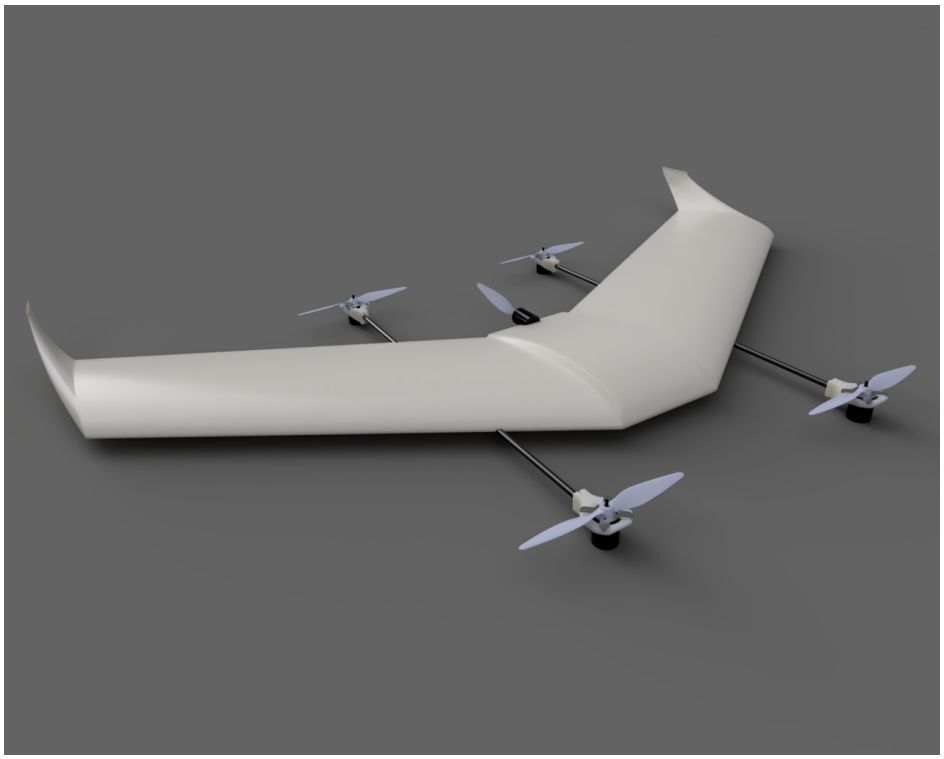
CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



VTOL, framtida drönarapplikationer i samhället

En praktisk undersökning om VTOL-drönare

Examensarbets-rapport inom Maskinteknik

Sebastian Larsson

Theodor Schwarzmayr

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

Examensarbete rapport 2024

VTOL, framtida drönarapplikationer

En praktisk undersökning om VTOL-drönare

SEBASTIAN LARSSON THEODOR SCHWARZMAYR

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sverige 2024

VTOL, framtida drönarapplikationer
En praktisk undersökning om VTOL-drönare
SEBASTIAN LARSSON, THEODOR SCHWARZMAYR

© SEBASTIAN LARSSON, THEODOR SCHWARZMAYR, 2024.

Handledare: Elin Svensson, Invencon AB
Examinator: Kjell Melkersson, Institutionen för Industri- och Materialvetenskap

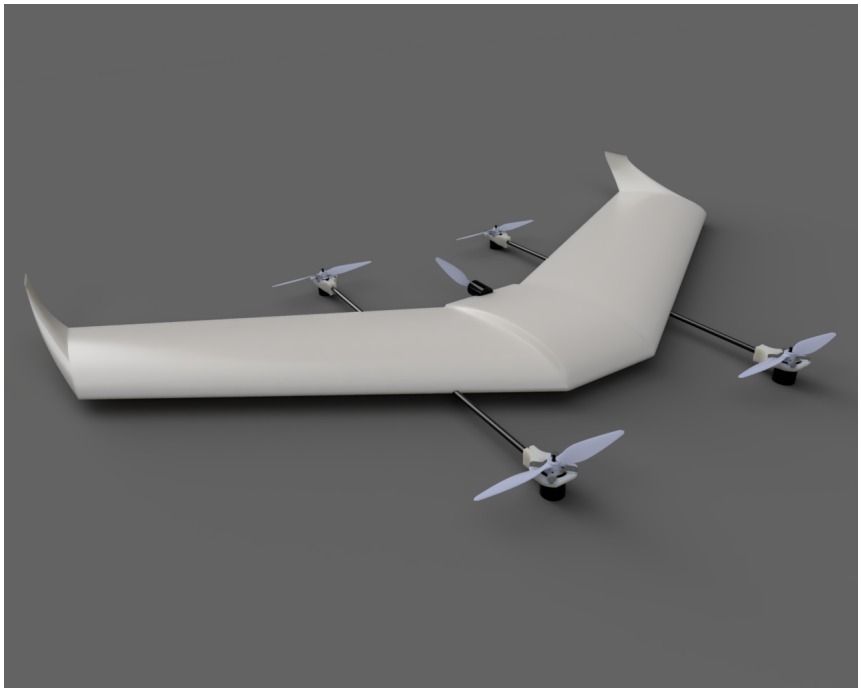
Examensarbets-rapport 2024
INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefonnummer +46 31 772 1000

Typeset in LaTeX
Göteborg, Sverige 2024

VTOL, framtida drönarapplikationer i samhället
En praktisk undersökning om VTOL-drönare
SEBASTIAN LARSSON, THEODOR SCHWARZMAYR
Institutionen för Industri- och Materialvetenskap
Chalmers University of Technology

