra en meningsfull analys. Ingen korrelation mellan motorernas storlekar, effekt, verkningsgrad eller effekt per massenhet kunde observeras. De 42 motorer som undersöktes representerar dock inte hela marknaden, en bredare undersökning hade möjligtvis givit en tydligare bild. Däremot har databladet kunnat belysa att det finns ett flertal motorer på dagens marknad som har hög verkningsgrad, uppemot ungefär 90 %. En motor som är värd att lyfta fram från databladet är Siemens SP260D. Siemens motor har en effekt per massenhet på 5,2 kW/kg och en verkningsgrad på 95 % vilket är utmärkande. I en vidare analys visade det sig att detta hade uppnåtts genom en omfattande viktoptimering av motorn, samt vätskekyllning för att kunna öka effekten utan att överhätta motorn [53].

5.2. Vad är det som sätter begränsningarna för BLDC-motorer?

Inom flygindustrin är det vikten som är den mest begränsande faktorn då BLDC-motorer generellt har en hög verkningsgrad, vilket går att avläsa i databladet.

Motorns vikt påverkas främst av vilket material som används i rotorn och statorn. Materialet behöver en hög permeabilitet för att undvika magnetisk mättnad. Samtidigt måste materialet vara tillräckligt hållfast för att klara de belastningar som sätts på motorn. De material som klarar dessa materialkrav är metalliska material vilka har hög densitet. Den höga densiteten på materialet leder till ett optimeringsproblem där så mycket material som möjligt bör elimineras utan att riskera magnetisk mättnad eller bristande hållfasthet i strukturen.

Utöver vikten är permanentmagneternas styrka en begränsande faktor. Från avsnitt 3.5.1.2 vet vi att neodymmagneter i klass N52 är de starkaste permanentmagneterna på marknaden. För att undvika avmagnetisering måste dock valet av permanentmagneter anpassas till motorns drifttemperatur. Även mängden koppar som ryms i statorn är begränsad och andelen av sloten som fylls med koppartråd är mindre än 100 %. Kylningen av motorn är även en begränsande faktor då en högre drifttemperatur begränsar strömmen och motorns förmåga att producera vridmoment. Drifttemperaturen har dessutom en inverkan på koppartrådens konduktivitet då konduktiviteten minskar när temperaturen i koppartråden ökar.

5.3. Vilka tekniska parametrar har störst påverkan på BLDC-motorer?

Att optimera en motor är ett komplext problem där olika variabler påverkar varandra på sätt som är svåra att förutse. En metod är att göra en serie av simuleringar av hela konstruktionen där en optimerad design framställs genom en iterativ process. På grund av bristande resurser har de huvudsakliga beståndsdelarna av BLDC-motorer analyserats individuellt utan att rangordnas. Genom att utvärdera varje designmöjlighet enskilt har istället indikationer på vad som bör väljas för en elektrisk flygapplikation tagits fram. Det har inte undersökts hur komponenterna interagerar med varandra eller hur stor kvantitativ skillnad ett specifikt designval har på motorprestandan.

5.3.1 Motortyper

Av alternativen in- och outrunner anses en inrunner vara lämpligast på grund av den ökade möjligheten till kylning av spolarna. Det lägre tröghetsmomentet hos inrunners är en fördel men inte av stor signifikans då motorn kan antas arbeta under stabil kontinuerlig drift. Den minskade driftsäkerheten anses kunna elimineras genom att använda en IPM-uppsättning av magneterna.

5.3.2 Poler

Fler rotor- och statorpoler leder generellt till ett starkare och jämnare fördelat vridmoment. En viktig faktor är att en giltig kombination av poler används, enligt beskrivningen i avsnitt 3.3.5. En låghastighetsmotor kräver ett högre antal poler för att få ett jämnt vridmoment. Om en motor med ett högt polantal skall drivas vid höga varvtal sätter det höga krav på elektroniken.

Eftersom elmotorer för flygapplikationer roterar vid varvtal där motorn inte är känslig för rippel kan ett lågt antal rotor- och statorpoler användas. För att inte minska verkningsgraden skall en kombination av rotor- och statorpoler med en hög lindningsfaktor väljas. En optimal kombination av rotor- och statorpoler för en given motorstorlek och geometri kräver en individuell undersökning.

5.3.3 Faser

Trefas anses vara det lämpligaste då det är standardiserat för elmotorer. En fördel är möjligheten att nyttja push-pull-konfigurationer och ökad motorkontroll. Att använda sex eller tolv faser skulle reducera rippet ytterligare, men elmotorer för flygapplikationer kan antas arbeta vid tillräckligt höga varvtal där rippel inte är ett problem.

5.3.4 Lindningar

Valet av lindningar är viktigt att göra tidigt i designprocessen då det ligger till grund för övriga designval. Koncentrerade lindningar är produktionsvänligare än utspridda lindningar, men ger en något lägre verkningsgrad på grund av de högre virvelströmsförlusterna. Skillnaden i verkningsgrad är dock inte tillräckligt stor för att avstå från koncentrerade lindningar. Koncentrerade lindningar har mindre lindningsändar än utspridd lindning, vilket resulterar i en viktreducering som gynnar motorns effekt per massenhet. Det är endast för ett fåtal kombinationer av rotor- och statorpoler som valet av koncentrerad lindning är aktuellt, annars blir verkningsgraden för låg.

5.3.5 Anslutning

Valet av anslutning är främst ett val mellan vridmoment eller rotationshastighet. För flygapplikationer är vridmoment att föredra då ett högre vridmoment innebär möjligheten att använda större och fler propellerblad, vilket producerar en större dragkraft [57]. Den anslutning som bör användas för flygapplikationer är alltså en Y-anslutning då det ger ett högre vridmoment.

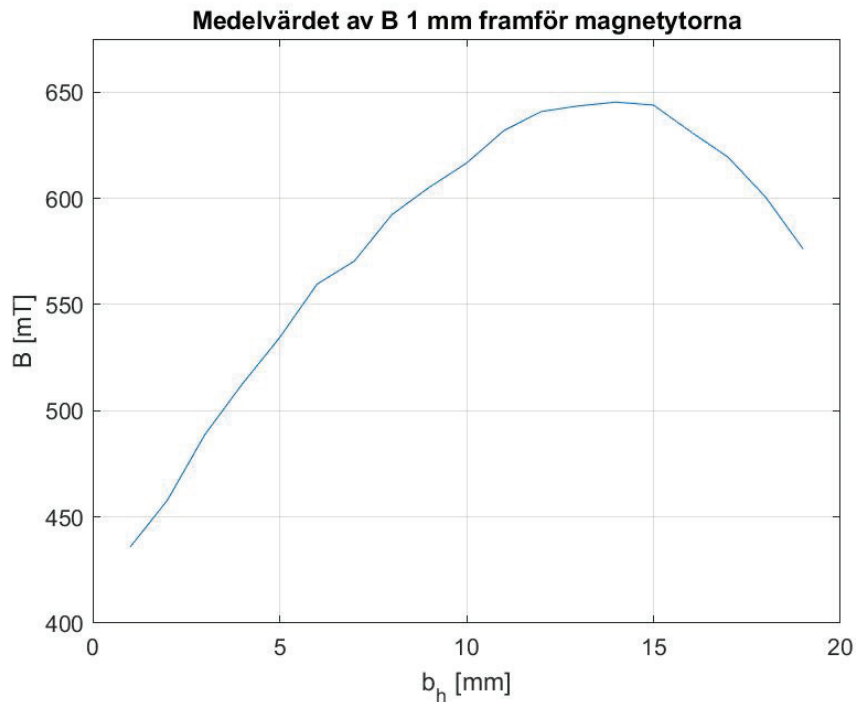
5.3.6 Magneter

Enligt avsnitt 3.5.1 bör det magnetiska flödet mellan rotorn och statorn ökas för att åstadkomma ett högre vridmoment. Det är därför ett rimligt antagande att permanentmagneter av den starkaste klassen (N52) är det bästa valet. Det måste dock tas i åtanke att permanentmagneterna avmagnetiseras om motortemperaturen överstiger permanentmagneternas maximala arbetstemperatur. För att säkerställa att motorn inte havererar är det viktigt att välja permanentmagneter med tillräckligt hög maximal arbetstemperatur.

Johan Åström berättar i intervju att Aros oftast använder neodymmagneter av klass 45SH på grund av den ökade värmetåligheten hos SH-magneter. Det finns dock tillfällen då det är relevant att undersöka andra alternativ. Eftersom flygplan opererar på altituder där omgivningstemperaturen är låg, kan temperaturskillnaden ΔT vara tillräcklig för effektiv kylning av motorn. Om motorns drifttemperatur är lägre än avmagnetiseringstemperaturen hos N52 magneterna bör de användas för att maximera det magnetiska flödet. För flygapplikationer bör det därför göras en undersökning av den maximala drifttemperaturen.

