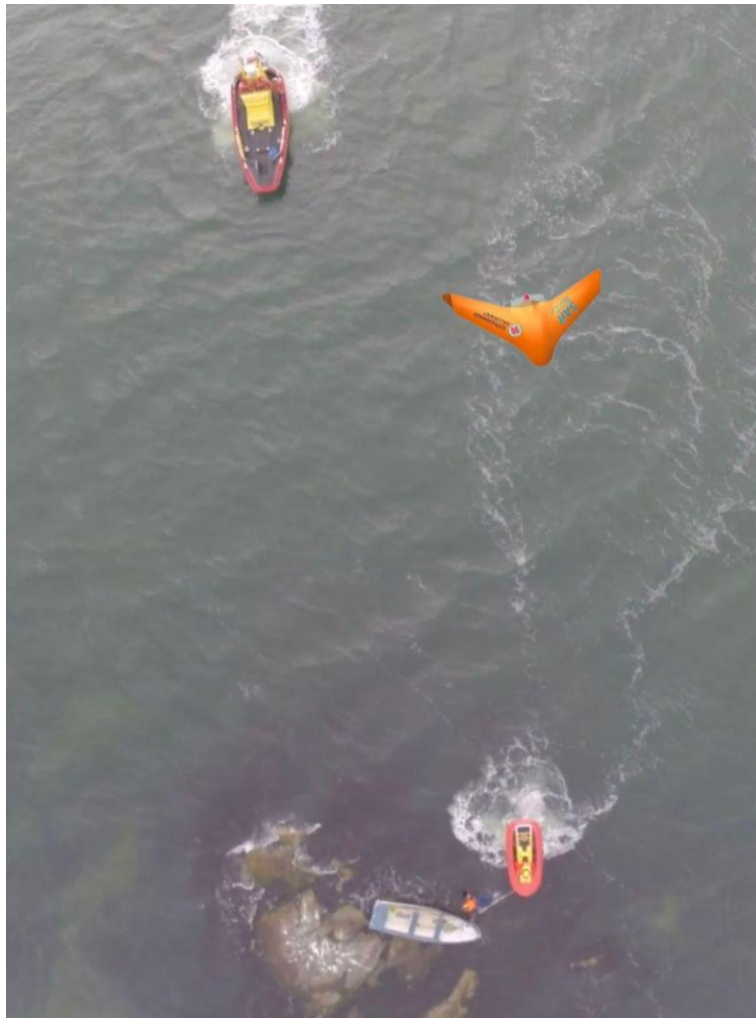




CHALMERS



Optimering Av Drivlina För Drönare Avsedd För Effektiv Sjöräddning

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekanik

Marcus Magnusson

Rasmus Sönniksen

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

Optimering Av Drivlina För Drönare Avsedd För Effektiv Sjöräddning

Marcus Magnusson
Rasmus Sönniksen



CHALMERS

Optimering Av Drivlina För Drönare Avsedd För Effektiv Sjöräddning

Marcus Magnusson

Rasmus Sönniksen

© Marcus Magnusson, Rasmus Sönniksen. 2021

Handledare: Fredrik Falkman, SSRS

Examinator: Bertil Thomas, Institutionen för elektroteknik, Chalmers Tekniska Högskola

INSTITUTIONEN FÖR
ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Förord

Under vårterminen 2021 har vi, två studenter från mekatronikprogrammet på Chalmers Tekniska Högskola arbetat med ett examensarbete för Sjärräddningssällskapet som innefattar framtagning av en drivlina avsedd för en flygande vinge.

Under projektets gång utförs ett flertal tester i Chalmers strömningslaboratorium, vi vill därför överlämna ett stort tack till Isak Jonsson samt Edward Hadziavdic för bra tips och idéer samt handledning i laboratoriet.

För mätningarna har en testrigg från företaget Rcbenchmark använts flitigt. Vi vill tacka Dominic Robillard som är en av skaparna av Rcbenchmark för snabba svar på frågor angående testriggens mjukvara.

Vi vill även passa på att tacka Lasertech för ett specialbeställt 3d-printat aluminiumnav för propellrarna som använts genom hela projektets gång.

Flygkroppen för den drönaren är framtagen av Emil Pettersson 2020. Vi vill passa på att tacka Emil för snabba och bra svar på frågor samt bollning av idéer.

Vi vill lämna ett stort tack till Fredrik Falkman från SSRS för vägledning samt utförliga diskussioner och tips men också för att ha lämnat rum för att testa egna tankar och idéer. Fredrik har varit vår handledare under arbetets gång och sett till att vi haft tillgång till utrustningen samt materialet vi behövt.

Sist men inte minst vill vi tacka vår examinator Bertil Thomas från institutionen för elektroteknik.

Göteborg, 2021

Marcus Magnusson & Rasmus Sönniksen

Sammanfattning

Ett arbete hos Svenska Sjöräddningssällskapet (SSRS) har gjorts med syfte att ta fram en effektiv drivlina avsedd för en drönare i form av en flygande vinge. Projektet utförs då SSRS planerar att använda drönaren till räddningsoperationer. Drönaren skall flygas ut till olycksplatsen och med hjälp av en kamera ge information till de sjöräddarna som är på väg ut till platsen. SSRS tror att en sådan funktion kan höja både kvaliteten såväl som säkerheten på de olika larmen sjöräddarna stöter på.

Då det kan vara långt ut till larm krävs det en lättviktsdesign med en effektiv drivlina för att erhålla en lång flygtid. Det är därför effektivitet är huvudmålet för de flesta test som genomfördes under projektets gång. Drivlinan som testas fram består av propeller, motor och ett fartreglage. Den mest effektiva kombinationen tas fram genom en rad av olika test i Chalmers strömningslaboratorium. I detta arbete testas 6 propellrar, 7 motorer och 2 olika fartreglage.

De flesta testerna som gjordes av komponenterna var för att studera effektiviteten vid två olika flygfall. Flygfallen önskades av SSRS och var 15m/s för lågfart och 35m/s för högfart. Från ett tidigare examensarbete där flygkroppen utvecklades är det givet den dragkraft som krävs för att föra drönaren framåt i luften vid olika hastigheter. Denna givna data användes flitigt av oss för att testa drivlinan vid de specifika fallen.

Högst effektivitet bland de vikbara propellrarna som testades var en 10x7 dimension. De stora propellrarna som till exempel 12x6,5 gav för stort luftmotstånd i vindtunnel medan de lägre storlekarna till exempel 9x7 krävdes alldeles för högt motorvarvtal.

För motorerna testades en optimal storlek och KV-tal fram för att sedan ställas mot konkurrenter i samma dimension. Den mest effektiva bland dessa blev en XING motor med storlek 2806,5 och KV-Tal 1300.

För fartreglagen var det Hobbywing Skywalker med den högre 50A-klassade som i testet var effektivare än den 30A-klassade.

Den rekommenderade kombinationen blev: Cam Carbon 10x7 Vikbar propeller, Iflight XING 2806,5 KV1300 motor och HobbyWing SkyWalker 50A ESC.

Abstract

A Thesis work has been carried out for the Swedish Sea Rescue Society or in short, SSRS. The purpose of the work has been to find an optimal propulsion system for a fixed wing drone. The purpose of the drone is to carry out missions of surveillance for the sea rescues they encounter. The drone with a mounted camera will help the rescuers get a glance of the location and to assess the situation. SSRS believes a tool like this could increase the quality as well as the safety of their missions.

The distance of the missions can be quite long so a lightweight design with a very efficient propulsion system is needed to meet the requirements of the flight time. Therefore, efficiency will be the main purpose of most of the tests throughout the project. The parts of the propulsion are a propeller, a motor and an ESC or electric speed controller. The most efficient of combinations will be selected by a series of tests at the Chalmers laboratory of fluids and thermal science.

Most of the tests are carried out to study the efficiency at two different airspeeds. The airspeeds are set by SSRS and are 15m/s for the low-speed case and 35m/s for the high-speed case. The requirement for the thrust is known with the help of a previous thesis work for when the fuselage was developed. These requirements are a central piece for this work and used a lot throughout the tests.

The highest achieved efficiency for the folding propellers that were tested was the 10x7 size. The bigger diameter of the 12x6.5 that led to a greater drag was not successful and didn't even manage to do the high-speed case of 35m/s. The smaller sizes of propellers like the 9x7 required a RPM above the limit of what the propellers were rated for.

The motors were tested to find an optimal dimension and KV-number. The optimal motor would later be compared with a brand competitor of the same dimension and KV-number. The most efficient motor was at last the Xing 2806,5 with a KV of 1300.

For the electronic speed controllers, the higher current rated ESC of 50A was the more efficient one than the 30A rated controller. The ESC was a HobbyWing Skywalker.

The final propulsion system contained the following parts: Cam Carbon 10x7 Folding propeller, a Iflight XING 2806,5 KV1300 motor and a HobbyWing SkyWalker 50 ESC.

Beteckningar

Ord

ESC - Electronic Speed Controller / Fartreglage

RPM - Revolutions Per Minute / Varv per minut

SSRS - Sjöräddningssällskapet / Svenska Sällskapet för Räddning af Skeppsbrutne

Flygfall - 2st olika hastigheter för drönaren.

Högfart - 35m/s

Lågfart - 15m/s

Pitch - Stigning för propellerbladet. Anges som andra siffran i till exempel en 10x7 propeller.

Thrust - Drivkraft - Skapad av propellern för att driva drönaren framåt

Drag - Luftmotstånd

4s/3s - 4-cell/3-cell LiPo batteri, 4s(14.8V), 3s(11.1V)

Kgf - Kilogram force, används för mätning av drivkraft i kg

Motorer

Motor A - EMAX ECO 2807 KV1500

Motor B - EMAX ECO 2807 KV1700

Motor C - EMAX ECO 2807 KV1300

Motor D - EMAX ECO 2306 KV 1700

Motor E - Hobbywing 2207 KV1750

Motor F - T-Motor 2806,5 1300KV

Motor G - XING 2806,5 1300KV

Fartreglage

ESC1 - Hobbywing Skywalker 50A

ESC2 - Aikon SEFM 50A

ESC3 - Airbot BumbBee 30A

ESC4 - Emax BIHeli 20A

ESC5 - Hobbywing Skywalker 30A

Innehåll

	5
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställningen	1
1.5 Mål	2
1.6 Rapportens innehåll	2
2. Teori	3
2.1 Vindtunneln	3
2.2 Test i vindtunnel	4
2.3 Flygkropp	4
2.4 Propeller	5
2.4.1 Bakgrund propeller	5
2.4.2 Propellerns mekanik	5
2.4.3 Skjutande propeller	6
2.4.4 Avanceringsstal	7
2.4.5 Propeller-effektivitet	7
2.4.6 Fast eller fällbar propeller	8
2.5 Motorer	9
2.5.1 Borstlösa motorer	9
2.5.2 Olika typer av borstlösa motorer	9
2.5.3 Motor-effektivitet	10
2.5.4 Motorstorlek	10
2.5.5 KV-Tal	10
2.6 Fartreglage (ESC)	11
2.7 Förluster	12
2.7.1 Fartreglage	12
2.7.2 Motor	13
3. Metod	14
3.1 Arbetsupplägg	14
3.2 Tillvägagångssätt för tester	15
3.2.1 Framdrivningstester	15
3.2.2 Automatiska tester	16
3.2.3 Slutgiltigt test	16

3.3 Propellrar	17
3.3.1 Aeronaut Cam Carbon	17
3.3.2 Propellrar i test	17
3.3.3 Propellernav	18
3.4 Motorer	19
3.4.1 Motorer i test	19
3.4.2 Uteslutna motorer	20
3.5 Fartreglage	21
3.6 Testtrigg	22
3.6.1 Testtrigg Series-1580	22
3.6.2 RCbenchmark	22
3.6.3 Kåpa	23
3.6.4 Givare	26
3.7 Spänningskälla	28
3.7.1 Nätaggregat	28
3.7.2 Batteri	28
4. Resultat	29
4.1 Propeller	29
4.2 Motor	31
4.2.1 Motortest 1	31
4.2.2 Motortest 2	33
4.3 Fartreglage (ESC)	34
4.3.1 Uteslutna fartreglage	34
4.3.2 Fartreglagetest	34
4.3.3 Haveri	35
4.4 Slutgiltigt test	36
4.4.1 Fällbar propeller	36
4.4.2 Spänningsnivåer i test	37
4.4.3 Effekt	37
5. Diskussion	38
5.1 Metoddiskussion	38
5.2 Propeller	39
5.2.1 Storlek & Stigning	39
5.2.2 Fällbar propeller	39
5.3 Motor	40
5.3.1 Motortest 1	40

5.3.2 Motortest 2	41
5.4 Fartreglage	42
5.5 Förluster	42
5.5.1 Fartreglage	42
5.5.2 Motor	43
5.6 Spänningsnivåer	44
5.7 Batterier	45
5.8 Felkällor	46
5.8.1 Propellernav	46
5.8.2 Precision på mätvärden	46
5.8.3 Vibration	46
5.8.4 Spänningsnivå	47
5.8.5 Verkligheten	47
5.8.6 Luftmotstånd	47
5.8.7 Fel på komponenter	48
5.8.8 Aerodynamik	48
5.8.9 Alternativ drivlina	48
5.9 Rekommendationer för vidare arbete	49
5.9.1 Vädrets påverkan	49
5.9.2 Segelflygning	49
5.9.3 Komplettest	49
5.9.4 Temperatur	49
5.9.5 Backslag	50
6 Slutsats	51
6.1 Svar på frågeställningar	51
Referenser	53
Bilagor	55
Bilaga 1 - Gantt schema	55
Bilaga 2 - Temperatur för Fartreglage	56

1. Inledning

I det här kapitlet ges en kortfattad beskrivning för att ge en insikt i projektet.

1.1 Bakgrund

Det svenska sjöräddningssällskapet (SSRS) utforskar möjligheten att ha en liten flotta av drönare som skall göra deras uppdrag effektivare och säkrare. Drönaren är av typen flygande vinge i en lättviktsdesign vilket krävs för den höga energieffektivitet som efterfrågas till uppdragen. I detta projekt skall en optimal drivlina bestående av fartreglage, elmotor och propeller testas främst ur den energieffektiva aspekten. Ett tidigare examensarbete har gjorts på detta i statiska förhållanden men skall nu tas vidare till dynamiska förhållanden i en vindtunnel.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att med dynamiska test ta fram en optimal drivlina för användning på den drönare SSRS har utvecklat.

1.3 Avgränsningar

I projektet så utvärderas drivlinan enbart efter två olika flygfall, högfart som är 35m/s och lågfart som är 15m/s inget annat studeras. Flygfallen utvärderas i dynamiska förhållanden fast naturbetingelser som luftfuktighet anses vara försumbara.

I projektet studeras inte heller den strömningsstörning flygkroppen kan skapa i luften. Flera faktorer i projektet förenklas och avgränsas på grund av den tidsram som existerar men även brist på kunskap och erfarenhet inom området. Avgränsningar för strömning måste också göras då verktyg som vindtunnel för dem dynamiska testerna inte finns att tillgå vid alla tänkbara tillfällen.

1.4 Precisering av frågeställningen

Vilka komponenter skapar tillsammans den mest effektiva drivlinan i flödande luft?

Klarar drivlinan av att framföra drönaren genom ett standard uppdrag i flödande luft?

Klarar drivlinan av att framföra drönaren i 35m/s i flödande luft?

1.5 Mål

Här presenteras de primära målet i projektet samt de sekundära målen.

Primära Mål

- Ta fram en kombination av komponenter som ger en så effektiv drivlina som möjligt vid de specifika flygfallen.

Sekundära Mål

- Ta reda på om en fast propeller levererar en högre effektivitet än en fällbar.
- Ta reda på vilken batterikapacitet som krävs för ett uppdrag

1.6 Rapportens innehåll

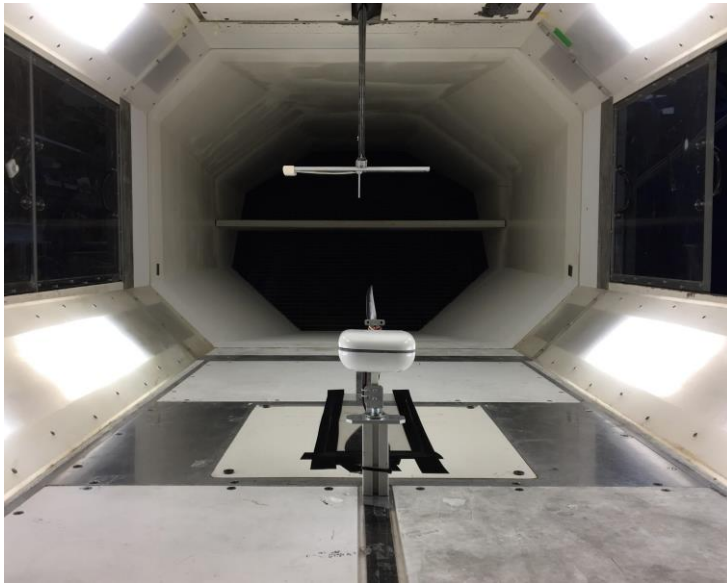
Rapporten består av sex huvudkapitel. Först introduceras projektet där bland annat en bakgrund till arbetet ges. Sedan kommer teoridelen där nödvändig information ges för bland annat komponenterna som använts i projektet. Den tredje indelningen är metod och där planeras projektet upp med ett arbetsupplägg och en plan för hur testerna skall genomföras. Efter metod presenteras resultatdelen för projektet och består till största del av resultatet från de tester som gjorts. Avslutningsvis reflekteras resultatet i diskussionen och det ges en slutsats.