Sammanfattning

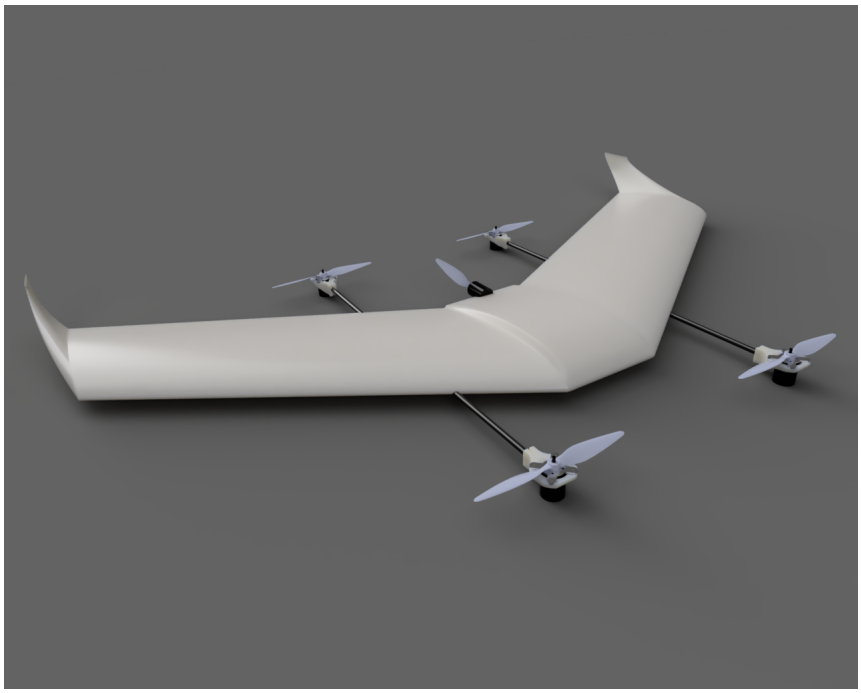
I denna rapport presenteras utvecklingen av en VTOL-drönarprototyp, med särskilt fokus på mekaniska och elektriska komponenter, batterival, vingens struktur samt tillverkningsmetoder. En skiss över det framtagna elektriska systemet visar hur strömförsörjning och signalkablar är kopplade. Drönaren använder ett Li-Po batteri för hög urladdningskapacitet, vilket möjliggör tillräcklig strömförsörjning till motorerna och flygdatorn. Vingens interna struktur är designad för att optimera styrka och styvhet, med hjälp av 3D-utskrivna segment sammanfogade med kolfiberrör, i figuren 0.1 visas den framtagna prototypen i CAD. För att maximera räckvidd och effektivitet övergår drönaren snabbt från drönarläge till flygplansläge. Övergången kontrolleras genom att justera pushermotorns och drönarmotorernas varvtal baserat på hastighetsdata från GPS och pitotrör. Slutsatser visar att nuvarande lagstiftning utgör en utmaning för drönarleveranser i bebyggda områden, men att vingdesignen avsevärt förbättrar drönarens räckvidd och energihushållning. Fortsatt arbete inkluderar praktiska flygtester och programvaruoptimering för att ytterligare förbättra drönarens prestanda.



Figur 0.1: Renderad bild på framtagen prototyp

Abstract

This report presents the development of a VTOL drone prototype, with a particular focus on mechanical and electrical components, battery selection, wing structure, and manufacturing methods. A sketch of the developed electrical system shows how power supply and signal cables are connected. The drone uses a Li-Po battery for high discharge capacity, enabling sufficient power supply to the motors and flight computer. The internal structure of the wing is designed to optimize strength and rigidity, using 3D-printed segments joined with carbon fiber tubes, in figure 0.2 is a image of the prototype in CAD. To maximize range and efficiency, the drone quickly transitions from drone mode to airplane mode. The transition is controlled by adjusting the pusher motor and drone motors' RPMs based on speed data from the GPS and pitot tube. Conclusions show that current legislation poses a challenge for drone deliveries in populated areas, but the wing design significantly improves the drone's range and energy efficiency. Future work includes practical flight tests and software optimization to further enhance the drone's performance.



Figur 0.2: Renderad bild på framtagen prototyp

Förord

Vi vill rikta ett stort tack till Kjell Melkersson för hans ovärderliga stöd och vägledning under hela projektets gång. Hans expertis och engagemang har varit avgörande för att vi skulle kunna slutföra detta examensarbete framgångsrikt.

Vi vill också uttrycka vår tacksamhet till Invencon AB för att vi fick möjlighet att genomföra vårt examensarbete hos er. Det stöd och de resurser ni har tillhandahållit har varit en nyckelfaktor för vår framgång och vi uppskattar er generositet och tillit.

Sebastian Larsson
Theodor Schwarzmayr

Göteborg, Maj 2024

Innehåll

Figurer **ix**

Tabeller **xi**

1 Inledning **1**
1.1 Bakgrund . . . 1
1.2 Syfte . . . 2
1.3 Avgränsningar . . . 2
1.4 Precisering av frågeställningar . . . 2

2 Teoretisk referensram **5**
2.1 Tidigare studier . . . 5
2.2 Aerodynamisk teori . . . 5
2.3 Existerande lösningar . . . 6
2.3.1 Quad VTOL pushermotor . . . 6
2.3.2 Quad VTOL tiltmotor . . . 7
2.3.3 Quad VTOL tiltwing . . . 8
2.4 Kravspecifikation . . . 9
2.5 Val av koncept . . . 10
2.5.1 Prototypskriterier . . . 10
2.5.2 Kesselringmatris . . . 10
2.6 Konceptutveckling . . . 11

3 Framtagen prototyp **13**
3.1 Framtagen prototyp . . . 13
3.2 Aerodynamik . . . 14
3.2.1 Vingprofil . . . 14
3.2.2 Vingutformning . . . 15
3.2.3 Stabilitet . . . 16
3.2.4 Elevons . . . 17
3.2.5 Propellerteknik . . . 17
3.3 Elektronik . . . 18
3.3.1 Flygdator och sensorer . . . 18
3.3.2 Drivsystem . . . 19
3.3.2.1 Strömförsörjning . . . 19
3.3.2.2 Schematiskt elschema . . . 19
3.3.2.3 Batteri . . . 20

3.4 Ram 21
3.4.1 Vingens internstruktur 22
3.4.2 Kolfiberör 23
3.4.3 Motorfäste 23
3.5 Tillverkningsteknik 24
3.6 Funktion 24

4 Slutsatser **27**

5 Diskussion och fortsatt arbete **29**
5.1 Diskussion 29
5.1.1 VTOL-drönare användningsområden 29
5.1.2 Vingens uppbyggnad och material 29
5.1.3 Elsystem 29
5.1.4 Mjukvara 29
5.2 Fortsatt arbete 30

Bibliography **31**

Figurer

0.1 Renderad bild på framtagen prototyp iv
0.2 Renderad bild på framtagen prototyp v

2.1 En välvd vingprofil med kordallinje och x_{cp}, x_{ac}, x_{cg} markerade 5
2.2 Svepvinkel på en vinge 6
2.3 Deltaquad Pro (Källa: Deltaquad) 7
2.4 Bell Boeing V-22 Osprey (James Haseltine/US Air Force) 8
2.5 NASA GL10 Greased Lightning (Källa: NASA Langley/David C. Bowman) 8

3.1 Renderad bild på framtagen prototyp 13
3.2 Flygande vinge från CAD 14
3.3 Clark Y vingprofil 15
3.4 Airbus Vingspetsfena (Källa: Till Niermann/Eget arbete) 16
3.5 Pixhawk 6C med tillbehör 19
3.6 Schematiskt elschema, Fökortningarna har följande betydelser: LR = LIDAR, FD = flygdator, PB = powerboard, ESC = motordrivare. . . 20
3.7 Vingstruktur (a) och motorfäste (b) 21
3.8 Vase mode 23
3.9 Renderad bild på motorfästet 24

Tabeller

2.1 Viktighetsgrad matris 11
2.2 Kesselringsmatris 11

1

Inledning

1.1 Bakgrund

I takt med den ökande efterfrågan på effektiva och hållbara leveransmetoder har intresset för vertikalt startande och landande drönare, så kallat VTOL (Vertical Take-Off and Landing), ökat avsevärt. Dessa drönare erbjuder potentialen att förbättra befintliga paketleveranssystem genom att undvika traditionella infrastrukturhindringar och erbjuda snabbare och mer flexibla leveransmöjligheter, speciellt med tanke på upptakten av E-handel. Tekniken har även visat sig vara mer miljövänlig än det traditionella systemet för att leverera paket och varor. Den här studien syftar till att utforska användbarheten hos VTOL-drönare för paketleverans och identifiera eventuella fördelar och utmaningar som kan påverka deras implementering, i synnerhet med avseende på leveranssäkerheten.