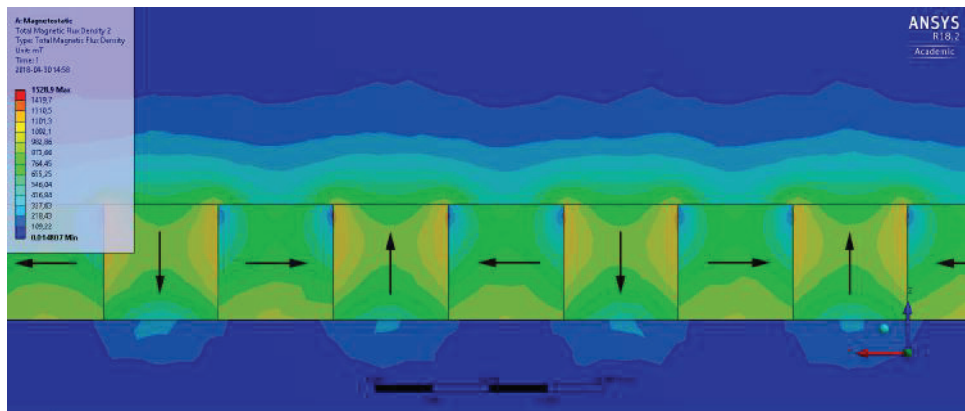
För att fästa magneterna på rotorn anses det bästa alternativet vara en IPM-uppsättning, för att garantera driftsäkerheten. Det stärker Johan Åström i intervjun där han påpekar att SPM undviks inom fordonsindustrin eftersom det är svårare att garantera driftsäkerheten. Den ökade driftsäkerheten för en IPM kommer dock med en förlust i magnetfältstyrka eftersom avståndet ökar mellan permanentmagneterna och statorn. För att motverka förlusterna bör bågformade magneter användas så att avståndet mellan permanentmagneterna och elektromagneterna minimeras.

När det kommer till magnetkonfigurationer är Halbachkonfigurationen fördelaktig då den ger ett koncentrerat magnetfält på sidan mot elektromagneterna. Resultaten från simuleringen av den linjära Halbachkonfigurationen kan ses i figur 5.1. Flödestätheten, B , stiger inledningsvis med den ökande bredden och når sitt maximum vid $b_h = 14$ mm och avtar då bredden ökas ytterligare.

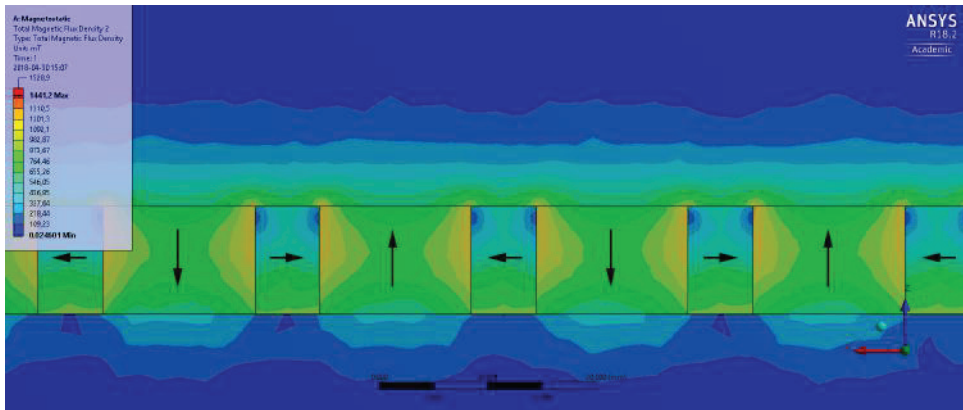


Figur 5.1: B -fältet för olika bredder på huvudmagneterna i den linjära Halbachkonfigurationen. Den genomsnittliga magnetiska flödestätheten når ett maximum då $b_h = 14$ mm.

I figur 5.2 och 5.3 visualiseras B -fältet i ett område kring magnetkonfigurationerna för $b_h = 10$ mm (kubiska tvärsnitt) respektive $b_h = 14$ mm. Halbachkonfigurationen med $b_h = 10$ mm uppvisar en stark förskjutning av magnetfältet, men en ojämn magnetflödestäthetsdistribution. För Halbachkonfigurationen med $b_h = 14$ mm är Halbacheffekten inte lika dramatisk, men en jämnare flödestäthet kan observeras längs den starka sidan. Även en växlande konfiguration undersöktes med $b_h = 10$ mm. Medelvärdet av B uppmättes till 544 mT, vilket är 72 mT lägre än Halbachkonfigurationen med samma b_v .



Figur 5.2: B -fältet i ett tvärsnitt av den linjära Halbachkonfigurationen då $b_h = 10$ mm. Förskjutningen av magnetfältet åt en sida kan tydligt observeras.



Figur 5.3: B -fältet i ett tvärsnitt av den linjära Halbachkonfigurationen då $b_h = 14$ mm. Halbacheffekten är inte lika tydlig som i figur 5.2, men ett högre medelvärde av B erhålls.

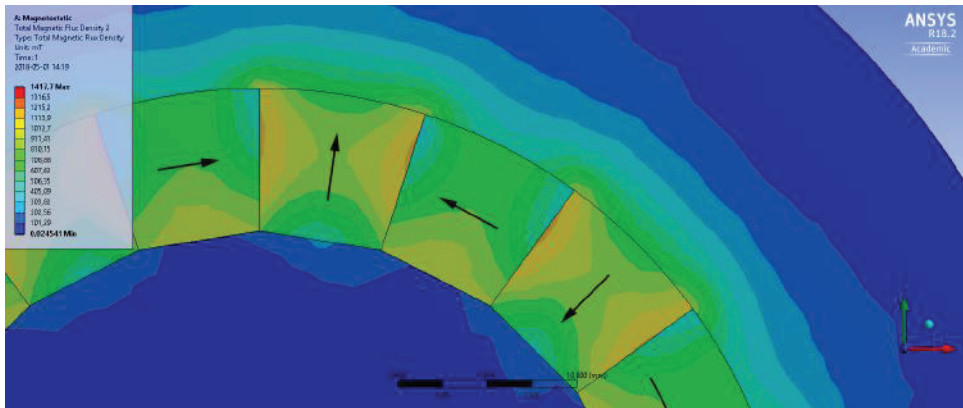
Resultaten från den linjära Halbachkonfigurationen indikerar att ett maximum av flödestäthet finns då $\frac{b_h}{b_r} > 1$

Medelvärdet av B -fältet mäts nu i cirkulära Halbachkonfigurationer där förhållandet mellan huvud- och riktningsmagneternas båglängder är 1:1 respektive 2:1. Även en växlande konfiguration undersöks vid båglängdsförhållandet 1:1. På grund av komplexiteten i att modellera cirkulära konfigurationer undersöktes endast tre sådana. Den cirkulära konfigurationen består av 20 permanentmagneter och har ytterdiametern 60 mm för att undersöka magneter i samma storleksordning som i den linjära konfigurationen. Som med den linjära konfigurationen mäts B -fältet i 100 punkter en millimeter framför permanentmagneterna längs den starka sidan, och ett medelvärde tas. Resultaten listas i tabell 5.1.

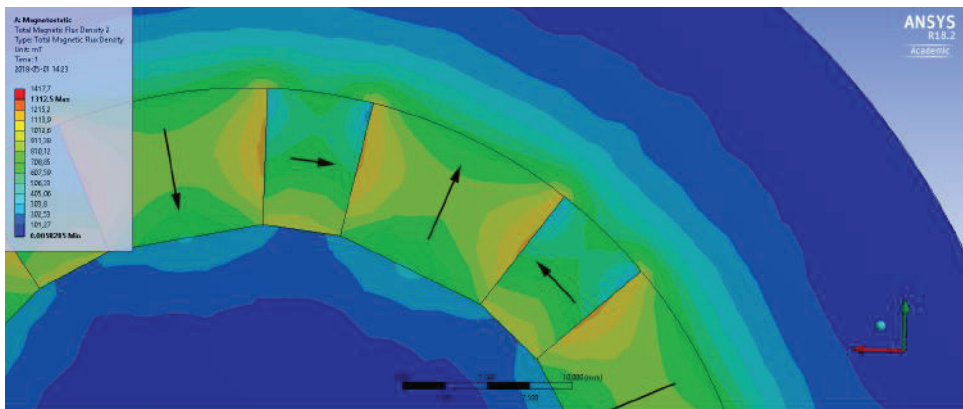
Konfiguration	B -fält [mT]
Växlande 1:1	511,1
Halbach 1:1	561,7
Halbach 2:1	576,6

Tabell 5.1: Medelvärdet av B -fältet framför permanentmagneterna i cirkulära konfigurationer.

Båda Halbachkonfigurationer presterar bättre än den omväxlande konfigurationen. Halbachkonfigurationen med båglängdsförhållandet 2:1 visar en cirka 3 % högre flödestäthet än Halbachkonfigurationen med båglängdsförhållandet 1:1. I figur 5.4 och 5.5 ses att resultatet är analogt med resultaten från de linjära konfigurationerna; bredare huvudmagneter ger en svagare Halbacheffekt men en jämnare magnetisk flödestäthet längs med konfigurationen.