2. Teori

Här samlas information och kunskap som krävs för att projektet skall kunna genomföras.

2.1 Vindtunneln

Vindtunneln som används för testerna i detta examensarbete finns på Chalmers Laboratory of Fluids and Thermal Science på Chalmers tekniska högskola. Vindtunneln byggdes 1964 och har genomgått flera stora renovationer sedan dess. Det är en subsonisk vindtunnel som är byggd för att klara vindhastigheter upp till 60m/s med väldigt låg turbulens. I figur 2.1 kan testtriggen ses uppmonterad i Chalmers vindtunnel.



Figur 2.1 - Vindtunneln på Chalmers

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**LABORATORY OF FLUID
AND THERMAL SCIENCE**

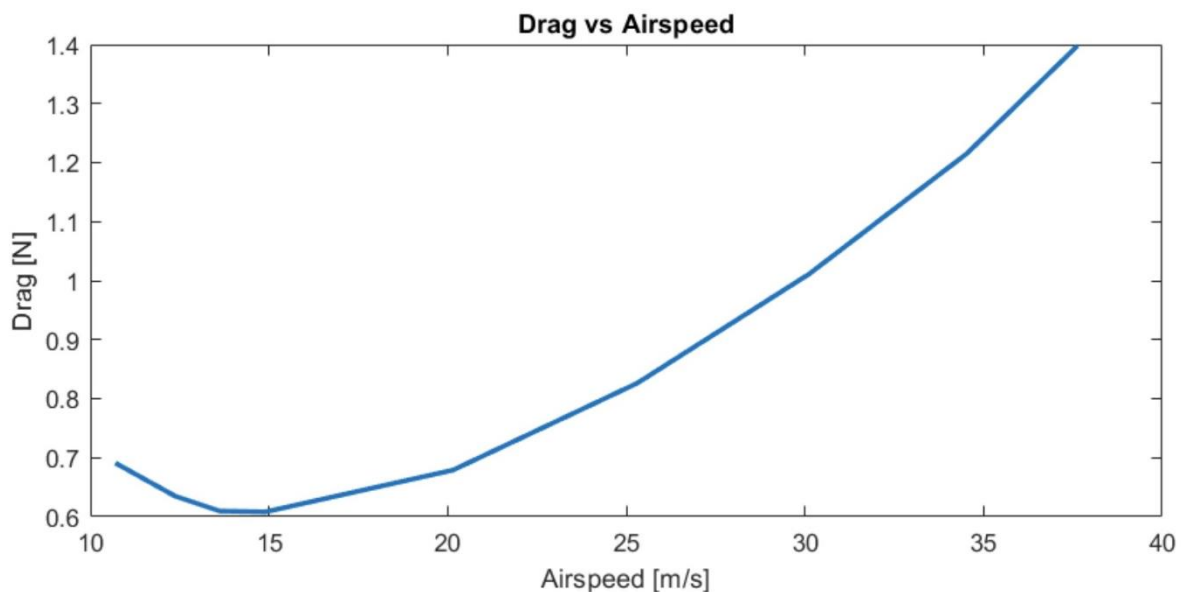
Figur 2.2 - Chalmers Strömningslaboratorium

2.2 Test i vindtunnel

Testerna i vindtunnel görs för att lära sig hur objekt beter sig i rörelse. För att test ska ge så bra data och likt verkligheten som möjligt krävs låg turbulens. Turbulens ger slumpmässiga svar eftersom det är svårt att veta hastigheten på ett turbulent flöde. Vindtunneln som testet kördes i ger turbulens nivåer på under 0,1% [1]. Det betyder att vindtunneln har väldigt låga nivåer av turbulens men det är något som snabbt kan ändras när testtriggen skall köras. Det kommer därför göras åtgärder för att förbereda testtriggen för tunneln och minimera störningar i flödet.

2.3 Flygkropp

Designen av flygkroppen tillhör inte detta projekt men påverkar icke desto mindre. I detta projekt där en drivlina skall tas fram krävs uppgifter på hur mycket dragkraft som drivlinan behöver generera för att övervinna det luftmotstånd som försöker trycka kroppen bakåt. I ett tidigare projekt togs en flygkropp fram och tester på aerodynamiken gjordes där bland annat luftmotståndet kunde bestämmas som kan ses i figur 2.3. Här presenteras flygkroppens luftmotstånd på den lodräta axeln beroende av hastigheten på den vågräta axeln.



Figur 2.3 - Luftmotståndskurva, [2]

I detta projekt studeras enbart två flygfall, lågfart i 15m/s) och högfart i 35m/s. Vid 15m/s är motståndet 0,61N och vid 35m/s 1,25N.

2.4 Propeller

Här ges bakgrund till propellern och dess mekanik. Det presenteras några olika sätt propellern kan monteras på och det ges även viktig teori för att mäta dess effektivitet.

2.4.1 Bakgrund propeller

Själva mekaniken bakom propellern pratades om redan på 1500-talet där framför allt Leonardo Da Vinci ritade på flygmaskiner med propeller liknande anordningar som drivmekanism. Det dröjde dock fram till 17e december 1903 innan den första motordrivna flygfarkosten utförde en fullständig flygning. Detta var bröderna Wright från North Carolina, USA som med sin Wright Flyer I skrevs in i historieböckerna världen över och är idag välkända inom flygindustrin. Wright Flyer I drevs med hjälp av två "pusher" propellrar [3]. Propellrar i "pusher" konfiguration studeras närmare i 2.4.3 *Skjutande Propeller*.

2.4.2 Propellerns mekanik

Innan namnet "propeller" infördes kallades mekanismen för "airscrew" eller "luftskruv" vilket beskriver funktionen ganska bra. I grund och botten är en propeller en skruv med gänga som är tänkt att bita i luften. Dagens propellrar har dock utvecklats genom många år och ser ganska annorlunda ut från de första prototyperna.

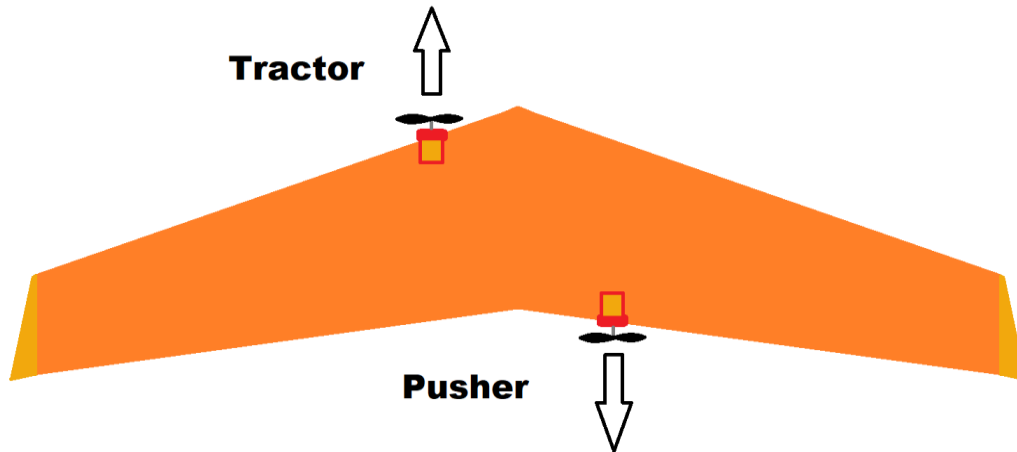
En propeller brukar specificeras efter "diameter" x "pitch" (mätt i tum) där ett exempel är 11x7. Den första siffran anger diametern för propellern vilket innebär sträckan mellan propellerbladspetsarna. Den andra siffran anger "pitch" eller "stigning" vilket är ett mått på sträckan propellern rör sig i färdriktning per varv som den snurrar i optimala förhållanden.

Både diameter och stigning kommer att tas hänsyn till i arbetet vid val av propeller. I grund och botten kan man säga att en propeller med liten diameter och hög stigning som snurras med hög hastighet ger hög fart och en propeller med stor diameter och låg stigning ger lägre fart men istället högt "vridmoment". Det gäller därför att hitta en bra balans mellan stigning och diameter som passar för den typ av flygning som planeras.

Vid dimensionering av propeller används ibland en tumregel som säger att propellerns diameter skall vara ungefär 25% av flygkroppens vingspann. Det är ingen vetenskaplig modell för att bestämma exakt diameter utan bara ett förslag på ungefär vilken storlek man kan börja testa med.

2.4.3 Skjutande propeller

Skjutande propeller är när propellern monteras för att putta drönaren framåt i luften istället för att den drar den fram. De två olika sätten brukar på engelska kallas "Tractor" och "Pusher". I figur 2.4 nedan kan skillnaden ses tydligare.

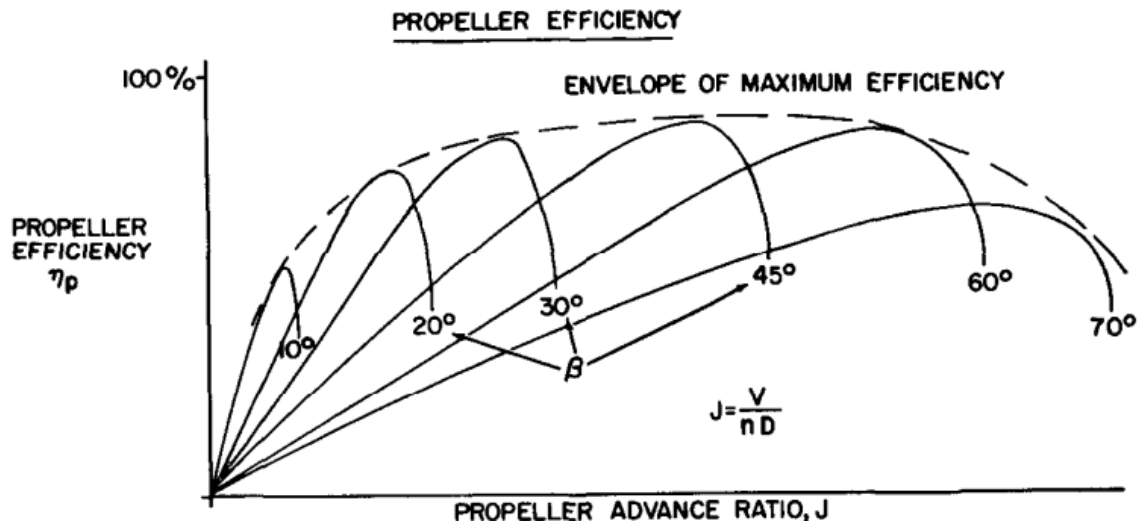


Figur 2.4 - Pusher och Tractor konfiguration

De två olika konfigurationerna innebär olika fördelar och nackdelar. En skjutande propeller ger en obehindrad vy framåt för en pilot eller en kamera. Den ger även teoretiskt lägre luftmotstånd motstånd då högfart turbulenta luftvirvlar inte flödar kring flygkroppen som den gör i tractor konfigurationen då propellern sitter framför flygkroppen [4]. För den skjutande propellern är dessutom luften bakom propellern helt fri vilket höjer dess effektivitet.

2.4.4 Avanceringsstal

En kvot som ofta används är avanceringsstalet vilket visar ett samband mellan hastigheten farkosten färdas med genom luften (V), varvtalet på propellern (n) samt diametern på propellern (D). Figur 2.5 nedan visar sambandet mellan en propellers effektivitet och avanceringsstal. Kurvorna i figuren visar tydligt att det är mycket viktigt att välja rätt propeller då små skillnader i avanceringsstal kan sänka effektiviteten hos propellern med flera procentenheter.



Figur 2.5 - Propeller-effektivitet i förhållande till avanceringsstal [5]

I ekv 2.1 för beräkning av avanceringsstal består täljaren av hastigheten genom luften och nämnaren av propellerns rotationshastighet samt diameter. Detta visar att en stor propeller i hög rotationshastighet det vill säga höga värden på n och D ger ett lågt avanceringsstal medan en liten propeller i låg rotationshastighet ger ett högt avanceringsstal.

Detta visar också att en stor propeller som snurrar långsamt kan ge samma avanceringsstal som en liten propeller som snurrar snabbt.

$$J = \frac{V}{n \cdot D} \quad \text{Ekv. 2.1}$$

2.4.5 Propeller-effektivitet

Propeller-effektivitet används mycket i testerna av propellrar. Effektiviteten mäts genom att se hur mycket drivkraft levereras per mekanisk effekt (Watt). Kraften som drivlinan genererar fås med hjälp av de monterade lastcellerna på testriggen, med dessa kan även vridmomentet bestämmas för att räkna ut den mekaniska effekten som kan ses i ekv 2.2 och 2.3 nedan.

$$\text{Mekanisk effekt:} \quad P_{Mek} = M_{vrid} \cdot \omega \quad \text{Ekv. 2.2}$$

$$\text{Propeller-effektivitet:} \quad \frac{F_{Driv}}{P_{Mek}} = \text{Effektivitet} \quad \text{Ekv. 2.3}$$

2.4.6 Fast eller fällbar propeller

Den klassiska propellern som man oftast tänker på består av endast en del med två eller flera "propellerblad". I vissa sammanhang kan propellern vara i vägen eller helt enkelt göra onödigt luftmotstånd då motorn inte används, detta kan undvikas genom att använda en propeller med fällbara propellerblad även kallad en "foldingpropeller". Ett vanligt användningsområde för en fällbar propeller är hos segelflygplan, där vill man uppnå väldigt lågt luftmotstånd samt kunna landa utan att propellern tar i marken.

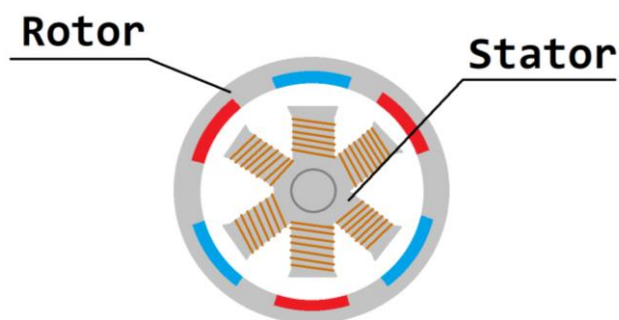
Verkningsgraden mellan två propellrar av samma modell där den ena i traditionell form och den andra fällbar skall vara densamma då de båda har samma aerodynamiska utformning. Den fällbara propeller kan eventuellt ställa till med problem i form av att den inte lyckas fälla ut sig till rätt vinkel eller om den faller ihop sig för mycket och låser sig självt vilket gör att den inte går att fälla ut vid gaspåslag. Vanligtvis använder man inte en fällbar propeller om det inte behövs då det som sagt kan ställa till problem, kan blir lite mindre effektiv samt ofta är dyrare i inköp.

2.5 Motorer

Här ges bakgrund till den typ av motor som skall användas i projektet.

2.5.1 Borstlösa motorer

Borstlösa motorer består av två huvuddelar, en stator och en rotor. För outrunners är stator den delen som står still och som har lindningarna medan rotorn roterar med permanentmagneterna. I figur 2.6 kan ett exempel på en borstlös outrunner ses. Spolarna i statorn består av olika järnkärnor som är lindade med koppartråd. När spolen som då är skapad får ström genom sig kommer den inducera och reagera som en magnet och det är detta man då kallar en elektromagnet. Om istället en negativ ström skulle ges till spolen kommer den attrahera en annan magnet istället för att repelleras. När detta skall tillämpas för en motor och för att skapa en rotation ges ström till de olika spolarna. Detta leder till att rotorn börjar rotera då den repelleras och attraheras av motsatt permanentmagnet. Detta fungerar dock enbart för en kort rotation då elektromagneten och permanentmagneten möts. Det fixas genom att strömföra en annan elektromagnet för att fortsätta rotationen. Strömförandet sker med ett trefasssystem där en frekvens på signalen ger ett visst varvtal på motorn [6]. Denna signal förklaras i 2.6 *Fartreglage (ESC)*.