Konceptet att leverera paket med drönare har funnits ett tag och det var på väg att ta fart tills att reglerna ändrades om hur drönare fick framföras i Sverige och EU. Just nu pågår det ett projekt som heter CITYAM, det är sponsrat av EU i bland annat Stockholm där drönarleveranser i stadsmiljö utreds vilket kan komma att påverka hur reglerna ser ut för drönare i Sverige. Detta innebär att det kan finnas möjligheter för drönarleveranser i framtiden.

Drönare i dagsläget har ofta fyra eller fler propellrar och fungerar mer som helikoptrar. Detta arbete ämnar att undersöka, genom att bygga en prototyp, om det är lönsamt att använda sig av flygplansdrönare som har förmågan att starta och landa vertikalt i paketleveranskontext. Denna typ av drönare kan även flyga stilla i luften likt en helikopterdrönare, men under horisontell färd utnyttjas vingen för att generera lyftkraft vilket ökar räckvidden på drönaren. Funktionen för att kunna flyga stilla i luften är kritisk då paketen behöver levereras på ett säkert och kontrollerat sätt.

Tillsammans med företaget Invencon har undersökningar på detta område utförts för att utvärdera hur framtidens leveranser skulle kunna se ut och om det går att använda drönare till detta ändamål. Arbetet har även undersökt, i begränsad mån, om det finns en marknad för den här typen av drönare.

1.2 Syfte

Uppdraget ska ge en tydligare bild på leveransdrönares roll i det framtida samhället. Om det är rimligt att drönare ska leverera paket i tätbebyggda områden och om det finns något behov av det. Några huvudaspekter som kommer undersökas är drönarens räckvidd, hur mycket en flygplansvinge bidrar till att förlänga räckvidden och vilka kritiska mekaniska komponenter som finns hos en paketleveransdrönare. Ytterligare huvudaspekter som undersökts är kroppens konstruktion och propellerteknik, samt hur dessa kan förbättras för att uppnå en högre säkerhet i drönarens funktion. Dessa kritiska delar kommer sedan att tillverkas och testas för att utvärdera hur de kan förbättra drönarens funktion.

Genom att fokusera på dessa mekaniska och maskintekniska aspekter strävar studien efter att bidra med insikter som kan vägleda utvecklingen av robusta och effektiva VTOL-drönare för framtidens paketleveranssystem.

Syftet med denna studie är således att genomföra en grundlig analys av användbarheten hos vertikalt startande och landande drönare för paketleverans. Genom att undersöka olika aspekter av dessa drönare, med fokus på tekniska egenskaper, strävar studien efter att ge insikter om huruvida VTOL-drönare är lämpliga för att möta kraven och förväntningarna i en realistisk paketleveransmiljö.

1.3 Avgränsningar

I huvudsak kommer drönarens mekaniska och strukturella design i sig att utvärderas, där maximal lyftkapacitet i samband med räckvidd på drönaren ska optimeras.

Drönaren ska följa de lagar och regler som finns i Sverige idag. En egenbyggd drönare faller i dagsläget under kategorin C4 och får därmed inte flygas i närheten av bostads-, industri-, affärs- och rekreationsområden eller människor. Därför blir även testningen av drönaren begränsad till områden där det är tillåtet att flyga denna drönare.

Undersökningen kommer i huvudsak identifiera och utveckla drönarens mekaniska system för att göra den pålitlig nog att användas i leveranskontext. Således kommer bland annat navigationssystem och drönarens autonomitet inte att behandlas mer än nödvändigt för att drönaren ska kunna flygas och utvärderas ur den mekaniska aspekten. Med den mekaniska aspekten menas drönarens stabilitet, räckvidd och lyftkapacitet där dessa i huvudsak är beroende av dess vikt, utformning och storlek.

1.4 Precisering av frågeställningar

Vad är en leveransdrönare idag och vad finns det för begränsningar på dagens drönare samt hur kan drönare designade för ändamålet varuleverans se ut i framtiden?

Vilka är de kritiska mekaniska delarna i en drönare och hur kan de förbättras för att uppnå en högre leveranssäkerhet i en leveransdrönare?

Hur kan en drönares tekniska egenskaper som räckvidd, stabilitet och lyftkapacitet optimeras för ändamålet varuleverans och vad är en flygplansvinges effekt på dessa tekniska egenskaper?

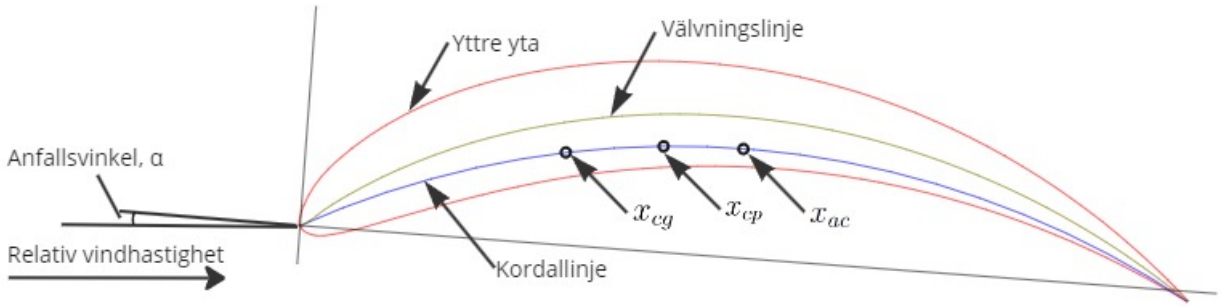
2
Teoretisk referensram

2.1 Tidigare studier

Genom att läsa igenom tidigare studier på samma områden erhölls en bättre bild av vad som bör ingå i kravspecifikationen. Enligt Jia Xu[1]* kommer en specifik energimängd för en drönare som ska kunna leverera paket och ha 20% energimängd i reserv ligga på ungefär 1,5 kWh. Detta gäller en drönare som ska kunna levera paket i stadsmiljö där räckvidden 16 km och vikten på paketet som levereras är 2,5 kg. I denna studie undersöks även skalbarheten av leveransdrönare där bland annat jämförelsen av VTOL-drönare med quadcopters görs, där VTOL-drönare har en tydlig fördel när det kommer till längre distanser.