Figur 5.4: B -fältet kring cirkulär Halbach 1:1.

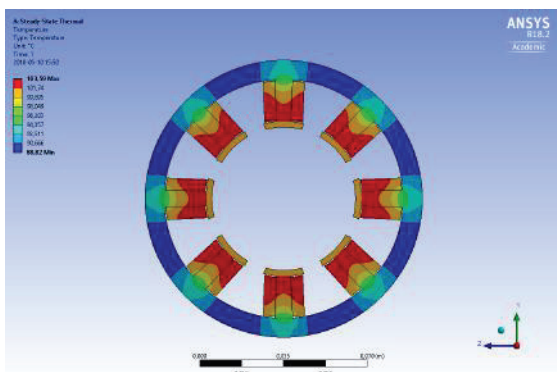


Figur 5.5: B -fältet kring cirkulär Halbach 2:1.

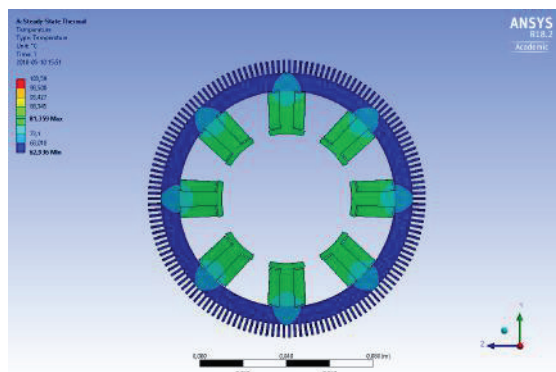
Simuleringsresultaten indikerar att en högre magnetisk flödestäthet kan åstadkommas utan att öka magnetvolymen genom att ändra breddförhållandet mellan huvudmagneterna och riktningmagneterna. Ett högre magnetiskt flöde för samma magnetmassa är intressant för flygapplikationer då mer vridmoment kan produceras av motorn utan att öka motorns vikt. Simuleringarna är dock enkla i sitt utförande. De innefattar varken rotor- och statorgeometri eller elektromagneter. En mer komplett motorsimulering med en permeabel rotor och stator skulle ha en stor påverkan på det magnetiska flödet. De undersöker inte heller inverkan av variationer i magnet höjd, vilket enligt (3.14) påverkar magnetfältets styrka. Det kan heller inte förutsättas att liknande resultat fås för Halbachkonfigurationer av andra storlekar. Resultaten är ändå intressanta och bäddar för mer utförligare utredningar av Halbachkonfigurationer i syfte att bygga lättare och mer kraftfulla BLDC-motorer.

5.3.7 Kylning

I figur 5.6 visas en godtycklig statorstruktur utan kylflänsar, värmeledningssimulering genomfördes enligt den beskrivning som ges i avsnitt 4.2. Därefter simulerades samma värmeledningsproblem med enda skillnaden att kylflänsar adderades på statorstrukturen. En temperaturminskning med 20 % i strukturen kunde observeras vilket illustreras i figur 5.7. Att konstruera kylflänsar på statorn reducerar spolarnas drifttemperatur vilket innebär att motorn kan producera mer vridmoment, på grund av möjligheten att öka strömmen utan att överhätta motorn.



Figur 5.6: Simulering av elmotor utan kylflänsar.



Figur 5.7: Simulering av elmotor med kylflänsar.

Vätskekylning anses vara en effektivare lösning på grund av att kylmediet är närmare, eller i direkt kontakt med lindningarna. Vätskekylning är dock en avancerad lösning och eftersom det undersökts en stor mängd designmöjligheter fanns det inte resurser att utforska en vätskekylningslösning.

6. Prototyp tillverkning

Vid tillverkningen av prototypen har målet varit att konstruera en BLDC-motor anpassad för flygapplikationer utgående från de resultat som erhållits under projektets gång. Vid ett flertal tillfällen har ogynnsamma parameterintervall gjorts på grund av begränsade resurser.

Det första designvalet som gjordes var att tillverka en inrunner. Därefter bestämdes det att en koncentrerad lindning skulle användas på grund av den minskade komplexiteten. Kombinationen mellan antalet rotor- och statorpolar är av yttersta betydelse då koncentrerad lindning nyttjas, på grund av att endast ett fåtal kombinationer resulterar i en önskvärd lindningsfaktor. En lämplig kombination bestämdes med hjälp av programvaran "Electric motor winding calculator" från Emotor [31]. Resultatet blev 12 slots och 10 poler vilket ger en hög lindningsfaktor på 0,966.

När antalet rotor- och statorpolar valts blev nästa steg att bestämma förhållandet mellan rotor- och statorradien. Förhållandet bestämdes till 0,6 för att maximera motorkonstanten K_m , som beskrivs i avsnitt 3.3.6. Ytterradien på statorn valdes till 48 mm då det ansågs ge en prototyp i behändig storlek. Nästa steg innebar design av rotorn, statorn, framsidan och baksidan. Designen av delarna gjordes helt i CATIA V5, för ritningsunderlag se appendix B. Framsidan och baksidan till statorn tillverkades av en 3D-skrivare i ett plastmaterial som innehåller metallspån. Fördelen med material är att detaljerna som skrivs ut har finare toleranser än om de tillverkas i exempelvis PET-plast.

För att undvika virvelströmsförluster så tillverkades rotorn och statorn i laminat. Laminatskivorna tillverkades i stålet SS-1312 och skars ut med hjälp av en vattenskarare. Varje skiva hade en tjocklek på 2 mm och totalt monterades 19 skivor i rotorn och 18 i statorn. Mellan varje skiva i statorn placerades en elektriskt isolerande film som hindrar virvelströmmar från att ledas mellan statorskivorna. Filmen var 0,1 mm tjock vilket gjorde att rotorn och statorn fick samma tjocklek.

Permanentmagneterna vägdes enskilt och placerades i rotorn så att vikten distribuerades jämnt runt hela rotorn. En jämn viktdistribution motverkar oönskade vibrationer. Permanentmagneterna skulle placeras i en IPM med Halbachkonfiguration. En cylinder skulle monteras kring magneterna för att innesluta dem, men monteringen av cylindern var för avancerad. Istället limmades magneterna på rotorn. Det resulterade i att rotorn i praktiken har försjunkna magneter (Inset Permanent Magnet). Den planerade IPM:en illustreras i figur 6.1.



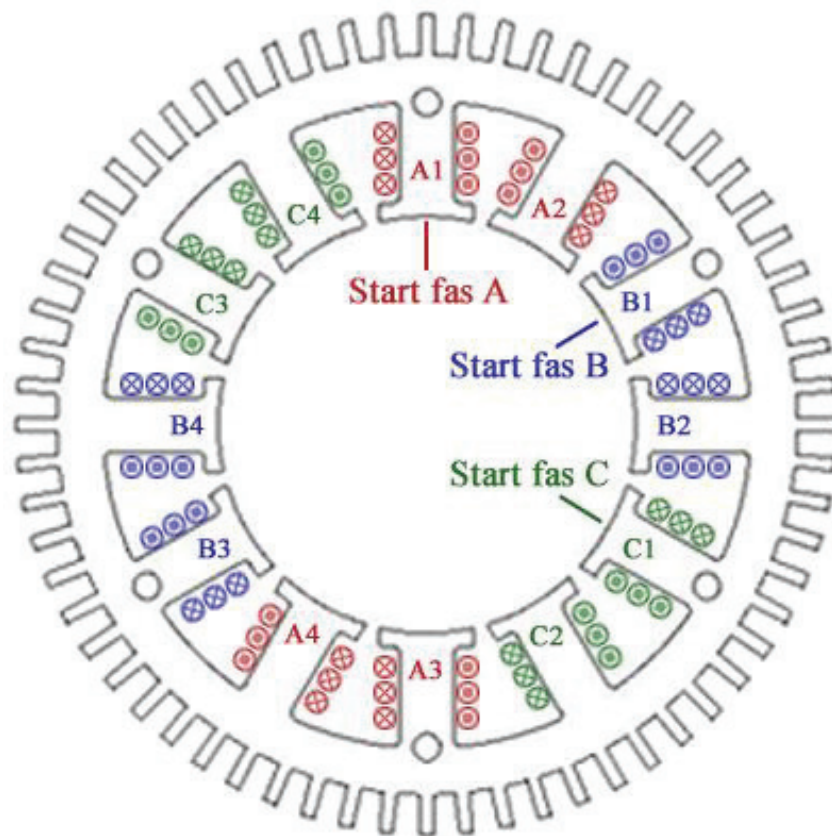
Figur 6.1: Figuren illustrerar den planerade rotorn med IPM.

Kanterna på de vattenskurna statorskivorna visade sig vara vassa, vilket förutspåddes kunna bli ett problem då kanterna riskerade att skära genom det elektriskt isolerande höljet runt lindningstråden. Om kanterna penetrerar lindningstrådens isolerande hölje skulle det resultera i kortslutning mellan faserna. För att motverka kortslutningsproblemet filades de vassa kanterna ned och eltejp fästes på de nedfilade kanterna för att ytterligare vaddera statorn.

