



CHALMERS



Test och utvärdering av framdrivningssystem för drönare avsedd för sjöräddning

Analys av motorer, propellrar och motorstyrning
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

JOSEFIN HELLEKANT

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2020
www.chalmers.se

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH
MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2020
www.chalmers.se

Test och utvärdering av framdrivningssystem för drönare avsedd för sjöräddning

Analys av motorer, propellrar och motorstyrning

Josefin Hellekant

Examensarbete 2020-08-21

© Josefin Hellekant, 2020

Institutionen för Industri och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Förord

Detta examensarbete har utförts som en del i utbildningen till högskoleingenjör i maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet har genomförts i nära samarbete med SSRS och med stöttning från Chalmers Tekniska Högskola. Examinator för arbetet var Peter Hammersberg. Merparten av arbete och tester är utförda i ett garage i Mölndal och vindtunneltesten i Chalmers strömningslaboratorium. Allt material i form av testrigg, nätaggregat, motorer, propellrar, speedcontrollers och tillbehör har erhållits från Fredrik Falkman på SSRS. Det är också Fredrik som stöttat, löst materiella problem och agerat bollplank under arbetets gång.

Jag skulle vilja tacka min handledare Fredrik Falkman på SSRS för hans outtröttliga stöd med långa mailkonversationer och stora problemlösande förmåga när saker inte går som planerat. Jag vill även tacka Isak Jonsson på Chalmers strömningslaboratorium för att ha tagit av sin tid och kommit med värdefull input. Jag skulle också vilja uttrycka tacksamhet till Magnus Hellekant för givande diskussioner och som i demonstrationssyfte byggde en elmotor av 3 sladdhärvor, en vattenfylld glaskanna, en plastskål och en stavmagnet. Sist men inte minst vill jag tacka Peter Hammersberg, min handledare och examinator på avdelningen för Industri- och materialvetenskap.

Sammanfattning

Detta arbete har utförts på förfrågan av Svenska Sjöräddningssällskapet (SSRS) under våren 2020. Syftet var att testa och jämföra olika komponenter i drivsystemet till en drönare som är under utveckling hos SSRS. Drönaren ska i framtiden understödja sjöräddningsarbetet genom att snabbt flyga till positionen för nödropet, filma och skicka bilder för att förse sjöräddarna med information om situationen. Med en sådan funktion spås operationens kvalitet och säkerhet kunna ökas avsevärt. För att drönaren ska kunna utföra så många uppdrag som möjligt krävs en aerodynamisk, lätt design med energieffektiva komponenter ombord. I detta arbete har 4 propellrar, 7 motorer och 3 ESC (electronic speed control) testats för att analysera effektiviteten hos olika kombinationer av dessa komponenter. Samtliga tester utfördes vid 11,1 V och 14,8 V för att simulera utfallet för två olika batterier. Propellrarna är av storlek 12x6,5", 11x7", 11x6" och 10x7", motorerna är av märkena AXI, EMAX, Hobbywing, Skystars och iFlight XING och ESCerna Jeti, V-Good och Hobbywing.

Jämförande tester utfördes genom att registrera propellerns drivkraft vid 50 W elektrisk effekt samt konstant ökande effektmatning. Inledningsvis sågs snabbt en stor skillnad i effektivitet hos ESCerna, där Hobbywing hade högst verkningsgrad och Jeti lägst. Den minsta propellern genererade sämre drivkraft än de tre andra, varav den största slutade i topp i kombination med en motor från AXI och ESC från Hobbywing. Motorernas verkningsgrad varierade något beroende på anpassningen mellan motor och ESC, men motorerna från AXI och Hobbywing utmärkte sig med genomgående höga resultat. Genomgående så gav testerna med 11,1 V bättre resultat än 14,8 V, på grund av spänningsberoende förluster i ESCn.

Summary

This thesis has been performed by request of the Swedish Sea Rescue Society during the spring 2020. The object of this thesis is to test and compare different components in the propulsion system of a SAR-drone under development at SSRS. In the future, the drone will support the rescue mission by quickly attend to the scene of distress, loitering the area and sending pictures of the scene to the rescue team preparing them for what situation they will face. With such a function the the quality and safety of the mission will increase considerably.

For the drone to be able to perform as many different SAR-missions as possible, a slim, aerodynamic design with energy efficient onboard components is required.

In this thesis, 4 propellers, 7 engines and 3 ESCs has been tested to analyze the efficiency of different combinations of these components. All the tests were performed at the voltages 11,1 V and 14,8 V to simulate two types of batteries.

The propeller sizes are 12x6,5", 11x7", 11x6" och 10x7 and the engines of the makes AXI, EMAX, Hobbywing, Skystars and iFlight XING and the ESCs Jeti, V-Good and Hobbywing.

Comparing tests were performed by registering the thrust of the propeller at 50 W electrical power and continuously increasing power feed. Initially a big difference between the ESCs could be seen where Hobbywing where of highest efficiency and Jeti of lowest. The smallest propeller generated the lowest amount of thrust and the biggest the highest amount of thrust in combination with the AXI engine and Hobbywing ESC. The efficiency of the engines varied depending on the adaption to the ESC but the engines from AXI and Hobbywing were distinguished with high results throughout the tests. Overall, the using of lower voltage 11,1 V were more efficient than with 14,8 V, that is caused by voltage-depending losses in the ESC.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Lagen	2
1.3 Syfte	2
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Frågeställningar	2
1.6 Målbild	3
1.6.1 Primära mål	3
1.6.2 Sekundära mål	3
1.7 Rapportens disposition	3
2 Teori	4
2.1 Drivsystemet	4
2.2 Propellern	4
2.2.1 Vingprofil	4
2.2.2 Tordering	4
2.2.3 Stigning	5
2.2.4 Slip	5
2.2.5 Avanceringsstal	5
2.2.6 Skjutande propeller	5
2.2.7 Propellerverkningsgrad	7
2.2.8 Beteckningar	7
2.3 Elmotorn	7
2.3.1 Borstlös outrunner (BLDC)	7
2.3.2 KV-tal	8
2.4 ESC	8
2.4.1 Pulsbreddsmodulering, PWM (pulse width modulation)	8
2.4.2 Rotorvinkelåterkoppling	9
2.5 Motor- och systemkaraktistik	10
2.6 Batterier	10
2.7 Systemeffekt och energi	11
2.8 Experimentanalys	13
2.8.2 Skjutande propeller	13
2.8.3 Testrigg	13
2.8.4 Mekanisk obalans	14
2.8.5 Vibrationer	14

2.8.6 Precision	14
3 Metod.....	15
3.1 Tillvägagångssätt.....	15
3.1.1 Rampningstester vid 0 m/s.....	15
3.2 Krav på drivkraft.....	16
3.3 Motorer	16
3.4 Propellrar	17
3.4.1 Propellrar	17
3.4.2 Verkningsgrad	18
3.4.3 Nav.....	18
3.5 ESC (speed controllers)	19
3.6 Kraftförsörjning.....	19
3.7 Testtrigg.....	20
3.7.1 Kalibrering	21
3.8 Testprogram/körcykel.....	21
3.9 Datainsamling och presentation.....	22
3.10 Temperaturmätning av ESC.....	23
3.11 Bedömning av propellerblad.....	23
3.12 Blockeringseffekt.....	23
3.13 Säkerhet.....	24
4 Resultat	25
4.1 Rampningstest.....	25
4.1.1 Propellertest	25
4.1.2 Motorprovning	27
4.1.3 Motrotation	30
4.2 Funktionstest i vindtunnel	31
4.3.1 Haveri	31
4.3 Temperaturmätning ESC	32
4.4 Resultat av olika spänningsnivåer	33
4.5 Teoretiskt vridmoment.....	33
5 Diskussion.....	35
5.1 Förluster	35
5.1.1 ESC	35
5.1.2 Motor.....	36
5.2 Propellerverkningsgrad	36
5.3 Två spänningsnivåer	36
5.4 Temperaturmätning	37

5.5 KV-talets påverkan.....	37
5.6 Tillförlitlighet i körcykeln.....	37
5.7 Metoden	37
6 Slutsats	39
6.1 Svar på frågeställningar.....	39
6.2 Tillförlitlighet	40
6.3 Fortsatt arbete	40
Referenslista.....	41
Bilagor	

Beteckningar

ESC

- X Jeti SPIN Pro 33
- Y V-Good Airplane-32
- Z Hobbywing X-rotor Micro 30A

Motorer

- 1 AXI 2212/12, 14 poler, KV 1959
- 2 EMAX RSII-2206, 2300KV
- 3 EMAX RSII-2206, 1900KV
- 4 EMAX RSII-2206, 1700KV
- 5 Hobbywing 2207, 1750KV
- 6 Skystars ST2306, KV 1800
- 7 XING 2208, 1800KV

Propellrar

- A 12x6,5"
- B 11x7"
- C 11x6"
- D 10x7"

P Effekt

η Verkningsgrad

D Luftmotstånd

I Ström

U Spänning

V Vindhastighet

J Avanceringsstal

SOC State of charge

1

Inledning

Detta kapitel ger en kort beskrivning av drönarprojektets bakgrund och syfte och målbild samt avgränsningar för detta examensarbete.

1.1 Bakgrund

Svenska sjöräddningssällskapet (SSRS) är en ideell förening bestående av 2200 frivilliga sjöräddare, 72 sjöräddningsstationer och 230 räddningsbåtar som opererar lokalt längs hela landets kust och i våra större sjöar. Verksamheten drivs helt och hållet med hjälp av donationer från privatpersoner, företag och organisationer och är den enda organisationen vars huvudsakliga syfte är sjöräddning. Utöver sjöräddningen utför föreningen andra viktiga uppdrag, som att agera sjöambulans, assistera räddningstjänst vid exempelvis miljöräddning och utföra samhällsnyttiga transporter.

Varje år rycker sjöräddarna ut på drygt 1000 räddningsuppdrag vilket är ca 85% av den totala andelen sjöräddningar med engagerade ytenheter [1]. Larm inkommer vanligtvis till flyg- och sjöräddningscentralen, JRCC (Joint Rescue Coordination Centre), som kontaktar sjöräddningsenheter i närheten av den nödställda. Jourhavande sjöräddare tar emot kallelsen via VHF och har 15 minuter på sig att ta sig till stationen, byta om och lämna kajen med räddningsbåten. 2018 var den genomsnittliga tiden för att ta sig från exempelvis arbete eller hem till att lämna kaj 13 minuter. Hela proceduren ställer stora krav på organisation och jourhavande sjöräddare och det är mycket som måste klaffa.

Tid räddar vid många omständigheter liv men är också en riskfaktor för sjöräddarna då risken för olyckor ökar i tidspressade situationer. Det är idag omöjligt för sjöräddarna att veta vad som väntar på räddningspositionen, som ofta är svårt att veta exakt, innan de kommit fram på plats och med egna ögon ser hur situationen ser ut. Att snabbt kunna förse sjöräddarna med information om situationen vid och kring den rapporterade nödpositionen skulle vid nödlägen kunna göra räddningsinsatsen både snabbare och säkrare. För att lösa problemet driver SSRS numera ett projekt som undersöker hur en självflygande drönare skulle kunna underlätta sjöräddningsarbetet.

SSRS har under de senaste åren arbetat på ett drönarkoncept med syftet att ta fram en kameraförsedd, automatisk drönare som vid inkommande nödsignal startar från kusten, snabbt flyger mot nödposition, bevakar området och förser sjöräddarna med information om exakt position och situation långt innan de själva är på plats eller kanske ens kastat loss från kaj. Medan sjöräddningen pågår glider drönaren runt positionen och landar till sist i vattnet där den plockas upp för hand.

En kedja av drönare ska täcka kustremsan, redo att flyga ut på uppdrag. Med en sådan lösning spår SSRS att de avsevärt kommer kunna öka säkerheten och kvaliteten på sjöräddningen.

1.2 Lagen

Det är idag inte lagligt att flyga med drönare utom synhåll utan att söka tillstånd för det specifika uppdraget [2]. För att kunna dra nytta av en drönare i sjöräddningssyfte krävs möjligheten att flyga utom synhåll utan att söka tillstånd för varje specifikt uppdrag. Drönare får generellt sett flyga på en maxhöjd av 120 m över land i okontrollerat luftrum, medan övrigt flyg inte får flyga lägre än 150 m [3]. Undantaget är polishelikoptrar, ambulanshelikoptrar, militär och övrig flygtrafik under start och landning.

Genom att försöka visa att möjligheterna och fördelarna med att kunna flyga en drönare i sjöräddningssyfte utom synhåll är större än riskerna, lobbar SSRS aktivt för specialtillstånd eller en ändring i lagen så att flygning i sjöräddningssyfte blir möjligt. Detta har inneburit samtal och möten med polis, räddningsflyget, militär m.fl. i syfte att öka förståelse och dela kunskap.

1.3 Syfte

Intresset för drönarflygning har ökat stort det senaste, framförallt på grund av att utvecklingen av material, tillverkningsteknik och elektroniska komponenter har ökat tillgängligheten och pressat priserna till nivåer som fler har råd med. Trots detta är det svårt att hitta ett färdigt koncept som i väsentliga drag uppfyller de krav som ställs av SSRS på en drönare i sjöräddningstjänst. De färdiga lösningar som övervägts har antingen varit för dyra eller inte varit optimalt anpassade för syftet. SSRS forsknings- och utvecklingsavdelning har kommit fram till att det behöver utvecklas en ny drönare specifikt anpassad för sjöräddningsuppdrag i SSRS kontext.

Syftet med detta examensarbete är att testa och jämföra olika komponenter i drönarens framdrivningssystem för att identifiera det eller de system med högst effektivitet. Framdrivningen kommer bestå av batteri, speedcontroller, motor och propeller som monteras i bakkant på drönarkroppen. Hela drönaren får väga max 1 kg och alla funktioner och komponenter måste slimmas för att uppfylla detta krav. Varje onödigt gram minskar tiden drönaren kan spendera i luften. Det är av största vikt att välja ett så effektivt drivsystem som möjligt, med minimerade förluster, för att inte suga onödigt mycket energi ur batterierna och därmed tillåta så mycket flygtid som möjligt.

1.4 Avgränsningar

Arbetet kommer inte behandla andra flygfall än marschfart och lågfart under statiska förhållanden. Befintlig data för luftmotstånd kommer inte revideras med avseende på antenner och andra avvikelser på flygplanskroppen. Olika naturbetingelser som luftfuktighet, temperatur och termik kommer inte tas hänsyn till. Inte heller kommer andra komponenter än de tilldelade att testas. Några ekonomiska hänsynstaganden kommer inte tas.

1.5 Frågeställningar

Hur ser de mest sannolika flygfallen ut?

Vilket luftmotstånd behöver framdrivningssystemet övervinna?

Vilka komponenter klarar framdrivningen mest effektivt?

Hur och var uttrycker sig förlusterna?

Spelar det någon roll vilken batterityp som används?

Uppfyller batterierna kraven för att driva drönaren under ett standarduppdrag?
Rekommenderad fortsatt provning?

1.6 Målbild

Slimmade system och minimerade elektriska förluster är avgörande för att drönaren ska kunna utföra så många olika uppdrag som möjligt. Det är viktigt att välja rätt komponenter och använda den begränsade energin i batterierna på ett medvetet och effektivt sätt.

1.6.1 Primära mål

- Ta fram vilken eller vilka kombinationer av komponenter i drivsystemet som ger högst effektivitet vid några specifika flygfall.
- Avgöra vilken batterikonstellation som är bäst lämpad för syftet

1.6.2 Sekundära mål

- Analysera förluster
- Analysera testverktyg och metoder
- Förbereda för provning i vindtunnel

1.7 Rapportens disposition

Rapporten är indelad i fyra huvuddelar. Den börjar med en introduktion till ämnet och beskrivning av problemet och fortsätter sedan i en teoridel med stort fokus på propellerns mekanik, funktioner hos drivsystemets komponenter och experimentanalys. Sedan följer en metoddel där själva arbetet beskrivs och en resultatdel där resultaten från experimenten presenteras och förklaras. Slutligen förs diskussion och slutsats där metod och resultat kommenteras och analyseras.

2

Teori

I detta kapitel beskrivs den övergripande teorin bakom propellern, elmotorn, elektronisk motorstyrning, batteridrift och experimentmetod. Arbetet är delvis baserat på tidigare examensarbeten där drönarens design fastställts med hjälp av aerodynamiska tester. För vissa återkommande uttryck upprepas inte förklaringar i detalj, utan fokuserar istället på ny information som är relevant för arbetets fortskridande.

2.1 Drivsystemet

Även om det finns jetdrivna drönare så är de propellerdrivna i absolut störst majoritet. Det finns drönare med propellrar monterade horisontellt (som en helikopter) och de som likt flygplan har propellern monterad fram eller bak. Propellern drivs oftast av en elmotor som drivs av ett batteri. Mellan batteriet och motorn monteras en ESC (electronic speed control) som styr effektmatningen till motorn och därmed reglerar propellerns varvtal. Det finns stor bredd i utbudet av motorer, propellrar och ESC's där både prestanda, effektivitet och karaktär kan variera stort, både enskilt och i kombination med varandra.