Figur 2.6 - En borstlös outrunners rotor samt stator

2.5.2 Olika typer av borstlösa motorer

Det finns två olika typer av borstlösa motorer, inrunner och outrunner. För en inrunner roterar rotorn inuti statorn och för en outrunner är det tvärtom. Dessa skillnader i strukturen ger självklart upphov till att dem även har olika fördelar och nackdelar. De stora skillnaderna ser man främst i vridmomenten. Skillnaden existerar då lindningarna tar avsevärt mer plats än rotorn för permanent magneterna. Detta leder till att om lindningarna är fästa på insidan, då blir konstruktionen av högre diameter än om dem var på utsidan. En högre diameter leder till att vridmomentet blir större då det finns en längre hävarm [6]. Outrunner brukar därför ha högre vridmoment medan inrunner föredras om höga RPM söks.

2.5.3 Motor-effektivitet

Motorns effektivitet är intressant när tester på de olika motorerna skall göras. Effektivitet är den viktigaste egenskapen i detta projekt och testas mest av allt. Motorernas effektivitet räknas ut genom att ta mekanisk effekt dividerat med elektrisk effekt som i ekvation 2.4 nedan. Den mekaniska effekten beräknas genom att ta vridmomentet givet från testriggens lastceller multiplicerat med varvtalet i radianers/sekund som kan ses i ekvation 2.1 i 2.4.5 *Propeller-effektivitet*.

$$\text{Motor-effektivitet: } \frac{P_{Mek}}{P_{EL}} = \text{Effektivitet} \quad \text{Ekv. 2.4}$$

2.5.4 Motorstorlek

Borstlösa likströmsmotorer i form av outrunners brukar anges i dess storlekar i form av 4 siffror där de två första står för diametern hos motorn och de två sista står för höjden eller längden. En motor som är 22mm i diameter och 6mm i höjd kallas därav 2206.

Diametern hos en motor är enligt hävstångsprincipen kopplat till motorns vridmoment där en större diameter innebär att motorn klarar av ett högre moment. En längre motor klarar av högre hastigheter än en kortare vilket har att göra med att de längre spolarna inte blir överhettade lika snabbt som de kortare spolarna hos en kortare eller lägre motor.

Att välja en motor i rätt storlek är viktigt då högsta möjliga effektivitet skall uppnås. En för stor motor väger mer och tynger ner hela drönaren vilket leder till kortare flygtid utan att man vinner något på den högre kapaciteten hos motorn som inte används. Även en för liten motor är ett problem då den lätt blir överbelastad vilket i sin tur leder till högre temperaturer. Dessa faktorer leder till en lägre effektivitet [6].

2.5.5 KV-Tal

Mindre likströmsmotorer brukar ha en KV-klassning som anger hur många varv per minut motorn snurrar beroende på vilken spänning den matas med. Man kan ange KV-talet i enheten RPM/V vilket gör att KV-talet multiplicerat med spänningen ger det RPM motorn kommer leverera som maximalt [6].

Som exempel kommer en motor med 1500KV som matas med 10V att leverera följande RPM:

$$1500_{RPM/V} \cdot 10_V = 15\,000_{RPM} \quad \text{Ekv. 2.5}$$

Ett högt KV-tal förknippas med tjock och kort tråd i motorns lindningar. Detta bidrar till en lägre resistans som leder till högre ström. Därav snurrar motorn snabbare men levererar ett lägre vridmoment. På samma sätt har en motor med lägre KV-tal en högre resistans, lägre rotationshastighet men högre vridmoment.

Som tidigare nämnts skall en stor propeller snurra långsamt och en mindre propeller snurra fort vilket gör att ett lägre KV-tal är att föredra till större propellar [7].

2.6 Fartreglage (ESC)

För att styra en borstlös outrunner som i detta fall behövs en ESC vilket står för electronic speed controller eller på svenska "fartreglage".



Figur 2.7 - In och utgångar hos ett fartreglage

Då en borstlös outrunner drivs av tre faser behöver fartreglaget kontrollera dessa faser på olika sätt för att få motorn att göra det man vill. Det är nödvändigt för fartreglaget att veta motorns "läge" eller "position" och det tar det reda på genom att mäta magnetfältet på den senast aktiva fasen. På det sättet mäts avståndet till magneten från spolen och fartreglaget får reda på både motorns läge och dess hastighet.

I figur 2.7 visas ett typiskt fartreglage, det skall matas med den spänning som man sedan vill att motorn skall matas med då det är den spänningen som regleras i de tre faserna till motorn. De tre faserna slår på och av spolarna i motorn som attraherar och repellerar magneterna vilket får den att rotera. Önskas en högre hastighet kortas intervallet mellan fartreglagets pulser ut på faserna ner vilket gör att permanentmagneterna passerar spolarna snabbare. För att styra hur fartreglaget skickar pulser till motorn skickas en PWM signal in på signal porten som visas i figur 2.7.

2.7 Förluster

Här presenteras teorin för de förluster som påverkar komponenterna.

2.7.1 Fartreglage

För fartreglaget finns det tre typer av förluster, den ena är ledningsförlusten som beror på fartreglagets inre resistans och den andra är switchförlusten som uppstår av den snabba på samt avslagningen som utförs för att skapa de pulser som motorn behöver. Den tredje förlusten är betydligt mindre och uppstår då fartreglaget ej skickar några signaler utan endast står och väntar och varierar i samband med spänning och ström [8].

Ledningsförlusten kan beräknas med ekvation 2.6

$$P_l \approx D \cdot R_{ON} \cdot I_{RMS}^2 \quad \text{Ekv. 2.6}$$

Där P är ledningsförluster, D är arbetscykeln, R är den totala interna resistansen och I är den genomsnittliga inkommande strömmen till fartreglaget.

Fartreglagets switchförlust kan beräknas med följande formel:

$$P_{SW} \approx \frac{1}{2} \cdot I_{RMS} \cdot U \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f \quad \text{Ekv. 2.7}$$

Där P är switchförluster, I är återigen den genomsnittliga inkommande strömmen till fartreglaget fast ek i kvadrat, U är inkommande spänningen, de båda t :en är på och av tiden och f är frekvensen för bytena (Switch).

2.7.2 Motor

För att välja en optimal motor är det viktigt att minimera förlusterna. Förlusterna i motorn består till största del av elektromagnetiska förluster [9]. De elektromagnetiska förlusterna består i sin tur av förluster i ledningarna, förluster av den relativa rörelsen mellan kärnan och magnetfältet som är känt som Eddy current. Till sist ingår även förluster för magnetismens motrotation som kallas hystereseffekt.

Ledningsförluster beräknas med Ekv 2.8.

$$P_l = I_{rms}^2 \cdot R_a \quad \text{Ekv. 2.8}$$

Där I är fasströmmen och R är ledningsresistansen.

Förlusterna för Eddy current beräknas med Ekv 2.9.

$$P_e = K_e B_{max}^2 f^2 \quad \text{Ekv. 2.9}$$

Där K och f är motorspecifika konstanter och B är toppvärdet för den magnetiska flödestätheten.

Hystereseffekten kan beräknas med Ekv 2.10.

$$P_h = K_h B_{max}^\alpha f \quad \text{Ekv. 2.10}$$

3. Metod

Här presenteras en metod på hur arbetet har genomförts. Allt från hur planeringen är upplagd till vilka komponenter som skall testas.

3.1 Arbetsupplägg

Examensarbetet har ett tydligt upplägg som kan förenklas till följande sätt:

1. Introduktion och Planering
2. Förundersökning och Teori
3. Vindtunnel testning av Komponenter
4. Utvärdering och Sammanställning

Arbetet introduceras och planeras. Det genomgås en förundersökning för de tilltänkta områdena i projektet där sedan nödvändig teori kan framställas. Efter det kan undersökningen av komponenterna påbörjas där test utförs i vindtunnel. Resultaten från dessa test utvärderas och sammanställs så val kan göras och projektet kan repetera steg 3 och 4 igen.

För tydligare upplägg kan Gantt schema ses i bilaga 1.

3.2 Tillvägagångssätt för tester

Under projektets gång har ett flertal tester utförts för att undersöka effektivitet hos komponenter samt om de är kapabla att utföra ett så kallat standard uppdrag.

3.2.1 Framdrivningstester

Ett tidigare examensarbete har utforskat motorer, fartreglage och propellrar i statistiskt tillstånd det vill säga i stillastående förhållanden. Då detta inte riktigt är fallet i ett verkligt uppdrag då drönaren ständigt rör sig framåt med en viss hastighet kommer framdrivningen nu testas i flödande luft. Tanken är att detta skall ske i vindtunnel där en vindhastighet effektivt kan uppnås och testet utföras.

Första steget är att utvärdera vilken propeller som är effektivast och klarar av de olika flygfallen som förekommer i ett standard uppdrag. Ett standard uppdrag består av flygning i 15m/s samt 35m/s.

Det andra testet eller i detta fall testen handlar om utprovning av motorer där den propeller som presterat bäst i propellertestet används. Motorerna testas i 15 samt 35m/s och effektiviteten hos dem jämförs för att hitta den motor som presterar bäst tillsammans med den optimala propellern.

Det tredje testet går ut på att prova fram det fartreglaget som levererar den högsta totala effektiviteten tillsammans med den propeller och motor som presterat bäst i de tidigare testen.

Slutligen görs även ett sluttest där den kombination med högst effektivitet testas utförligare för att kunna presentera uppgifter på den slutgiltiga drivlinan.

När den propeller som bäst hanterar de efterfrågade hastigheterna sorterats fram skall en utredning om vilket varvtal propellern uppnår den högsta effektiviteten utföras. Sedan är det dags för val av motor där kraven är att den skall vara bra anpassad för det efterfrågade varvtalet från propellern samt tillräckligt stark för att kunna driva propellern på ett effektivt sätt.

Ett antal kandidater väljs ut och den motor som presterar bäst och effektivast med propellern går vidare i utredningen. Ett antal fartreglage kommer att testas efter effektivitet tillsammans med propellern och motorn för att komplettera drivlinan.

Kombinationen som ger bäst effektivitet samt klarar kraven är då vinnaren i testet.

3.2.2 Automatiska tester

Automatiska tester har gjorts i programmet RCBenchmark för att underlätta testerna i vindtunneln. Med de automatiska testerna behövs inte signalen till fartreglaget ställas in manuellt och varje test blir identiskt. De automatiska testerna fungerar på det sättet att varvtalet rampas upp med signalen från fartreglaget tills det att den nivå på drivkraft som krävs för det testade flygfallet uppnås. När den rätta nivån är funnen skall den först stabilisera sig på den nivån för att sedan fortsätta köras på den specifika drivkraften. Under hela tiden sparas det ner data från körningen som en loggfil som sedan kan göras till tabell eller olika diagram för att hantera informationen lättare.

3.2.3 Slutgiltigt test

Det sista besöket i strömningslaboratoriet kommer att bestå av tester för flygfällen under olika spänningsnivåer. Detta för att ta reda på hur drivlinan reagerar vid olika spänningar och strömmar men framförallt även effekten drivlinan kräver vid de olika flygfällen. Det kommer även testas om någon effektivitet blir förlorad genom användandet av vikbara propellrar. Det testas genom att jämföra den vikbara propellern med en ovikbara av samma märke och modell samt dimension.

3.3 Propellrar

Här presenteras och motiveras kortfattat vilka propellrar som testas under projektets gång och varför.

3.3.1 Aeronaut Cam Carbon

Propellrarna som användes i detta arbete är alla av typen Aeronaut CAM Carbon. Det är fällbara propellrar som är gjorda av kolfiberförstärkt plast. Dem är designade för hög prestanda och effektivitet.

3.3.2 Propellrar i test

I detta projekt testas 5 olika propellrar av samma märke och modell men av olika storlek. I tabellen nedan visas vilka propellrar som används. Propellrarna är fällbara vilket eventuellt är en nödvändighet men den propellern med högst verkningsgrad kommer även att testas i icke fällbar konfiguration.

Tabell 3.1 - Tabell över propellrar

Propeller	Storlek
Märke - Modell	Diameter x Pitch
Aeronaut CAM	10x7
Aeronaut CAM	11x7
Aeronaut CAM	12x6.5
Aeronaut CAM	9x7
Aeronaut CAM	10x8

Detta urplock av propellrar har valts på grund av den teorin som har getts i 2.4.2 *Propellerns Mekanik* där det skrivs om de olika propellerstorlekarnas karaktäristik. Fem olika diametrar testas med utgångspunkt från tumregeln som tidigare nämnts där 25% av flygkroppens vingspann i detta fall är ca 10 tum. I figur 3.1 nedan kan ett blad från varje dimension för propeller ses.



Figur 3.1 - Ett av propellerbladen från varje propeller som testats

3.3.3 Propellernav

I arbetet används ett specialtillverkat nav i aluminium från företaget LaserTech. I ett tidigare examensarbete användes nav i plast som funkade för de statiska testerna men för testerna i vindtunneln krävs det ett i mer hållfast material. I figur 3.2 kan navet ses komplett med propeller och motor.



Figur 3.2 - Propellernav i aluminium

3.4 Motorer

De motorer som genomgår tester i projektet presenteras och listas upp med de testnamn de senare kommer benämnas vid.

3.4.1 Motorer i test

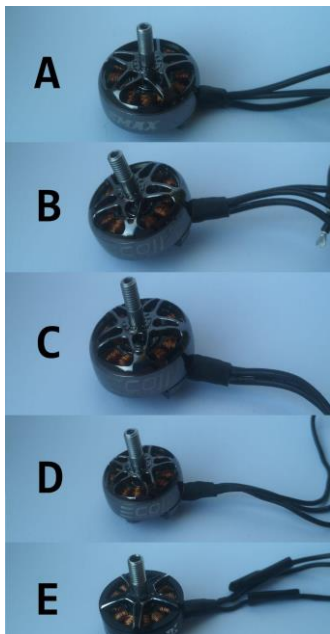
Tester görs med 5 olika motorer i olika storlekar, olika KV-tal samt från olika fabrikat. Efter propellertestet beräknades ett ungefärligt efterfrågat KV-tal utefter den optimala propellerns RPM. De motorer som redan fanns inköpta från tidigare arbeten stämde in ganska bra på det beräknade värdet men en ytterligare köptes in för att täcka ett större spann av KV-tal. Motorerna som testas i projektet visas i tabellen nedan samt dess testnamn. Motorn som köptes in var motor C.

När de 5 olika motorerna har testats skall några få nya motorer beställas baserat på resultatet från första testet.

Tabell 3.2 - Lista över motorer som testas

Testnamn	Motor	Storlek	kv
A	Emax ECO	2807	1500
B	Emax ECO	2807	1700
C	Emax ECO	2807	1300
D	Emax ECO	2306	1700
E	Hobbywing	2207	1750

I figur 3.3 nedan visas de 5 motorer som testats i det första motortestet. Motor A-D är alla från tillverkaren Emax samt modellserien ECOII men motor D är av en mindre storlek.



Figur 3.3 - Motorerna som testas i det första motortestet

3.4.2 Uteslutna motorer

Från början var tanken att 7 motorer skulle testas där två av dem inte kunde köras vid testtillfället av olika skäl. Dessa två motorer var från olika tillverkare vilket var tänkt att ge ett större mångfald i testen samt av lite annorlunda storlekar.

Den 1a motorn som inte kunde köras var AXI goldline 2212/12 1950KV. Anledningen att motorn inte kunde köras var att den inte tål mer än 3S Lipo batterier vilket är strax över 12V i spänning och testerna planerades att köras på ca 16V.

Den 2a motorn som fick uteslutas var Emax Grand Turbo 2215/09 1180KV då propellernavet till motorn inte fanns tillgängligt vid testet på grund av problem hos posten.

3.5 Fartreglage

I projektet skall 5 olika fartreglage testas från olika tillverkare samt med lite olika storlekar i form av vilken storlek på ström de är lämpade för. Specifikationen för fartreglagen syns i tabell 3.3 och bild på dem finns i figur 3.4.

ESC1 och ESC5 är fartreglage anpassade för flygplan där ESC1 är aningen överdimensionerat då 50A inte skall uppnås. Anledningen till valet av 50A är att de mindre fartreglagen i serien enligt specifikationer inte klarar av spänningen hos ett 4s batteri. Dock testas även ESC5 som egentligen klassat för 3s.