Ledaren som användes var en isolerad koppartråd med diameter 1,1 mm. Sex trådar tvinnades ihop till en gemensam ledare som sedan lindades, se figur 6.2. Koppartrådarna tvinnades ihop för att det blir mindre tidskrävande då endast 1/6 av antalet varv behövdes lindas. Statorn lindades med tre faser efter lindningsschemat som illustreras i figur 6.3.



Figur 6.2: Figuren visar 6 stycken koppartrådar som tvinnats till en tjockare tråd.

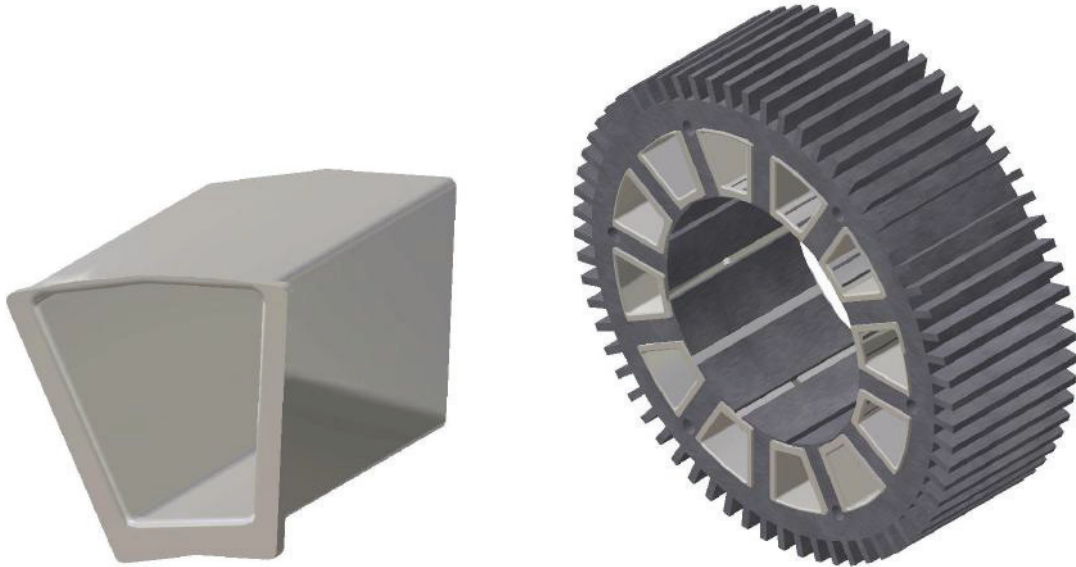


Figur 6.3: Figuren visar ett lindningsschema för en trefas inrunner-stator med 12 slots.

För att få en uppfattning om hur många varv som koppartråden skulle lindas runt varje statortand genomfördes grundläggande beräkningar där koppartrådens area relaterades till slotens area, A_w . Resultatet blev 10 varv per statortand. Efter att de första två tänderna i A-fasen lindats blev det tydligt att en alldeles för liten andel av sloten var uppfylld med koppartråd. Det slutade med att varje tand lindades med 15 varv. Det hade varit möjligt att linda ett eller två varv till, men det ansågs vara för tidskrävande att börja om och utföra lindningen en gång till. Ett problem som uppstod på grund av att det lindades 15 varv istället för 10 varv att koppartråden blev för kort för att lindas runt samtliga fyra statortänder i en fas. För att lösa problemet lindades tand 1 och 2 i varje fas med en gemensam tråd och tand 3 och 4 i varje fas med en annan tråd. För att sedan koppla ihop de fyra tänderna löddes tråden ihop och de ändarna som löpte ut från den fjärde tanden i varje fas löddes ihop till en Y-anslutning för att gynna motorns K_t .

Under lödningsprocessen av faserna upptäcktes ett problem. De åtgärder som vidtagits för att vaddera statorns vassa kanter var ej tillräckliga. Vid felkontroll om faserna blivit kortslutna upptäcktes faktumet att samtliga 3 faser hade elektrisk kontakt med statorn vilket indikerar att det isolerande höljet måste ha penetrerats av statorn. Konsekvensen av detta blev att faserna behövde lindas om på nytt och en ny lösning för att vaddera statorn behövdes tas fram.

Den nya vadderingslösningen blev att 3D-skriva ett plastsölje som fördes in i varje slot i statorn, se figur 6.4 och figur 6.5. Plastens mjukare kanter kommer skydda lindningstråden så att det isolerande höljet hålls intakt.



Figur 6.4: Modellen av plastskyddet som **Figur 6.5:** Samtliga plastskydd monterade i skyddar statorns kanter.

På grund av tidsbrist har prototyp tillverkningen avstannat, i figur 6.6 visas prototypen i sitt slutliga tillstånd. För att färdigställa motorn skulle plastskydden installerats, motorn lindats om och den 3D-printade fram- och baksidan monterats.



Figur 6.6: Den tillverkade prototypen i sitt slutliga tillstånd.

7. Slutsats

Syftet med rapporten var att bidra till en mer miljövänlig flygindustri samt undersöka vilka faktorer som har störst påverkan på BLDC-motorer och hur de kan optimeras. Informationen som samlats in kan användas för att tillverka effektivare BLDC-motorer anpassade för elektriska flygapplikationer. Rapporten kan bidra till en acceleration av elektrifieringen inom flygindustrin och således till en miljövänligare flygtrafik.

De frågeställningar som valdes för att kunna uppfylla syftet visade sig under projektets gång vara för generella. Att få en grundläggande förståelse för hur BLDC-motorer fungerar är inte komplicerat, däremot att förstå de ingående parametrarnas interaktioner i detalj skulle kräva ett mer omfattande projekt. Därför har de tre första frågeställningarna besvarats utförligt medan den fjärde frågan endast delvis besvarats.

Utifrån teorin bakom de individuella komponenterna går det att tillverka en BLDC-motor som kan konkurrera med marknadens mellanskikt. För att konstruera en optimerad motor för marknadens toppskikt krävs mer omfattande simuleringar på grund av de komplexa relationerna mellan de ingående parametrarna. Motorn bör modelleras och simuleras som en enhet där alla parametrar kan interagera med varandra. Simuleringarna bör genomföras för varje specifik applikation eftersom valen av parametrar inte kan generaliseras för BLDC-motorer.

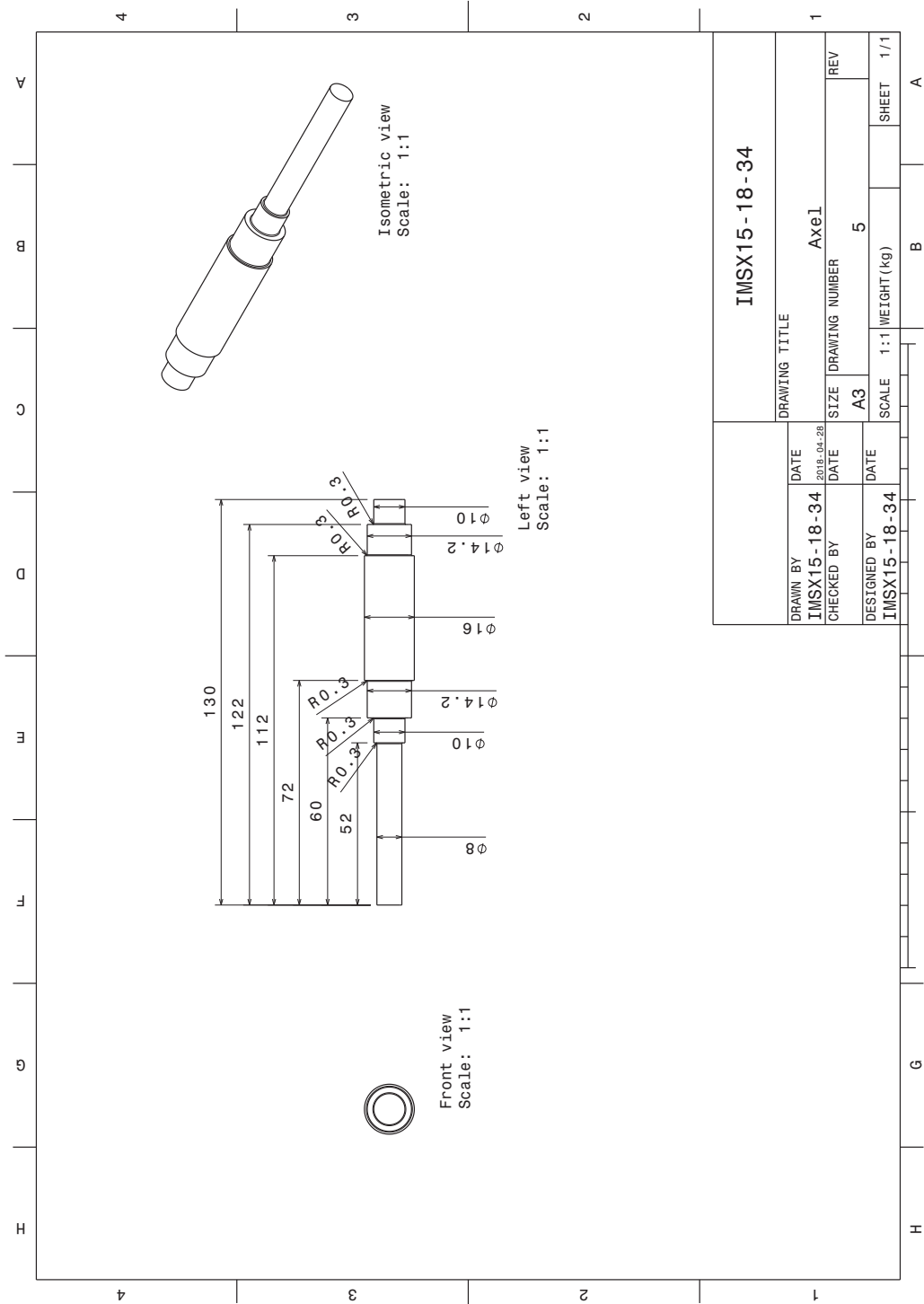
Problematiken för dagens BLDC-motorer ligger inte i att uppnå en hög verkningsgrad då många motorer har en verkningsgrad på över 90 %. Utmaningen ligger istället i att uppnå en hög effekt per massenhet. De motorer som placerat sig i marknadens toppskikt har inte hittat några revolutionerande designval utan uppnår en hög effekt per massenhet genom viktoptimering och avancerade kylmetoder. Nästa steg skulle därför vara att undersöka effekten av kylsystem och viktoptimering utförligare. Det kan även vara aktuellt att fokusera på mer specifika områden, exempelvis rotor- och statorpolkombinationer, lindningsalternativ eller magnetgeometri.