2.2 Aerodynamisk teori

För att göra en bedömning av stabiliteten för en flygande vinge behövs tre nyckelpunkter defineras. Dessa punkter ligger på kordallinjen till vingprofilen vid roten av vingen. Punkterna illustreras i figur 2.1 och är följande:



Figur 2.1: En välvd vingprofil med kordallinje och x_{cp}, x_{ac}, x_{cg} markerade

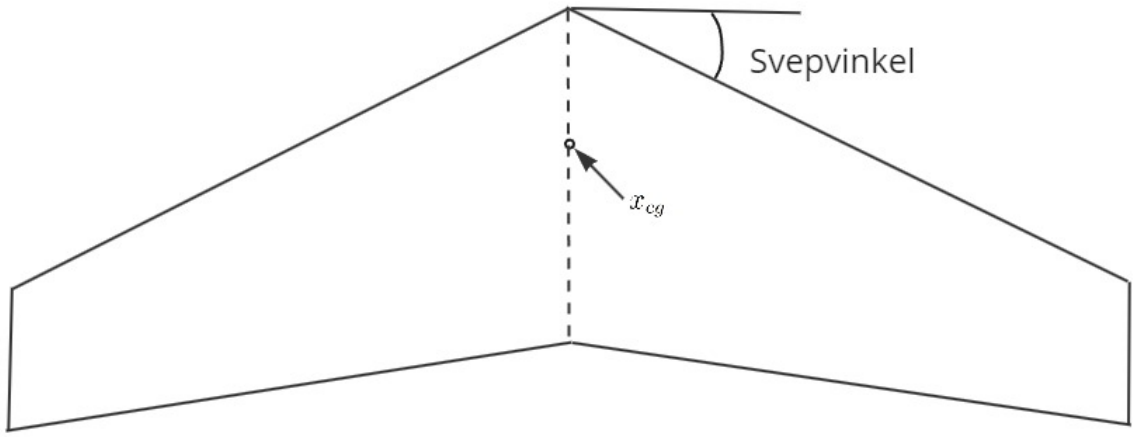
1. Tryckcentrum, x_{cp}, är punkten längs kordallinjen där den resulterande kraften från yttrycket längs hela vingen verkar. Detta inkluderar alla inducerade lyft- och luftmotståndskrafter. Positionen av x_{cp} varierar även beroende på anfallsvinkeln.

2. Aerodynamiska mittpunken, x_{ac}, är en punkt längs kordallinjen där momentet

[1]Xu, J. (2017) Design Perspectives on Delivery Drones . RAND Corporation.
* Siffra inom hakparates anger här och i fortsättningen referenser

är oberoende av anfallsvinkeln av vingen.

3. Masscentrum, x_{cg}, är punkten längs kordallinjen där gravitationskraften verkar. Till följd av ett bakåtsvep på vingen kan x_{cg} variera beroende på anfallsvinkeln av vingen, se figur 2.2.



Figur 2.2: Svepvinkel på en vinge

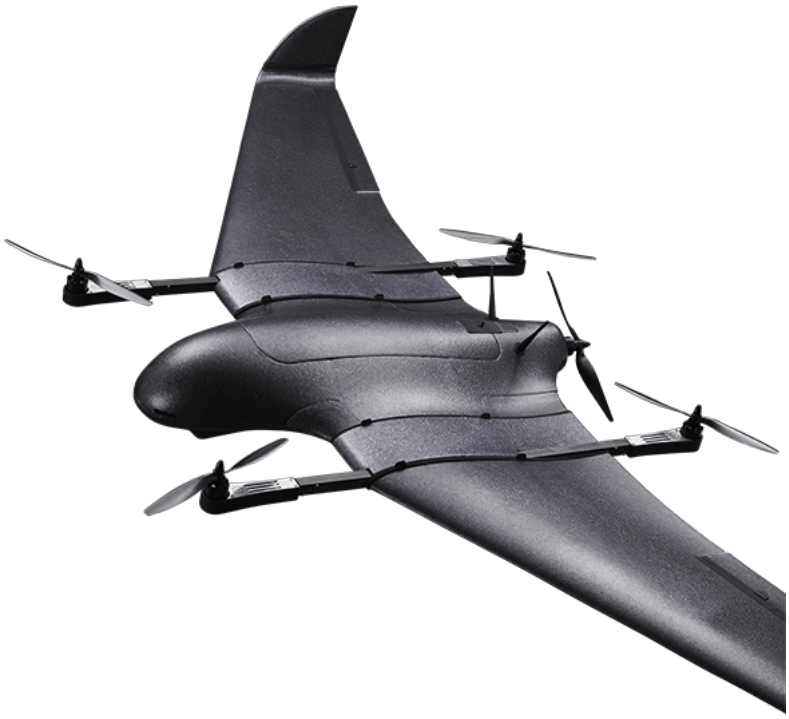
För att flyga stabilt måste störningarna beroende av yttre laster motverkas genom geometrin av vingen för att drönaren ska återvända till sin ursprungliga riktning. En flygande vinge har positiv statisk stabilitet om den återvänder till jämviktsläge efter en störning uppkommer. Jämviktsläget är då vingen åker med jämn, horisontell framåtrörelse utan moment runt x_{cg}.

2.3 Existerande lösningar

Existerande VTOL-drönare på marknaden har många olika konfigurationer och här beskrivs de olika koncepten med deras respektive för- och nackdelar. Framförallt undersöks layouten på drönaren, alltså utformningen och inte elsystemet.

2.3.1 Quad VTOL pushermotor

I en "quad VTOL pushermotor" drönare har en vanlig 4 propellrig drönare och en flygande vinge slagits samman för att få versatiliteten av en drönare och långdistansflygning från vingen. En flygande vinge definieras av avsaknaden av ett stjärtstyrverk, det vill säga att vingen inte har ett traditionellt fuselage och den bakre vingen. Quad VTOL pushermotor har även en ytterligare propeller, alltså totalt fem propellrar, dår den femte propellern är riktad vinkelrätt mot resterande propellrar för att driva drönaren framåt när den övergår i huvudsakligen horisontell flygning. Ett exempel på denna design kan ses i figur 2.3.



Figur 2.3: Deltaquad Pro (Källa: Deltaquad)

En nackdel med denna design är att när den körs i drönarläge används inte pushermotorn och när drönaren flyger i flygplansläge används inte de 4 drönarmotorerna. Flygplansläge innebär att flygningen sker huvudsakligen med hjälp av vingen och inte de uppåtriktade propellrarna samt att flygningen är huvudsakligen horisontell. Detta skapar även onödigt luftmotstånd när drönaren förflyttar sig horisontellt framåt.

2.3.2 Quad VTOL tiltmotor

Tiltmotor har ingen femte motor för flygplansläget, istället vrids de två främre drönarmotorerna succesivt mer och mer frammåt när drönaren går in flygplansläge. Ett känt exempel på denna design är Boeing's Osprey, i figur 2.4.

Figur 2.4: Bell Boeing V-22 Osprey (James Haseltine/US Air Force)

Denna design har potential att var mer effektiv med hjälp av de sänkta luftmotståndet från att ha färre stillastående motorer i flygplansläge.