De resterande fartreglagen är tillverkade för att användas till racingdrönare i form av multikoptrar med små snabbt roterande propellrar. Detta skall i teorin inte ha betydelse på effektiviteten men skiljer sig på andra sätt. Fartreglagen för racingdrönare är mindre, lättare och har en kortare responstid. De saknar dock möjligheten att programmera om fartreglaget från en handkontroll eller radio vilket ofta används vid användning i radiostyrda flygplan. Storleken på fartreglagen dimensionerades utefter de strömmar som uppnåtts under de tidigare testen samt med en viss säkerhetsgrad. Strömmar under tidigare test närmade sig 10A vid mjuka gaspåslag, vid högre accelerationer, eventuell motvind samt lägre spänning i batteriet kan dessa strömmar höjas en hel del vilket är anledningen till att fartreglage klassade till 30A har valts.

Tabell 3.3 - Lista över fartreglage som testas

Testnamn	ESC	max A (Peak)
ESC1	Hobbywing Skywalker	50 (65)
ESC2	Aikon SEFM	30 (40)
ESC3	Airbot BumpBee	30 (40)
ESC4	Emax BIHeli	20 (30)
ESC5	Hobbywing Skywalker	30 (40)



Figur 3.4 - Tre av fartreglagen som testas

3.6 Testrigg

Här presenteras testriggen som använts under projektets gång samt dess viktigaste delar och funktioner.

3.6.1 Testrigg Series-1580

Testriggen är från företaget RCbenchmark och är av modellen 1580. Testriggen är gjord för att testa drivlinor till drönare, helikoptrar och flygplan. Med hjälp av påmonterade lastceller kan riggen mäta dragkraft upp till 5kg och vridmoment till 1,5Nm. Det finns även många tillägg som kan göras till riggen. Exempel på dessa är temperatursensor, optisk RPM sensor och mycket mer.

3.6.2 RCbenchmark

Det företaget som har gjort testriggen har även gjort en tillhörande mjukvara. Med ett USB-interface kan riggen enkelt kopplas in och styras. I programmet kan antingen manuell signal skickas till fartreglaget eller kan ett automatisk test programmeras. Det går även att ställa in säkerhetsgränser i programmet som stänger av riggen om någon parameter skulle överskridas, exempelvis. temperatur, varvtal, ström eller effekt.

3.6.3 Kåpa

För att minimera störningar i flödet gjordes en kåpa för testriggen. Kåpan är mer aerodynamisk än riggen och på det sättet gör man sig av med störningar i flödet och turbulens som kan påverka resultatet. Kåpan skyddar även delar som sitter monterat på riggen ifrån att skaka sönder vid högfartstesten. I figur 3.5 kan kåpan ses monterad på testriggen och i figur 3.6 visas testriggen men enbart med kåpans ram.



Figur 3.5 - Testrigg med kåpa monterad Figur 3.6 - Testrigg med kåpans ram monterad

Design

Kåpans syfte var som sagt att motverka störningar och turbulens i luftflödet till propellern, för att göra detta möjligt utformades den med jämna mjuka linjer samt till viss mån i form av en aerodynamisk droppe. Kåpans form begränsades av de komponenter på riggen den behövde omsluta. Målet var att göra den så liten som möjligt utvändigt för att påverka flödet så lite som möjligt, därav är det små marginaler mellan kåpa och testrigg på insidan.

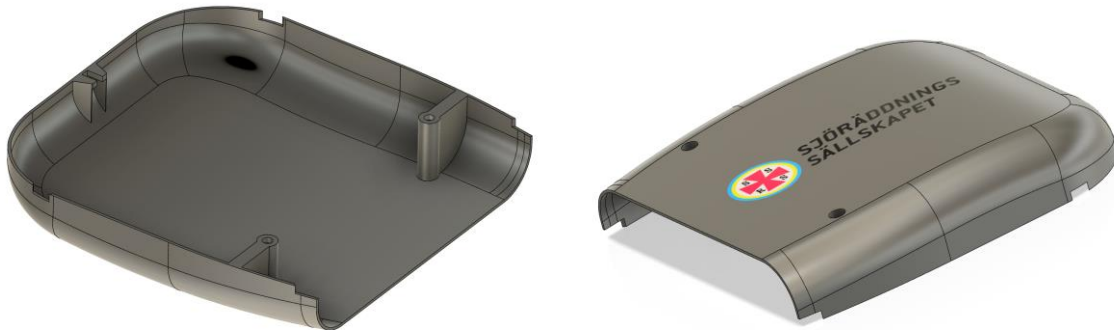
När kåpan utvecklades ansågs det även viktigt att den skulle vara smidig och snabb att öppna för byte av komponenter inför tester. Motorn går att lossa och byta utan att öppna kåpan över huvud taget men om fartreglage eller något annat skall bytas eller ordnas med behöver man öppna kåpan. Detta görs enkelt genom att lossa de två skruvarna i hålen på ovansidan och sedan skjuta hela locket framåt.

Kåpan består av tre delar samt sju stycken mindre träskruvar. I figur 3.6 syns testriggen med endast kåpans ram markerad. Ramen placeras på testriggens stomme genom att en styr-pigg på ramen passar ner i ett hål i testriggen samt att två skruvar från testriggen löper genom hål i ramen. Detta gör att ramen hamnar centrerad på plats och den kan sedan spännas fast med de två muttrarna som håller den svarta plattan med motorfartreglageanslutningen.

Kåpans undersida fästs på undersidan av ramen med hjälp av fyra skruvar ovanifrån. Längst fram på ramen sitter en femte skruv som håller den övre delen av kåpan på plats genom att kåpan skjuts på skruvskallen i ett spår på kåpans insida. Det sista steget är att montera den övre delen av kåpan vilket som sagt görs enkelt genom att skjuta på kåpan och skruva i skruvarna på kåpans ovansida ner i ramen.

3D-modellering

Kåpans delar designades i Autodesk Fusion 360 som är ett 3D-modelleringsprogram. I figur 3.7 visas kåpans ovandel både ovanifrån samt underifrån i ett urklipp från Fusion 360 under utveckling.



Figur 3.7 - Övre delen av kåpan i Fusion 360

Processen att rita kåpan började med att ta mått från testtriggen för eventuella infästningar samt området kåpan behövde omfamna. Ramen ritades först och sedan de två kåporna tillsammans med skruvhål och liknande för montering på ramen. Det reflekterades över om det skulle finnas lufthål eller inte för att låta luft flöda genom den slutna kåpan i syfte att kyla ner elektroniken. Valet gjordes att avvakta med lufthål för att se om värmen skulle bli ett problem eller inte. Lufthålen hade även påverkat luftflödet till propellern vilket ville undvikas.

Fysisk konstruktion

Kåpans delar skrevs ut med hjälp av en 3D skrivare i en polymer vid namnet PLA. Delarna testmonterades och de passade som de skulle, ramen monterades som den kom från skrivaren men de två kåpdelarna vars ytor luftens skall flöda längs var inte tillräckligt släta. Ytorna slipades ner och spacklades några gånger tills de var släta vilket syns i figur 3.8.



Figur 3.8 - Övre och undre kåpan slipade och spacklade

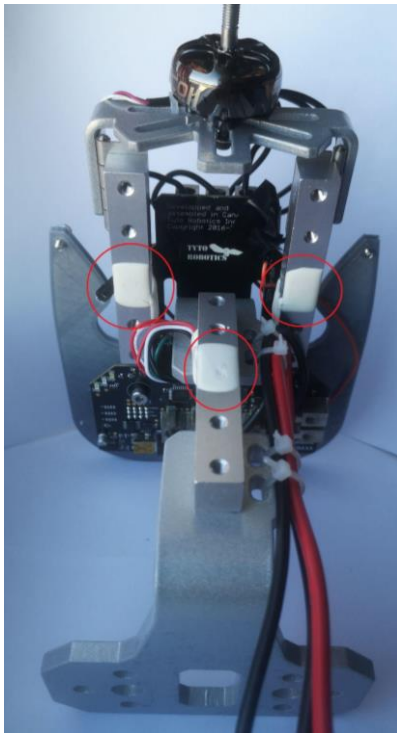
När ytorna var släta målades de vita med sprayfärg samt ett skyddande lager klarlack. Ytorna var nu släta och glatta och kunde monteras för de kommande testen i vindtunneln.

3.6.4 Givare

Här visas de givare som används på testriggen.

Lastceller

Det finns 3st lastcellerna monterade på testriggen. Lastcellerna mäter töjningen i materialet och genom att veta materialets egenskaper kan kraften lösas ut. I figuren nedan kan lastcellerna ses och dem är inringade.

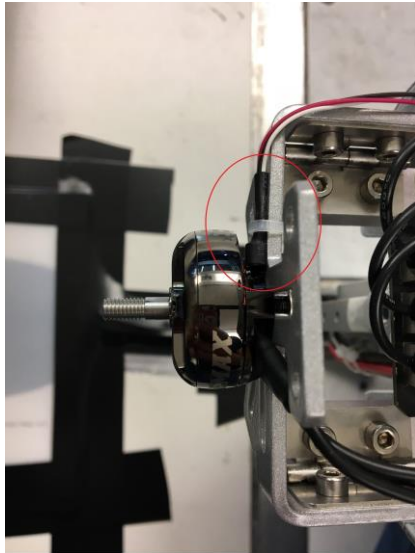


Figur 3.9 - Lastceller på Testrigg

I figur 3.9 ses det att det finns en lastcell monterad lodrät och 2st sitter monterade parallellt med varandra vågrät. Den lodräta lastcellen sitter ortogonalt med dragkraften som drivlinan ger och därav kan en drivkraft räknas ut med hävarmen. De resterande två lastcellerna påverkas av den vridkraft som drivlinan genererar av rotation. Vridkraften är riktad mot rotationsriktningen och leder till att en lastcell trycks ihop medan den andra vill töjas. Genom den skillnaden kan ett vridmoment lösas ut.

Tempgivare

På testtriggen finns det två påmonterade givare av typen DS18B20. Det är en digital temperatursensor som mäter temperaturer mellan -55°C till 125°C [15]. En sitter nära lindningarna till motorn och en sitter intill fartreglaget. De används dels för att skydda utrustningen med hjälp av "safety cutoffs" som avbryter testet om en viss inställd gräns uppnås. Givarna används också för att ge intressant mätdata på när testerna körs.



*Figur 3.10 -
Temperaturgivare på motor*



*Figur 3.11 - Temperaturgivare
på fartreglage*

Figur 3.10 visar när givaren är monterad intill lindningarna på en motor och figur 3.11 visar en givare intryckt innanför höljet på ett fartreglage. Mätvärdena som ges från sensorerna kommer dock inte vara utan mätfel då perfekt positionering inte är möjlig. Det går inte att få sensorn perfekt intill varken lindningarna på motorn eller kretskortet på fartreglaget. Värdena kan istället användas till att jämföra med andra komponenter eller att studera förändringarna i värdet från sensorn.

3.7 Spänningskälla

Här presenteras de spänningskällor som ingått i projektet, då drönaren eventuellt skall drivas med ett 4 cells Lipo batteri behövs en spänning på runt 16V.

3.7.1 Nätaggregat

I projektet används ett nätaggregat BaseTech BT-305. Det kan ge 0-30V och 0-5A. 5A räcker dock inte för alla test, då samtliga drivlinor översteg 5A för flygfall 35m/s. Därför bestämdes det att fulladdade batterier istället skulle användas för alla test i vindtunneln. Nätaggregatet kom istället till nytta när olika spänningsnivåer skulle testas men det var endast möjligt i lågfart.

3.7.2 Batteri

Då nätaggregatet inte räcker till att ge drivlinan ström nog för högfarts testerna användes istället LiPo-batterier för testerna i tunneln. LiPo-batterierna som används är av märket Hacker TopFuel. Det är ett 4-cells batteri med 5000mAh. Då batteriet har 4-celler kopplade i serie ger levereras en vilospänning på 14.8V och vid fulladdat en spänning på 16.8V. Batteriet har en "discharge rate" 20 C vilket innebär att den kan laddas ur 20 gånger sin kapacitet, vilket då betyder 100A. I projektet finns det två sådana batterier att tillgå vilket innebär att ett batteri alltid kan laddas upp medans det andra testas med och på det sätt skapas det en rotation med fulladdade batterier till varje test. I figur 3.12 visas ett av de batterier som används i projektet.



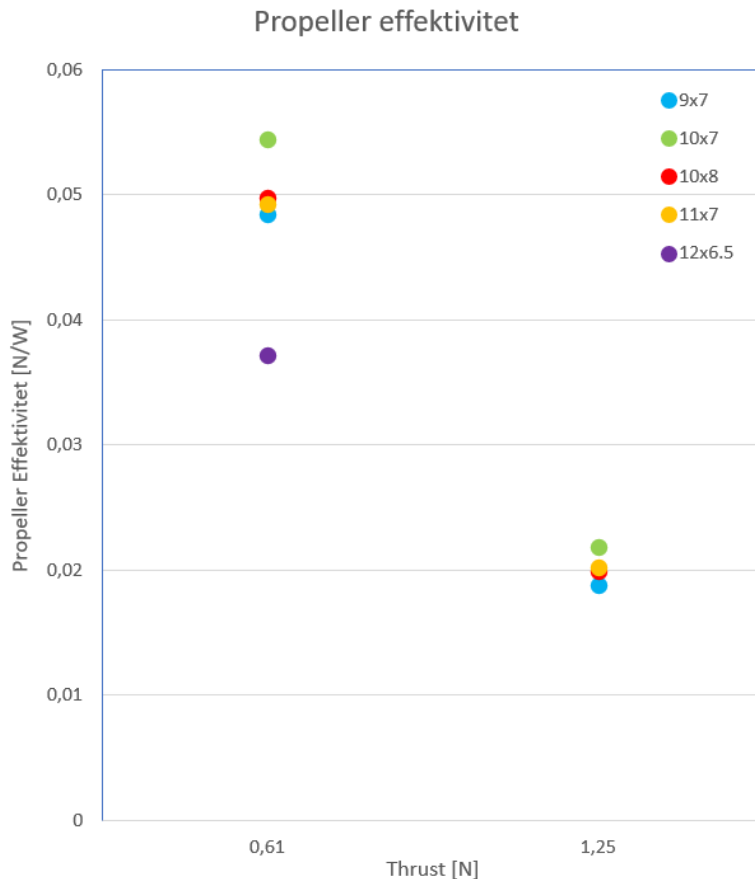
Figur 3.12 - 4-Cells batteri

4. Resultat

Här presenteras resultatet från de tester som utförts under projektets gång i form av grafer och mätvärden.

4.1 Propeller

För att testa propellrarna utfördes tio tester vilket innebar två olika hastigheter med fem olika propellrar. Testen utfördes i ca 16,8V och alltid med ett nyladdat batteri.



Figur 4.1 - Propeller effektivitet över drivkraften

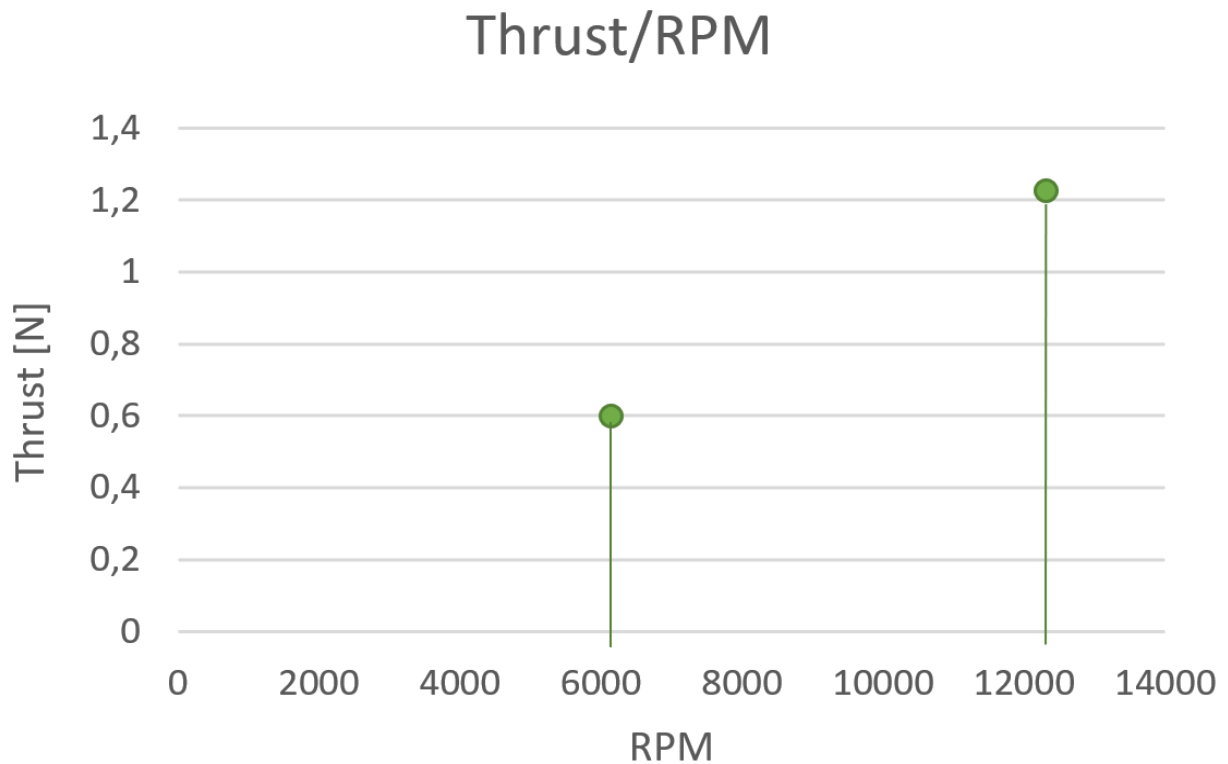
Diagrammet visar hur effektivt propellrarna presterade i de två flygfallen. På diagrammets "Thrust" axel visas 0,61 samt 1,25 N vilket motsvarar flygkroppens luftmotstånd i 15 samt 35m/s. En tydlig observation är att propellrarnas effektivitet sjunker markant när hastigheten genom luften ökar.