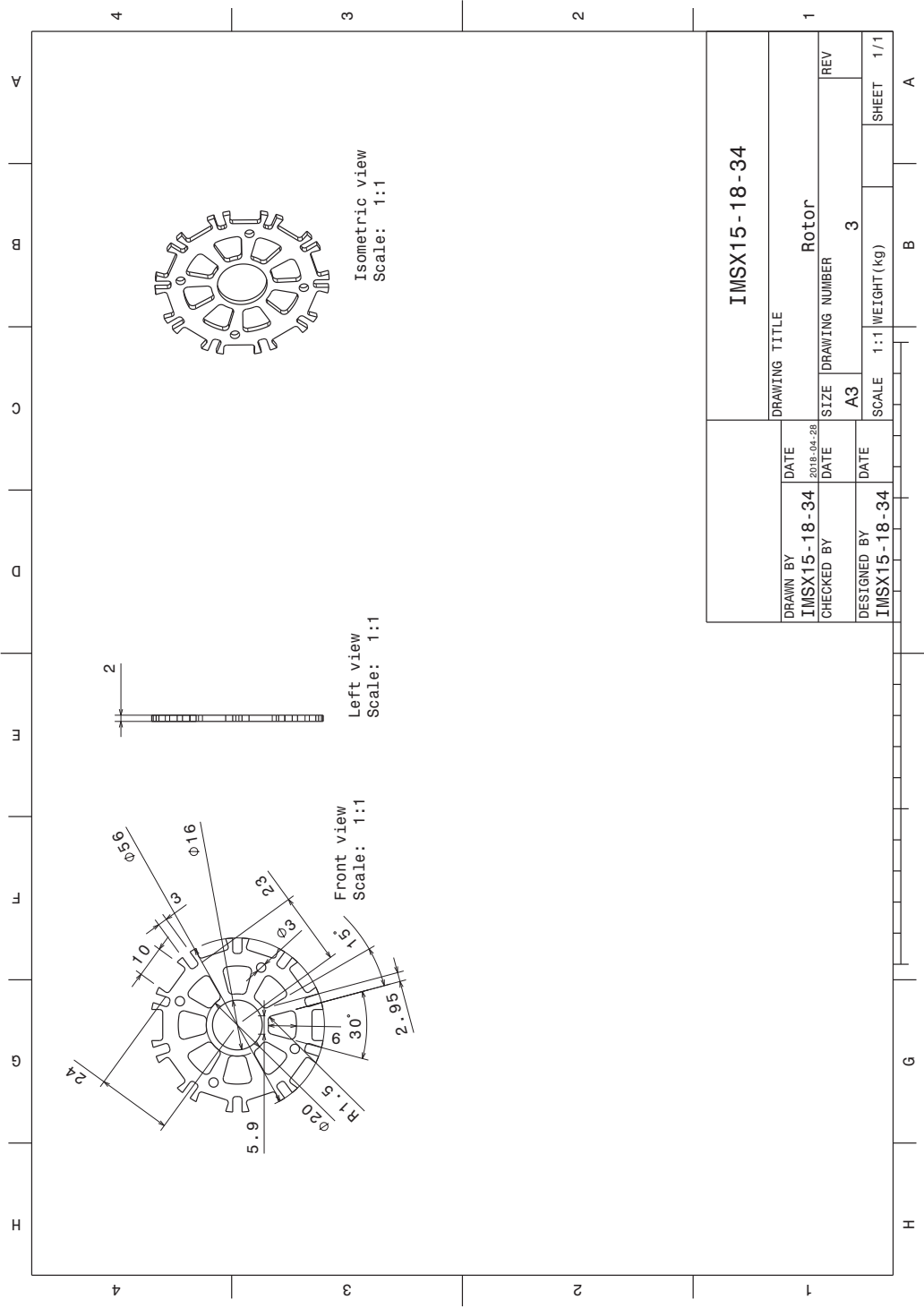
A. Datablad

	Tillverkare	Motor typ	Poler	D [mm]	m [kg]	P [kW]	P/m [kW/kg]	η	Max RPM	K_v	K_t
SP260D	Siemens	Inrunner	40		50,00	260	5,20	0,95	2500		2,3
MN3520	T-motor	Outrunner	14	42,5	0,22	1,14	5,18				0,036
300M	MagiDrive			467,36	49,50	240	4,85	0,955	3600		
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	180	
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	105	
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	90	
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	115	
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	220	
JM1	Joby	Inrunner	22	154	2,75	13,2	4,80		9000	18	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	175	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	120	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	160	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	100	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	75	
JM1S	Joby	Inrunner	22	154	1,80	8,2	4,56		9000	25	
6M	MagiDrive			104,14	1,20	5	4,17	0,905	8000		
150M	MagiDrive			360,68	29,70	120	4,04	0,945	4200		
MP202/80	Dongguan*	Outrunner		202	6,40	25	3,91	0,88	6000	55	
75M	MagiDrive			279,4	16,50	60	3,64	0,985	5000		
40M	MagiDrive			223,52	8,90	32	3,60	0,925	5500		
12M	MagiDrive			142,24	2,80	10	3,57	0,915	7000		
JM2	Joby	Inrunner	46	200	4,00	14	3,50		3500		
X-12090	Dongguan*	Outrunner		118	2,48	8,66	3,49	0,857			
20M	MagiDrive			180,34	4,80	16	3,33	0,92	6200		
JM2S	Joby	Inrunner	46	200	3,35	10,5	3,13		3500		
Laimers BLDC		Outrunner	18	105	0,90	0,48	0,53	0,8	6650	255	0,125
65S53A 55.P.050	NMBTC		8		1,44	0,295	0,20	0,92	3520	73,7	0,124
65S35A 82.P.040	NMBTC		8		1,12	0,148	0,13	0,91	3560	74,9	0,124
65S18 40.1.060	NMBTC		8		0,75	0,097	0,13	0,93	3645	79,4	0,114
57BLF04	HetsiMotor		8	122	2,00	0,25	0,13				0,066
40P10A	NMBTC		14		0,16	0,012	0,08	0,78	3400	265	0,026
GM42ELF 40-220	GEMS		8	40	0,33	0,013	0,04				
MP S-154120/55KV	Dongguan*	Outrunner	8	154	5,90	0,3	0,00	0,88	4500	20,35,55	0,096
80BL300L4	MoonsIndustries		8	84		5,5		0,892		7,03	
BLDC5-5-154	Volcano Electric		8	205		1		0,9			
VOL-BL10B48	Volcano Electric		2								
VOL-BL450A48	Volcano Electric		10			0,15			8000		
PMSM-53	Volcano Electric		4/6/8			4					
BLDC4.0-154	Volcano Electric		40	202	4,10			0,93	3120		
12kW Motor size M*	NT-power		40	202	5,40	3		0,93	2850		
15kW Motor size M*	NT-power		60	132				0,88	4800	138	0,0631
LEM-130	Lynchmotors		28	89	0,85			0,94	7300	120	0,0796
KDE8218XF-120	KDE Direct										