Nackdelen med tiltmotor är att drönaren förlorar redundansen från att ha fem fasta motorer. Dessutom ökas komplexiteten på grund av den vridande mekanismen.

2.3.3 Quad VTOL tiltwing

Tiltwing är lik tiltmotor-designen fast drönaren vrider på vingen samtidigt som de två främre motorerna. I figur 2.5 syns ett exempel på ett koncept som utvecklades av NASA, här vrids då hela vingen för att byta mellan att sväva och att flyga horisontellt framåt.

Nackdelarna är lika tiltmotor-konceptet. Komplexiteten ökar ännu mer och chansen för haveri är högre.

Figur 2.5: NASA GL10 Greased Lightning
(Källa: NASA Langley/David C. Bowman)

2.4 Kravspecifikation

I förstudien till projektet gjordes en kravspecifikation som sedan utvecklades under projektet för att mäta hur väl drönaren uppfyller de förväntningar som ställs på den. Dessa krav har delats in i olika kategorier som krav på tekniska specifikationer, prestationskrav, miljökrav, användarvänlighet, kommunikation samt förvaltningskrav. Kortfattat beskrivs kraven nedanför:

Tekniska specifikationer:
- Vingspann: 1600 mm
- Maximal vikt för last: 0,5 kg.
- Flygtid: Minst 30 minuter med last.
- Vertikal start och landning (VTOL): Förmåga att lyfta och landa vertikalt samt övergå till horisontellt flyg.
- Autonomi: Möjlighet till delvis eller helt autonom flygning för navigering och leveransprocess.

Prestationskrav:
- Maximal hastighet: 60 km/h.
- Stabilitet: Upprätthålla stabilitet och säkerhet under alla väderförhållanden och vindförhållanden.
- Noggrannhet vid leverans: Kunna leverera paket till en specificerad destination med hög noggrannhet och precision.

Säkerhetskrav:
- Kollisionsundvikande teknologi: Inbyggda sensorer och kollisionsundvikande system för att undvika hinder och kollisioner under flygning.
- Nödåtgärder: Förmåga att vidta nödåtgärder, såsom autonom återgång till bas eller nödlandning vid eventuella fel.

Miljökrav:
- Ljudnivå: Låg ljudnivå för minimal störning i områden med tät befolkning.

Användbarhetskrav:
- Användarvänlighet: Enkel användarupplevelse för drift och underhåll av drönaren.
- Kompakt design: Smidig och lätt att transportera samt hantera för enkel användning i olika miljöer och situationer.

Kommunikationskrav:
- Kommunikationssystem: Tillförlitlig kommunikation med markkontrollcenter för övervakning och styrning av drönaren.
- Positioneringssystem: Inbyggt GPS eller annan positioneringsteknik för exakt navigation och spårning av drönaren under flygning.

Lagkrav:

- Drönaren måste flygas inom synhåll, inte högre än 120 meter, drönaren måste flygas minst 150 meter ifrån bostads-, affärs- industri- och rekreationsområden och inte över folkmassor. För att göra flygningar utanför dessa riktlinjer måste ett särskilt tillstånd sökas till varje flygning. [8]

Uppgraderingsmöjligheter:

- Flexibilitet för framtida uppgraderingar och förbättringar av drönarens prestanda och funktioner.

2.5 Val av koncept

För att välja koncept används en Kesselringsmatris se tabell 2.2, för att lätt jämföra de olika alternativen. I denna avvägning gjordes också en bedömning på hur möjligheterna ser ut att designa och bygga en prototyp av det valda konceptet.

2.5.1 Prototypskriterier

Här förklaras de olika kriterierna som användes för att utvärdera de olika koncepten.

- Redundans: Inbyggd redundans i drönaren är avgörande för att säkerställa att drönaren kan slutföra sitt uppdrag eller återvända till sin hemposition även om en kritisk mekanism eller komponent skulle gå sönder.

- Simplicitet: En simpel design är önskvärt för att en prototyp ska kunna tillverkas med avseende på tid.

- Stabilitet: En stabil design är viktigt för att drönaren inte ska tappa kontrollen speciellt mellan drönar- och flygläget.

- Vikt: En lättare drönare kan flyga längre.

- Kostnad: Budgeten är begränsad till cirka 10 000 kr. En mer avancerad drönare kostar mer att tillverka.

2.5.2 Kesselringmatris

Med hjälp av Kesselringmatrisen kan vi jämföra de olika koncepten och ge en indikation vad som passar bäst för vårat koncept. Viktighetsgraden v för matrisen gjordes genom jämföring av kriterierna i tabell 2.1. Viktighetsgraden v multipliceras med u för varje kriterie, efter så summeras poängen för varje kriterie och resultatet med högst poäng är teoretiskt sett bästa alternativet.

	Redundans	Simplicitet	Stabilitet	Vikt	Kostnad	Summa
Redundans	-	0.5	0.5	1	0	2
Simplicitet	0.5	-	1	0	0.5	2
Stabilitet	0.5	0	-	0.5	1	2
Vikt	0	1	0.5	-	1	2.5
Kostnad	1	0.5	0	0	-	1.5

Tabell 2.1: Viktighetsgrad matris

Kriterie	v	Quad VTOL Pusher		Quad VTOL Tilt rotor		Quad VTOL Tilt wing	
		u	uv	u	uv	u	uv
Redundans	2	4	8	3	6	2	4
Simplicitet	2	5	10	3	6	2	4
Stabilitet	2	4	8	4	8	3	6
Vikt	2.5	4	10	3	7.5	2	5
Kostnad	1.5	5	7.5	4	6	3	4.5
Σuv			43.5		33.5		23.5

Tabell 2.2: Kesselringsmatris

I matrisen är den understa raden hur många poäng respektive koncept har fått där uv är viktade poäng. Där går det att se att Quad VTOL Pushermotor är det vinnande konceptet enligt denna matris eftersom den fick mest viktade poäng. Därmed valdes Quad VTOL pushermotor som konceptet att vidareutveckla, mycket tack vare dess redundans. Ett kriterie som gavs hög viktighetsgrad var vikten och det valda konceptet ansågs vara lättast tack vare dess simplicitet och mindre mängd extra komponenter.