Av de fem olika propellrarna som testats syns en tydlig skillnad i effektivitet där propellern med dimensionerna 10x7 ligger bäst till och väljs därav som den optimala propellern för drivlinan.

Propellern med störst diameter (12x6.5) hade en relativt låg effektivitet vid test i 15m/s samt togs till sin maxgräns för varvtal men gav inte tillräckligt med drivkraft för att framföra drönaren i 35m/s.

Varvtal

För att dimensionera motor behövs framförallt varvtalet då propellern skapar tillräckligt med drivkraft för att klara av flygfallet. Detta ger nödvändig information för när ett KV-tal skall väljas för de motorer som skall testas. En annan viktig parameter är att motorn skall kunna leverera tillräckligt med vridmoment vilket redan har påvisats att motorn i propellertestet gör. Om de inte producerat tillräckligt stort vridmoment blir motorn ansträng vilket leder till en värmeutveckling och eventuellt överhettning.



Figur 4.2 - Drivkraft över RPM för 10x7

Diagrammet i figur 4.2 ovan ger att för 15m/s behövs 6000RPM och för 35m/s behövs 12300RPM. Detta gäller för att propellern med dimensionerna 10x7 skall uppnå högsta möjliga effektivitet vid de efterfrågade flygfällen. Det önskade varvtalet är en viktig parameter vid inköp av motor då varvtalet tillsammans med spänningen är kopplat till motorns KV-tal.

4.2 Motor

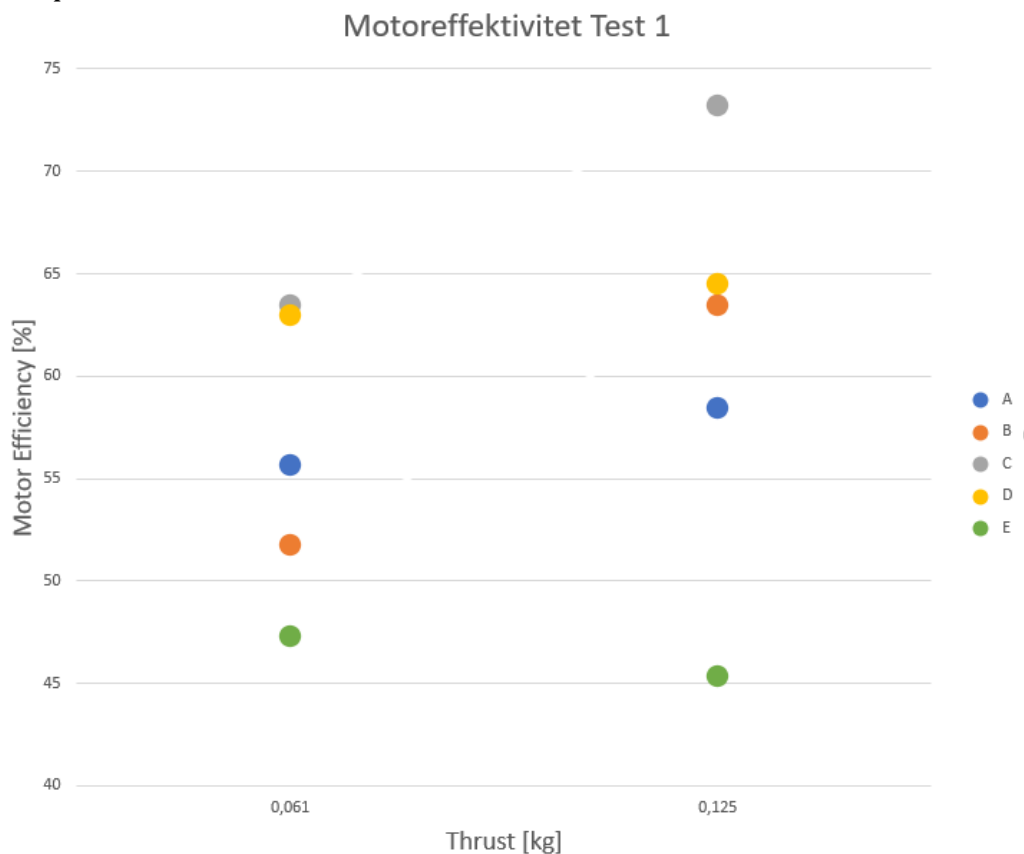
Här presenteras resultaten från de test som körts med motorerna, under projektets gång utfördes två motortest där det andra testet är en uppföljning och vidare undersökning efter resultatet från det första testet.

4.2.1 Motortest 1

För att testa motorerna kördes 10 tester där 5 olika motorer kördes i 2 hastigheter. I figur 4.3 anges enbart en beteckning för respektive motor. Beteckningarna för motorerna kan hittas i tabell 3.2. Testen utfördes precis som i propeller testen med fulladdat batteri med 16,8V vid start.

Effektivitet

Här presenteras effektiviteten för de olika motorerna i motortest 1.

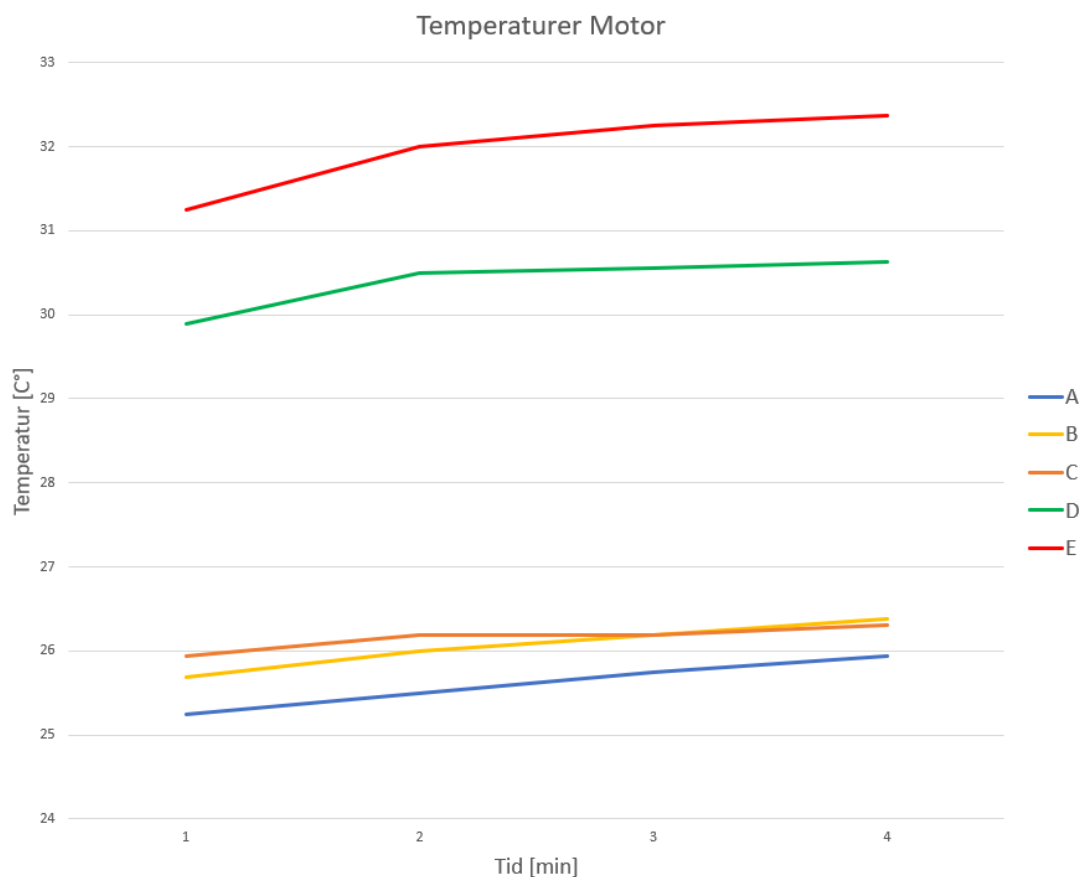


Figur 4.3 – Motor-effektivitet

De olika flygfallen i figur 4.3 representerar flyghastigheterna 15 och 35m/s. I figuren kan det utläsas att motor C har högst effektivitet vid flygfall 15 och 35. Vid 15m/s är den inte mycket mer effektiv än konkurrenten D men vid högfart 35m/s är C markant högre. Det kan även utläsas ur figuren att motor E är minst effektiv i samtliga flygfall.

Temperatur

Ett diagram över temperaturen vid motorn framställdes genom att under en tidsperiod på 4 minuter erhålla mätvärden från temperatursensorn. Det ger en bild av hur varma motorerna blir av att köra i högfart.



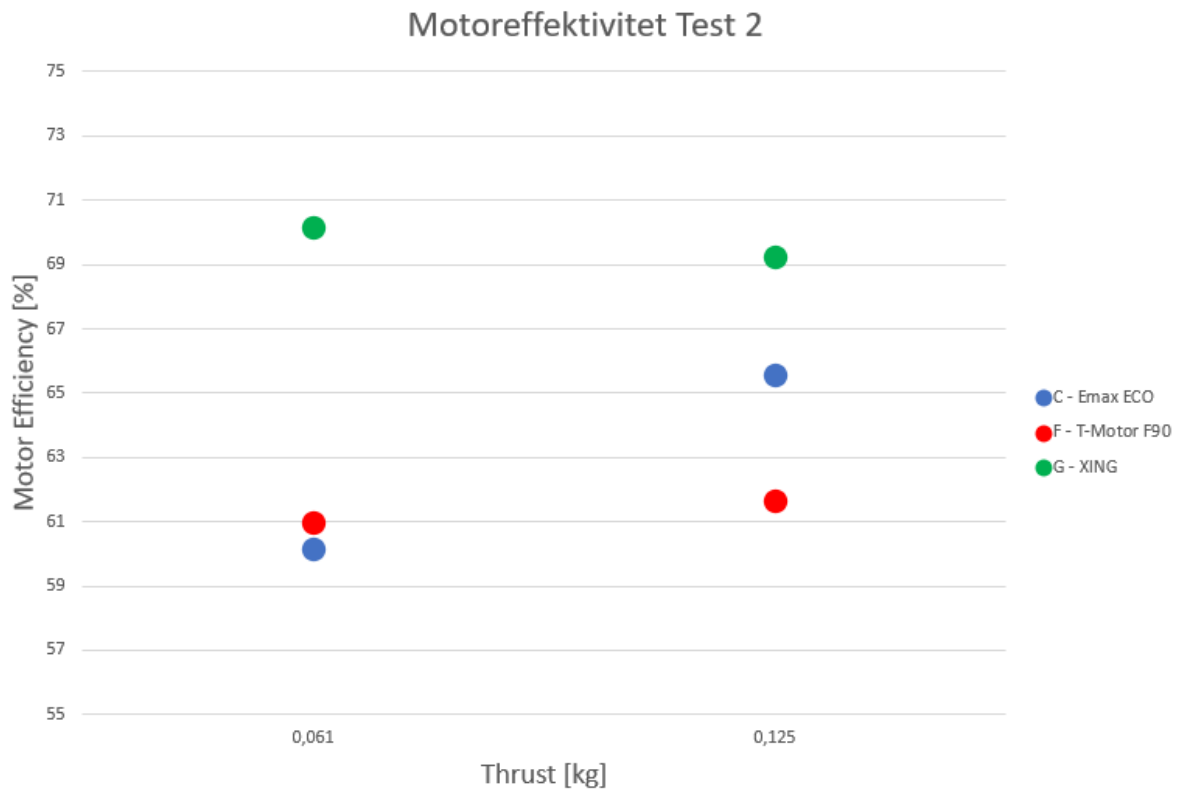
Figur 4.4 - Motortemperatur

Figur 4.4 visar temperaturen intill motorernas spolar beroende av tiden då motorn producerat 1,25N drivkraft vilket motsvarande 35m/s. Motor A, B samt C är av storlek 2807 medan D och E är 2207 och 2306. Diagrammet visar tydligt att de två mindre motorerna D och E når en högre temperatur. Temperatur för fartreglaget finns i bilaga 2.

4.2.2 Motortest 2

Efter det första motortestet beställdes det konkurrenter till motor C som var den mest effektiva motorn i motortest 1. Motorerna som beställdes var av liknande specifikation men av annat märke. Motortest 2 genomförs precis som första testet där 2 olika flygfall testas.

I detta test tas motor-effektivitet fram för de olika motorerna. Bakgrund till vad motor-effektivitet är och hur den tas fram ges i teori 2.5.3 *Motor-effektivitet*.



Figur 4.5 – Motor-effektivitet (Test 2)

I figur 4.5 kan det utläsas att motor G är effektivast för samtliga flygfall. För det första flygfallet i 15m/s är motor G drygt 10 procentenheter effektivare än konkurrenterna. För det andra fallet i 35m/s är den cirka 4 procentenheter effektivare än närmsta konkurrent som är motor C. Detta innebär att motor C inte längre är den mest effektiva motorn som var fallet för det första testet som genomfördes.

4.3 Fartreglage (ESC)

Här presenteras resultaten från de test på fartreglage som gjorts. Under testerna av fartreglage uppstod två problem som gjorde att endast två fartreglage kunde testas, detta nämns även i denna del av rapporten.

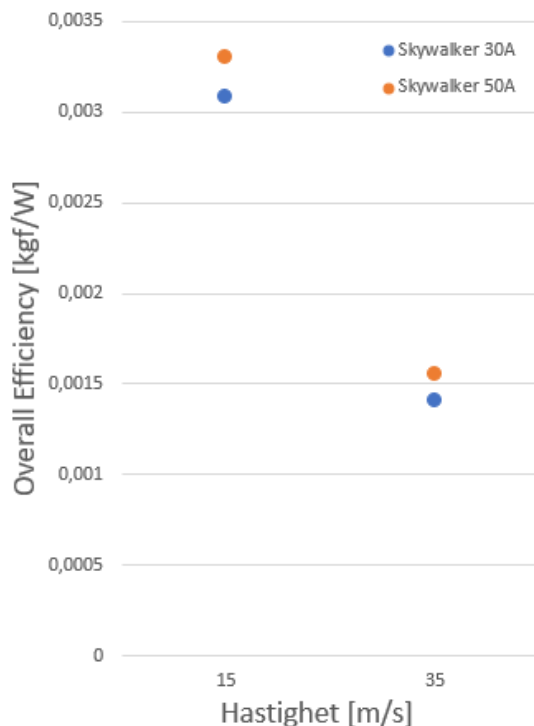
4.3.1 Uteslutna fartreglage

Som nämnt i 3.5 *Fartreglage* var planen att testa fem fartreglage, ESC4 blev överbelastat vilket ledde till att det brändes och ESC2 och ESC3 drog orimligt mycket ström vid testerna.

De två små fartreglagen avsedda för racingdrönare drog ca tre gånger mer ström än ESC1 Skywalker vilket gjorde att de inte kunde testas. Ett försök gjordes att programmera om dem samt uppdatera dess mjukvaror med hjälp av en Arduino men problemet kvarstår. Tyvärr finns inte tiden att fortsätta undersöka fallet vilket gör att endast ESC1 och ESC5 kunnat testas.