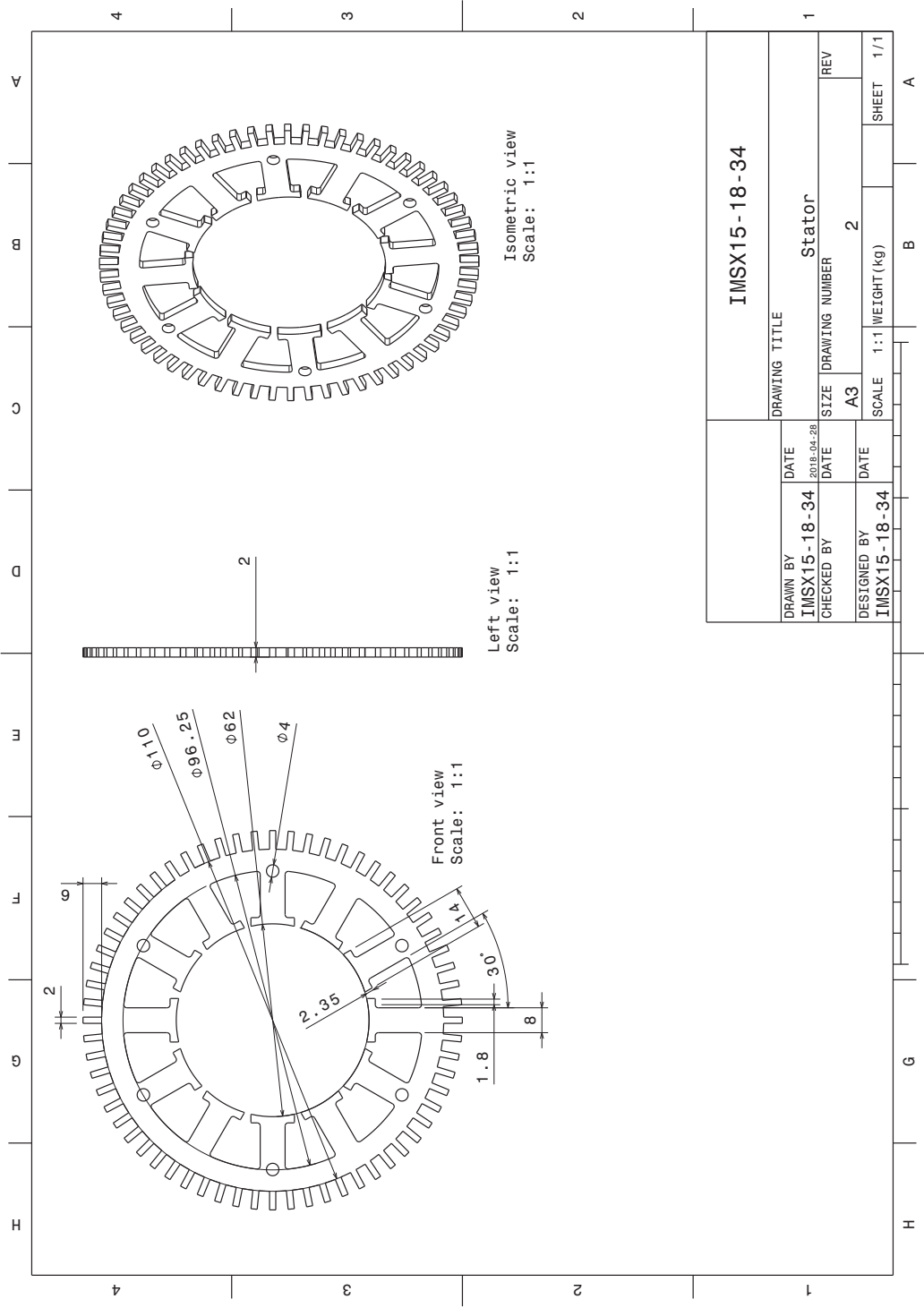
* = Dongguan Freerchobby Model Co., Ltd.