Drönaren som behandlas i rapporten är av typen flygande vinge. Drönarens prestanda är ett resultat av kombinationen mellan drivsystemets karaktäristik och drönarens aerodynamiska egenskaper. Det är de aerodynamiska egenskaperna som avgör vilken drivkraft och effekt drivsystemet måste tillhandahålla vid olika flygfall. För att erhålla maximal prestanda krävs att dessa två egenskaper matchas för drönarens specifika syfte, t.ex. specifik distans, uthållighet, hastighet, akrobatik m.m.

2.2 Propellern

2.2.1 Vingprofil

En flygplanspropeller kan liknas vid en roterande vinge som lyfter planet framåt. Propellerbladets framsida har en välvd profil vilket gör att luften behöver röra sig en längre sträcka över bladet. Baksidan av propellerbladet har en rak profil. Det blir således längre mellan luftmolekylerna på ovansidan och ett undertryck uppstår. Ovansidan av vingen korresponderar mot propellerbladets framsida, som således påverkas av ett framförvarande undertryck som suger propellerbladet framåt då det rör sig genom luften. Bladets baksida påverkas liksom undersidan på vingen av ett övertryck som puttar bladet framåt [15].

2.2.2 Tordering

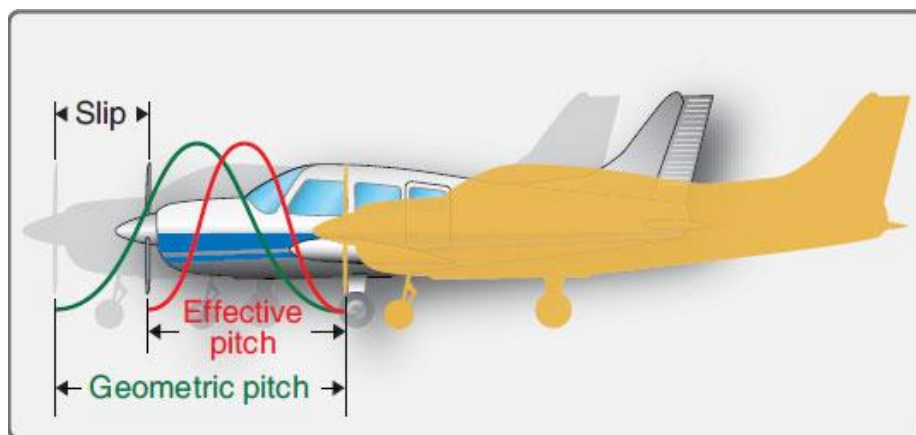
Propellerbladets tordering är den skruvade profilen som relativt rotationsplanet ger bladet en större vinkel vid roten och mindre vinkel längre ut mot toppen. Detta beror av att toppen rör sig en längre sträcka under rotation och hinner därför röra sig genom en större mängd luft. Torderingen gör att skoveleffekten hos bladet minskar längre ut från navet så att tryckkraften verkar lika mycket i alla tvärsnitt, trots varierande fart genom luften [15].

2.2.3 Stigning

Stigningen är sträckan som propellerbladet skruvar sig genom luften på ett varv. Stigningen är starkt korrelerad med bladets stigningsvinkel eftersom större vinkel gör att stigningen ökar. Geometrisk stigning är sträckan propellern avancerar utan förluster, effektiv stigning fås genom att dra av förlusterna. Stigning kallas även för pitch. Stigningsvinkeln varierar utmed bladets längd och ett representativt värde mäts vid 75% av bladets längd från navet [4].

2.2.4 Slip

Slip är ett mått på hur mycket propellern slirar. Det är alltså skillnaden mellan avståndet propellern skruvar sig fram i verkligheten och den geometriska stigningen, vilket förtydligas i figur 2.1.



Figur 2.1. Geometrisk pitch, effektiv pitch och slip [8].

Effektiviteten hos en propeller är beroende av stigning, form, längd, rotation och longitudinell hastighet. Alla propellrar med fast pitch är mest effektiva vid ett specifikt flygfall. Med variabel pitch kan effektiviteten maximeras under hela flygningen [15].

2.2.5 Avanceringsstal

Avanceringsstalet J är en dimensionslös kvot mellan propellerns longitudinella hastighet genom luften (V) och varvtal (n) samt propellerns diameter (D). Man kan tyda det som ett mått på hur mycket luft propellern klarar av att skopa undan.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (\text{Ekv. 2.1})$$

Hastigheten mäts i meter per sekund, varvtalet i rotationer per sekund och diametern i meter [4].

2.2.6 Skjutande propeller

En skjutande propeller, även kallad en pusher sitter monterad bakom motorn och verkar med tryckkraft på propelleraxeln. Skjutande propellrar är vanligast i den marina världen men finns även i flygsammanhang. fördelarna med en skjutande propeller är att det är enklare att montera utrustning fram på flygplanet när det inte finns en propeller i vägen. En eventuell pilot får bättre sikt och planet blir mer strömlinjeformat. Dessutom blockeras

inte luftflödet efter propellern av någon flygplanskropp, vilket är positivt för propellerns verkningsgrad. Däremot kan turbulensen som bildas av strömningstörningar uppströms påverka propellern negativt. Strömningstörningarna kan ge negativa effekter på hur luften släpper i bakkant på propellerbladet och kan sänka verkningsgraden avsevärt för propellern [9]. Olika propellrar påverkas olika mycket vilket gör det viktigt att välja rätt om man ska använda en pusher.

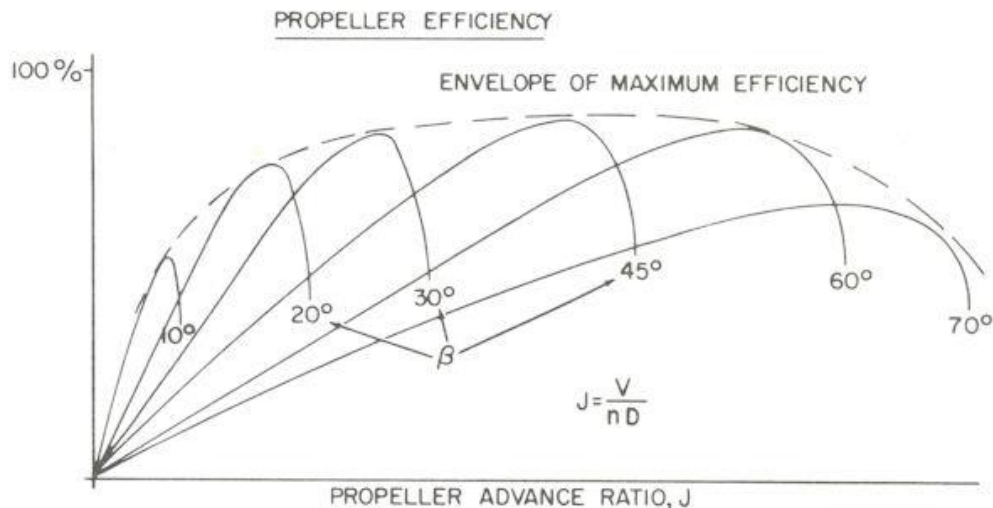
Flygplan med skjutande propellrar har tillverkats i många olika modeller, med start 1903 då bröderna Wright flög sin *Wright Flyer* för första gången. Under åren har det tillverkats en hel del jaktplan med skjutande propeller, just av anledningarna att det är lättare att montera utrustning i fören och att sikten för piloten blir bättre. Nackdelarna är att om piloten behöver ta sig ut ur flygplanet så blir propellern en potentiell livsfara, därför utrustades planen så småningom med katapultstolar. I figur 2.3 syns ett svenskt plan med skjutande propeller, SAAB J21.



Figur 2.3. SAAB J 21, jakt- och attackplan från 1945 med skjutande propeller. (wikimedia commons)

2.2.7 Propellerverkningsgrad

En propeller med fix stigningsvinkel har ett mycket snävt spann för hög propellerverkningsgrad. Verkningsgraden stiger snabbt och faller snabbt med varierande avanceringsstal vilket illustreras i figur 2.4. För hög verkningsgrad i ett stort spann flygfall krävs en propeller med ställbar stigning. Det blir uppenbart att en propeller med fix stigningsvinkel behöver väljas mycket noggrant beroende på vilken typ av flygning som skall utföras, då verkningsgraden sjunker kraftigt utanför ett relativt snävt intervall.



Figur 2.4. Propellerverkningsgrad som funktion av avanceringstalet för olika stigningsvinklar [4].

2.2.8 Beteckningar

En propellers storlek benämns efter systemet AxB, där A betecknar propellerns diameter och B propellerns stigning. En propeller med benämning 10"x7" har en diameter på 10 tum och sträckan den skruvar genom luften på ett varv är 7 tum.

2.3 Elmotorn

En växelströmsmotor består av en stator och en rotor. Statorn står stilla och rotorn roterar antingen kring eller inuti statorn. Den ena delen är försedd med magneter och den andra ett antal lindningar av koppartråd. Vid strömsättning av lindningarna bildas ett magnetfält som magneterna reagerar på. Magneterna kommer antingen attrahera eller repellera från magnetfältet och strömsätts lindningarna i rätt sekvens kommer det bli en rotationsrörelse mellan stator och rotor. Vid rotation kommer en annalkande magnet att attraheras av lindningens magnetfält, i passageögonblicket polvänder strömmen och en repellerande kraft uppstår [16].

2.3.1 Borstlös outrunner (BLDC)

Att en elmotor är borstlös innebär i praktiken att magneten roterar och lindningarna står still. Detta gör det enkelt att förse motorn med elektricitet. Borstarnas uppgift är att överföra strömmen mellan stator till rotor, men när lindningarna inte roterar (en stator) behövs ingen sådan lösning. Outrunner och inrunner talar om ifall rotorn (i detta fallet magneten) sitter monterad invändigt eller utvändigt på statorn. Outrunner innebär att hela motorns ytterhölje med magnetpolerna roterar runt lindningarna. Magneter och

lindningar kan observeras i figur 2.5 (a) och (b). Outrunners har ofta fler poler än inrunners och roterar därmed långsammare än en inrunner av samma storlek. De har ofta lägre vikt än motsvarande inrunners. En BLDC är en synkronmotor vars varvtal är låst till fashfrekvensen, oavsett pålagd last. Vid ökad last ökas effekten medan varvtalet förblir oförändrat, vilket gör att en noggrann återkoppling av rotorvinkel till styrdonet/ESCn är viktig.



(a) 14 magnetpoler synliga



(b) Monterad på testriggen

Figur 2.5: 14-polig borstlös outrunner.

2.3.2 KV-tal

När en elektrisk ledare befinner sig inuti ett varierande magnetfält induceras en elektromotorisk motkraft (EMK) i ledaren [14]. EMK är proportionerlig mot antalet lindningar och magnetfältets styrka och bestämmer värdet på KV-talet. Fler lindningar och/eller kraftigare magnet ger högre EMK och lägre KV. Vid dubbling av antalet lindningar och dubbelt så stark magnet ökar KV fyrfald. KV står för constant velocity och talet talar om hur snabbt motorn roterar per volt och utan last.

Ett högt KV innebär få varv med tjock tråd som leder mer ström med lägre spänning. Vridmomentet blir lägre vid högt KV och brukar passa för små propellrar som ska rotera med hög hastighet. Ett lågt KV innebär många varv med tunn tråd som leder mindre ström men med högre spänning. Lågt KV ger högre vridmoment vilket innebär att motorn orkar dra runt en större propeller. KV-talet ger en indikation på hur motorn är tänkt att användas.

2.4 ESC

För att styra en elmotor krävs styrdon som talar om för motorn vad den ska göra. En typ av styrdon är ESC (electronic speed control) som med hjälp av en H-brygga kan kontrollera effektnivån ut till motorn.

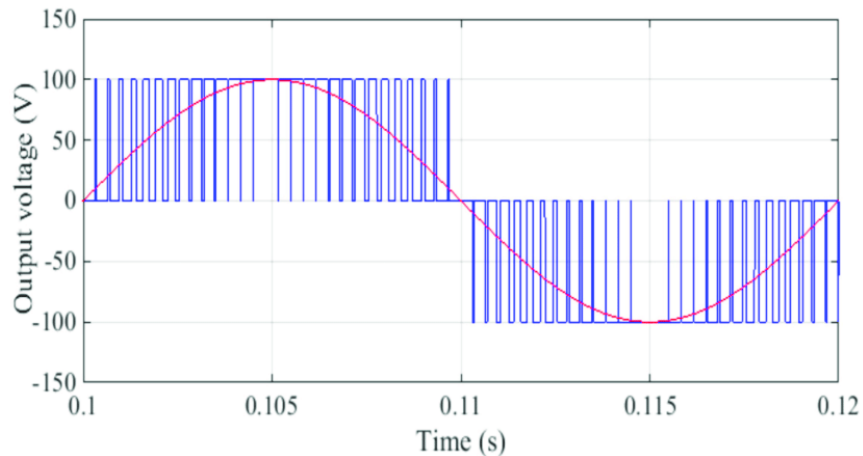
2.4.1 Pulsbreddsmodulering, PWM (pulse width modulation)

Pulsbreddsmodulering är ett sätt att forma en signal så att man till exempel steglöst kan reglera effekt och varvtal på en elmotor.

Inne i ESCn finns en så kallad H-brygga. Den sitter mellan två ingående likströmspoler och tre utgående faser. H-bryggan tar ström från de två ingående likströmspolerna via sex transistorer, två för varje utgående fas, en styr pulser från plussidan och den andra från minussidan. Transistorerna slår av och på och bildar med hjälp av timade pulser var

sin sinusvåg med 120° förskjutning. Alla tillslag sker med full spänning, i början på perioden är tillslagstiden kort, för att förlängas och sedan avta igen.

Medelspänningskurvan som bildas kan se ut som exempelvis en sinusvåg och imitera en växelströmsfas. I figur 2.6 ses ett exempel på hur en sinusvåg kan skapas med hjälp av pulser av varierande längd. Då vågen blir negativ polvänder H-bryggan utgående spänning och växelström har skapats.



Figur 2.6. Pulsbreddsmodulering under en period för en av faserna. [12]

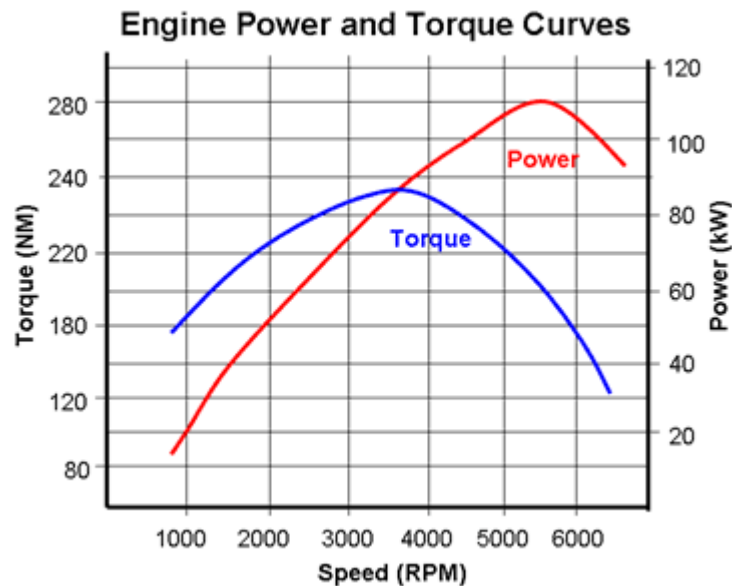
Utgående effekt styrs med hjälp av två parametrar, cykeltid och tillslagstid. Cykeltiden är konstant och väljs av användaren utifrån motorns tidskonstanter. Tillslagstiden avgör hur bred pulsen blir, hur stor del av cykeltiden som ska fyllas upp med puls. Vill man öka uteffekten kan man antingen korta ner cykeltiden eller öka tillslagstiden. Längre tillslagstid drar mer ström och kommer ge en högre sinuskurva och högre effektivspänning ut från ESCn.

2.4.2 Rotorvinkelåterkoppling

För att kunna modulera faserna korrekt krävs att ESCn vet vilken rotorvinkel motorn har vid ett visst givet ögonblick. Återkoppling med rotorvinkeln sker via den fasen som i ett ögonblick inte är aktiv. Magneterna i motorn genererar en reaktionsström i den inaktiva fasen, som blir olika stor beroende på hur snabbt den passerar. På detta vis kan ESCn avgöra vilket varvtal motorn har.

2.5 Motor- och systemkaraktistik

Motorns karaktistik beskriver hur motorn arbetar vid olika varvtal. En graf som visas i figur 2.7 kan beskriva hur vridmoment, effekt eller verkningsgrad förändras med varvtalet. Olika motorer har olika karaktär och arbetar olika bra vid olika driftfall, därför är det i många fall av vikt att välja en motor med en specifik karaktistik, för att maximera den totala effektiviteten.