4.3.2 Fartreglagetest

När propeller samt motor valts ut fortsatte testen mot att prova fram ett fartreglage med hög effektivitet. Här testas två fartreglage från samma tillverkare samt modellserie men i olika storlekar. Modellen är Hobbywing Skywalker i 30A samt 50A.

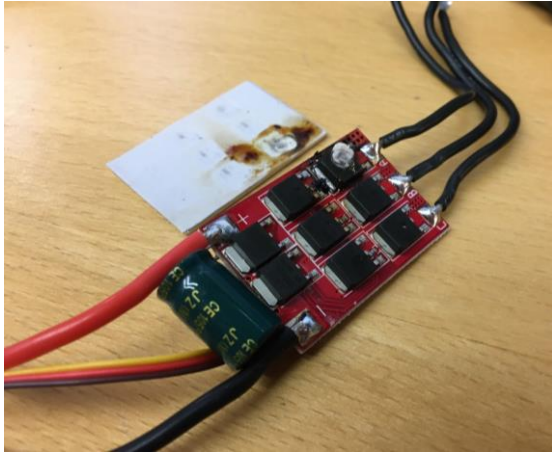


Figur 4.6 - Effektivitet hos Fartreglage-test

I figur 4.6 jämförs de två fartreglagen i de två hastigheterna projektet fokuserat på. På den lodräta axeln visas den totala effektiviteten i form av kilogram kraft per watt där ett högt värde är att föredra. Det är tydligt att Skywalker 50A levererar en något högre effektivitet än Skywalker 30A. Detta gör att Skywalker 50A väljs ut som det optimala fartreglaget från testet.

4.3.3 Haveri

Under motortestet kördes till en början med ESC4 som är klassad till 20A. En av motorerna som senare valdes bort då den inte klarar 4-cells batterier (AXI goldline) kördes med spänningskälla i form av ett nätaggregat. Eftersom motorn klarar av max 3-cells spänning matades ca 12V. För att försöka uppnå den efterfrågade effekten som krävs för att ge upphov till den drivkraft som behövs kompenserade nätaggregatet den lägre spänningen genom att höja strömmen avsevärt. Då fartreglaget endast klarar av 20A resulterade det hela i ett haveri där en av fartreglets MOSFET-transistorer brändes. Fartreglaget efter haveri visas i figur 4.7 nedan.



Figur 4.7 - Haveri på fartreglage

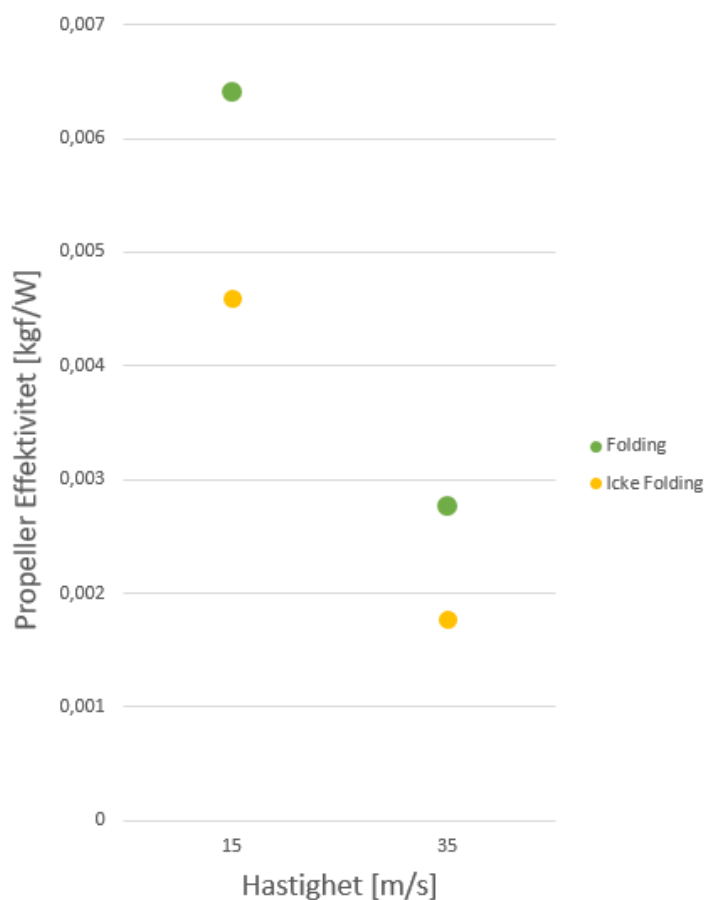
4.4 Slutgiltigt test

Här presenteras resultaten för propellertestet med fast mot fällbar propeller samt testet för de olika spänningsnivåerna.

4.4.1 Fällbar propeller

I tidigare test har enbart fällbara propellrar testats. I detta test skall den mest effektiva dimension på fällbar propeller (10x7) testas mot en icke fällbar propeller i identisk dimension samt märke och modell. Med ett sådant test kan man då se om effektivitet förloras på att ha funktionen att kunna fälla in propellern vid glidflygning.

Testet är kört som tidigare propellertest där 2st flygfall studeras, 15m/s och 35m/s. För dessa flygfall tas propeller effektiviteten fram som kan ses i figur 4.8.

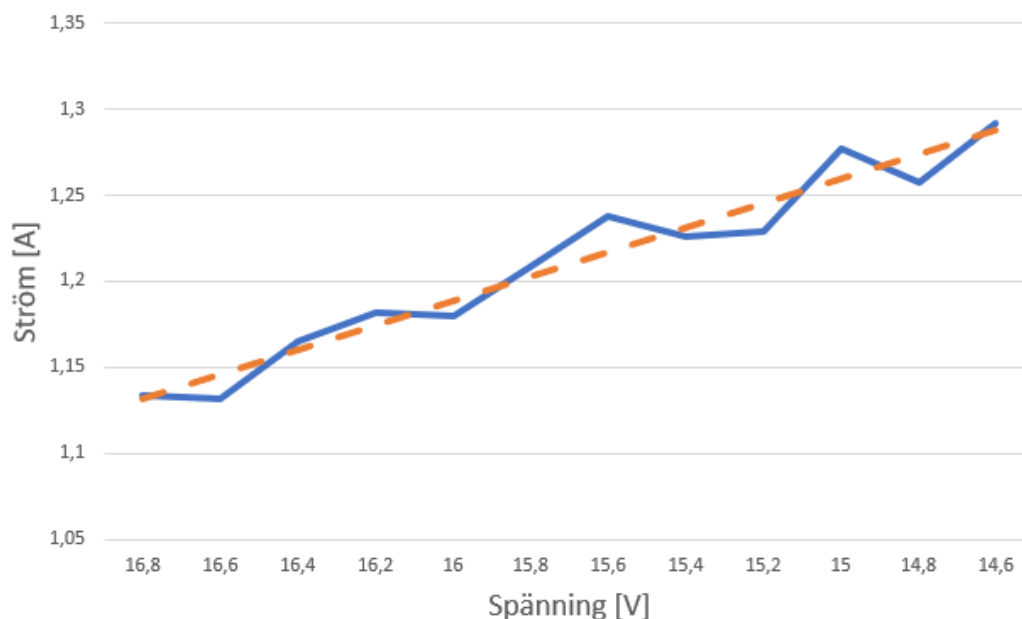


Figur 4.8 – Propeller-effektivitet för fällbar och ovikbar propeller

Grön prick i figur 4.8 är den fällbara propellern och den gula är den fällbara. Figuren visar att den fällbara propellern var mest effektiv i de båda flygfallen.

4.4.2 Spänningsnivåer i test

I tidigare framdrivningstest har drivlinan enbart körts på 16,8V eller strax under för att jämföra med olika kombinationer. Batterierna är inte bestämda i projektet och därav inte heller spänningsnivån. Därför körs detta test för att visa skillnaden som spänningsnivån gör på drivlinan. I detta test körs det i lågfart och drivlinan justeras för varje ändring i spänning för att hela tiden uppfylla lågfarten. Med det menas det att signalen till fartreglaget justeras så att korrekt drivkraft ges för lågfarten. Den blå linjen visar mätdata för testet och den orange är en trendlinje för diagrammet.



Figur 4.9 - Spänningsnivåer för lågfart framdrivning

I figur 4.9 kan det ses att vid 16,8V drar drivlinan ungefär 1,15A. När spänningen sedan sjunker krävs det mer ström för att fortfarande klara lågfarten. Avslutningsvis vid spänningsnivå 14,6V drar drivlinan 1,3A vilket är drygt 13% mer än vid första spänningsnivån.

4.4.3 Effekt

Under de sista testen i vindtunneln med den optimala kombinationen av motor, fartreglage och propeller i de båda flygfallen uppmättes effekterna enligt tabell 4.1.

Tabell 4.1 - Spänningsnivåer för lågfart framdrivning

Flygfall	Hastighet [m/s]	Effekt [W]
Lågfart	15	18,5
Högfart	35	81,3

5. Diskussion

Här reflekteras metod, resultatet, felkällor och rekommendationer för vidare arbete. Frågeställningen som introducerades i inledningen av projektet besvaras och avslutningsvis formuleras även en slutsats som ramar in arbetet.

5.1 Metoddiskussion

Propellertesterna var från början tänkta att utföras med hjälp av automatiska testprogram som tidigare nämnt men under de första testerna i vindtunneln insåg vi att det gick smidigare att utföra manuella tester. De manuella testerna går ut på att operatören stegar upp fartreglaget tills efterfrågad drivkraft är uppnådd. Här tas ett större antal mätvärden innan testet avslutas.

Autotestet hade inte underlättat dessa test och inte heller tillfört bättre värden. I projektet mäts endast i två flygfallen och inte under accelerationen dit. Ett automatiskt test hade varit till fördel om mätningen skulle göras även under accelerationen och på så sätt fått en kontinuerlig kurva för effektiviteten över drivkraft. Det hade dock behövts en kommunikation mellan testriggen och vindtunneln med till exempel ett program som LabVIEW. På det sättet kan drivlinan och vindtunneln rampas upp tillsammans och ett autotest skapas som underlättar provningen. Testerna hade alltså kunnat göras automatiskt men det hade inte skapat något mervärde till svaren på projektets frågeställningar. Att sätta sig in i ett program som LabVIEW och skapa en kommunikation mellan drivlinan och vindtunneln hade varit tidskrävande. Dessutom hade det behövt ske i strömningslaboratoriet som under projektets gång har varit näst intill fullbokat och svårt att boka. Det automatiska testandet är dock en metod för provning som kan användas om vidare arbete sker på projektet för att ge mer information om drivlinan.

5.2 Propeller

Här diskuteras resultaten från de tester som gjorts angående propellrar. Diskussionen berör vilken den mest effektiva propellern är för projektets syfte samt varför.

5.2.1 Storlek & Stigning

Som tidigare nämnt ger i regel större propellrar högre effektivitet. Detta bekräftas i Figur 4.1 där 9 tums propellern har en lägre effektivitet än de båda 10 tums. En propeller av större storlek skapar även ett större luftmotstånd vilket gör att vid högre hastigheter går man ofta ner i storlek och ökar istället rotationshastigheten. Propellerns stigning har även en viktig inverkan på effektiviteten, en för hög stigning kan jämföras med att cykla på en för hög växel vilket skapar en onödig belastning. På samma sätt kan en för låg vinkel jämföras med en för låg växel där man behöver trampa extremt snabbt för att skapa tillräckligt med hastighet för att propellern skall producera den drivkraft som efterfrågas.

Propellern med diametern 12 tum var för stor och kunde inte uppnå den efterfrågade dragkraften i hastigheten 35m/s. De två 10 tums propellrarna samt 11 tums propellern uppnådde nästan snarlik effektivitet där 10x7 var bäst i de båda flygfallen och ses därav som den optimala propellern för drönaren. Propellrarna med dimensionerna 10x8 samt 11x7 hade antingen en storlek för hög stigningsvinkel eller diameter vilket gjorde att de inte riktigt var lika effektiva som 10x7.

5.2.2 Fällbar propeller

För att undersöka om en fast icke-fällbar propeller skulle vara att föredra jämfördes propellern som kom ut som effektivast i det första propellertestet med en icke-fällbar propeller av samma diameter, stigning och modell. I figur 4.8 ser man att den fällbara propellern uppnår en högre effektivitet än den icke-fällbara. Med vetskap om resultatet samt att den är fällbar leder det till att den fällbara propellern blir det slutgiltiga valet.

Rent teoretiskt borde de båda propellrarna ha samma effektivitet, dock är den fällbara propellern monterad på ett specialtillverkat aluminiumnav. Aluminiumnavet har ett kortare avstånd mellan infästningspunkterna jämfört med ett standardnav för fällbara propellrar vilket gör att propellerns diameter blir mindre än den fasta propellerns. Detta kan troligen vara en stor anledning till att de skiljer i effektivitet. Det gör att alla de fällbara propellrarna som testats har en något lägre diameter än vad de är specificerade till vilket går att läsa mer om i *5.8 Felkällor*. Anledningen till att den fällbara propellern trots allt hade högre effektivitet än den fasta kan vara att dess diameter är mindre. Diametern hos den fällbara mättes till 23,3 cm vilket motsvarar ungefär 9,2 tum istället för 10 tum.

5.3 Motor

Här ges en diskussion kring de motortester som genomförts under arbetet och vilka slutsatser som kan dras

5.3.1 Motortest 1

Motor-effektiviteten mättes genom att köra i 2 olika hastigheter och mäta effektiviteten vid de olika fallen. Resultatet till detta test skrevs om i *4.2.1 Motortest 1* och tillhörande diagram för effektiviteten är figur 4.3. Motor A, B och C som syns i figur 4.3 var alla av samma märke, modell och storlek men enbart KV-talet skilde dem åt. Motor C är motor som har lägst KV-tal och är den motorn med högst effektivitet i både 15m/s och 35m/s.

Det visade sig att 1300KV var mest effektiva konfigurationen för användningsområdet och propellern. Om en mindre propeller hade använts skulle det antagligen vara att föredra ett högre KV-tal då en högre rotationshastighet blivit nödvändig. Som nämnt i *2.5.5 KV-Tal* leder ett lägre KV-tal till lägre strömmar då resistansen är mindre vilket är en bidragande faktor till att motorn med lågt KV-tal levererade högst effektivitet.

I figur 4.4 visas det tydligt att motorerna i mindre storlekar som 22 och 23mm i diameter uppnår en högre temperatur än de större. Det handlar om temperaturer på strax över 30 grader vilket i sig inte är ett problem men det visar på att dem påverkas av belastningen till en högre grad än vad de större motorerna gör. I en verklig situation där naturens oförutsägbara krafter kan påverka i form av motvind, varmt väder osv kommer belastningen öka och där finns en risk för överhettning av de mindre motorerna.

Motor C hade högst effektivitet bland dem 5 motorerna som valdes ut för att testas i det första testet. Motor C var effektivare än andra motorer av samma märke och modellserie. Det som skilde motorerna åt var deras storlek och KV-tal. Därför kan slutsatsen dras att det var den effektivaste storleken och KV-talet på motorn bland de motorer som testades. Det är därför intressant att göra ytterligare ett test där motorerna har samma storlek och KV-tal men skiljer sig åt vid tillverkare och modell.

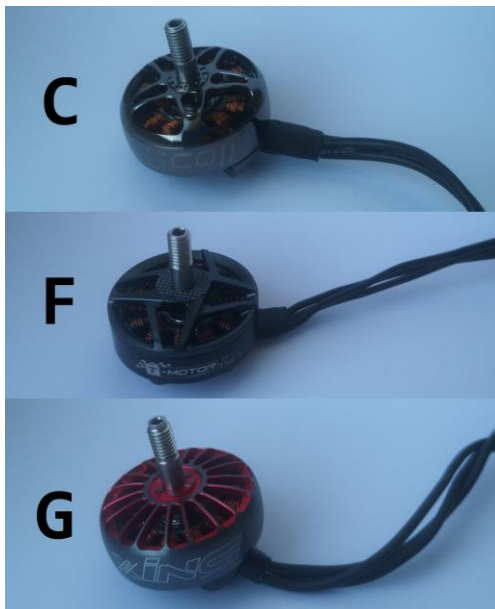
5.3.2 Motortest 2

Till test 2 införskaffades motor F och motor G för att testas mot motor C. Specifikation på de nya motorerna kan ses i tabell 5.1.

Tabell 5.1 - Motorerna i andra motortestet

Motor namn	Motor
C	ECO 2807 1300KV
F	T-Motor 2806,5 1300KV
G	XING 2806,5 1300KV

Som det var sagt i slutsatsen på test 1 ville vi hitta två konkurrenter som var lika när det kom till storlek och KV-tal. Det gjordes för att ta reda på vilken modell som gör den effektivaste motorn i den dimension som hade högst effektivitet i test 1. Motorerna som köptes har identiskt KV-tal och diameter. Dem har en minimal skillnad på 0,5mm i höjd. I figur 5.1 nedan visas de tre motorer som använts i testet.