2.6 Konceptutveckling

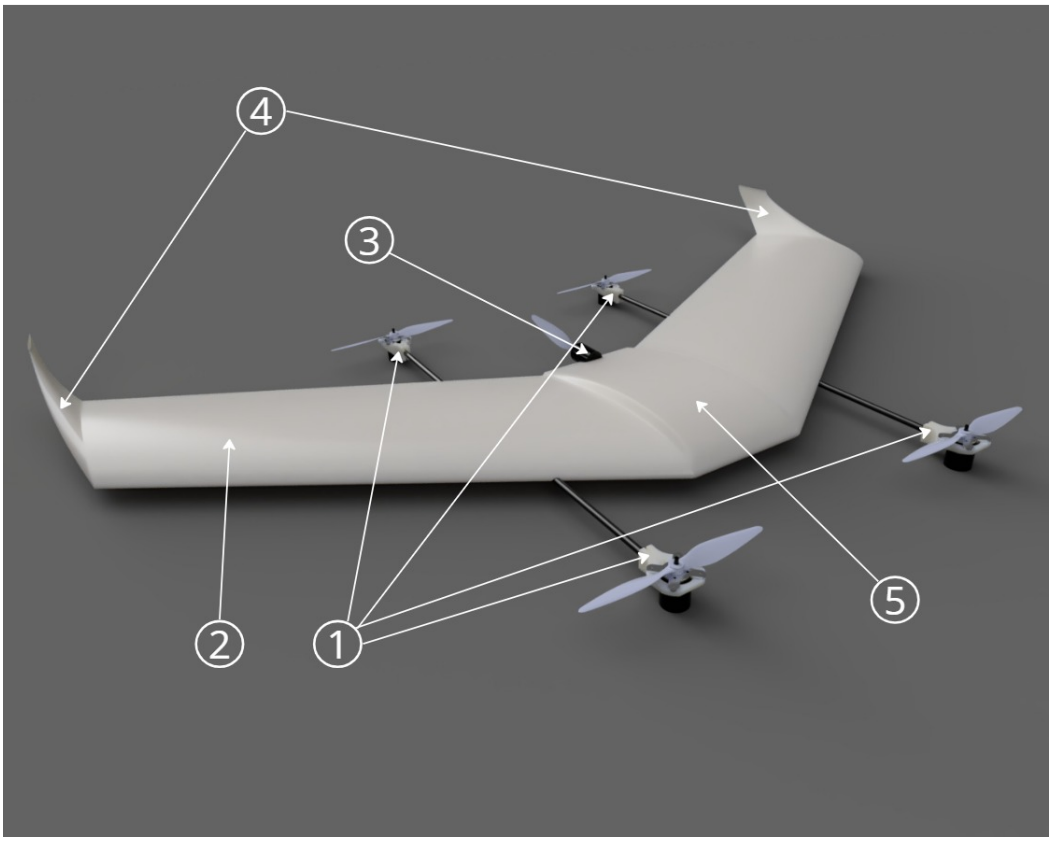
Konceptet började planeras och konstrueras i CAD. Olika delsystem testades även parallellt med designen. Detta för att verifiera att dellösningen fungerar och är redo att implementeras med resterande delsystem. Ett exempel på detta är när den interna vingstrukturen designades, då testades det att skriva ut en bit av vingen på en 3D-skrivare för att kontrollera att det håller och att det fungerar med anknytande delsystem. Mer om hur resonemanget förts för de olika delsystemen förklaras i kapitel 3.

3
Framtagen prototyp

I detta kapitel kommer resultaten av de olika delsystemen att förklaras i detalj. Eftersom drönaren inte är klar kommer enbart delar av prototypen visas. Det finns även renderingar i CAD som kommer redovisas för att ge en bild av helhetskonceptet.

3.1 Framtagen prototyp

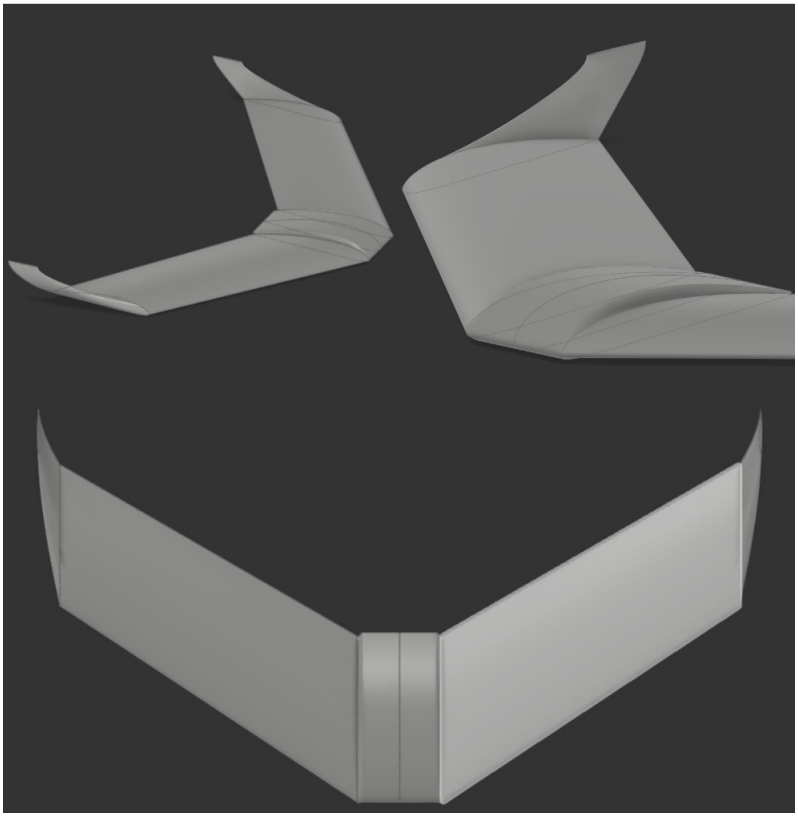
Den slutgiltiga prototypen visas i figur 3.1. I figuren syns vingen (2) med vingspetsfenor (4), kolfiberrör, fem stycken propellrar och fästena för drönarmotorerna (1). Framdrivningsmotorn syns vid (3). Den framtagna prototypen har även ett elektroniskt system som involverar, batteri, 5x ESCs (motordrivare), flygdator, 5x motorer, GPS och strömfördelningskort. De flesta av de här komponenterna sitter i mitten av vingprofilen (5).



Figur 3.1: Renderad bild på framtagen prototyp

3.2 Aerodynamik

För att optimera bärförmåga och räckvidd hos drönaren är det av största vikt att drönaren har en väloptimerad aerodynamik för att minska förlusterna i luftmotståndet. Med det framtagna konceptet som visas i figur 3.2 kommer aerodynamiken i det horisontella flygläget vara kärnpunkten för att förbättra räckvidden. Stabiliteten är även en essentiell del av vad som undersökts i drönarens aerodynamik.



Figur 3.2: Flygande vinge från CAD

3.2.1 Vingprofil

Under designstadiet och med hjälp av kravspecifikationen är det tydligt att drönaren kommer behöva gå långsamt för att vara tillåtet att köra om det ska kunna testas utan särskilda tillstånd. Därför är det nödvändigt att vingprofilen genererar tillräckligt med lyftkraft vid låga hastigheter. Det finns flera sätt att göra detta på, ett av dem är att göra vingprofilen välvd, detta påverkar dock effektiviteten som mäts i L/D (lyftkraft/vindmotstånd) i högre hastigheter. Det andra sättet är att använda sig av en vingprofil som är särskilt anpassad för att generera mycket lyftkraft vid låga anfallsvinklar och Clark Y-vingprofilen är välkänd för att göra detta, se figur 3.3. En annan viktig anledning till att Clark Y-vingprofilen valdes är tillverkningsbarheten av denna. Dock så tenderar en välvd vingprofil till att bli mycket tunn är det svårare att få styrkan som krävs genom vingen. Clark Y-profilen ger även god manöverbarhet och kontroll vilket är fördelaktigt för att kunna framföra drönaren i olika väderförhållanden.