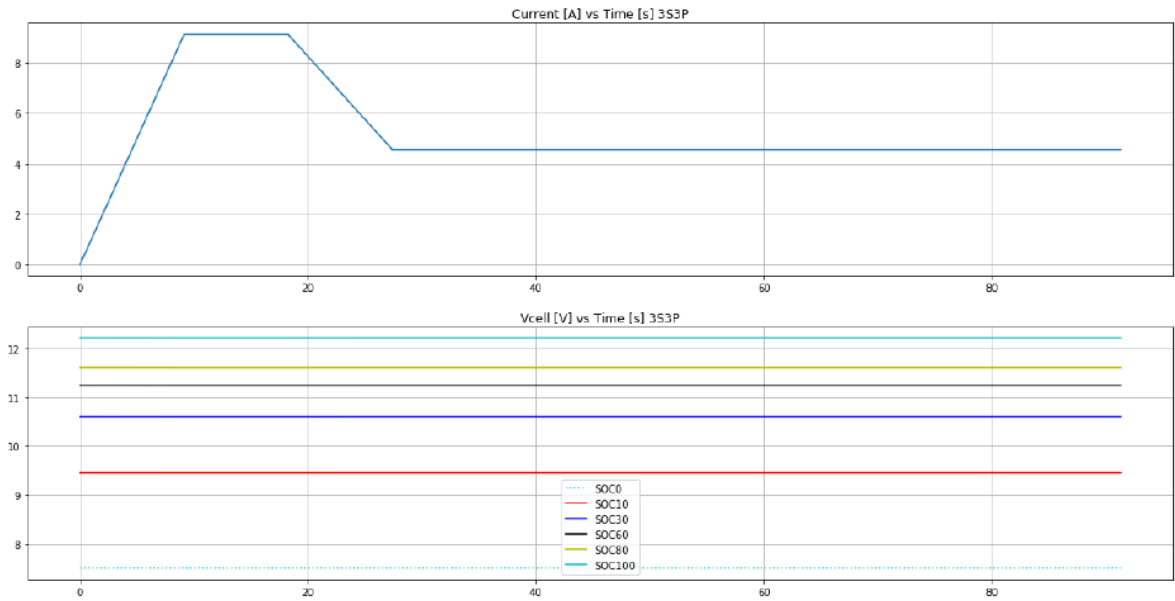
Figur 2.7. Motorkaraktistik för vridmoment och effekt hos en specifik motor. [5]

Det är viktigt att notera att driftpunkten med högst verkningsgrad för ett helt system inte behöver vara samma som den för enbart motorn. Fler aspekter måste då tas hänsyn till, till exempel hur effektivt speedcontrollern och motorn arbetar tillsammans.

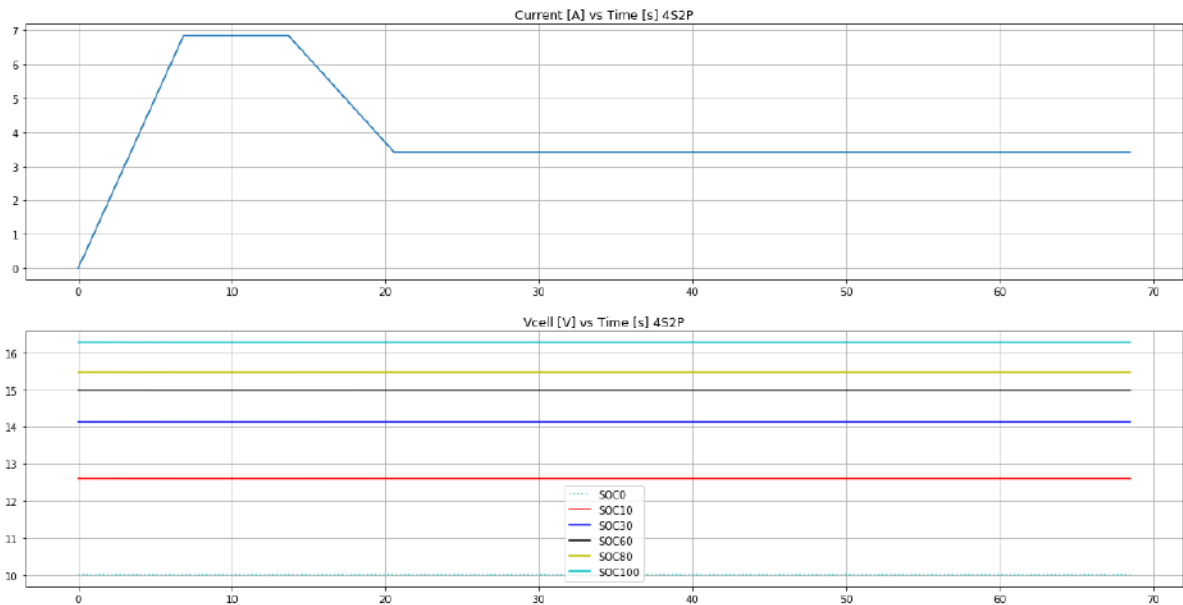
2.6 Batterier

Vid tillfället då detta arbete utförs har det ännu inte beslutats vilken uppsättning batterier som kommer driva motorn. Det står mellan två olika konstellationer av 3,7-Volts lithiumjonbatterier, 4S2P och 3S3P. 4S2P står för fyra seriellt och två parallellt kopplade batterier och 3S3P för 3 seriellt och 3 parallellt kopplade batterier. Detta ger två olika nivåer för spänning och maximalt strömutfåg. För de modeller som är aktuella vid författandet av den här rapporten har varje battericell ett energiinnehåll på 13 Wh och 8 respektive 9 batterier ett energiinnehåll på 104 respektive 117 Wh.

Tester har utförts på de två konstellationerna för att kartlägga batteriernas verkliga prestanda med avseende på SOC (state of charge) [6]. Graferna i figur 2.8 (a) och (b) är framtagna av företaget [6] som tillhandahåller batterierna. För respektive batterikonstellation visar den övre grafen strömutfången och den undre spänningsnivån vid pålagd last om 50 W.



(a) 3S3P.



(b) 4S2P.

Figur 2.8. Strömåtgång vid pålagd last samt spänningsnivå vid olika SOC [6].

Figur 2.8 (a) och (b) visar att det är stor skillnad i spänning beroende på vilken laddningsgrad batteriet har. 4S2P-batteriet varierar mellan 16,4 volt som fulladdat till runt 10 volt helt urladdat. 3S3P-batteriet varierar mellan 12,3 och 9,5 V. Bilderna visar även på den strömtopp som uppstår vid till exempel starten av en elmotor. Efter starten lägger sig strömmen stabilt vid konstant effekt.

2.7 Systemeffekt och energi

Framdrivningssystemet ska klara av att hålla drönaren i en marschfart på 35 m/s under ca 10 minuter och sedan lågfart 15 m/s under ca 40 minuter. Förutom framdrivningssystemet kommer det finnas andra komponenter som kamera, radiokommunikation, autopilot, GPS mm som också kommer ta energi från batteriet.

Denna övriga utrustning förväntas dra ca 5 W kontinuerligt. I sammanhanget kommer framdrivningssystemet stå för den mest energikrävande delen ombord och effekten av övrig utrustning kommer inte tas med i beräkningarna i detta arbete.

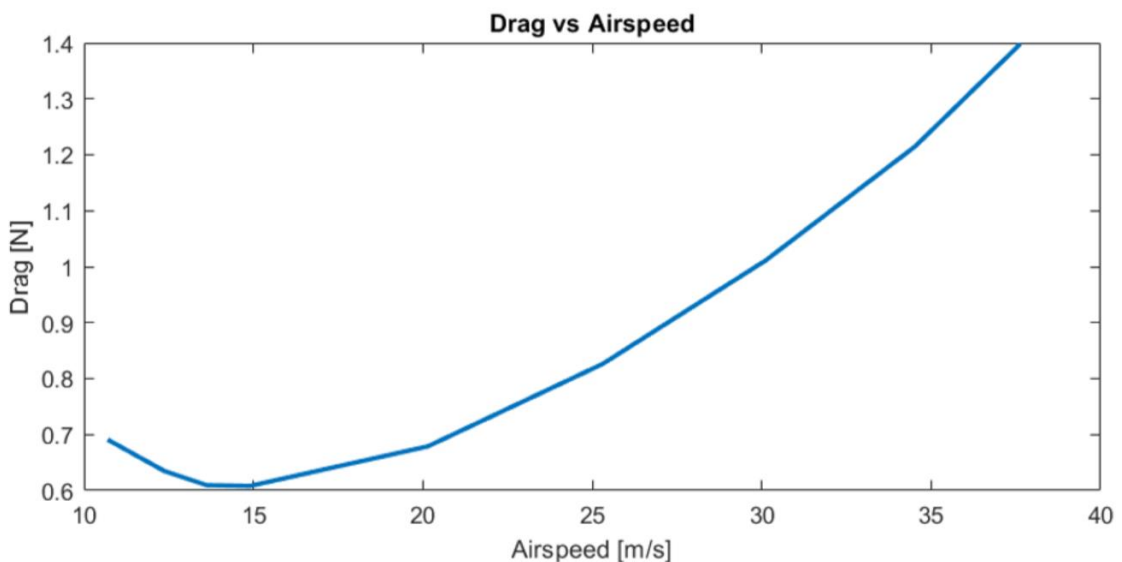
Effekten för ett drivsystem utan förluster beskrivs av formeln:

$$P = F \cdot V \quad \text{Ekv. 2.2}$$

För vår drönare kan Ekv. 2.2 skrivas som:

$$P_{tot} = (D \cdot V) \cdot \frac{1}{\eta_{tot}} \quad \text{Ekv. 2.3}$$

Verkningsgraden för propellern och motorn ligger vid optimala omständigheter runt 0,8 vardera [17][4], således blir den totala verkningsgraden $\eta_{tot}=0,64$. Verkningsgraden kommer i verkligheten att variera vid olika flygfall, med störst variation i propellerns verkningsgrad som beskrevs i avsnitt 2.2.7. D i ekv 2.3 står för luftmotståndet och visualiseras av kurvan i figur 2.9. Kurvan är ett resultat av en tidigare utförd magisteruppsats [7] i vilken den aerodynamiska designen för drönaren togs fram.



Figur 2.9. Luftmotstånd vs. fart genom luft [7].

I tabell 2.1 presenteras teoretisk systemeffekt vid olika vindhastigheter.

Tabell 2.1. Erfordrad teoretisk effekt vid olika vindhastigheter.

Hastighet genom luft, v (m/s)	Luftmotstånd D(N)	Totaleffekt, Ptot (W)
15	0,61	14,3
25	0,85	33,2
35	1,25	68,4

Den maximala erfordrade effekten som batteriet måste tillhandahålla är enligt tabell 2.1 ca 68,4 W. För ett batteri på 11,1 V innebär det ett strömuttag på 6,2 A och för 14,8 V ett strömuttag på 4,6 A. Maxfart ska bibehållas under ca 10 minuter med efterföljande lågfart 15 m/s under ca 40 minuter. Den partiella och totala energiåtgången presenteras i tabell 2.2.

Tabell 2.2. Energiåtgången vid olika flygfall

Flygfall	Energiåtgång
Maxfart 10 min	11,4 Wh
Lågfart 40 min	9,5 Wh
Totalt per nominellt uppdrag	20,9 Wh

Total energiåtgång för enbart framdrivningssystemet under ett nominellt uppdrag blir ungefär 21 Wh. Notera att detta är den teoretiska energiåtgången utan yttre påverkan. Under ett verkligt uppdrag kommer drönaren behöva stiga, gira, ta sig igenom kastvindar med mera. Även flygtiden kommer variera och ibland bli längre än den nominella, vid till exempel utdragna räddnings- och sökinsatser. Att hitta en propeller med så hög verkningsgrad som 0,8 vid både 15 och 35 m/s är dessutom inte sannolikt. Det är lämpligt att välja en propeller med så hög sammanlagd verkningsgrad som möjligt för båda driftfallen.

Energiåtgången kan därmed variera kraftfullt vilket behöver tas höjd för vid val av batteri. Batteriernas energiinnehåll är 104 respektive 117 Wh, vilket täcker behovet för ett nominellt uppdrag med faktor fem.

2.8 Experimentanalys

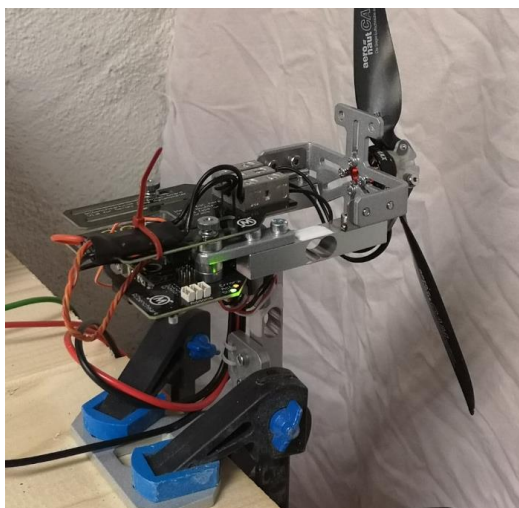
Resultatet av experimentet kommer i viss grad alltid påverkas av utrustningen som används, därför är det viktigt med en analys om utrustningens funktion, precision samt elektriska och fysikaliska effekter på omgivningen.

2.8.2 Skjutande propeller

Olika propellrar fungerar olika bra som påskjutande propeller på grund av hur känsliga de är för störningar i luftströmningar uppströms. Sådana störningar kan göra att luften inte släpper från propellerns bakkant på ett optimalt sätt och därmed försämra propellerns verkningsgrad avsevärt [9]. För att veta exakt hur bra en propeller arbetar i turbulensen bakom flygplanskroppen krävs att detta testas i vindtunnel, vilket inte rymms inom ramarna för detta arbete.

2.8.3 Testrigg

Testriggen från RCBenchmark (figur 2.10) är utrustad med lastceller för registrering av tryck- och dragkraft, vridmoment, vikt och vibrationer. Utöver detta registreras spänning, ström och varvtal. Utifrån dessa data räknas mekanisk och elektrisk effekt samt propellerns och motorns verkningsgrad ut.



Figur 2.10. Testrigg med ESC, motor och propeller monterade.

Testriggen monteras mot bordet med tving, vilket gör den stabil men samtidigt lätt att ompositionera.

2.8.4 Mekanisk obalans

Mekanisk obalans finns alltid och beror på toleranser, tillverkningsfel och asymmetrier hos roterande motordelar, axel, nav och propellerblad. Målet är att minska dessa obalanser genom att sålla ut felaktiga och skadade delar samt se till att montering sker på ett korrekt vis.

2.8.5 Vibrationer

Testriggen mäter kontinuerligt vibrationer under testningen. För att minska vibrationer och påverkan av dem kontrolldras alla skruvar med jämna mellanrum och samtliga lösa delar fästs med buntband. Testprogrammet har ett nödstopp som bryter strömmen om vibrationerna blir för stora. Vibrationsnivån för brytpunkten kan ställas in manuellt upp till programmets hårdkodade maxvärde.

2.8.6 Precision

Resultaten för fysiska mätningar kan aldrig bli exakta och det är viktigt att identifiera källor till felmarginaler och storleken på eventuella fel för att kunna bedöma resultatets tillförlitlighet. Man måste veta vilka avläsningsmetoder som används, hur de fungerar och hur de påverkas av olika omständigheter.

Det är också viktigt för att kunna analysera relevansen av olika resultat och hur felen i längden kommer påverka vid tillämpning av resultaten i analyser och i verkligheten.

Ett exempel på hur variationer i felmarginal kan uppstå är hur varvtalet mäts hos en elmotor. Rotorvinkelåterkopplingen kan fungera olika bra beroende på anpassningen mellan motor och ESC. Denna återkoppling ger varvtalet hos motorn som följaktligen kommer visa olika fel.

Felmarginalerna i resultaten vid användning av testriggen från RCBenchmark är små och uppges vara 0,5% för spänning, vidmoment och drivkraft och 1% för strömavläsning [18]. Det totala mätbruset i förhållande till resultaten bedöms som tillräckligt lågt för att resultaten ska kunna användas som beslutsgrundande.

Var de största felen finns, hur stora de är och vad de beror på kan till viss del avgöras genom att tolka resultaten. Exempelvis borde ett visst varvtal med en propeller också ge ett specifikt värde på drivkraften, vilket bekräftas av resultaten.

3

Metod

3.1 Tillvägagångssätt

3.1.1 Rampningstester vid 0 m/s

Testerna utförs inledningsvis i statisk omgivning, det vill säga med avanceringsstal $J = 0$. Resultaten loggas vid upprampning och nedrampning av effektmatning vid spänningsnivåerna 11,1 V och 14,8 V som simulerar de två batterikombinationerna som kandiderar för att slutligen användas i drönaren. Maximal ström är 5,3 A.