Figur 5.1 - Motorerna i andra motortestet

Resultatet blev som man kan se i figur 4.5 i 4.2.2 *Motortest 2* att motor G blev den mest effektiva. Fler motorer hade kunnat köra för denna storlek på motor för att testa fler märken och modeller på motorer. Det gjordes dock inte då projektet är avgränsat av tid och för att inte komma efter i tidsplanen valdes det att gå vidare till nästa test för drivlinan.

5.4 Fartreglage

De två fartreglage som testades gav väldigt lika resultat men reglaget klassat till 50A påvisade en aningen högre effektivitet. Då de båda fartreglagen var av samma tillverkare samt modellserie borde de leverera ungefär den samma effektiviteten, att de är klassade till olika stora strömmar skall endast påverka storleken på komponenterna samt upplösningen vid gas signalen.

En möjlig anledning till att det större fartreglaget var effektivare än det lilla kan vara att det var godkänt att köra med spänningen från ett 4 cells batteri medan det lilla enligt specifikation inte skall matas med mer än ett 3 cells batteri. Eftersom testet gjordes med ett 4 cells batteri är det möjligt att fartreglaget inte beter sig riktigt som det är tänkt att göra då det tekniskt sätt används felaktigt.

5.5 Förluster

Förluster har en stor betydelse för effektivitet hos komponenterna. I denna del diskuteras resultatet och förlusternas påverkan.

5.5.1 Fartreglage

I teori-kapitlet 2.7.1 *Fartreglage* introducerades förlusterna för fartreglaget. Där kan ekvation 2.6 och ekvation 2.7 ses som visar förlusten för ledning och switch.

Om ekvationen för ledningsförluster studeras kan det ses att en ökning av ström, större intern resistans eller längre cykeltid för fartreglagen alla leder till en större förlust. Den interna resistansen specificerad av tillverkaren kan vara en faktor i valet av fartreglage för att minska förlusterna. Den ingående strömmen kan sänkas genom att ha en högre spänning och då fortfarande generera samma effekt för drivlinan. Det uppnås med effektlagen som kan ses i ekv 5.1

$$P = U \cdot I$$

Ekv. 5.1

En justering skulle sänka lednings förlusterna men kommer påverka switchförlusterna som kan ses i 5.5.2 *Motor*. Switchförlusterna beror av strömmen, spänningen, tiden för av och på och frekvensen för bytena. Den spänningsjustering som pratades om tidigare del skulle då ha en direkt påverkan på storleken på switchförlusterna. Vilket betyder att de som man vinner i minskad ledningsförlust leder till ökad switchförlust.

Detta betyder att det ej finns några direkta justeringsmöjligheter för att minska de totala förlusterna från fartreglaget. Det som kan göras är att köpa ett fartreglage med låg intern resistans och på det viset sänka ledningsförlusterna.

5.5.2 Motor

I 2.7.2 *Motor* presenteras det 3 st förluster för motorn. Ledningsförluster, förluster för Eddy current och hysteresförlust. Just dessa förluster presenteras då enligt [9] är de elektromagnetiska förluster majoriteten av förlusterna. Om ekvation 2.8 studeras kan det ses att den beror av 2 faktorer, fasströmmen och ledningsresistansen. Identiskt med ledningsresistansen i fartreglaget ökas förlusterna med en ökad ström. Fasresistansen i motor eller den interna resistansen är motorspecifik och vi kan studera de tre motorerna som testades i det slutgiltiga motortestet. I tabell 5.2 nedan finns fasresistansen för motorerna. Fasresistans är tagen från tillverkarnas hemsidor [10] [11] [12].

Tabell 5.2 - Fasresistans för motorer i test

Motorbeteckning	Motor	Fasresistans
C	ECO 2807 1300KV	58mΩ
F	T-Motor 2806,5 1300KV	76mΩ
G	XING 2806,5 1300KV	44,3mΩ

Då ser vi att motor G som var den mest effektiva motorn i testerna har den lägsta resistansen. Den lägre resistansen har i sin tur lett till mindre ledningsförluster och har varit en bidragande faktor till att den blev den mest effektiva.

Motor F var trots den högre fasresistansen effektivare än motor C för lågfarts testen. Vid högfarts testen var det dock tvärtom, vilket kan bero på att fasströmmen då har ökat signifikant. När fasströmmen är högre och multipliceras med resistansen leder det till en kraftig ökning i ledningsförlusterna enligt ekv 2.8.

5.6 Spänningsnivåer

I testet för de olika spänningsnivåerna som gjordes i 4.4.2 *Spänningsnivåer i test* gavs det en insyn i strömförbrukningen för olika nivåer på spänning. Det testades från 16,8V ner till 14,6V med steg av 0,2V. Vid 16,8V drar drivlinan 1,13A och när spänningsnivåer är 14,6V krävs det 1,3A, vilket är 13% mer än vid 16,8V. Det kan bekräftas med ohms effektlag ekvation 5.1.

I ekvationen kan det utläsas att vid en sänkning av spänningen U krävs det en höjning av strömmen I för att vidhålla samma effekt P . Effekten måste vidhålla nivån på 19W för att drivlinan skall generera tillräckligt med drivkraft för att föra den framåt i 15m/s. Liknande beräkningar kan då göras för drivlinan i högfarten som inte kunde köras i vindtunneln. Dessa beräkningar kan ses i tabell 5.3 nedan. Det krävs 81,3W för att drönaren skall färdas i 35m/s och då kan vi med dem olika nivåerna på spänning räkna ut strömförbrukningen.

Tabell 5.3 - Approximering av strömförbrukning i högfart

Spänning [V]	Effekt [W]	Ström [A]
16,8	81,3	4,84
16,6	81,3	4,9
16,4	81,3	4,96
16,2	81,3	5,02
16,0	81,3	5,08
15,8	81,3	5,15
15,6	81,3	5,21
15,4	81,3	5,28
15,2	81,3	5,35
15,0	81,3	5,42
14,8	81,3	5,49
14,6	81,3	5,57

Vid 16,8V där de flesta testen har körts drar drivlinan enbart 4,84A men vid 14,6V drar den 5,57A vilket är 0,73A mer. För verkliga tester kommer spänningsnivån successivt sjunka och strömmen kommer då öka som påvisat i tabell 5.3.

5.7 Batterier

Ett Lipo batteripack består av en eller flera celler, dessa celler har en vilospänning på 3,7V och när de är fulladdade en spänning på 4,2V. En tumregel för att inte skada lipobatterier är att inte ta ut mer än 80% av cellernas kapacitet vilket ungefär motsvarar vilospänningen på 3,7V [13]. Detta behöver tas hänsyn till vid dimensionering av lämpligt batteri.

I projektet ligger fokuset på 4 cells batterier vilket innebär att det är 4 parallellkopplade celler som tillsammans levererar 14,8V i vilospänning samt 16,8V fulladdat. På drönaren kommer det bortsett från drivlinan att finnas elektronik som bland annat styrsystem, servon och kamera. Den övriga elektroniken har även den en strömförbrukning som inte får glömmas bort i beräkningarna. Vi antar därför att den övriga elektroniken ombord på drönaren drar 5W [2].

I 4.4.3 *Effekt* presenteras de effekter som krävs för att föra drönaren framåt. Med hjälp av effekterna samt flygtiden kan energin som krävs för ett teoretiskt uppdrag beräknas enligt ekv 5.2.

$$Effekt[W] \cdot Tid[h] = Energi[Wh] \quad \text{Ekv. 5.2}$$

För ett teoretiskt uppdrag där flygning i högfart i 10 minuter och en effekt på 81,3W, flygning i lågfart i 40 minuter med en effekt på 18,5W samt att det antas att övrig elektronik drar 5W fås enligt ekv 5.3 följande.

$$18,5 \cdot \frac{40}{60} + 81,3 \cdot \frac{10}{60} + 5 \cdot \frac{50}{60} = 30,05Wh \quad \text{Ekv. 5.3}$$

Enligt ekv 5.1 kan den nödvändiga batterikapaciteten beräknas för ett 4 cells batteri.

$$\frac{30,05 Wh}{14,8 V} = 2,03 Ah = 2030 mAh \quad \text{Ekv. 5.4}$$

Ekv 5.4 visar att för att flyga ett teoretiskt uppdrag med de uppmätta effekterna från vindtunneltesterna samt ett 4 cells batteri krävs det 2030mAh. Som tidigare nämnt vill man undvika att ladda ur ett lipobatteri mer än 80% av kapaciteten. Detta gör att för att kunna ta ut 2030mAh behöver 2030mAh vara 80% av batteriets totala kapacitet vilket då motsvarar 2538mAh.

Det beräknade värdet av krävd batterikapacitet kan komma att förändras av en stor mängd olika parametrar som vind och temperatur. För att drönaren skall uppnå de tänkta hastigheterna kommer även några sekunder av acceleration äga rum vilket kräver en del ström.

Viktigt att tänka på vid val av batteri är att ju större batteriet blir desto mer väger det vilket gör att den totala vikten som skall flyga ökar. Detta kommer i sin tur medföra att det krävs en högre effekt för att hålla drönaren i luften.

5.8 Felkällor

Ett resultat kan påverkas av många parametrar och felkällor finns för alla resultat. Här presenteras några av de som påverkat detta projekt.

5.8.1 Propellernav

De fällbara propellrarna monteras vanligtvis på ett nav som sedan fästs på motorn. Detta nav brukar ha en bit längre mellan monteringshålerna för propellerbladen än det nav som använts under testerna. Detta gör att diametern hos propellern blir mindre vilket leder till att propellerns geometri inte riktigt arbetar som den är designad att göra. Propellrar har något som kallas "tordering" vilket innebär att stigningen på propellerbladet är brantare närmast navet då det rör sig långsammare där. Torderingen är utprovad och framtagen utefter hur långt ut på propellern man kommer vilket i detta fall senare förändrats med det smalare navet.

Att propellern inte arbetar som det är tänkt kommer antagligen sänka dess effektivitet samt prestanda vilket gör att testerna kanske skulle sett annorlunda ut med ett nav i rätt storlek. För vidare arbete av projektet är detta något som är värt att kolla upp.

5.8.2 Precision på mätvärden

Mätvärdena från lastcellerna hade låg precision och pendlade inom ett mindre intervall. Detta påverkade direkt drivkraften. Den låga precisionen för lastcellerna skulle möjligtvis kunna uppkomma vid vibrationer i riggen. De ojämna värdena i drivkraften kan leda till att felaktiga värden loggas och att en viss kombination som testas antingen gynnas eller missgynnas.

Den dåliga precisionen i mätvärdena märktes av tidigt och för att minska dess påverkan på testen har alltid ett genomsnitt plockats ut. Detta minimerar risken för att man använder ett för högt eller för lågt mätvärde.

5.8.3 Vibration

Vibrationer i riggen är bidragande faktor till de instabila mätvärdena. Vibrationer kan uppstå i riggen när till exempel skruvar inte är helt åtdragna. Det kan vara att motorn eller propellern som inte sitter helt centrerat och ger då en obalans när drivkraft skapas. Det kan även vara en aerodynamisk obalans som skapas vid högre vindhastigheter då riggen och kåpan påverkas av luftflödet. Sitter exempelvis riggen snett kan det i de högre vindhastigheter ge upphov till vibrationer. Under testkörningar har vi gjort vad vi kan för att minska dessa vibrationer genom att se över skruvar och se till att allting är monterat korrekt.

5.8.4 Spänningsnivå

Då det inte fanns tillgång till en stabil variabel spänningskälla som kunde leverera spänningen motsvarande ett 4s batteri har två likadana batterier använts. Batterierna har en kapacitet på 5000mAh och har alltid varit fulladdade vid testens begynnelse. När ett test körs laddas det andra batteriet vilket gör att när nästa test skall köras finns det alltid ett fulladdat batteri redo.

Ett fulladdat lipobatteri med 4s har en spänning på 16.8V. Den höga spänningen kommer successivt minska ner till 14.8V under uppdragets gång. Den högre spänningen gör att det går åt mindre ström för att uppnå samma effekt vilket gör att när spänningen sjunker ökar strömmen något.

5.8.5 Verkligheten

De test som körts har varit i vindtunnel och därav i simulerade perfekta förhållanden. I verkligheten kommer drönaren ställas mot utmaningar som till exempel kastvindar och nederbörd. I verkliga förhållanden kan det hända att en annan drivlina hade blivit effektivare eller givit andra intressanta egenskaper som stabilitet. Mer om de verkliga testen skrivs om i rekommendationer för vidare arbete.

5.8.6 Luftmotstånd

I ett tidigare examensarbete har en flygkropp tagits fram. För denna flygkropp gjordes en luftmotståndskurva eller luftmotståndskurva som visar hur mycket luftmotstånd som kroppen skapar i olika vindhastigheter. Denna data är en central del i detta projekt då den säger hur mycket drivkraft som krävs av drivlinan för att övervinna motståndet. Om det skulle vara något fel i det tidigare examensarbetet påverkar det vårt projekt som i sin tur kan påverka framtida arbeten.

5.8.7 Fel på komponenter

Eventuella fel på komponenter kan kraftigt påverka resultaten av ett test. Det kan vara en skadad yta på en propeller eller ett produktionsfel som lett till en exempelvis obalanserad propeller. Under projektets gång har komponenterna som använts analyserats noggrant men vissa fel kan vara svåra att hitta.

De komponenter som testats är utvecklade och marknadsförda som hobbykomponenter vilket gör att de inte kostar speciellt mycket att köpa in men detta medför risken att kvaliteten är lägre. Exempelvis kan tillverkarens kvalitetskontroller vara mindre strikta eller rent av obefintliga vilket i sin tur skulle kunna leda till att ett så kallat "måndagsexemplar" har testats som på något sätt har en brist som sänker effektiviteten och prestandan.

Testtriggen som använts för mätningarna har en något skev motorinfästning vilket riktar motorn lite snett. Detta är troligen en kvarleva från ett haveri en tidigare examensarbetare var med om vilket möjligtvis påverkat mätvärdena något. Eftersom riktningen dock är den samma för alla motorer som jämförts med varandra borde jämförelserna vara korrekta.

På testtriggen monteras plattan för motorinfästning på lastcellerna med hjälp av två gångjärn vars vinklar låser varandra. Dessa gångjärn glappar om de inte låses fast under spänning vilket har skapat vibrationer vid ett tillfälle under projektets gång. Vibrationerna var starka och upptäcktes men vid eventuellt mindre glapp skulle vibrationerna möjligtvis påverka testen utan att operatören lägger märke till problemet.

5.8.8 Aerodynamik

Då testerna i vindtunneln inte kunnat utföras med flygkroppen vilket hade varit att föredra betyder det att luftflödet som når propellern inte kommer se likadant ut som när motorn är fäst på flygkroppen. Då en flygkropp är designad att glida genom luften utan för stort motstånd vill man ha ett laminärt flöde över flygkroppen och in i propellern. Då testtriggen i sig har en hel del sladdar och icke aerodynamiska former påverkas luftflödet och antar turbulenta störda strömmar vilket i sin tur skiljer testet från verkligheten. Därför monterades en kåpa på riggen som ett försök att hålla luftströmmarna ostörda. Kåpan har dock inte testats i aerodynamiskt syfte för att motsvara flygkroppen vilket gör att strömmarna ändå skiljer sig från verkligheten till en viss grad.

5.8.9 Alternativ drivlina

De test som gjorts har lett till en slutsats kring en viss kombination av komponenter till en drivlina. De komponenter som testats är dock enbart en bråkdel av vad som finns. Det finns ingen möjlighet att testa alla möjliga kombinationer utan val av komponenter måste göras. Det innebär att det med stor sannolikhet finns en alternativ drivlina som är mer effektiv än den som tagits fram. Det viktigaste är dock inte vilken kombination på drivlina som valts ut snarare varför den valts. Vilka faktorer har studerats för att göra valen och varför. Det kommer alltid utvecklas nya komponenter med högre effektivitet men processen för att hitta samt testa dem är densamma.

5.9 Rekommendationer för vidare arbete

Här presenteras rekommendationer för vad som kan vidare arbetas. Det kan vara ofärdiga delar av detta projekt eller viktiga faktorer som upptäckts under arbetets gång.