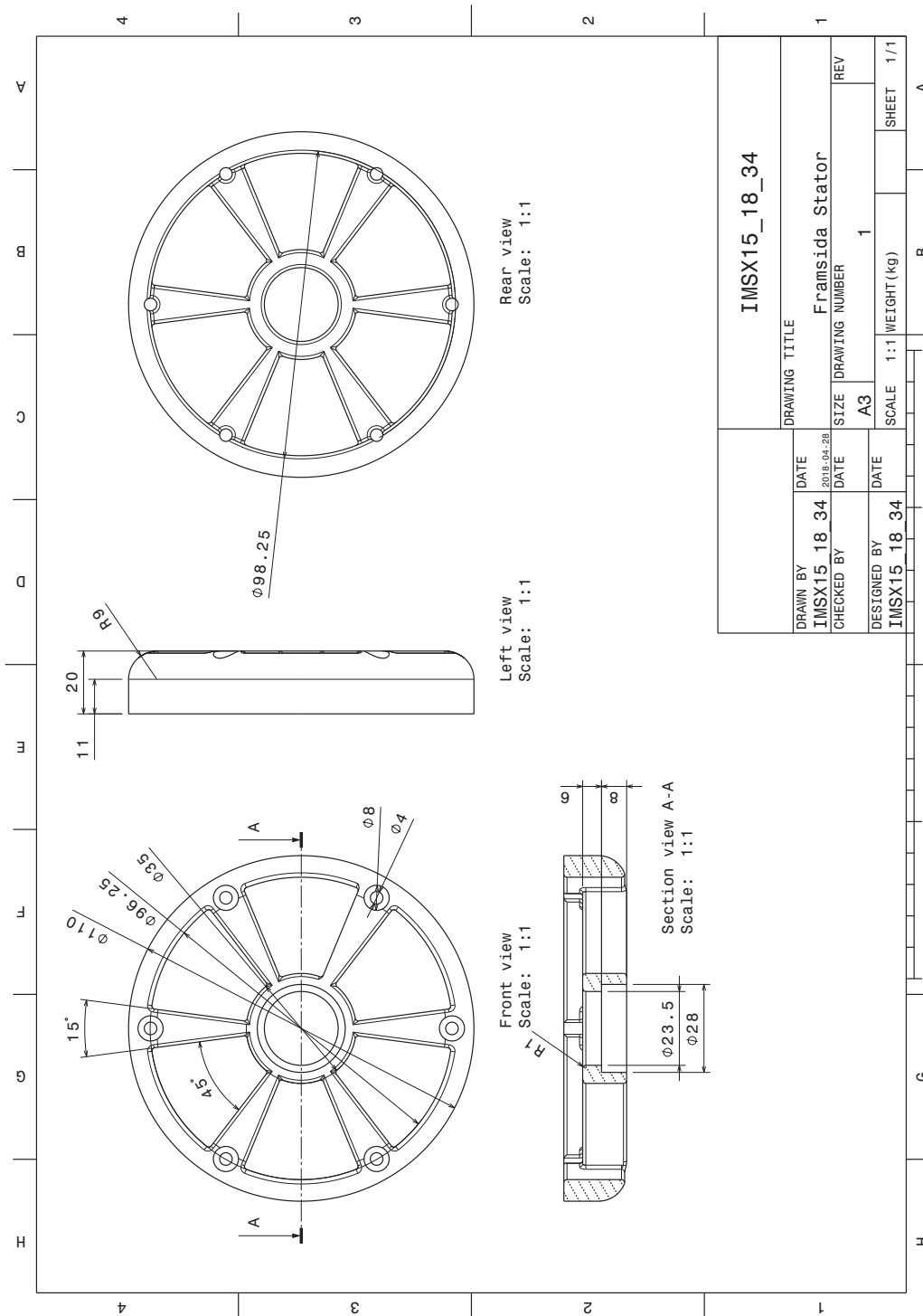
B. Ritningar

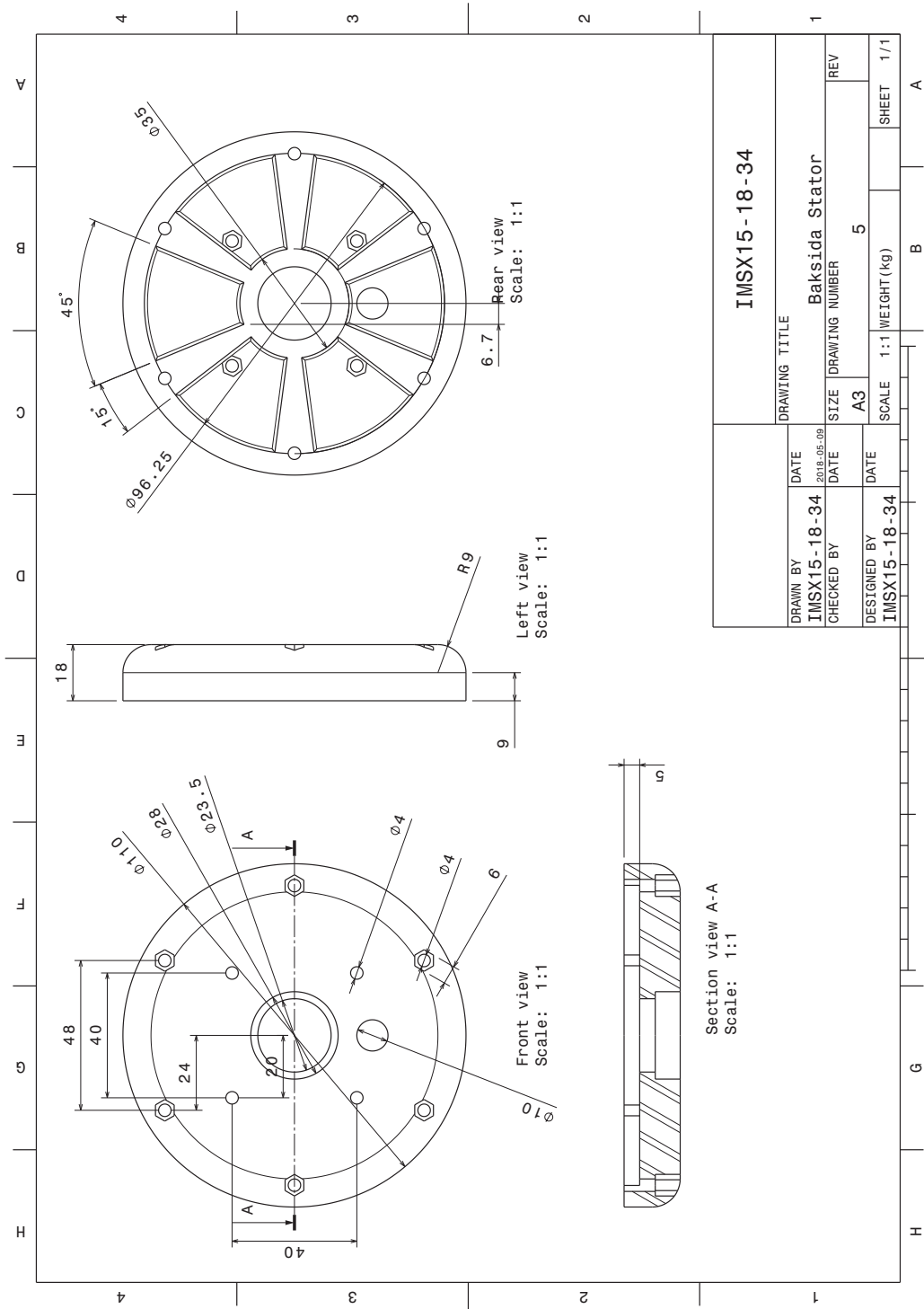




DRAWING TITLE		IMSX15-18-34	
DRAWN BY	DATE	Rotor	
IMSX15-18-34	2018-04-28	SIZE	DRAWING NUMBER
CHECKED BY	DATE	A3	3
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1 WEIGHT(kg)
IMSX15-18-34			SHEET 1/1







Referenser

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Aviation and the Global Atmosphere", ISBN: 92-9169-, 1999. [Online] Tillgänglig: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf> [Hämtad: 18 januari, 2018]
- [2] European Parliament's Committee on Environment, "Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping", PE 569.964, november 2015. [Online] Tillgänglig: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/569964/IPOL_STU\(2015\)569964_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/569964/IPOL_STU(2015)569964_EN.pdf) [Hämtad: 23 januari, 2018]
- [3] "Volvo Cars elektrifierar hela sitt modellprogram," *Volvo Car Sverige AB Newsroom*, 5 juli 2017. [Online] Tillgänglig: <https://www.media.volvocars.com/se/sv-se/media/pressreleases/210058/volvo-cars-elektrifierar-hela-sitt-modellprogram> [Hämtad: 17 april, 2018]
- [4] M. Hovis, "How Far Away Is Commercial Electronic Aviation?," *Inside EVs, Electronic Vehicle News, Reviews and Reports*, 11 november, 2014. [Online] Tillgänglig: <https://insideevs.com/far-away-commercial-electric-flight/> [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [5] R. Pope, "KEEPING COMMERCE IN FLIGHT: 100 Years of Commercial Airports," Burns & McDonnell, Kansas City, MO, 2011. [Online] Tillgänglig: <https://www.burnsmcd.com/insightsnews/insights/aviation-special-report/2011> [Hämtad: 18 april, 2018]
- [6] A. Forslund, "Uncertainty and Robustness in Aerospace Structures," Doktorsavhandling, Institutionen för industri- och materialvetenskap, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sverige, 2016. [Online] Tillgänglig: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/241657/241657.pdf> [Hämtad: 8 februari, 2018]
- [7] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," Microship Technology Inc., Chandler AZ, DS00885A, 2003. [Online]. Tillgänglig: <http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20%28BLDC%29%20Motor%20Fundamentals.pdf> [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [8] "Airplane Characteristics for Airport Planning," Boeing Commercial Airplanes, Renton WA, D6-58329-2, 2015. [Online] Tillgänglig: http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/acaps/777_2lr3er.pdf [Hämtad: 7 februari, 2018]
- [9] Department of Community Government Services, Government of Nunavut, "Environmental Emergency Plan," 2015. [Online] Tillgänglig: <https://web.archive.org/web/20170116182103/http://ftp.nirb.ca/>

- 01-SCREENINGS/COMPLETED%20SCREENINGS/2016/16XN003-GN-CGS-Tank%20Farm%20Expansion/01-APPLICATION/160204-16XN003-Petroleum%20Products%20Stored%20and%20Dispensed-IA2E.pdf [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [10] Panasonic, "Lithium Ion", NCR18650B datasheet, 2012. [Online]. Tillgänglig: <https://web.archive.org/web/20150722042425/http://industrial.panasonic.com/lecs/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE417.pdf> [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [11] Panasonic, "OVERVIEW OF LITHIUM ION BATTERIES" [Online]. Tillgänglig: https://web.archive.org/web/20111107060525/http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_LiIon_Overview.pdf [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [12] M. Caujolle, "Airbus, Rolls-Royce, and Siemens team up for electric future Partnership launches E-Fan X hybrid-electric flight demonstrator," Airbus Newsroom, 28 november 2017. [Online]. Tillgänglig: <http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/11/airbus--rolls-royce--and-siemens-team-up-for-electric-future-par.html> [Hämtad: 18 april, 2018]
- [13] "Air transport statistics", 22 december 2017. [Online] Tillgänglig: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Air_transport_statistics#Further_Eurostat_information [Hämtad: 23 januari, 2018]
- [14] J. Holden, N. Goel. "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation," UBER, San Francisco CA, 27 oktober 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.uber.com/elevate.pdf> [Hämtad: 23 mars, 2018]
- [15] M. Verch, "Das Volocopter Modell bei der IAA 2017" 2017. [Elektronisk bild]. Tillgänglig: <https://www.flickr.com/photos/30478819@N08/36569214214> [Hämtad: 10 april, 2018]
- [16] "Fordon i trafik efter region, fordonsslag och år", *Statistiska centralbyrån*, Feb. 15, 2018. [Online] Tillgänglig: <http://www.statistikdatabasen.scb.se/sq/50693> [Hämtad 11 maj, 2018]
- [17] Socialstyrelsen, "Buller", ISBN 978-91-85999-30-9, Juni 2008. [Online] Tillgänglig: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/ad862888cbd54496b6aa8ec71247bd75/buller-hoga-ljudnivaer-inomhus.pdf> [Hämtad 11 maj, 2018]
- [18] C. Bjørnæs, "A guide to Representative Concentration Pathways," CICERO Center for, Oslo, Norge, u.d. [Online] Tillgänglig: <https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/A-guide-to-RCPs.pdf> [Hämtad: 23 januari, 2018]
- [19] Gavin M.Mudd, "Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites", *Ore Geology Reviews*, Vol. 38, s. 9-26, 21 januari 2010,

- [Online] Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136810000569> [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [20] "Magnets in the News: How Cobalt & Neodymium Demand Impacts Magnet Pricing," *Dura Magnets, Inc.*, 16 mars, 2018. [Online] Tillgänglig: <https://www.duramag.com/techtalk/magnet-news/magnets-in-the-news-how-cobalt-neodymium-demand-impacts-magnet-pricing/> [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [21] K. B. Shedd, "Mineral commodity summaries," USGS, januari 2017, [Online]. Tillgänglig: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2017-cobal.pdf> [Hämtad: 16 januari, 2018]
- [22] C. Walther, "In DR Congo, UNICEF supports efforts to help child labourers return to school," *Unicef Newslines*, 13 juni 2012. [Online]. Tillgänglig: https://www.unicef.org/childsurvival/drcongo_62627.html [Hämtad: 13 maj, 2018]
- [23] R. N. Lawton, D. Fujiwara, "Living with aircraft noise: Airport proximity, aviation noise and subjective wellbeing in England", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 42, s. 104-118, januari 2016. [Online] Tillgänglig: https://ac.els-cdn.com/S1361920915001959/1-s2.0-S1361920915001959-main.pdf?_tid=cd7ad72e-7ee2-4334-8767-dbf3fcd77701&acdnat=1523439174_3a02712d8df06e88369e59fbf353543a [Hämtad: 24 april, 2018]
- [24] C. Laimer, "600 Watt, 3D-Printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor," *Instructables*, [Online], 3 maj 2017. Tillgänglig: <http://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/> [Hämtad: 30 januari, 2018]
- [25] "History of Brushless DC Motors," *MinebeaMitsumi*, 2014. [Online] Tillgänglig: <http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/brushless-dc-motors/> [Hämtad: 7 februari, 2018]
- [26] Wapcaplet, "Electric motor cycle 2," Wikimedia Commons, 31 mars, 2006. [Elektronisk bild] Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_motor_cycle_2.png [Hämtad: 10 april, 2018]
- [27] Dr. Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, uppl. 2, Lebanon, OH, USA: Magna physics publishing, 2006.
- [28] R. Queen, "KM - Motor Constant - THE GREAT EQUALIZER", MOOG Components Group, Blacksburg, USA, 104, 2008. [Online]. Tillgänglig: http://www.motioncomp.com/pdfs/Motor_Constant_Great_Equalizer.pdf [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [29] D. Muzar och E. Lanteigne, "Experimental characterization of brushless DC motors for flight applications," i *The Canadian Society for Mechanical Engineering (CSME) International Congress 2016*, Kelowna BC, Kanada, 2016.