Arbetet inleds med att testa alla propellrar med en och samma kombination av motor och ESC. Den propeller som visar sig vara mest effektiv vid 50 W effektmatning går vidare för fortsatt arbete. I nästa steg behåller vi samma ESC och propeller men byter ut motorn tills alla motorer har körts. Den mest effektiva kombinationen av motor och propeller för ESC nr 1 är nu framtagen. Proceduren upprepas med ESC nr 2 och 3.

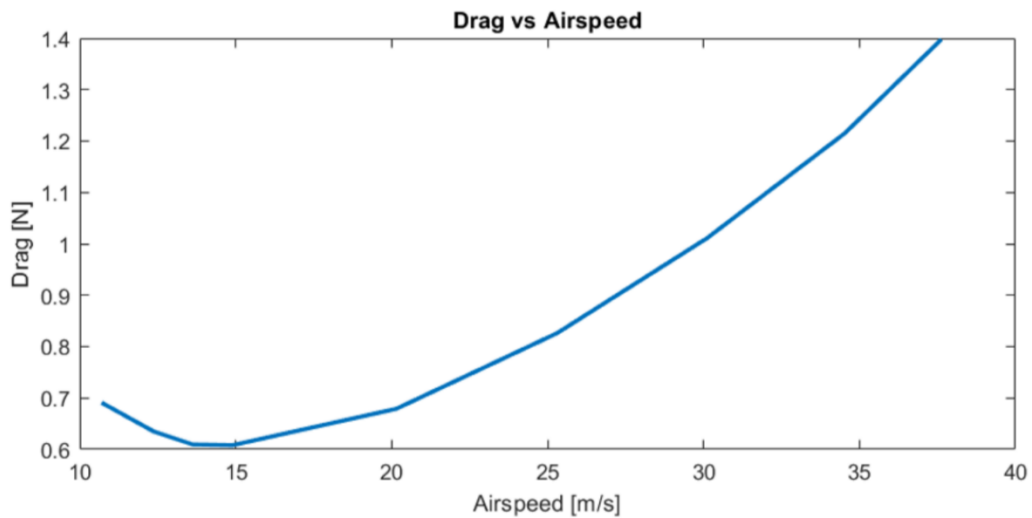
Verkningsgraden hos en propeller beror av avanceringsstalet och går således inte att beräkna vid $J = 0$. Resultaten får ses som en fingervisning och slutligen analyseras i förhållande till varandra.

3.1.1.1 Motrotation

Ett test kommer även utföras med felaktig rotationsriktning på propellern för att bedöma storleken på drivkraften som i detta fall blir en bromskraft. Motrotation skulle kanske kunna vara behjälplig vid landning, då en bromsande kraft kan underlätta och dämpa ett eventuellt fall. Syftet med testet är att bedöma om tillämpningen av motroterande propeller kan vara en lämplig lösning på landningsproblematiken. Testet utförs med spänningen 14,8 V och upprampning till 70 W.

3.2 Krav på drivkraft

Drönarens design och geometri är resultatet av en tidigare magisteruppsats [7]. Grafen i figur 3.1 är resultatet av vindtunneltester som gjordes i samband med detta.



Figur 3.1. Luftmotstånd vs. fart genom luft [7].

Kurvan beskriver vilket luftmotstånd som måste övervinnas vid olika farter genom luften. Vid 15 m/s kräver drönaren att drivsystemet ger en drivkraft på 0,61 N och vid 35 m/s krävs drivkraft på 1,25 N.

3.3 Motorer

Sju motorer ska testas. För att förenkla hanteringen av data har alla motorer tilldelats ett identifieringsnummer från 1-7. Nummer och namn ses i tabell 3.1 och utseende i figur 3.2. Motorn från AXI är större än övriga motorer och genererar högre vridmoment.

Tabell 3.1. Motorer med identifieringsnummer.

- 1: AXI 2212/12, Gold Line, KV 1959
- 2: EMAX RSII-2206, 2300KV
- 3: EMAX RSII-2206, 1900KV
- 4: EMAX RSII-2206, 1700KV
- 5: Hobbywing 2207, 1750KV
- 6: Skystars ST2306, KV 1800
- 7: XING 2208, 1800KV



Figur 3.2. Från vänster motorer 1-7.

Alla motorer är 14-poliga borstlösa outrunners. De har KV-tal som varierar mellan 1700 och 2300.

3.4 Propellrar

3.4.1 Propellrar

Fyra olika propellrar av märket Aeronaut CAM carbon ska testas. Bladen är tillverkade av en blandning av kolfiber och nylon för att ge dem hög hållfasthet och vridstyvhet med låg vikt. Vingprofilen är mycket tunn och utformningen av den är baserad på avancerade beräkningar för att få fram ett blad med hög effektivitet [10]. I arbetet betecknas propellrarna med bokstäverna A-D, för att förenkla hanteringen av data. Propellrar med beteckning presenteras i tabell 3.2 och i figur 3.3.

Tabell 3.2. Propellrar A-D.

Beteckning	Storlek
A	12x6,5"
B	11x7"
C	11x6"
D	10x7"



Figur 3.3. Propellerblad i storleksordning.

3.4.2 Verkningsgrad

Verkningsgraden hos propellern beror av avanceringsstalet J som i sin tur beror av vindhastigheten. Vid tester med relativ vindhastighet 0 m/s finns det alltså ingen möjlighet att räkna ut någon verkningsgrad, då den teoretiskt sett är 0.

Verkningsgraden kan räknas ut med hjälp av ekv 3.1:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} \quad \text{Ekv. 3.1}$$

där P_{in} är nettoeffekten efter att förluster från ESC och motor subtraherats och P_{ut} utgörs av drivkraften och kan beskrivas av formeln

$$P_{ut} = D \cdot V \quad \text{Ekv 3.2}$$

Verkningsgraden kan med ekvationerna 3.1 och 3.2 beskrivas

$$\eta = \frac{D \cdot V}{P_{in}} \quad \text{Ekv 3.3}$$

3.4.3 Nav

Propellernavet är konstruerat av Fredrik Falkman på SSRS och har tillverkats i plast och i aluminium. Plastnavet i figur 3.4 (a) är 3D-printat av Fredrik Falkman med materialet Formlabs Durable Resin som är framtaget för att imitera segheten och styrkan hos polyetylen. Gångor har skurits ut i hålet för motoraxeln med en M5-gångtapp. Det finns motorer med både höger- och vänstergängade axlar, således har det fått tillverkas både höger- och vänstergängade nav. Propellerbladen skruvas fast i navet med två 4 mm axelskruvar för plast.

Aluminiumnavet i figur 3.4 (b) är 3D-printat av Lasertech LSH AB och har gängats för hörgängad motoraxel. Propellerbladen fästs med M3-skruv.



1. *Plastnav*



(b) *Aluminiumnav*

Figur 3.4. Propellernav

Naven med vänstergänga självspänns mot motorns axel när axeln roterar, medan de hörgängade naven/axlarna kommer vilja skruva upp sig. Detta löses genom att stödja de hörgängade förbanden med gänglåsning.

3.5 ESC (speed controllers)

Det finns tre olika speed controllers med olika egenskaper som ska testas. De kommer i arbetet betecknas med bokstäverna X, Y och Z och presenteras i tabell 3.3 nedan.

Tabell 3.3. Lista över speed controllers.

X: Jeti SPIN Pro 33

Y: V-Good Airplane-32

Z: Hobbywing X-rotor Micro 30A

ESC X är den största och erbjuder ett antal inställningsmöjligheter för olika syften. Inställningsmoden som valts under testning är Mode 4 Glider outrunner. ESC Y är mindre och framtagen för att vara snabb, energieffektiv och lätt. ESC Z är minimalistisk och ultralätt men också framtagen för att vara reaktionssnabb och energieffektiv. ESCerna ses i figur 3.5.



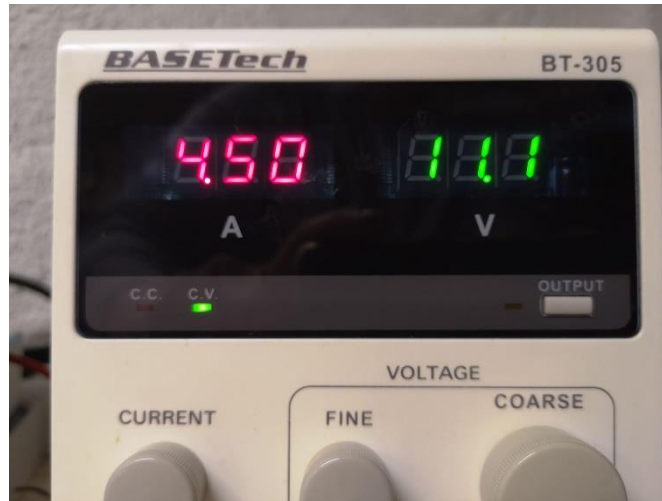
Figur 3.5. ESCar med beteckning från vänster: X, Y, Z

3.6 Kraftförsörjning

Testtriggen förses med ström från ett nätaggregat, en Basetech BT-305 Bench Power Supply med maxeffekt på 150W (max 30V, 5A). Spännings- och strömnivåerna som ska användas ska i så hög utsträckning som möjligt imitera de batterier som slutligen ska driva drönaren. Det finns två möjliga kombinationer av 3,7-volts Li-ionbatterier i konstellationerna 4S2P och 3S3P.

De för tillfället aktuella batterierna har testats av [6] och lastades med 3,5 respektive 4,5 A för att undersöka hur spänningen sjunker med SOC (state of charge). Vid ett SOC på ca 60% ligger spänningen på ca 11,1 och 14,8 V.

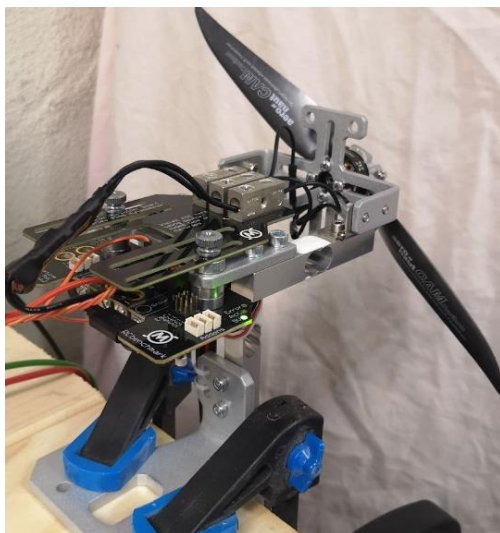
Värdena vid 60% SOC används härnäst i testningen. Nätaggregatet ställs in på 11,1 eller 14,8 V beroende på vilken batterikombination som ska simuleras och genererar en maximal ström på 5,3 ampère. Mätvärden kommer sedan att jämföras vid 50 W, alltså 11,1 V och ca 4,5 A eller 14,8 V och ca 3,3 A. Ett exempel på hur det kan se ut ses i figur 3.6.



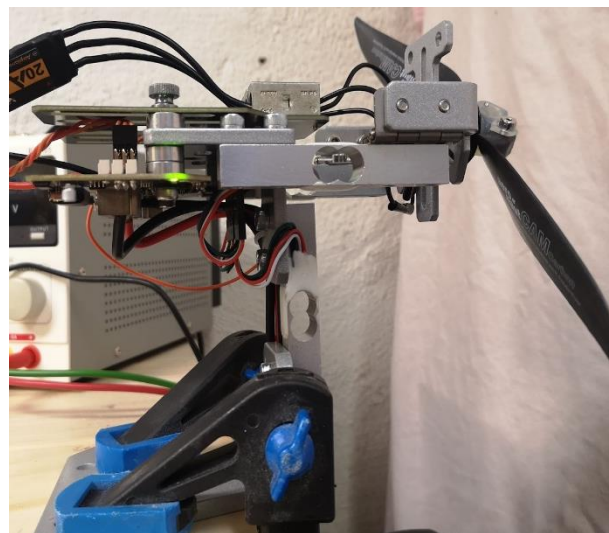
Figur 3.6. Nätaggregatet inställt på 11,1 V.

3.7 Testrigg

Testriggen från RCBenchmark i figur 3.7 (a) och (b) är utrustad med två lastceller för vridmoment och en för drag- och tryckkraft. Den läser av motorns varvtal genom att på den inaktiva fasen mäta spänningen som induceras av motorns roterande magneter. Även ESCn använder den här metoden för att avgöra när och hur faserna skall strömsättas. Det finns möjlighet att ansluta ohm-mätare för resistansmätning av motorns lindningar. Testriggen mäter även strömförbrukning, spänning och vibrationer. Det finns möjlighet att ansluta optisk varvtalsensor, temperaturgivare och styrdon för till exempel hastighet (ESC) och variabel pitch. Kretskorten ansluts till datorn via USB och styrs samt presenterar information i programmet RCBenchmark GUI 1.1.8.



(a)



(b)

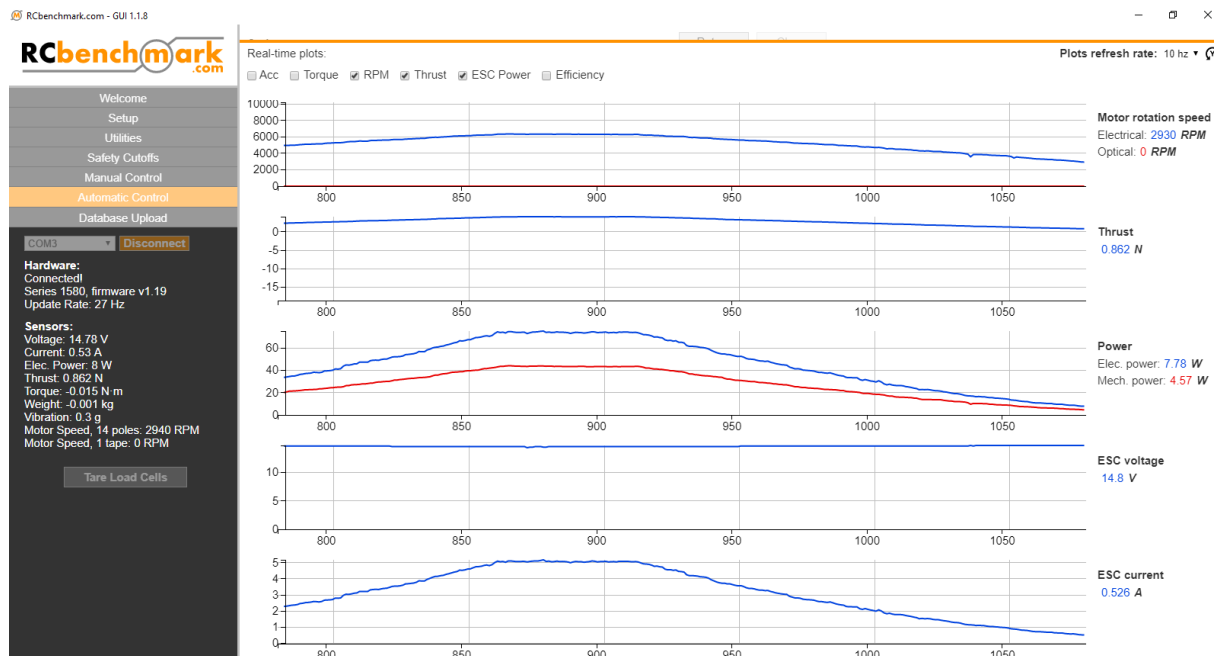
Figur 3.7. RCBenchmark Dynamometer 1580.

3.7.1 Kalibrering

Testrigger kalibreras med avseende på vridmoment och drivkraft med hjälp av testprogrammet RCBenchmark 1.1.8 och medföljande kalibreringsutrustning. Alla data och lastceller nollställs i testprogrammet innan körning.

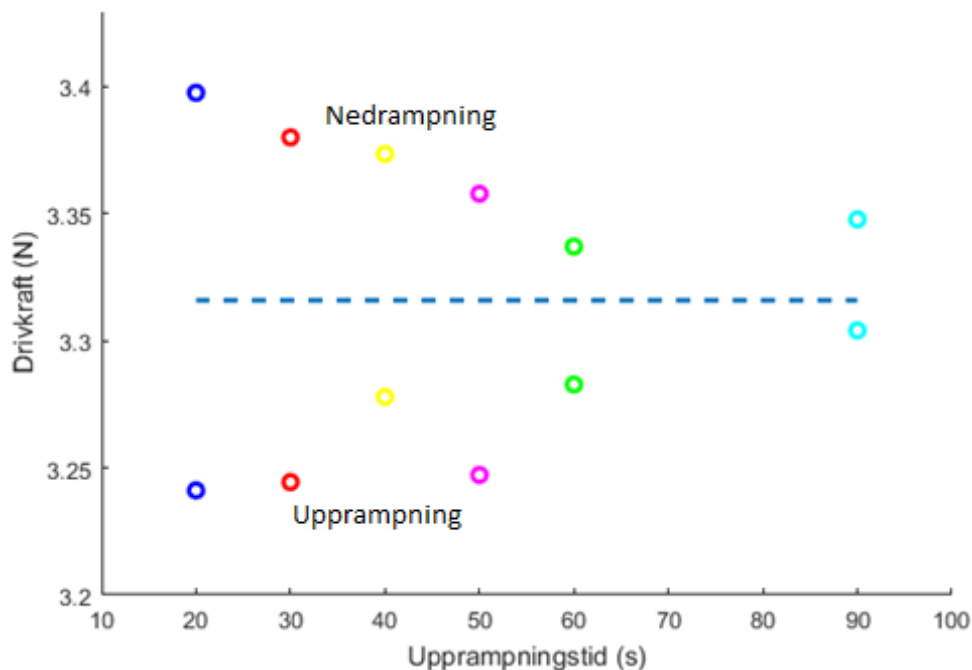
3.8 Testprogram/körcykel

Testerna styrs via programmet RCbenchmark GUI version 1.1.8, som körs på en HP-laptop. I figur 3.8 visas ett exempel på hur en körcykel kan se ut. Här övervakas elektrisk rotationshastighet, dragkraft (thrust), elektrisk och mekanisk effekt, spänning och ström in i speedcontrollern. Det går även att se grafer för vridmoment, acceleration och verkningsgrader för propeller, motor och hela systemet. I kolumnen till vänster visas alla mätvärden momentant.