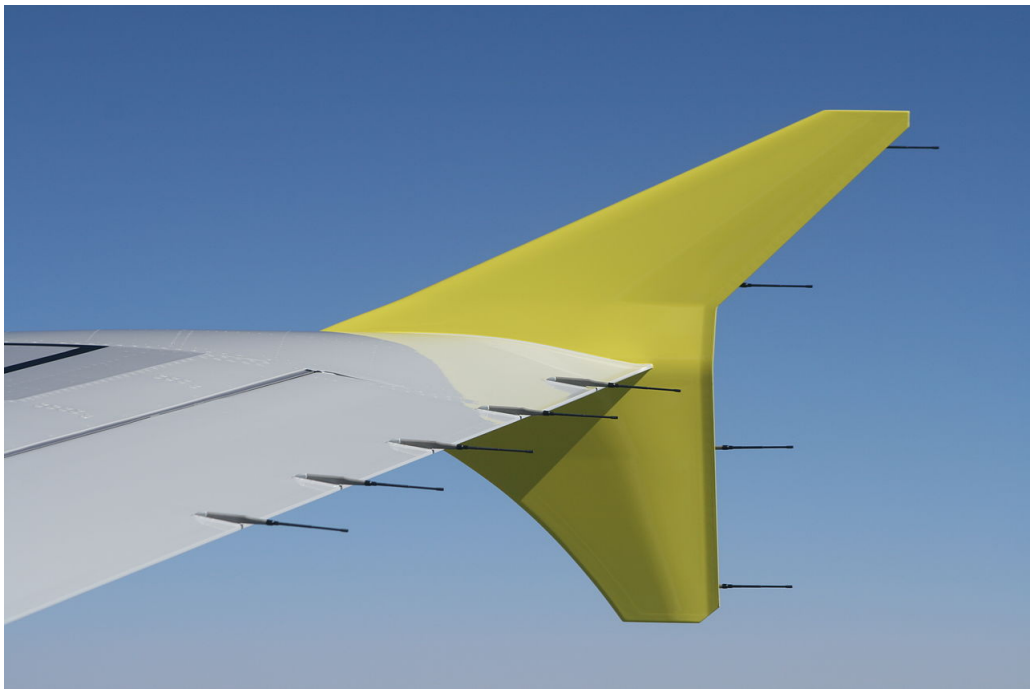
Figur 3.3: Clark Y vingprofil

Att vingprofilen behöver kunna leverera mycket lyftkraft är också viktigt när drönaren övergår från att flyga vertikalt med drönarmotorerna till att flyga horisontellt med hjälp av vingen. Traditionella flygplan använder sig ofta av vingklaffar men på grund av den flygande vingens instabila egenskaper är det svårt att konstruera vingklaffar. Vingklaffar fälls ofta ner i samband vid lyftning och landning av vanliga flygplan där klaffarna fälls ner för att generera mer lyftkraft i låga hastigheter. Det som händer är att mer luft dirigeras neråt vilket genererar mer lyftkraft. Tyvärr är det svårt att implementera detta om det inte finns ett stjärstyrverk som kan hjälpa till att ta upp momentet som uppkommer när vingklaffarna fälls ner.

3.2.2 Vingutformning

För att minska luftmotståndet ytterligare kan vingutformningen anpassas. Det som bland annat kan göras åt detta är att eliminera alla ytor som inte genererar någon lyftkraft. Exempel på detta är ett traditionellt flygplan där det finns en flygplanskropp där passagerarna sitter. Där genererar inte flygplanskroppen någon lyftkraft. För att få plats med elektroniken och för att bärförmågan av vingen ska vara erforderlig har konceptet av en flygande vinge anpassats för drönaren. Men tanken är att konstruera en vinge som genererar lyftkraft över hela vingen.

För att effektivisera en flygplansvinge är det nödvändigt att minimera cirkulationen av luft som uppstår runt en vinge till följd av tryckskillnaderna som uppstår. En vanlig lösning på detta som en ser hos exempelvis glidflygplan är att förlänga vingen. En annan lösning som gör ungefär samma sak är använda en vingspetsfena, se figur 3.4. Detta är en anordning som påverkar flödet av luften och samma effekt fås ungefär som att göra vingspannet större. En annan fördel när det kommer till flygande vingar är att det kan vara nödvändigt att ha någon form av vertikal struktur på vingen för att förhindra att vingen kan börja glida i sidled i luften. Därmed fungerar dessa två vingspetsfenor väldigt bra tillsammans för att effektivisera flygplansvingen.



Figur 3.4: Airbus Vingspetsfena (Källa: Till Niermann/Eget arbete)

Vingen har även utformats med en svepning. Detta innebär att vingspetsen ligger bakom roten av vingen och huvudanledningen till att vingen utformades på detta sätt var att flytta bak x_{cl} och x_{ca} för att göra planet stabilt. Vidare är vingen avsmalnande ut mot vingspetsen, detta gör att om det skulle bli flödesseparation vid höga anfallsvinklar av vingen kommer drönaren tappa lyftkraft i mitten av vingen först. Detta är kritiskt för att planet fortfarande ska gå att manövrera. Skulle exempelvis vingändarna tappa lyftförmågan pågrund av flödesseparation eller än värre, endast ena vingänden, kommer drönaren bli instabil och risk för att bli icke kontrollerbar

3.2.3 Stabilitet

För att skapa en stabil flygande vinge är det mycket att tänka på. Den behöver vara stabil i alla rotationsriktningar för att kunna flyga framåt på ett stabilt sätt. Ett vanligt sätt att beskriva stabiliteten är att tänka sig en pil. Massan är koncentrerad långt fram i förhållande till ytarean av pilen. Detta gör att det aerodynamiska centrumet ligger långt bak samtidigt som masscentrum ligger långt fram. När det kommer störningar utifrån eller om pilen inte skulle färdas helt rakt kommer den att självstabilisera eftersom rotationen sker kring masscentrum. Ligger masscentrum istället baktill blir systemet instabilt och pilen kommer försöka vända sig i luften och färdas bak och fram. När det kommer till en flygande vinge finns det många sätt att anpassa desingnen för att göra den stabil.