- [Online] Tillgänglig: https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/36011/1/CSME%20%2806.29.16%29%20-%20Dominic_Revised.pdf [Hämtad: 8 maj, 2018]
- [30] J. R. Hendershot, "Brushless DC Motor Phase, Pole and Slot Configurations," Hillsboro OH, u.d. [Online]. Tillgänglig: http://www.jimhendershot.com/Jim_Hendershot/Articles_files/brushlessdcmotorphasepoleslotconfigurations.pdf [Hämtad: 11 maj 2018]
- [31] Emetor, 2018, "Electric motor winding calculator." [Online] Tillgänglig: <https://www.emetor.com/windings/> [Hämtad: 8 maj, 2018]
- [32] R. Fitzpatrick, "The Biot-Savart law," *Home Page for Richard Fitzpatrick*, [Online], 2 februari 2006. Tillgänglig: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node39.html> [Hämtad: 8 maj, 2018]
- [33] Svjo, "3fas-y-koppling" och "3fas-d-koppling," 2015. [Elektronisk bild]. Tillgänglig: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3fas-y-koppling.png> och <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3fas-d-koppling.png>. Hämtad [8 maj, 2018]
- [34] H. Huang och L. Chang, "Electrical Two-Speed Propulsion by Motor Winding Switching and Its Control Strategies for Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 48, nr. 2, ss. 607-618, mars 1999. [Online] Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=752586&tag=1> [Hämtad: 13 maj, 2018]
- [35] A. M. EL-Refaire och T. M. Jahns, "Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines Using Fractional-Slot Concentrated Windings," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, nr. 3, ss. 790-800, maj/juni 2005. [Online] Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1433004> [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [36] Y. Choe *et al*, "Comparison of Concentrated and Distributed Winding in an IPMSM for Vehicle Traction," *Energy Procedia*, vol. 14, ss. 1368-1373, 8 mars 2012. [Online] Tillgänglig: https://ac.els-cdn.com/S1876610211045231/1-s2.0-S1876610211045231-main.pdf?_tid=dc529a05-3158-41c2-9dac-9945b0b33b79&acdnat=1525866132_af4af856ad972fd9ed1d150bbdac3059 [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [37] F. Magnussen och C. Sadarangani, "Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings," i *Proc. IEEE IEMDC*, Madison WI, USA, maj 2003, ss. 333-339. [Online] Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1211284> [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [38] U. A. Bakshi och M. V. Bakishi, *D.C and Synchronous Machines*, Pune, Indien: Technical Publications Pune, 2007.
- [39] C. W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*,

- uppl. 3, New York NY, USA: Marcel Dekker, Inc., 2004. [Online]. Tillgänglig: http://ebook.pldworld.com/_eBook/-Power%20Electronics-/TRANSFORMER%20and%20INDUCTOR%20DESIGN%20HANDBOOK%203rd%20Edition,%20Revised%20and%20Expanded/ourdev_725050HHOGA4.pdf [Hämtad: 8 maj, 2018]
- [40] S. Madhavaraj och B. Venkatalakshimi, "Reduction of Cogging Torque, Harmonics in PM BLDC Motor," i *2014 International Conference on Innovations in Engineering and Technology*, Madurai, Indien, 2014, ss. 288-291. [Online]. Tillgänglig: <http://www.rroij.com/open-access/reduction-of-cogging-torque-harmonicsin-pm-bldc-motor.php?aid=49838> [Hämtad: 9 maj, 2018]
- [41] N. Bianchi och S. Bolognani, "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, nr. 5, ss. 1259-1265, september/oktober 2002. [Online] Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1035178> [Hämtad: 24 april, 2018]
- [42] G. Lee, S. Kang och T. Jung, "Permanent Magnet Structure Design of Outer Rotor Radial Flux Permanent Magnet Generator for Reduction Cogging Torque with Design of Experiment," i *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Busan, Korea, 2013, ss. 315-319. [Online]. Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6754452> [Hämtad: 24 april, 2018]
- [43] W. Wu, "DC Motor Drive Speed Regulation: Using a Repetitive Control Application in a Flatbed Scanner", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 18, nr. 2, ss. 38-46, mars-april 2012, [Online]. Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6148570/> [Hämtad: 26 april, 2018]
- [44] J. Camacho, V. Sosa, "Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry," *Revista mexicana de Física*, vol. 59, nr.1, ss. 8-17, juni 2013, [Online]. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/262707508_Alternative_method_to_calculate_the_magnetic_field_of_permanent_magnets_with_azimuthal_symmetry [Hämtad: 25 april, 2018].
- [45] X. Wang, P. Wang och X. Xu, "Magnetic field analytical calculation of the permanent magnet synchronous linear motor with fractional slot concentrated windings," *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, Kina, 2014, ss. 1762-1767. [Online] Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7013780/> [Hämtad: 8 maj, 2018].
- [46] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 4 uppl., New York NY, USA: Springer Science+Business Media, 2010.
- [47] "Physical Magnet Data," *supermagnete*, u.d. [Online] Tillgänglig: https://www.supermagnete.de/eng/data_table.php [Hämtad: 27 april, 2018].

- [48] "Demagnetisation through heat, temperature resistance magnets," *supermagnete*, u.d. [Online] Tillgänglig: <https://www.supermagnete.de/eng/faq/What-temperatures-can-magnets-sustain> [Hämtad: 27 april, 2018].
- [49] C. Jaszczolt, "Understanding permanent magnet motors," *Control Engineering*, 31 januari 2017. [Online] Tillgänglig: <https://www.controleng.com/single-article/understanding-permanent-magnet-motors/345972809e774096c1b1eeec350f0168.html> [Hämtad: 28 april, 2018].
- [50] J. Kuria och P. Hwang, "Investigation of Thermal Performance of Electric Vehicle BLDC Motor," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, nr.1, ss. 1-17, mars 2012. [Online]. Tillgänglig: <https://pdfs.semanticscholar.org/e662/87e60efbfef78371aaa6f4f6ce9c0f10b0c8.pdf> [Hämtad: 24 april, 2018]
- [51] D. Montone, "Temperature Effects on Motor Performance," Haydon Kerk Motion Solutions, Pittman Motors, Waterbury CT, u.d. [Online] Tillgänglig: https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/downloads/white-papers/temperature_effects_on_dc_motor_performance_1.pdf?la=en [Hämtad: 13 maj 2018]
- [52] "Liquid cooling," *Kooler*, u.d. [Online] Tillgänglig: <http://www.kooler.fi/technology/> [Hämtad: 10 maj 2018]
- [53] T. Lombardo, "Inside Siemens' Record-Breaking Electric Aircraft Motor," *Engineering*, 1 augusti 2016. [Online] Tillgänglig: <https://www.engineering.com/ElectronicsDesign/ElectronicsDesignArticles/ArticleID/12805/Inside-Siemens-Record-Breaking-Electric-Aircraft-Motor.aspx> [Hämtad: 24 april, 2018]
- [54] HKCM Engineering, "Neodymium (NdFeB) 45SH," datasheet, april 2018. [Online] Tillgänglig: https://www.hkcm.de/HKCM_demag_data.php?l=en&gr=45SH [Hämtad: 29 april, 2018]
- [55] Y. Nakamura, M. Mochizuki och F. Ishibashi, "Brushless dc motor with large air gap," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 125, nr. 3, ss. 67-74, november 1998, [Online]. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/244960959_Brushless_dc_motor_with_large_air_gap [Hämtad: 13 maj, 2018]
- [56] "Convective Heat Transfer Coefficient Table Chart," *Engineers Edge*, 2000. [Online] Tillgänglig: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm [Hämtad: 13 maj, 2018]
- [57] "Engine Performance, Definitions," *Experimental Aircraft Info*, 2006: [Online] Tillgänglig: <https://www.experimentalaircraft.info/articles/aircraft-engine-performance-1.php> [Hämtad: 11 maj, 2018]
- [58] W. Brown, "Brushless DC Motor Control Made Easy," Microchip Technology

Inc., Chandler AZ, DS00857A, 2002. [Online] Tillgänglig: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857a.pdf> [Hämtad: 24 april, 2018]