Figur 3.8. Körcykel med upprampning, plåtå och nedrampning för 14,8V. Tid i sekunder på x-axeln.

Samtliga kombinationer av propeller/motor/ESC testas i samma körcykel. För att undersöka tillförlitligheten hos en körcykel har upp- och nedrampningstiden vid en kombination av komponenter varierats mellan 20, 30, 40, 50, 60 och 90 sekunder och resultaten mellan testerna jämförts vid effektmatningen 50 W. Resultaten ses i diagrammet i figur 3.9 där drivkraften vid upprampning beskrivs av punkten nedan den streckade linjen och drivkraften vid nedrampning ovan. Den streckade linjen är det totala medelvärdet av samtliga värden på drivkraften vid 50 W.



Figur 3.9. Dragkraften vid olika rampningstid samt medelvärdet av alla resultat.

I alla mekaniska system finns hystereseffekt eller tröghet som gör att det tar tid för systemet att hitta sitt jämviktsläge efter en ny styrsignal. När börsvärdet varierar snabbt i stora steg kommer ärvärdet skilja sig mer än vid långsammare förändring. Detta syns tydligt i figur 3.9 där rampningstiden varierats mellan 20 och 90 sekunder och dragkraftens värde vid 50 W är tagen vid upp- och nedrampning. Skillnaden mellan värdet vid upp- och nedrampning är större vid snabb upprampning och minskar ju långsammare styrsignalen förändras.

Med ökande rampstid verkar resultaten konvergera mot en medellinje, streckad i figur 3.9. Slutsatsen är att resultatet inte nödvändigtvis är avhängt mot upprampningstiden, så länge ett medelvärde räknas ut. Den streckade medellinjen vid 3,32 N bedöms kunna approximeras som ett medelvärde för dragkraften vid 50 W. Olika kombinationer av ESC, motor och propeller reagerar olika snabbt på stegförändringen och för att erhålla ett jämförbart resultat kommer medelvärdena jämföras. Differensen (delta) mellan drivkrafterna vid 50 W och upp- och nedrampning kan sedan jämföras för att bedöma kvickheten och stabiliteten i systemet.

Testerna körs med upprampningstid på 40 sekunder, en plåt på 5 sekunder och sedan nedrampning under 40 sekunder. Tiden som skulle gå åt att förlänga upprampningstiden så att upprampnings- och nedrampningsvärdena konvergerar ryms inte i detta arbete så alla resultat kommer jämföras med ett medelvärde mellan de två. För att kontrollera rimligheten i resultaten jämförs deltavärdet, alltså differensen som beskrevs i förra stycket. Vid avvikande deltavärde kan misstanke väckas om instabil körcykel och en bedömning ifall testet ska göras om får göras.

3.9 Datainsamling och presentation

All data övervakas och samlas in i programmet RCbenchmark GUI, version 1.1.8. Programmet skapar kommaseparerade loggfiler med all data som samlas in vid körningarna. Dessa kan öppnas och redigeras i Excel och datan importerar till Matlab R2016A. I Matlab skapas en kod som plottar kurvor och beräknar relevanta värden. Ett

exempel på sådan kod ses i figur 3.10 där drivkraften vid 50W beräknas vid upp- och nedrampning.

```
%Drivkraft vid 50 W under upp- och nedrampning.
equalthrust50W= interp1(epower(c:a),thrust(c:a),setpower);
equalthrust50W2= interp1(epower(a:b),thrust(a:b),setpower);
%Skriv ut Drivkraften vid upp- och nedrampning.
fprintf('Thrust vid 50W: %s och %d .\n',equalthrust50W,equalthrust50W2);
%Skriv ut medeldrivkraften
fprintf('Medel thrust vid 50W: %s.\n',(equalthrust50W+equalthrust50W2)/2);
```

Figur 3.10. Matlab-kod som beräknar drivkraften samt medelvärdet vid 50W.

3.10 Temperaturmätning av ESC

Samtliga speedcontrollers har genomgått temperaturtester för att bedöma risken för överhettning och behovet av kylning. Testerna har utförts med motorn AXI Gold Line och den största propellern med dimensioner 12"x6,5" vid effektmatning på 70W, vilket ungefär motsvarar den elektriska effekt som teoretiskt krävs för att framföra drönaren i 35 m/s. Temperaturen på speedcontrollern mättes varje minut under 3 minuters körning. Det är den högsta temperaturen över ytan som registrerats och mätningarna görs med en IR-termometer från Dibotech.

3.11 Bedömning av propellerblad

Det är viktigt att propellerbladen inte har några fel när jämförande tester ska göras. Ojämnheter i materialet, skador och asymmetri kan ge stora effekter på resultatet och dessutom bidra till obalans som kan skada testutrustningen. Ett propellerblad med diskvalificerande skador ses i figur 3.11.



Figur 3.11. Ett propellerblad med synliga skador som inte använts i jämförande testning.

3.12 Blockeringseffekt

Testerna har av säkerhets- och praktiska skäl utförts med propellern placerad 30 cm från en gles hyllvägg. Detta medför en blockeringseffekt där luftflödet bakom propellern störs av omgivande miljö. Jämförande test har utförts med fri luftström bakom propellern och resultaten visade att störningen medför en försämring i drivkraft med ca 3%. Detta motsvarar en förändring i drivkraft på ca 0,1 N. I sammanhanget är det en liten försämring som med tanke på att samtliga test körs under samma förutsättningar kan

bortses från. Syftet med testen är inte att erhålla exakta värden, utan jämförbara värden med någorlunda precision.

3.13 Säkerhet

Vid alla tester har skyddsglasögon använts. Det är också viktigt att aldrig stå i eller i närheten av propellerns rotationsplan. I datorprogrammet ställs maxvärden in och bryter strömmen om dessa överskrids. Vid allt arbete med propeller, motor och ESC på testriggen stängs nätaggregatet av och i de fall som är möjliga laddas kondensatorer ur för att minska risken för stötar. Alla anslutningar och kopplingar lödas eller tvinnas och säkras med eltejp. Alla nakna skarvar isoleras med eltejp. Vid arbete med utgående kablar från nätaggregatet vidtas extra vaksamhet för att undvika kortslutning.

För att minska riskerna ifall propellernavet skulle lossa från axeln placeras riggen med motoraxeln vänd mot en vägg. Operatören sitter minst 1 meter framför testriggen under körning. De högergångade propellernaven säkras med gänglåsning för att undvika att förbandet skruvar upp sig.

4

Resultat

Detta kapitel innehåller resultaten från rampningstesten med avanceringsstal $J = 0$ och fuktionstestet i vindtunneln.

4.1 Rampningstest

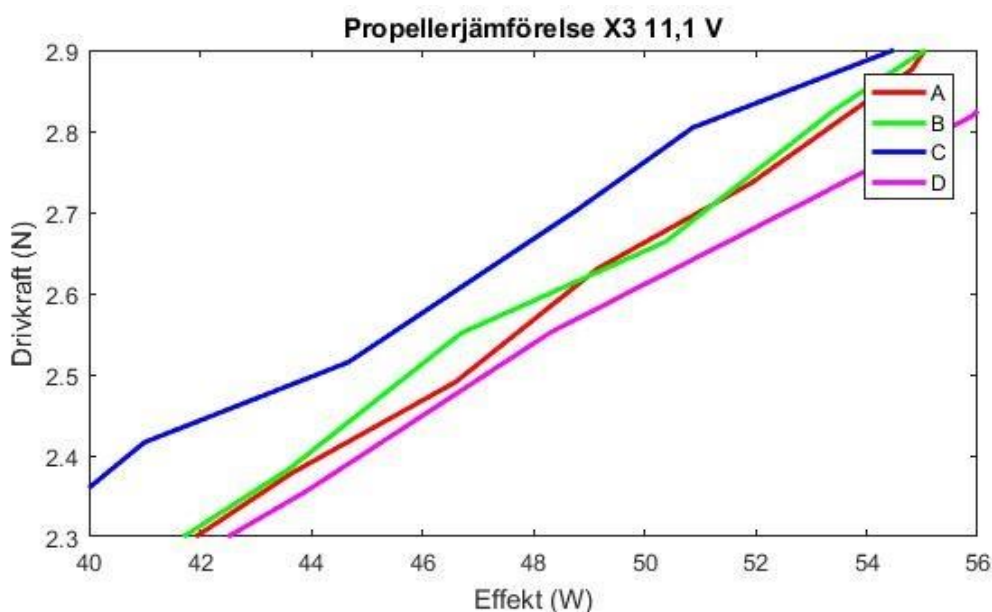
Detta avsnitt presenterar resultaten från rampningstesterna med avanceringsstal $J = 0$, d.v.s. vid vindhastighet 0 m/s. I avsnittet kommer endast grafer från testerna vid 11,1 V att presenteras då det är effektmatningen som avgör drivkraften för en viss kombination. Eventuella skillnader i resultat mellan spänningsnivåerna beror av förluster i komponenterna men förhållandet mellan resultaten kommer vara desamma. Värden på drivkraften vid en specifik effektmatning presenteras i tabellform för både 11,1 och 14,8 V.

4.1.1 Propellertest

Första delen av arbetet gick ut på att sälla ut den eller de propellrar som i kombination med en specifik motor och en specifik ESC hade bäst verkningsgrad. Propellernas drivkraft studerades vid 11,1 och 14,8 V. Proceduren upprepades för samtliga ESC och resultaten presenteras nedan i avsnitt 4.1.1.1 till 4.1.1.3.

4.1.1.1 ESC X, motor 3

Resultaten från testerna med ESC X (SPIN Pro 33) och motor 3 (EMAX RSII-2206, 1900KV) visas i figur 4.1. Det är tydlig skillnad mellan propellrarna och den med högst verkningsgrad är utan tvekan propeller C (11x6"). D gav ett sämre resultat medan B och C ligger mittemellan ger ett bättre resultat vid högre effekt och varvtal.



Figur 4.1. Propellrarnas genererade drivkraft vid olika elektrisk effekt och 11,1 V

Den genererade drivkraften vid 50 W presenteras i tabell 4.1. Värdena för 14,8 V är något lägre än för 11,1 V och propellrarnas resultatförhållande är likartat för båda spänningsnivåerna.

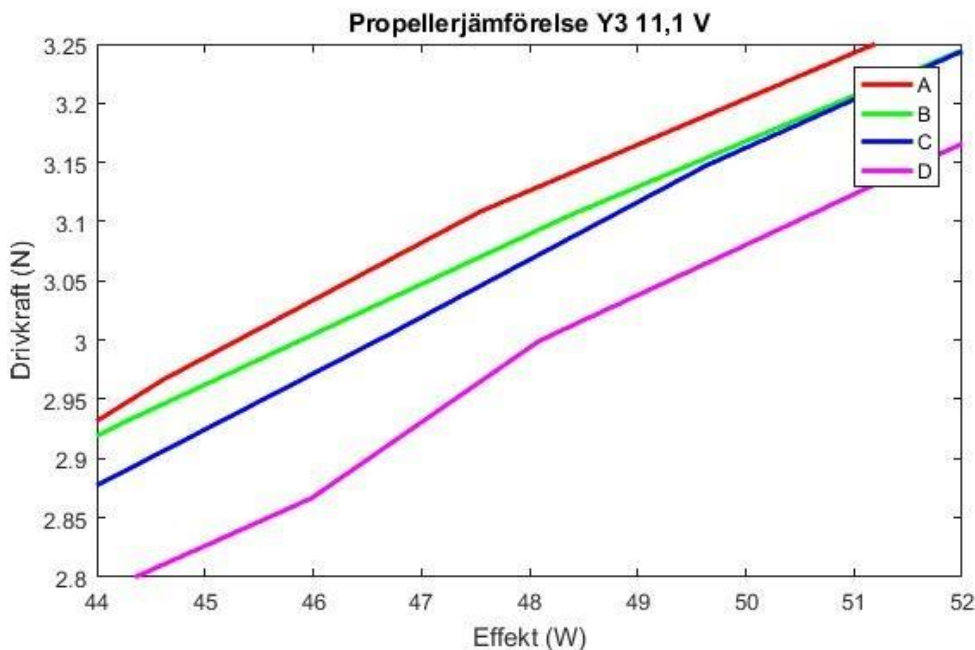
Tabell 4.1. Drivkraft [N] vid 50W

Spänning/Propeller	A	B	C	D
11,1 V	2,66	2,68	2,79	2,65
14,8 V	2,58	2,59	2,68	2,48

C visade sig generera ca 5% högre värden än övriga propellrar så beslutet togs att för ESC X enbart låta propeller C gå vidare i arbetet.

4.1.1.2 ESC Y, motor 3

Med samma metod som ovan genomfördes tester med ESC Y (Vgood), och motor 3 (EMAX RSII-2206, 1900KV), samma motor som tidigare. Resultatet presenteras nedan i figur 4.2. Precis som för testen med ESC X så presterar propeller D sämst. A, B och C presterar ungefär likartat, med A i topp för testet på 11,1 V.



Figur 4.2. Propellrarnas genererade drivkraft vid olika elektrisk effekt och 11,1 V.

Den genererade drivkraften vid 50 W presenteras nedan i tabell 4.2. Värdena för 14,8 V är även här något lägre än för 11,1 V. Generellt sett så ger A, B och C likvärdiga resultat och D ca 18% lägre.

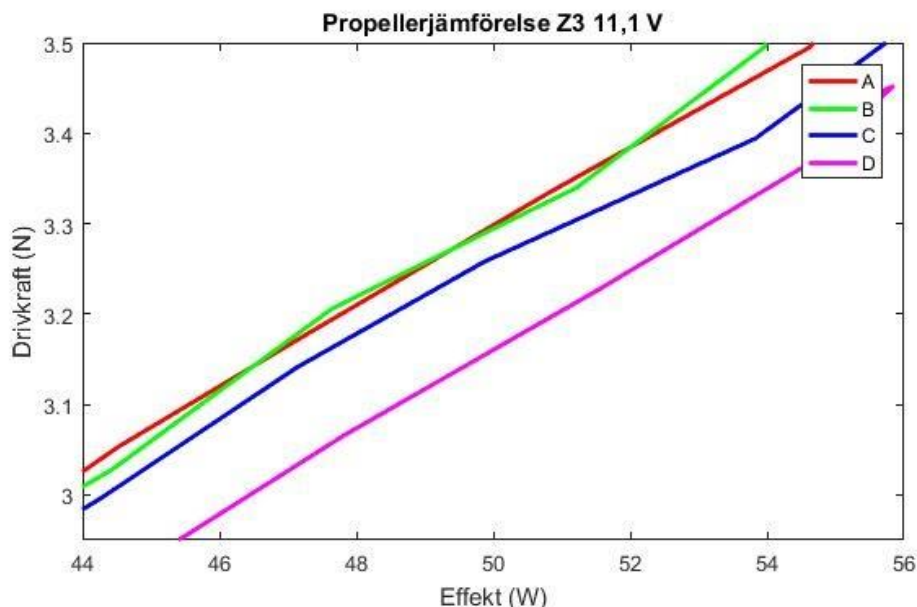
Tabell 4.2. Drivkraft [N] vid 50W

Spänning/Propeller	A	B	C	D
11,1 V	3,27	3,24	3,22	2,65
14,8 V	2,89	2,96	2,96	2,48

För vidare tester med ESC Y beslutas att propellarna A, B och C går vidare..

4.1.1.3 ESC Z, motor 3

Proceduren genomfördes med ESC Z (Hobbywing) och motor 3 (EMAX RSII-2206, 1900KV). Resultaten presenteras nedan i figur 4.3. Även med den här kombinationen presterar propeller D sämst. A, B och C presterar likvärdigt.



Figur 4.3. Propellarnas genererade drivkraft vid olika elektrisk effekt och 11,1 V.