5.9.1 Vädrets påverkan

Projektets mätningar är utförda i vindtunnel med en motvind som symboliserar drönarens hastighet vilket gör att det i grund och botten motsvarar flygning i helt vindstilla förhållanden. I verkligheten är detta sällan fallet, speciellt inte på högre höjder längs med kusten. Då räddningsuppdragen med största sannolikhet kommer innebära en flygning från land och västerut över havet till en eventuell olycksplats kommer västkustens pålandsvindar ofta behöva övervinnas.

Att flyga i motvind gör att en mer drivkraft behöver levereras för att kunna föra drönaren framåt vilket i sin tur naturligtvis leder till en högre strömförbrukning.

5.9.2 Segelflygning

Då drönaren har nått sin destination vid olycksplatsen skall den cirkulera i upp till 40 minuter. För att spara energi medan drönaren uppehåller sig över olycksplatsen hade det varit intressant att undersöka möjligheterna för att termikflyga samt flyga på hang. Detta innebär att man utnyttjar vindar, tryckskillnader samt soluppvärmd luft för att generera lyft. Detta är metoder som används inom glidflyg och segelflyg med mycket bra resultat [14].

Att kunna utnyttja vindar och termik hade kunnat spara en hel del ström och förlänga flygtiden. För att detta skall fungera optimalt är en fällbar propeller att föredra då den fälls ihop och gör mindre luftmotstånd när motorn står still vilket är en förutsättning för att segelflyga effektivt.

5.9.3 Komplettest

I detta projekt har en drivlina testats fram med hjälp av en testrigg. Ett vidare arbete på detta hade kunnat vara att istället testa med den flygkropp som tagits fram i ett tidigare examensarbete. Drivlinan kan då monteras i pusher konfiguration på flygkroppen och testas i vindtunneln. Då ges den korrekta strömningen vid propeller och korrekt data kan då läsas ut.

Steget efter det är att provflyga drönaren utomhus. Här kan det vara intressant att se hur mycket ström som faktiskt går åt samt om den uppnår de hastigheter tanken är att den skall uppnå.

5.9.4 Temperatur

I projektet har drivlinan enbart testats i vindtunneln som har haft en temperatur på ungefär 21°C. I Sverige påträffas ett spektrum olika temperaturer under årets gång och låga temperaturer ner och under 0°C är ingen ovanlighet på vinterhalvåret. Det är stor differens i temperatur och något som påverkar batteriet negativt. Detta kan vara något som är värt att undersöka för att se hur stor skillnad det faktiskt gör.

5.9.5 Backslag

Drivlinan som nu har testats fram skulle kunna testas i backslag, alltså testa drivlinans förmåga att skapa motriktad drivkraft. Denna förmåga hade varit intressant att studera för att utvärdera om drönaren hade kunnat använda detta till en effektivare landning. Ett exempel på det är att låta drönaren gå in i fritt fall där den dyker vertikalt mot marken, havet eller eventuellt däck på en båt. Strax innan marken eller annat underlag sätter motorn fullt gaspåslag bakåt och bromsar på så sätt in drönaren till en avsevärt lägre fart för att sedan låta den falla vertikalt från en mycket låg höjd och landa relativt mjukt.

6 Slutsats

Examensarbetets huvudsakliga mål var att ta fram en kombination av komponenter som ger en drivlina med högsta möjliga effektivitet vid de specifika flygfallen. Detta har under projektets gång utförts genom fyra besök i Chalmers strömningslaboratorium där en handfull komponenter har jämförts för att avslutningsvis utse de komponenterna med högst effektivitet. Tillsammans bildar dessa komponenter en effektiv drivlina för Sjöräddningssällskapets drönare.

I projektets start lades det även upp två sekundära mål och även dem är undersökta. Det ena av målen gick ut på att utvärdera om en fällbar eller icke fällbar propeller var att föredra vilket testades i vindtunneln. Testet gav ett lite oväntat resultat som gav upphov till nya funderingar och tankar om propellrarnas geometri vilket i sin tur ledde till en upptäckt av att propellernavet som använts i testen borde varit bredare. Detta var tyvärr inget som reflekterades över i början av projektet när det kunde åtgärdas men är värt att tänka på inför fortsättning av projektet.

Det andra sekundära målet gick ut på att undersöka hur stort batteri den framtagna drivlinan skulle behöva för att ta drönaren genom ett uppdrag. Genom att ta reda på vilken effekt den drivlinan krävde för att framföra drönaren i de två flygfallen kunde en energi beräknas tillsammans med uppgifterna från standarduppdraget. Då energin för uppdraget var beräknad kunde storleken på batteri bestämmas.

6.1 Svar på frågeställningar

Här besvaras de frågeställningar som introducerades i inledningen av projektet.

Klarar drivlinan av att framföra drönaren i 35m/s i flödande luft?

Under det första testet som utfördes klarade alla propellrar utom en av att leverera tillräckligt med drivkraft för att driva drönaren framåt i 35m/s. Propellern som inte klarade av uppdraget hade stor diameter och låg stigning vilket ofta används för låga hastigheter. Därav hade propellern en specificerad maxgräns på varvtal som nåddes innan den efterfrågade nivån av drivkraft.

Bortsett från den stora propellern har alla kombinationer som testats kunnat uppnå 35m/s utan några större problem vilket även stämmer in på den slutligt valda drivlinan. Svaret på frågan är därför att drivlinan klarar av att framföra drönaren i 35m/s i flödande luft.

Vilka komponenter skapar tillsammans den mest effektiva drivlinan i flödande luft?

Under projektets gång har en handfull propellrar, motorer samt fartreglage testats. Av de propellrar som jämförts var det Aeronaut Cam Carbon 10x7 som visade den högsta effektiviteten samt uppfyller de krav som fanns i form av hastigheter. Viktigt att ha i åtanke är att propellern tillsammans med de andra fällbara propellrarna har testats med ett nav i fel storlek vilket kan ha påverkat resultatet något. Med navet fick propellern en mindre diameter vilket antagningsvis skulle kunna betyda att med ett nav i riktig storlek hade en något mindre propeller haft en högre effektivitet.

Motorerna jämfördes i olika storlekar, fabrikat samt KV-tal, det visade sig att tillsammans med den utvalda propellern var en motor med ett KV-tal runt 1300KV samt en diameter av ca 28mm att föredra. Tre motorer med dessa specifikationer men från olika tillverkare testades och jämfördes där den med högst effektivitet var Iflight XING 2806,5 1300KV.

Två fartreglage jämfördes där de båda var från samma tillverkare samt produktserie men i olika storlekar. Resultatet visade att de båda presterade väldigt lika men den som presterade bäst var HobbyWing Skywalker 50A.

Den kombination av komponenter som tillsammans skapar drivlinan med högst effektivitet presenteras i tabell 6.1.

Tabell 6.1 - Drivlinan med högst effektivitet

Drivlina	Produktnamn
Propeller	Aeronaut Cam Carbon 10x7
Motor	Iflight XING 2806,5 1300kv
ESC	HobbyWing Skywalker 50A

Klarar drivlinan av att framföra drönaren genom ett standard uppdrag i flödande luft?

Enligt de tester som gjorts på drivlinan i vindtunneln har effekten som krävs för att föra drönaren framåt i de olika hastigheterna fastställts. Tillsammans med antagandet för den övriga elektronikens effekt på 5W kan vi beräkna den totala energin för ett uppdrag där 10 minuter består av flygtid i högfart samt 40 minuter med flygning i lågfart. I 5.7 *Batterier* beräknas energin samt batterikapaciteten för ett 4 cells batteri. Den beräknade batterikapaciteten som behövs för ett uppdrag hamnar på 2538mAh utan hänsyn till acceleration eller motvind. Då motvind kommer påträffas samt att vetskapen om att acceleration kommer äga rum kommer lite mer kapacitet att vara nödvändigt. Därav skulle förslagsvis ett batteri på 4 celler med en kapacitet på ungefär 3000mAh vara att rekommendera.

Svaret på frågan lyder därför att drivlinan klarar av att framföra drönaren genom ett standard uppdrag i flödande luft förutsatt att ett batteri med tillräcklig kapacitet finns tillgängligt.

Referenser

- [1] Chalmers, Large-Scale Low Turbulence Subsonic wind Tunnel, Chalmers.se, <https://www.chalmers.se/en/departments/m2/simulator-labs/labs/chalmerswindtunnels/facility/Pages/Large-Scale-Low-Turbulence-Subsonic-wind-Tunnel.aspx>, 2018-10-03.
Hämtad: 2021-02-08

- [2] E. Pettersson, "Design of a drone system for maritime search and rescue missions", SSRS, Gothenburg, Sweden, 2020.

- [3] Frank Hitchens, "Propeller Aerodynamics" , Andrews UK Ltd., United Kingdom: 2015-05-11, pp.11-13. Tillgänglig: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/chalmers/reader.action?docID=4460965> , Hämtad: 26 Jan, 2021.

- [4] S. Gudmundsson, "Chapter 14 - The Anatomy of the Propeller" in General Aviation Aircraft Design, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013, pp.583-585.

- [5] H. Hurt, "AERODYNAMICS FOR NAVAL AVIATORS", University Of Southern California, January 1965, Tillgänglig: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/00-80t-80.pdf

- [6] Emrik Joner, How Brushless Motors Work and How to Test Them, RCBenchmark.com, <https://www.rcbenchmark.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work> 2020-10-23, Hämtad: 2021-03-26

- [7] Astro Flight, Motor Terminology, Astroflight.com, <https://www.astroflight.com/explanation-of-motor-terminology.html>, Hämtad: 2021-04-08.

- [8] A. Gong, D. Verstraete, "Experimental Testing of Electronic Speed Controllers for UAVs," presented at the AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sydney, Australia, July 2017, 53.

- [9] Tridibesh Nag, Subhendu B. Santra, Arunava Chatterjee, Debashis Chatterjee, Ashoke K. Ganguli, "Modelling and minimization of losses for brushless DC (BLDC) motor suitable for electric vehicular applications" in World Journal of Modelling and Simulation, May 2016.
[Online]. Tillgänglig: http://www.worldacademicunion.com/journal/1746-7233WJMS/wjmsvol12no04paper02.pdf?fbclid=IwAR03Spj4EUOt7arZa7M53_jcKsBwbKaK96LzYTYh8LSl5aSKpItLeIvNS24.
- [10] *F90 Specifications*, T-motor, 2021-05-14. [Online]. Tillgänglig: <https://store-en.tmotor.com/goods.php?id=1064>
- [11] *Description Eco Series*, Emax Model, 2021-05-14. [Online]. Tillgänglig: <https://emaxmodel.com/products/pre-order-emax-eco-ii-series-2807-1300kv-1700kv-1500kv-brushless-motor-for-rc-drone-fpv-racing>
- [12] *iFlight Xing 2806.5 Test Report*, iFlight-rc, 2021-05-14. [Online]. Tillgänglig: https://shop.iflight-rc.com/index.php?route=product/product&product_id=1001
- [13] Hacker, Hacker Motor GmbH, Ergolding, Germany, *Produktbeschreibung und Bedienungsanleitung Hacker Motor LiPo Akkus, 2020*, Hämtad: 2021-05-18.
[Online]. Tillgänglig: http://www.hacker-motor.com/daten/anleitungen/akkus/Anleitung_Hacker_LiXx_2021-25112020.pdf
- [14] G. Reddy, J. Wong, A. Celani, T.J. Sejnowski, M. Vergassola, "Glider soaring via reinforcement learning in the field", University of California, California, America, October 2018, Hämtad: 2021-04-14. [Online]. Tillgänglig: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0533-0.pdf>
DOI: 10.1038/s41586-018-0533-0
- [15] Maxim Integrated, "Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer" (July, 2017). Distributed by Maxim Integrated.
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

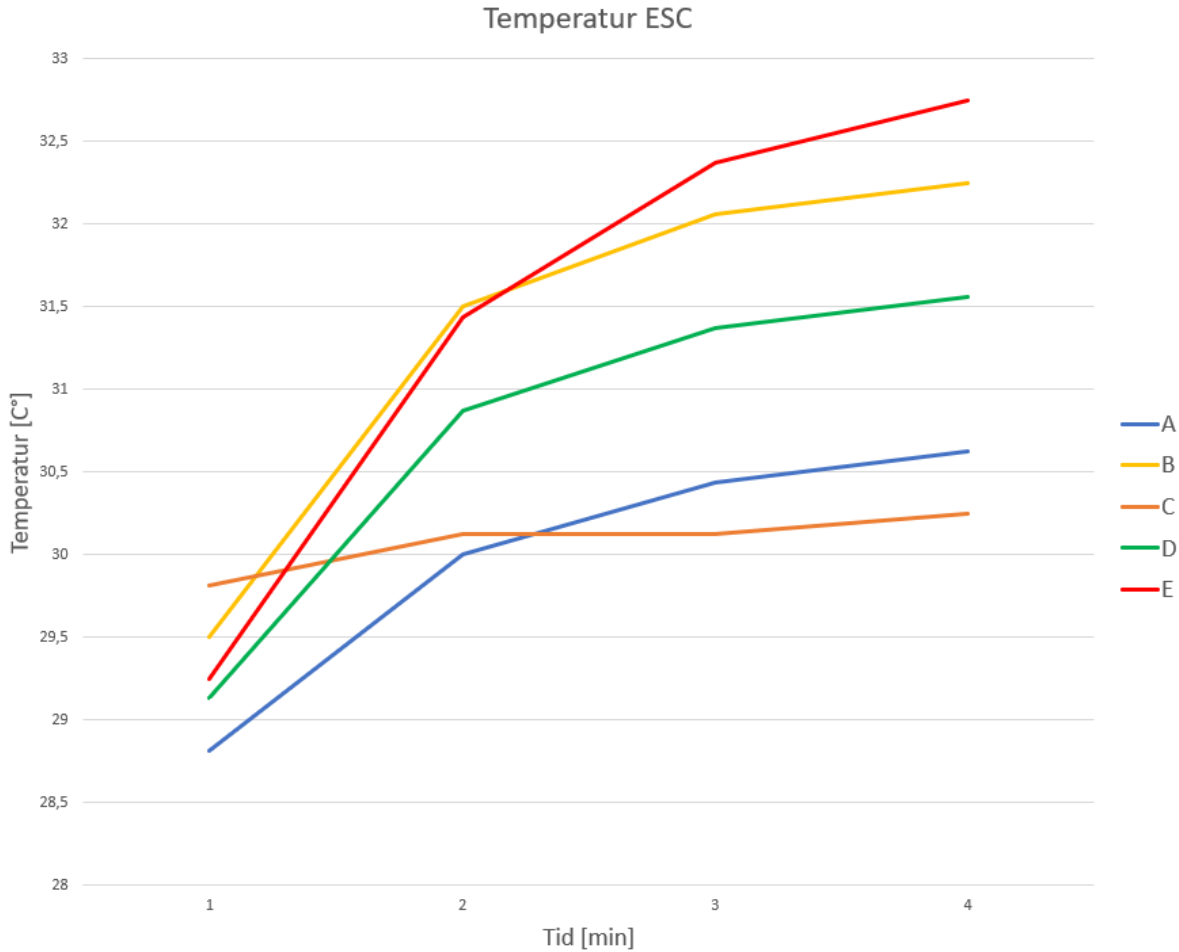
Bilagor

Bilaga 1 - Gantt schema

Aktivitet \ Vecka	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Intro/Planering									Tentavecka
Förundersökning									Tentavecka
Förberedning Test									Tentavecka
Förberedning Propeller									Tentavecka
Proppellertest									Tentavecka
Utvärdering									Tentavecka
Förberedning Motor									Tentavecka
Motortest									Tentavecka
Utvärdering									Tentavecka
Förberedning ESC									Tentavecka
ESC-test									Tentavecka
Utvärdering									Tentavecka
Förberedning Sluttest									Tentavecka
Sluttest									Tentavecka
Utvärdering									Tentavecka
Sammanställning									Tentavecka
Marginal/Reserv									Tentavecka
Avslut									Tentavecka

Aktivitet \ Vecka	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Intro/Planering											Tentavecka
Förundersökning											Tentavecka
Förberedning Test											Tentavecka
Förberedning Propeller											Tentavecka
Proppellertest											Tentavecka
Utvärdering											Tentavecka
Förberedning Motor											Tentavecka
Motortest											Tentavecka
Utvärdering											Tentavecka
Förberedning ESC											Tentavecka
ESC-test											Tentavecka
Utvärdering											Tentavecka
Förberedning Sluttest											Tentavecka
Sluttest											Tentavecka
Utvärdering											Tentavecka
Sammanställning											Tentavecka
Marginal/Reserv											Tentavecka
Avslut											Tentavecka

Bilaga 2 - Temperatur för Fartreglage



Temperatur vid fartreglage för de fem olika motorerna som testades i första motortestet.