Drivkraften vid 50 W presenteras i tabell 4.3 nedan. Testerna vid 11,1 V ger återigen bättre resultat än 14,8 V. Propeller A genererar högst värden följt av B och C. D genererar ca 5% lägre värden än övriga propellrar.

Tabell 4.3. Drivkraft [N] vid 50W

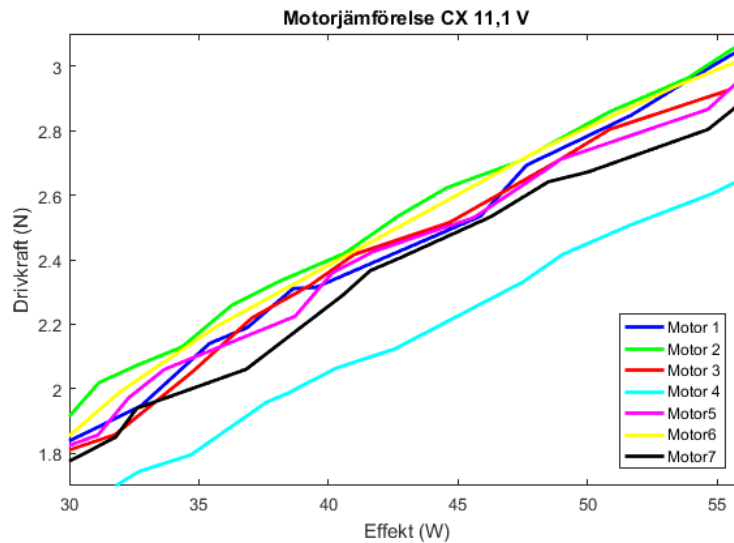
Spänning/Propeller	A	B	C	D
11,1 V	3,38	3,34	3,30	3,20
14,8 V	3,32	3,27	3,24	3,15

För vidare testning med ESC Z beslutas att A, B och C får fortsätta

4.1.2 Motorprovning

När de för de specifika ESCerna mest effektiva propellarna valts ut började provningarna av de 6 återstående motorerna. Vid motorbyte kördes tester med alla aktuella propellrar på båda spänningsnivåerna. Extra varsamhet iaktogs med de hörgångade motorerna (1, 5-7) vilkas propellernav drogs åt och kontrollerades kontinuerligt för att undvika att de skruvade upp sig under körning.

4.1.2.1 ESC X med propeller C



Figur 4.4. Drivkraft för motor 1-7 med propeller C och ESC X vid 11,1 V.

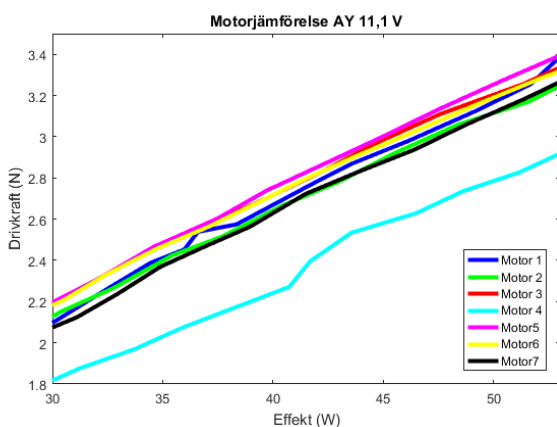
Testen med den lägre spänningen ger ett genomgående bättre resultat på drivkraften. Samtliga resultat ligger en bit under 3 N.

Tabell 4.4. Drivkraften [N] för propeller C med motor 1-7 vid 50 W.

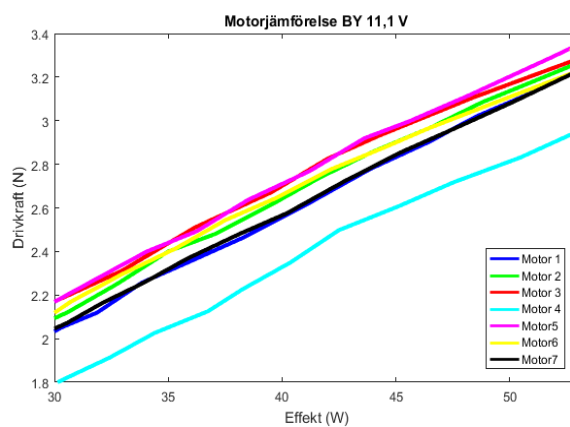
Prop	U [V]	1	2	3	4	5	6	7
C	11,1 V	2,84	2,86	2,79	2,49	2,84	2,84	2,72
C	14,8 V	2,77	2,75	2,68	2,39	2,75	2,72	2,63

4.1.2.2 ESC Y med propeller A, B och C

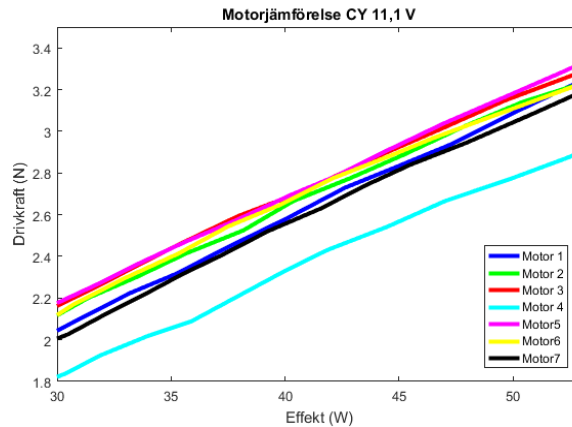
Vid dessa test visade sig motorerna arbeta ungefär likvärdigt, med undantag för motor 4 vars resultat är sämre. Motor 3 och 5 utmärker sig något och propeller A presterar överlag bäst. Motor 3 visar ovanligt stor skillnad i resultaten mellan de två spänningsnivåerna. Strömförsörjning med 11,1 V ger överlag högst värde på drivkraften.



(a) A



(b) B



(c) C

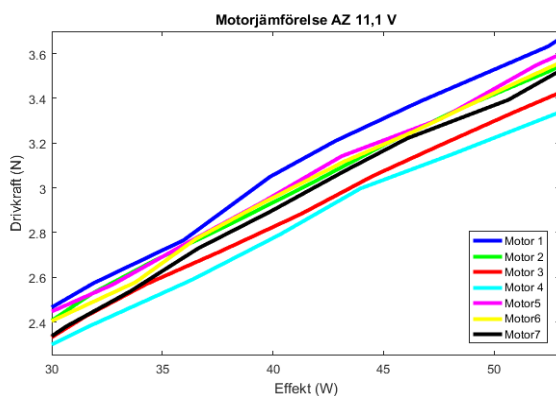
Figur 4.5. Drivkraft för motor 1-7 med propeller A, B och C med ESC Y vid 11,1 V.

Tabell 4.5. Drivkraften [N] för propeller A, B och C med motor 1-7 vid 50 W.

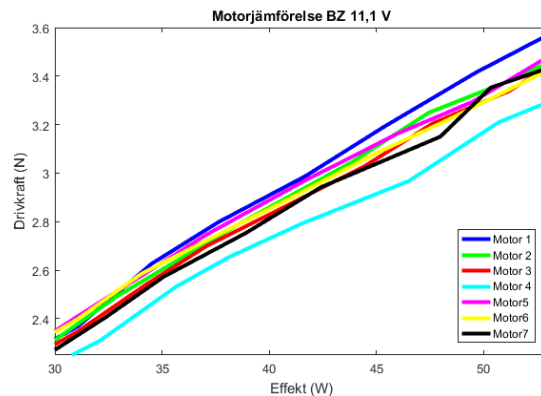
Prop	U [V]	1	2	3	4	5	6	7
A	11,1 V	3,23	3,16	3,27	2,84	3,30	3,25	3,18
A	14,8 V	3,14	3,11	2,89	2,55	3,07	3,02	3,06
B	11,1 V	3,15	3,17	3,24	2,85	3,26	3,16	3,12
B	14,8 V	3,05	3,05	2,96	2,58	3,11	3,02	3,01
C	11,1 V	3,14	3,16	3,22	2,82	3,23	3,20	3,09
C	14,8 V	3,04	3,04	2,96	2,59	3,11	3,10	3,02

4.1.2.3 ESC Z med propeller A, B och C

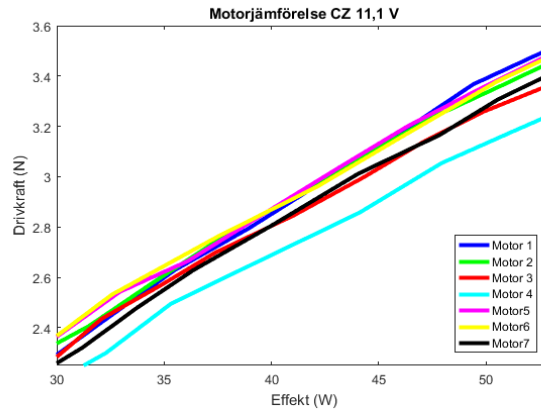
Resultaten från ESC Z är de högsta som uppmätts under dessa tester vilket tyder på att ESC Z arbetar mer effektivt än de övriga. För samtliga motorer ger propeller A högst värde på drivkraften och motor 1 presterade över lag bättre än de andra. Motor 4 presterar jämförelsevis dåligt även i den här kombinationen. Resultaten visualiseras i figur 4.6 (a), (b) och (c).



(a) A



(b) B



(c) C

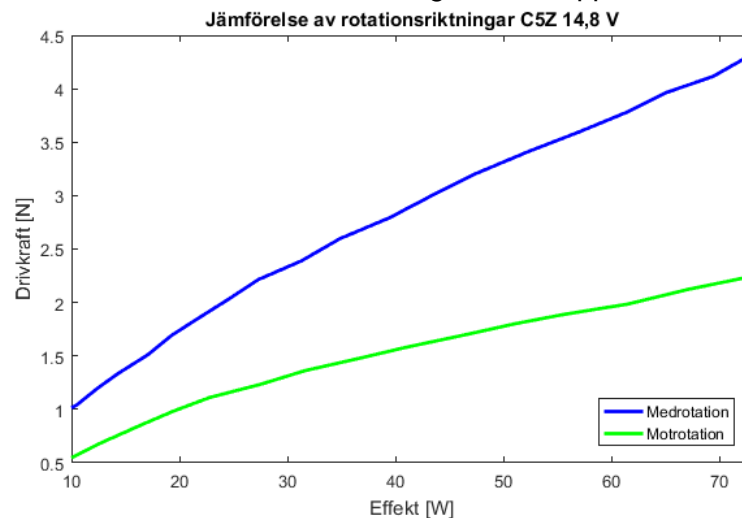
Figur 4.6. Drivkraft för motor 1-7 med ESC Y vid 11,1 V.

Tabell 4.6. Drivkraften [N] för propeller A, B och C med motor 1-7 vid 50 W.

Prop	U [V]	1	2	3	4	5	6	7
A	11,1 V	3,62	3,46	3,38	3,24	3,51	3,48	3,43
A	14,8 V	3,58	3,41	3,32	3,23	3,45	3,44	3,42
B	11,1 V	3,49	3,37	3,34	3,17	3,39	3,35	3,36
B	14,8 V	3,44	3,32	3,27	3,13	3,38	3,28	3,29
C	11,1 V	3,48	3,42	3,30	3,17	3,42	3,48	3,44
C	14,8 V	3,44	3,35	3,24	3,13	3,37	3,33	3,34

4.1.3 Motrotation

Resultatet från testet med omvärd rotationsriktning ses i figur 4.7. Här presenteras den genererade drivkraften för båda rotationsriktningarna vid upp till 70 W elektrisk effekt.



figur 4.7. Drivkraften [N] för propellerns två rotationsriktningar.

Det är tydligt att omvänd rotation genererar betydligt lägre drivkraft än korrekt rotation. I 0 m/s och upp till 70 W genererar omvänd rotation ungefär halva drivkraften mot korrekt rotation. Värt att notera är att detta test utförts i stillastående omgivande luft och alltså inte speglar ett verkligt fall. Det enda som kan utläsas ur testet är att den fiktiva propellerverkningsgraden vid dessa ineffekter verkar halveras vid omvänd rotation. Eftersom vi egentligen inte kan tala om några absoluta propellerverkningsgrader vid stillastående luft får detta test endast ses som en jämförelse mellan de båda rotationsfallen.

4.2 Funktionstest i vindtunnel

I funktionstestet i vindtunneln monterades testtriggen på en vertikal aluminiumbalk monterad på en lastplatta genom golvet. Materielen testades i 15 m/s och 35 m/s.

4.3.1 Haveri

Vid första körningen i 35 m/s visades att det 3D-printade propellernavet i Durable Resin inte klarade krafterna som uppstod i samband med körning i stark vind. Eftersom luften kommer in mot propellern med hög hastighet krävs en högre rotationshastighet för propellern att skapa tryck nedströms än vid lägre vindhastigheter eller stillastående körning. Den högre rotationshastigheten och trycket mot propellerbladen som ökade snabbt när de fälldes ut sig efter startögonblicket blev för stor påfrestning för materialet vid skruvförbandet. Av skadorna att döma har propellerbladet brutits loss från skruvförbandet, med start vid övre skruvhålet närmast kameran i figur 4.8 (a). Vid nämnt skruvhål har skruven slitits rakt upp medan det bortre sta skruvhålet har varit utsatt för större knäckning bakåt. Detta stämmer väl överens med rotationsriktning och propellerbladets tröghet. Teorin bekräftar av materialdeformationer på nav av samma typ och material som använts under tidigare testning. I figur 4.8 (b) kan observeras att hålet där axelskruven förs in har antagit en oval form på grund av den utåtriktade kraften från propellerbladet.



(a) Havererat propellernav



(b) Deformerat axelhål

Figur 4.8.

Obalansen som blev till följd av haveriet medförde stora krafter som deformerade delar av riggen och överbelastade lastcellerna så pass att de gick sönder och fick ersättas med nya. Det deformerade motorfästet ses i figur 4.9.



Figur 4.9. Deformerat motorfäste.

För att undvika liknande haveri i framtida vindtunneltester har ett propellernav i aluminium tillverkats.

4.3 Temperaturmätning ESC

Resultatet av temperaturmätningen presenteras i tabell 4.7 nedan. Temperaturen ökade snabbt för samtliga ESC men den från Jeti klarade inte mer än 2 minuter innan temperaturen var uppe i 90°C och testet avbröts. Jetis ESC ha en maximal operationstemperatur på 85°C, vilket är rimligt med hänsyn till mätfel och individuella variationer. ESCn från Vgood gick i 3 minuter innan temperaturen var uppe i 90°C och testet avbröts, vilket är 50% längre än den från Jeti. Vid mätningen av ESCn från Hobbywing upptäcktes det att mätdonet hade svårt att fånga upp temperaturen på kretskortets yta om ca 3 cm². Efter upprepade försök kunde ett par ungefärliga värden registreras, men det vore i sin rätta att utföra fler tester med mer finkalibrig mätutrustning för att få mer tillförlitliga siffror. Resultatet indikerar dock att Hobbywings ESC alstrar mindre värme än de två andra.

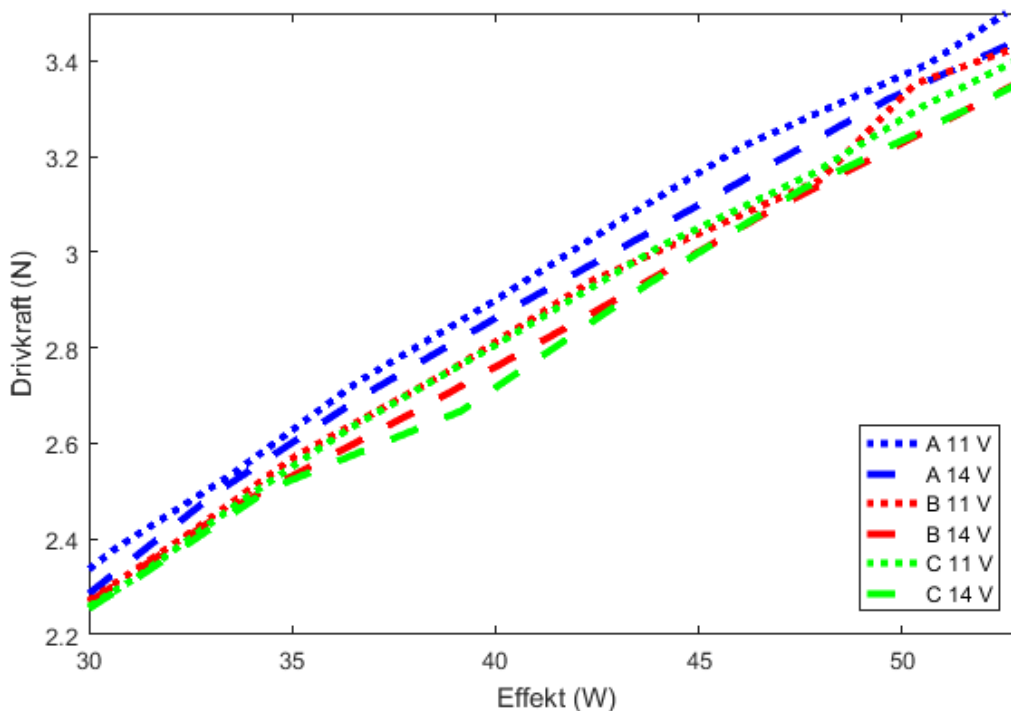
Tabell 4.7. Ytemperatur [°C] vid olika tidpunkter.

Tid (min)	Jeti	Vgood	Hobbywing
0	21,5	22,5	22.5
1	60	64	30
2	89	78	47
3	x	90	70

Viktigt att notera är att dessa temperaturtester utförts vid 0 m/s och att varvtalet på motorn kommer vara högre för samma drivkraft när drönaren har fart genom luften. Det kommer eventuellt också finnas viss kyleffekt beroende på var på drönaren ESCn monteras. Detta kan komma att påverka hur temperaturen stiger vilket gör det tydligt att detta endast kan ses som ett jämförande test om hur de tre ESCerna förhåller sig till varandra. Tydligt är dock att någon typ av kylning krävs för samtliga ESC.

4.4 Resultat av olika spänningsnivåer

För samtliga tester genererar 11,1 V högre värden på drivkraften än 14,8 V. Detta visualiseras i figur 4.10 där skillnaden i drivkraft mellan körningarna på 11,1 och 14,8 V kan ses för tre olika propellrar, motor 7 och ESC Z.



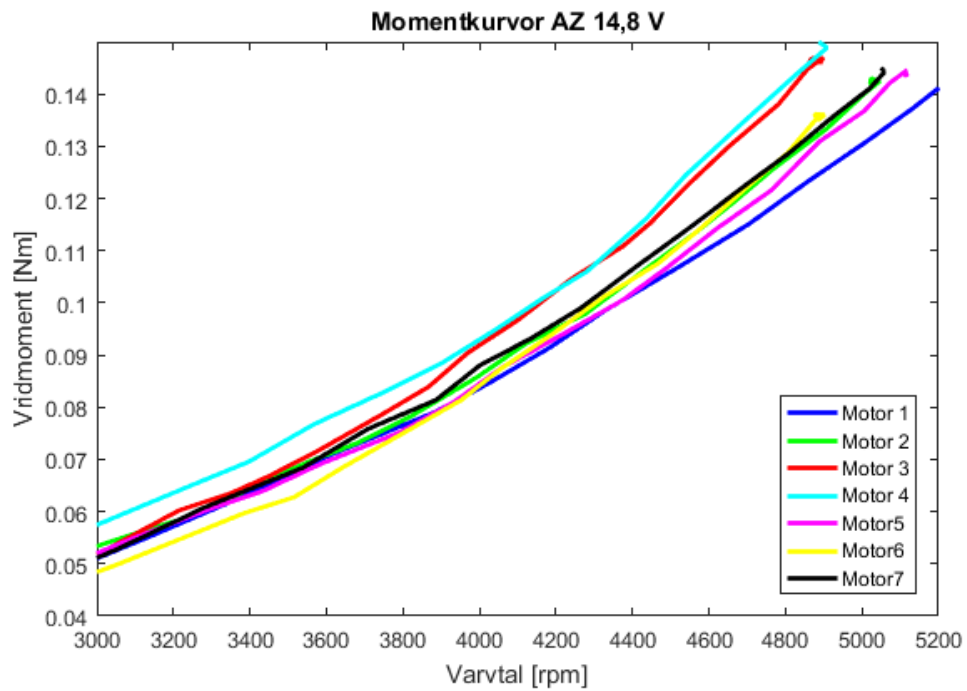
Figur 4.10. Jämförelse av resultat mellan 11,1 V och 14,8 V med propellrar A, B och C, motor 7 och ESC Z.

Mellan 45-50 W händer något i alla test som gör att drivkraftskurvorna för båda spänningarna konvergerar. Det ser ut som om drivkraften för 11,1 V flackar ut något, för att sedan åter divergera från 14,8 V-linjen. Ju större propeller desto senare kommer denna störning i kurvan. Detta har troligtvis att göra med motorns eller ESCns karaktäristik. Notera att för propeller A konvergerar kurvorna vid 50 W, vilket också bekräftar av resultaten för ESC Z (bilaga D), där skillnaden uppgår till maximalt 0,06 N. Efter 50 W ökar åter avståndet mellan kurvorna.

4.5 Teoretiskt vridmoment

Detta är inget verkligt vridmoment utan det teoretiska vridmomentet för systemet. En fix last, d.v.s. ett specifikt varvtal för en propeller, kräver i teorin samma vridmoment. I verkligheten finns det förluster och någon motor drar mer effekt vid ett specifikt varvtal än någon annan, vilket ger sämre verkningsgrad. Syftet med att plotta det teoretiska vridmomentet är att genom tidigare oanvända indata bekräfta testresultaten.

Kurvorna i figur 4.11 kan beskrivas som det verkliga inbördes förhållandet i verkningsgrad mellan motorerna. Kurvan för motor 4 ligger högst vilket bekräftar att den också ger mer förluster än övriga motorer. Motor 1 och 5 presterar mest effektivt och motor 1 blir relativt sett mer effektiv vid högre varvtal.



Figur 4.11. Teoretiskt vridmoment m.a.p. varvtal.

5

Diskussion

ESC Z genererar de utan tvekan högsta värdena på drivkraften, vilket talar för att den ESCn generellt sett arbetar mest effektivt, eller att den råkar vara bättre anpassad till de motorer som medverkar i testet. De högsta värdena erhöles med ESC Z tillsammans med motorerna 1,2 och 5. Propeller A presterar bäst men det kan finnas behållning i att även testa B, C och D i vindtunnel eftersom propellrar kan bete sig olika vid olika värden på J. Det är också av intresse att observera hur de olika propellrarna påverkas av strömningstörningar uppströms som uppkommer av drönarkroppen.

Vid studier av tabellen i bilaga D kan observeras att varvtalsåterkopplingen inte verkar ha fungerat helt optimalt under dessa test. Ett högre varvtal bör generera mer drivkraft, men testen med 14,8 V genererar enligt resultatet alltid ett lite högre varvtal, men lägre drivkraft än de med 11,1 V.

5.1 Förluster

Det är tydligt att förlusterna är olika stora för olika komponenter. Det är också tydligt att komponenterna arbetar olika bra sinsemellan och att vissa kombinationer har högre verkningsgrad än andra.

5.1.1 ESC

Det visade sig också att storleken på förlusterna i ESCn beror på hur hög batterispänningen är. Detta bekräftas av Gong och Verstraete i [11] där effektiviteten studerats hos 4 olika ESC vid tre olika spänningsnivåer. En ESC kan ses som en högfrekvent elektronisk switch vars förluster kan beskrivas av två dominerande delar. Den första är ledningsförlusterna och kan approximeras med formeln

$$P_{ledn} \approx D \cdot R_{in} \cdot I^2 \quad \text{Ekv. 5.1}$$

där D är pulskvoten, alltså hur stor del av cykeltiden strömmen är påslagen, R_{in} är den totala inre resistansen och I den inkommande strömmen. Den andra stora förlustdelen är switchförlusten som kan approximeras med

$$P_{sw} \approx \frac{1}{2} \cdot I \cdot U \cdot (t_{p\ddot{a}} + t_{av}) \cdot f \quad \text{Ekv. 5.2}$$

där U är spänningen, $t_{p\ddot{a}}$ och t_{av} är tiden switchen är på respektive av och f är switchfrekvensen. En tredje förlust är tomgångsförlust vilken förenklat varierar bilinjärt med strömmens och spänningens styrka.

Efter förenkling av ekv 5.1 och 5.2 kan verkningsgraden enligt [11] approximeras med

$$\eta \approx \frac{a \cdot I^2}{U} + b + \frac{c}{I} + \frac{d}{U} \quad \text{Ekv 5.3}$$

där a,b,c och d är konstanter. För en given effekt kommer ökande spänning att medföra minskande ström. Enligt ekvation 5.3 kommer ett sådant scenario medföra sjunkande verkningsgrad.

5.1.2 Motor

Förlusterna för motorerna beror enligt [13] till absolut största del av elektromagnetiska förluster som i sin tur består av två stora delar, ledningsförluster och järnförluster. Ledningsförlusterna beror av resistiv uppvärmning i kopparledningarna och definieras av

$$P_{ledn} = 3R_{\theta}I^2 \quad \text{Ekv 5.4}$$

där R_{θ} står för fasresistansen och I motorns fasström.

Järnförlusten är en effekt av bland annat hysteres i det elektromagnetiska fältet samt virvelströmsförluster i järnet.

$$P_{fe} = k_h f B^{\alpha} + \frac{k_e}{2\pi^2} \left\{ \frac{dB}{dt} \right\}^2 \quad (\text{W/kg}) \quad \text{Ekv 5.5}$$

där f , k_h , k_e och α är motorspecifika konstanter och B toppvärdet för magnetfältet som beror av I enligt

$$B = \frac{N \cdot \mu \cdot I}{l} \quad \text{Ekv 5.6}$$

där N är antalet lindade varv, l ledningens längd och μ permeabiliteten för mediet inuti spolen.

P_{ledn} kommer öka med kvadraten på strömmen. P_{fe} beror enbart av I och kommer enligt ekv 5.6 och 5.7 att öka med ökande ström. För motorns verkningsgrad är det alltså fördelaktigt med låg ström och hög spänning.

ESCn vill ha låg spänning och hög ström medan motorn vill ha hög spänning och låg ström. Testresultaten som genomgående visar sämre resultat för högre spänning bekräftar att förlusterna för ESCn dominerar.

5.2 Propellerverkningsgrad

Propellerverkningsgraden kan inte beräknas, utan måste tas fram genom omfattande tester i vindtunnel. Verkningsgraden kan variera stort vid olika flygfall och två till synes lika propellrar kan ha stor påverkan på systemverkningsgraden. Det hade underlättat stort i arbetet om det fanns verkningsgradskurvor för propellrarna att tillgå. Det hade bekräfta propellerns effektivitet vid olika driftfall och minska behovet av framtida vindtunneltester.

5.3 Två spänningsnivåer

För samtliga tester genererar 11,1 V högre värden på drivkraften än 14,8 V. Vid analys av kurvan i figur 4.10 i kapitel 4.4 noteras vid samtliga test för 11,1 V en utfläckning av kurvan mellan 45 och 50 W. Detta mönster ses alltså inte med kurvorna för 14,8 V. Utfläckningen kommer något senare med propellern med diameter 12" än för de andra som har diameter 11". Detta innebär att verkningsgraden för systemet sjunker något i detta intervall med denna spänning. Den definitiva orsaken till detta kan vara intressant att veta, för att undvika en eventuell försämring av verkningsgraden vid kritiska driftfall. För att ta reda på orsaken till detta krävs fler tester och analyser av drivsystemet med framtagning av moment- och effektdiagram för motorerna, verkningsgradsdiagram för ESCn och verkningsgradskurvor för propellrarna.

5.4 Temperaturmätning

Tiden det tog för komponenterna att bli överhettade rörde sig i stort mellan 2 och 3 minuter, vilket är väldigt snabbt med tanke på att effektmatningen i testet är ungefär densamma som ska hållas i minst 10 minuter under marschfart. Det kommer alltså finnas ett kylbehov oavsett vilken av komponenterna som ska monteras på drönaren. De temperaturmätningar som gjorts ska dock inte ses som något annat än en ungefärlig uppskattning av hur komponenternas värmeegenskaper förhåller sig till varandra. Fler och mer noggranna undersökningar vore i framtiden önskvärda, främst på den eller de ESC som blir aktuella att användas i drönaren. Testerna skulle behöva utföras med finare utrustning och noggrannare temperaturövervakning för att inte riskera överhettning. Detta i syfte att bedöma kylbehovet för att undvika överhettning vid flygning.

5.5 KV-talets påverkan

Motor 4 utmärker sig i samtliga test som den motor som presterar sämst. Motor 4 har också det med god marginal högsta KV-talet på 2300 och därmed låg elektromotorisk motkraft.

Ett högt KV-tal innebär kort, tjock lindningstråd, låg inre resistans som ger hög ström och hög rotationshastighet men lägre vridmoment. Detta passar mindre propellrar som ska rotera snabbt, vilket sannolikt innebär att de propellrar som medverkat i testerna varit för stora för motor 4. Enligt teorin skulle de mindre propellrarna på 11" generera bättre resultat än den på 12", men några sådana tendenser syns inte i resultaten. Sannolikt är skillnaden mellan propellrarna i sammanhanget så liten att KV-talet inte ger någon större effekt på dess resultat. Hade fler tester med fler storlekar på propellrar kunnat utföras hade en skillnad mellan dem förmodligen kunnat utläsas.

Motor 2 och 5 har 1700 respektive 1750 i KV-tal vilket är lägst bland de medverkande motorerna. Båda motorerna har i samtliga test med enstaka undantag presterat i övre skiktet. Motor 1 har ett i sammanhanget medelhögt KV-tal på 1950 men är också större än de andra med ungefär dubbla antalet lindningar och har trots KV-talet presterat i topp med både ESC X och Z. Den kombinerade effektiviteten beror både på komponenternas verkningsgrad och hur bra de samarbetar.

Motor 1 skulle med sitt både höga KV-tal och vridmoment kunna ha mer att ge med en större propeller, då dess drivkraft-effektkurva för de två största propellrarna ser ut att separera från övriga motorer vid runt 40 W och uppåt.

5.6 Tillförlitlighet i körcykeln

I bilagorna A-D kan varvtal, drivkraft vid upprampning samt medelvärde vid 50 W utläsas för varje test. Kolumnen delta ger drivkraftens differens i punkten för 50 W vid upprampning och nedrampning. Deltavärdet kan ses som ett kontrollvärde på testets tillförlitlighet. Delta ligger generellt sett runt 0,1 N och något högre för motor 1 som har större roterande massa och större tröghet. Större avvikelser från normvärdet kan tolkas som störningar i körcykeln, missar i varvtalsåterkopplingen eller sämre anpassning mellan motor och ESC.

5.7 Metoden

Arbetet med testtriggen och programmet från RCBenchmark har varit enkelt och relativt problemfritt. Testtriggen var enkel att bygga ihop och supporten från RCBenchmark efter

haveriet var snabb och precis. Materialet är lätt att förstå med enkla instruktioner och testerna ger detaljerade värden med hög precision.

Rampningstesten som utförts under arbetet bygger på ett i programmet inbyggt testscript. Scriptet har modifierats med tidskonstanter och trottelvärden för att passa syftet och de specifika komponenterna. Något som saknades var dock funktionen att kunna skriva in ett värde på trotteln och trycka enter. Den funktionen hade varit behjälplig framför allt i vindtunneln där det är viktigt att gasreglaget manövreras med försiktighet. Vid manuell manövrering kan regleringen framför allt i starten bli ryckig och okontrollerad. Problemet med starten löstes dock genom att ha rotation på propellern innan vindhastigheten ökade.

En lärdom under arbetets gång är att för att erhålla verkligt tillförlitliga värden från propellertester krävs att de körs i vindtunnel. Propellertesterna i rigg och $J = 0$ kan endast ge en fingervisning om tendenser hos propellrarna men säger väldigt lite om hur effektiva de är vid våra bestämda driftfall. Dock kunde mängden data användas senare för att bekräfta tendenser hos både propellrar, ESC och motorer.

6

Slutsats

Detta examensarbete som är en del i ett större, fortlöpande projekt har bidragit till att utöka kunskapen om drönarens framdrivning och ta projektet ytterligare ett steg i rätt riktning. Huvudmålet med arbetet var att finna den eller de kombinationer av ESC, motor och propeller som hade högst systemeffektivitet och avgöra vilket batteri som var bäst lämpad för syftet. Detta har genomförts med lyckat resultat med undantag för att propellernas effektivitet ej kunnat bedömas utanför vindtunnel. De sekundära målen var att analysera förluster, testverktyg och metoder samt förbereda för fortsatt vindtunneltestning. Samtliga av dessa mål har uppfyllts. För att effektivisera drivsystemet ytterligare kan fler tester utföras på olika propellrar, där den mesta effekten finns att vinna eller förlora.

6.1 Svar på frågeställningar

Frågeställningarna i kapitel 1.5 har besvarats löpande under arbetets fortskridande. Här följer ett sammanfattande svar för vardera frågeställning.

- Hur ser de mest sannolika flygfallen ut?
De flygfall som drönaren huvudsakligen kommer erfaras är de som utförs under ett sjöräddningsuppdrag. Ett nominellt uppdrag består av 10 minuter marschfart i 35 m/s med följande 40 minuter lågfart i 15 m/s. Tiden för flygningen kommer kunna variera beroende på uppdragets art, vilket är viktigt att ta höjd för vid exempelvis val av energikälla.
- Vilket luftmotstånd behöver framdrivningssystemet övervinna?
Drönarens design och aerodynamiska egenskaper är resultatet av arbetet [7]. Härur har värden för luftmotståndet vid olika vindhastigheter kunnat läsas. Drönaren bringar ett luftmotstånd på 0,61 N vid lågfart och 1,25 N vid marschfart.
- Vilka komponenter klarar framdrivningen mest effektivt?
De jämförande rampningstesterna vid 0 m/s gav tydliga resultat för ESCer och motorer. ESC Z gav ojämförbart högst uteffekt och var allra bäst i kombination med motor 1. Även motor 5 låg högt i testen med ESC Z. I kombination med motor 1 och ESC Z verkar propeller A ha mer att ge än övriga.
- Hur och var uttrycker sig förlusterna?
Vid rampningstesterna visade det sig snabbt att det var stor skillnad på ESCernas prestanda. Motor 1 och propeller C gav för ESC Z 22,5% högre värde än för ESC X. De stora förlusterna består av switchförluster och ledningsförluster. Det är även tydligt att propellrarna arbetar olika bra vid olika driftfall och det är här de största förlusterna och vinsterna finns att finna.
- Spelar det någon roll vilken batterityp som används?

Resultaten från de jämförande rampningstesterna visade att förlusterna genomgående ökade vid högre spänning. Det är alltså bättre att välja ett batteri på 11,1 V än ett på 14,8 V.

- Uppfyller batterierna kraven för att driva drönaren under ett standarduppdrag?
I teorin uppfyller batterierna kravet med en faktor 5. I verkligheten kommer propellerns verkningsgrad variera för olika driftfall och en dynamisk omgivning kommer kräva att drönaren stiger, girar och parerar kastvindar. Detta kostar energi som är viktigt att ta höjd för vid valet av batteri.
- Klarar materielen att testas i vindtunnel?
Vid tester i högre vindhastigheter är det viktigt att använda material med en i sammanhanget hög hållfasthet, exempelvis ett propellernav i aluminium istället för i plast. Navet behöver också säkras mot propelleraxeln med någon typ av gänglåsning. Det är också viktigt att sälla ut komponenter med defekter som kan skapa obalans och kontrollera alla förband. Är man noga med detta så klarar materielen att testas för de intressanta driftfallen.

6.2 Tillförlitlighet

Tack vare jämförelsetesternas omfattning är det lätt att ana mönster och tendenser som i sig bekräftar riktigheten i många av resultaten, trots interpolering och beräkning av medelvärden mellan olika resultat. Det finns tydliga tendenser som går igenom i närapå alla tester, som t.ex. faktumet att förlusterna i ESCn ökar med ökande spänning, att motor 4 i sammanhanget presterar dåligt och att ESC X har stora förluster. Det går att se tendenser i motorernas karaktäristik av hur effekt-drivkraft-kurvor av hög precision

Propellerns prestanda går inte att mäta vid test i 0 m/s då verkningsgraden delvis beror på den inkommande luftens hastighet. Det går att med viss erfarenhet ana vilka propellrar som kommer prestera bäst i olika situationer, men några definitiva resultat är omöjliga att erhålla utan fartvind.

6.3 Fortsatt arbete

För att optimera drivsystemet ytterligare behöver framtida tester bedrivas i vindtunnel där både verkningsgrader hos propellrarna och strömningsstörningarna uppströms på grund av flygplanskroppen kan analyseras. Lämpligt vore att exempelvis köra drivsystemet i vindhastigheterna 15, 20, 25, 30 och 35 m/s och vid varje vindhastighet registrera det varvtal och den effekt som krävs för att upprätthålla erforderad drivkraft. Framför testrigger kan det också monteras en vinge för att simulera störningarna i luftflödet på samma sätt som drönaren kommer orsaka.

Med mer tid kan mer omfattande tester med fler komponenter utföras för att optimera drivsystemet ytterligare. Det vore intressant att se hur propellrar av mer varierande storlek presterar beroende på motorns KV-tal. Om möjligt så vore framtagandet av verkningsgrads- effekt- och momentkurvor för propellrar och motorer till stor hjälp för valet av slutligt drivsystem. För att kunna bedöma kylbehovet för ESCn behöver också fler tester utföras under simulering av verkliga förhållanden.

Arbetet med drönarens utveckling kommer att pågå på flera fronter tills dess att den sitter på sitt stativ vid kusten, redo att skjutas iväg på sjöräddningsuppdrag. Även efter det kommer dess prestation och funktion kontinuerligt utvärderas med avsikten att ytterligare förbättra och effektivisera sjöräddningen i Sverige.

Referenslista

- [1] Statistik sjöräddning 2019
[URL] <https://www.sjofartsverket.se/upload/Bilder/%c3%85rsstatistik%20sj%c3%b6-%20och%20flygr%c3%a4ddning%2020191.pdf>

- [2] EU:
<https://transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/nya-regler-fran-1-juli-2020/>
Senast uppdaterad: 2020-05-28, kl 08:30

- [3] Lagen:
<https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/regler-for-dronare/>
Senast uppdaterad: 2019-02-08, kl 13:42

- [4] H. Hurt, AERODYNAMICS FOR NAVAL AVIATORS, University of California, 1965
https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/00-80t-80.pdf

- [5] Bild motorkarakteristik: [URL]
<https://www.quora.com/What-is-the-relation-between-engine-RPM-and-engine-torque>

- [6] Dag Lundström, batteriexpert på Micropower.

- [7] E. Pettersson, Design of a drone system for maritime search and rescue missions, M.S. thesis, department of Aerospace engineering, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2020

- [8] Bild Geometric pitch:
[URL] <https://www.flight-mechanic.com/propeller-aerodynamic-process/>

- [9] Pusher Prop Problems
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19910012515.pdf>
P. Soderman, W. Horne, Acoustic and Aerodynamic Study of a Pusher-Propeller Aircraft Model, NASA technical paper, 1990.

- [10] Aero-naut CAMcarbon folding propellers
[URL] <http://www.aero-naut.de/en/products/airplanes/accessories/propellers/camcarbon-folding-prop/>

- [11] A. Gong, D. Verstraete, Experimental Testing of Electronic Speed Controllers for UAVs, The University of Sydney, Sydney, NSW, 2006.
https://www.researchgate.net/publication/318294444_Experimental_Testing_of_Electronic_Speed_Controllers_for_UAVs

- [12] PWM-bild: M. Vujacic, M. Hammami ID , M. Srndovic and G. Grandi, Theoretical and Experimental Investigation of Switching Ripple in the DC-Link Voltage of Single-Phase H-Bridge PWM Inverters, ID Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, University of Bologna, 2017.
- [13] J. Kuria, P. Hwang, Modeling Power Losses in Electric Vehicle BLDC Motor, Journal of Energy Technologies and Policy, ISSN 2224-3232, Vol.1, No.4, 2011.
- [14] E. Pfützenreuter, What is the Kv rating of RC model motors?, 2007
[URL] https://epxx.co/artigos/motor_en.html
- [15] Propeller Aerodynamic Factors
[URL] <https://www.flight-mechanic.com/propeller-aerodynamic-factors/>
- [16] Electric motors
[URL] <https://www.explainthatstuff.com/electricmotors.html>
- [17] K. Parmeter, C. Smith, Energy Management Principles, Elsevier B.V, 2016, ISBN 978-0-12-802506-2
- [18] Series 1580 dynamometer and thrust stand datasheet
[URL] <https://cdn-docs.rcbenchmark.com/wp-content/uploads/2016/01/2016-02-04-RCbenchmark-1580-datasheet.pdf>

Bilagor

A

Resultat från propellertesterna med motor 3 och ESC X, Y och Z.

Jeti	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
A3X 11,1V	4,5	3918	2,62	2,66	0,08
A3X 14,8V	3,5	3897	2,53	2,58	0,1
B3X 11,1V	4,5	4360	2,65	2,68	0,06
B3X 14,8V	3,5	4333	2,56	2,59	0,06
C3X 11,1V	4,5	4446	2,76	2,79	0,06
C3X 14,8V	3,5	4436	2,64	2,68	0,08
D3X 11,1V	4,5	5149	2,61	2,65	0,08
D3X 14,8V	3,5	5118	2,43	2,48	0,1
V-Good	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
A3Y 11,1V	4,5	4188	3,2	3,27	0,14
A3Y 14,8V	3,5	4075	2,81	2,89	0,16
B3Y 11,1V	4,5	4593	3,17	3,24	0,14
B3Y 14,8V	3,5	4605	2,89	2,96	0,14
C3Y 11,1V	4,5	4727	3,16	3,22	0,12
C3Y 14,8V	3,5	4704	2,88	2,96	0,16
D3Y 11,1v	4,5	5427	2,61	2,65	0,08
D3Y 14,8V	3,5	5424	2,43	2,48	0,1
Hobbywing	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
A3 11,1 V	4,5	4352	3,34	3,38	0,08
A3 14,8 V	3,5	4389	3,29	3,32	0,06
B3 11,1 V	4,5	4789	3,29	3,34	0,1
B3 14,8 V	3,5	4812	3,23	3,27	0,08
C3 11,1 V	4,5	4879	3,26	3,3	0,08
C3 14,8 V	3,5	4923	3,19	3,24	0,1
D3Z 11,1V	4,5	5587	3,16	3,2	0,08
D3Z 14,8V	3,5	5640	3,1	3,15	0,1

B

Resultaten från motortesterna med ESC X: Jeti SPIN Pro 33 och propeller C.

Jeti	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
Motor 1					
C1 11,1V	4,5	4529	2,78	2,84	0,12
C1 14,8V	3,5	4506	2,71	2,77	0,12
Motor 2					
C2 11,1V	4,5	4569	2,82	2,86	0,08
C2 14,8V	3,5	4564	2,75	2,75	0
Motor 3					
A3X 11,1V	4,5	3918	2,66	2,7	0,08
A3X 14,8V	3,5	3897	2,53	2,58	0,1
B3X 11,1V	4,5	4360	2,65	2,7	0,1
B3X 14,8V	3,5	4333	2,56	2,59	0,06
C3X 11,1V	4,5	4446	2,76	2,79	0,06
C3X 14,8V	3,5	4436	2,64	2,68	0,08
D3X 11,1V	4,5	5149	2,61	2,65	0,08
D3X 14,8V	3,5	5118	2,43	2,48	0,1
Motor 4					
C4 11,1V	4,5	4270	2,45	2,49	0,08
C4 14,8V	3,5	4279	2,34	2,39	0,1
Motor 5					
C5 11,1V	4,5	4517			0
C5 14,8V	3,5	4565	2,72	2,75	0,06
Motor 6					
C6 11,1V	4,5	4549	2,81	2,84	0,06
C6 14,8V	3,5	4763	2,65	2,72	0,14
Motor 7					
C7 11,1V	4,5	4466	2,67	2,72	0,1
C7 14,8V	3,5	4442	2,58	2,63	0,1

C

Resultaten från motortesterna med ESC Y: V-Good Airplane32 och propellrarna A, B och C.

Y:V-Good	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
Motor 1					
A1 11,1 V	4,5	4201	3,17	3,23	0,12
A1 14,8 V	3,5	4238	3,05	3,14	0,18
B1 11,1 V	4,5	4641	3,08	3,15	0,14
B1 14,8 V	3,5	4650	2,97	3,05	0,16
C1 11,1 V	4,5	4722	3,09	3,14	0,1
C1 14,8V	3,5	4684	2,98	3,04	0,12
Motor 2					
A2 11,1V	4,5	4255	3,11	3,16	0,1
A2 14,8V	3,5	4249	3,07	3,11	0,08
B2 11,1V	4,5	4685	3,14	3,17	0,06
B2 14,8V	3,5	4594	3	3,05	0,1
C2 11,1V	4,5	4781	3,12	3,16	0,08
C2 14,8V	3,5	4774	3	3,04	0,08
Motor 3					
A3Y 11,1V	4,5	4188	3,2	3,27	0,14
A3Y 14,8V	3,5	4075	2,81	2,89	0,16
B3Y 11,1V	4,5	4593	3,17	3,24	0,14
B3Y 14,8V	3,5	4605	2,89	2,96	0,14
C3Y 11,1V	4,5	4727	3,16	3,22	0,12
C3Y 14,8V	3,5	4704	2,88	2,96	0,16
Motor 4					
A4 11,1V	4,5	4047	2,79	2,84	0,1
A4 14,8V	3,5	3915	2,52	2,55	0,06
B4 11,1 V	4,5	4424	2,81	2,85	0,08
B4 14,8V	3,5	4314	2,53	2,58	0,1
C4 11,1V	4,5	4551	2,78	2,82	0,08

C4 14,8V	3,5	4443	2,56	2,59	0,06
Motor 5					
A5 11,1V	4,5	4311	3,25	3,3	0,1
A5 14,8V	3,5	4252	3,02	3,07	0,1
B5 11,1 V	4,5	4707	3,2	3,26	0,12
B5 14,8V	3,5	4705	3,05	3,11	0,12
C5 11,1V	4,5	4803	3,18	3,23	0,1
C5 14,8V	3,5	4798	3,05	3,11	0,12
Motor 6					0
A6 11V	4,5	4273	3,19	3,25	0,12
A6 14V	3,5	4193	2,96	3,02	0,12
B6 11V	4,5	4665	3,11	3,16	0,1
B6 14V	3,5	4630	2,97	3,02	0,1
C6 11V	4,5	4774	3,15	3,2	0,1
C6 14V	3,5	4785	3,04	3,1	0,12
Motor 7					0
A7 11,1V	4,5	4253	3,12	3,18	0,12
A7 14,8V	3,5	4220	3	3,06	0,12
B7 11,1V	4,5	4626	3,08	3,12	0,08
B7 14,8 V	3,5	4604	2,97	3,01	0,08
C7 11,1V	4,5	4707	3,04	3,09	0,1
C7 14,8V	3,5	4713	2,98	3,02	0,08

D

Resultaten från motortesterna med ESC Z: Hobbywing X-rotor Micro 30A och propellrarna A, B och C.

Z:Hobbywing30A	Ström (A)	Varvtal (rpm)	Thrust 50W (N)	Thrust medel 50W (N)	delta
Motor 1					
A1 11,1 V	4,5	4525	3,53	3,62	0,18
A1 14,8 V	3,5	4549	3,48	3,58	0,2
B1 11,1 V	4,5	4896	3,44	3,49	0,1
B1 14,8 V	3,5	4931	3,37	3,44	0,14
C1 11,1 V	4,5	4954	3,43	3,48	0,1
C1 14,8V	3,5	5008	3,37	3,44	0,14
Motor 2					
A2 11,1 V	4,5	4447	3,42	3,46	0,08
A2 14,8 V	3,5	4486	3,35	3,41	0,12
B2 11,1 V	4,5	4814	3,34	3,37	0,06
B2 14,8 V	3,5	4857	3,27	3,32	0,1
C2 11,1 V	4,5	4922	3,37	3,42	0,1
C2 14,8 V	3,5	4977	3,32	3,35	0,06
Motor 3					
A3 11,1 V	4,5	4352	3,34	3,38	0,08
A3 14,8 V	3,5	4389	3,29	3,32	0,06
B3 11,1 V	4,5	4789	3,29	3,34	0,1
B3 14,8 V	3,5	4812	3,23	3,27	0,08
C3 11,1 V	4,5	4879	3,26	3,3	0,08
C3 14,8 V	3,5	4923	3,19	3,24	0,1
Motor 4					
A4 11,1 V	4,5	4319	3,18	3,24	0,12
A4 14,8 V	3,5	4373	3,17	3,23	0,12
B4 11,1 V	4,5	4695	3,14	3,17	0,06
B4 14,8 V	3,5	4737	3,08	3,13	0,1
C4 11,1 V	4,5	4826	3,13	3,17	0,08
C4 14,8 V	3,5	4854	3,09	3,13	0,08
Motor 5					

A5 11,1 V	4,5	4491	3,46	3,51	0,1
A5 14,8 V	3,5	4517	3,41	3,45	0,08
B5 11,1 V	4,5	4878	3,32	3,39	0,14
B5 14,8 V	3,5	4893	3,34	3,38	0,08
C5 11,1 V	4,5	4969	3,36	3,42	0,12
C5 14,8 V	3,5	5014	3,31	3,37	0,12
Motor 6					
A6 11,1 V	4,5	4438	3,42	3,48	0,12
A6 14,8 V	3,5	4483	3,38	3,44	0,12
B6 11,1 V	4,5	4836	3,29	3,35	0,12
B6 14,8 V	3,5	4865	3,26	3,28	0,04
C6 11,1 V	4,5	4923	3,35	3,38	0,06
C6 14,8 V	3,5	4953	3,26	3,33	0,14
Motor 7					
A7 11,1 V	4,5	4411	3,37	3,43	0,12
A7 14,8 V	3,5	4454	3,35	3,42	0,14
B7 11,1 V	4,5	4755	3,33	3,36	0,06
B7 14,8 V	3,5	4832	3,23	3,29	0,12
C7 11,1 V	4,5	4898	3,28	3,34	0,12
C7 14,8 V	3,5	4949	3,23	3,29	0,12

E

Drivkraften vid 11,1 respektive 14,8 V för motorer 1-7, propeller A och ESC Z.