Den viktigaste stabiliteten för flygplanets effektivitet är vanligtvis hur mycket nosen dyker neråt i olika hastigheter. Det vill säga hur långt fram masscentrum är i förhållande till aerodynamiska centrumet x_{ac} och kraftvektorn där alla lyftande krafter verkar. För att förtydliga är det aerodynamiska centrumet som styr hur stabilt

flygplanet är och det blir även mer stabilt desto snabbare drönaren färdas. Kraftvektorn där alla lyftande krafter, det vill säga verkar samlingen av alla uppåtverkande krafter och beror på vilken anfallsvinkel vingen har och vilken hastighet flygplanet färdas i. Det beror även på andra saker som exempelvis Reynoldstalet. För att göra drönaren stabil används empirisk information om vilken marginal som är erforderlig för den statiska stabiliteten. När x_{cg}, x_{ac} och x_{cp} dimensioneras gentemot varandra finns det olika marginaler där en lägre marginal gör flygplanet mer responsivt för små ändringar på kontrollytorna och detta lämpar sig bra för akrobatiska flygplan där goda 3D egenskaper eftersträvas. Har marginalen ett större värde fås ett mer tungstyrt flygplan men stabiliteten är ofta bättre. När det kommer till denna drönare har det valts ett hyfsat stort värde på marginalen för att stabilitet är viktigare än 3D förmåga i det här fallet. Den statiska marginalen är i princip hur långt framför x_{cg} är framför x_{ac}. Skulle marginalen vara noll och punkterna sammanfaller är det risk att planet är ostabilt men möjligheten till effektivare flygning finns.

3.2.4 Elevons

För att kunna flyga med drönaren i horisontellt läge måste det gå att anpassa riktningen på drönaren för att kunna styra tillbaka efter en vindpust eller undvika ett hinder. I ett traditionellt flygplan används vanligtvis tre olika kontrollytor för att justera flygplanets riktning i luften. Dessa är skevroder (aileron), höjdroder (elevator) och sidroder (rudder). Men eftersom en flygande vinge saknar ett stjärtstyrverk används bara det som i ett traditionellt flyg kallas för skevroder. Detta är då det styrreglage som påverkar vindflödet över vingen och därmed kan ändra hur flygplanet roterar runt axeln i flygplanets färdriktning. För att kunna påverka denna rotation på flygplanet och för att därmed kunna svänga bakas höjdrodret in i skevrodret. Det vill säga att kontrollytan som hade varit kontrollytan för skevrodret i ett traditionellt flygplan används till både skevroder och höjdroder i en flygande vinge. Detta görs genom att förflytta denna kombinerade kontrollyta antingen med varandra eller mot varandra.

Vad det gäller utformningen av denna kontrollyta blir momentet större desto längre ut kontrollytan sitter på vingen. Därför har kontrollytan placerats långt ut på vingen och detta innebär även att kontollytan hamnar långt bak vilket även hjälper funktionen av ett höjdroder. Där samma princip med momentet gäller till följd av svepningen av vingen, eftersom med svepet av vingen så är kontrollytorna längre bak jämfört med x_{cg}. Dessa kontrollytor kallas elevons från engelskans ailerons och elevators.

3.2.5 Propellerteknik

När det kommer till propellrarnas funktion på drönaren är det dimensionerande hur mycket luft den kan "stöta iväg". När det kommer till drönarmotorerna är det ganska enkelt att dimensionera propellrarna för relativhastigheten är inget bekymmer eftersom den vanligtvis är lika med noll i vertikalt flygeläge. För horisontell framdrift av drönaren blir det svårare då relativhastigheten enbart gör propellern som mest

effektiv i vissa hastigheter, en viss propeller är designad för en hastighet som beror på vinkeln på bladen. Men eftersom drönarhastigheten är begränsad till 60 km/h enligt de drönarregler som finns idag gäller det att hitta en propeller som är anpassad för att snabbt kunna accelerera upp till den hastigheten och vara optimerad för att flyga i ca 60 km/h.

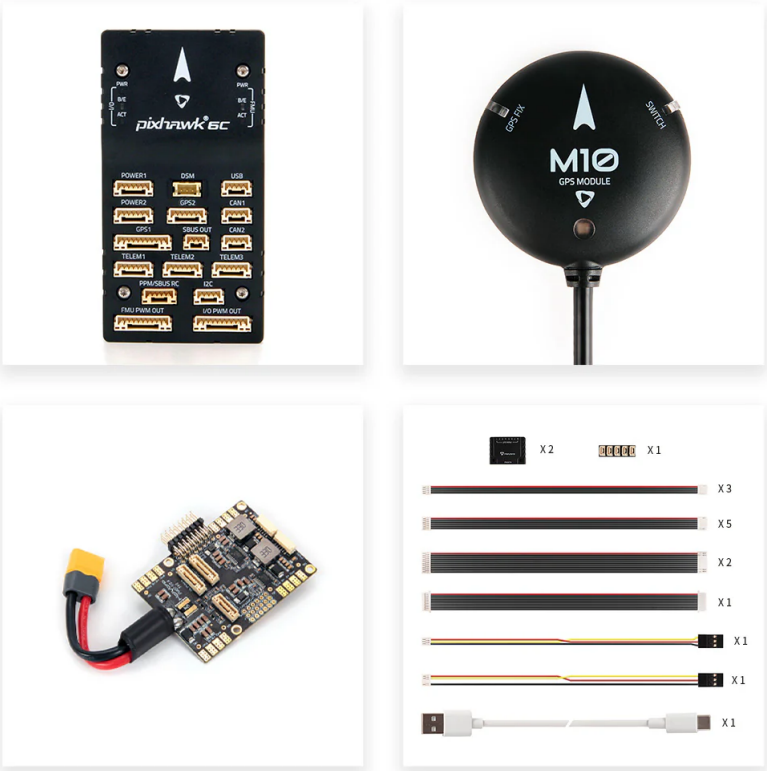
3.3 Elektronik

Med hjälp av befintliga produkter som bygger på Ardupilots[6][1] mångsidiga utvecklingsplattform har behovet av att skriva anpassad styrprogramvara för drönaren minimerats. Detta har möjliggjort en ökad koncentration på utvecklingen av övriga delsystem.

3.3.1 Flygdator och sensorer

Flygdatorn Pixhawk 6c, se figur 3.5, tillsammans med Ardupilots programvara säkerställer en stabil flygning för drönaren genom att använda all data som samlas in av dess olika sensorer. Pixhawk 6c innehåller inbyggda accelerometer, gyroskop, barometer och kompass för att hjälpa till med detta. Dessutom kan externa sensorer som pitotrör, GPS och lidar anslutas till flygdatorn för att ytterligare förbättra dess förmågor.

[1] Siffra inom hakparantes anger här och i fortsättningen referenser.



Figur 3.5: Pixhawk 6C med tillbehör

3.3.2 Drivsystem

Drivsystemet består av batteri, PM07 powerboard, motordrivare och slutligen motorerna. Batteriet består av flera battericeller i standardformat som sitter seriekopplade för att uppnå erfoderlig spänning. PM07 powerboard används för att fördela strömmen från batteriet till alla motordrivare och flygdatron, den har även andra funktioner som att mäta ström och spänning. Eftersom målet var att bygga drönaren valdes drönarmotorerna för att de var prisvärda i förhållande till hur mycket framåtdrivande kraft de kunde producera.

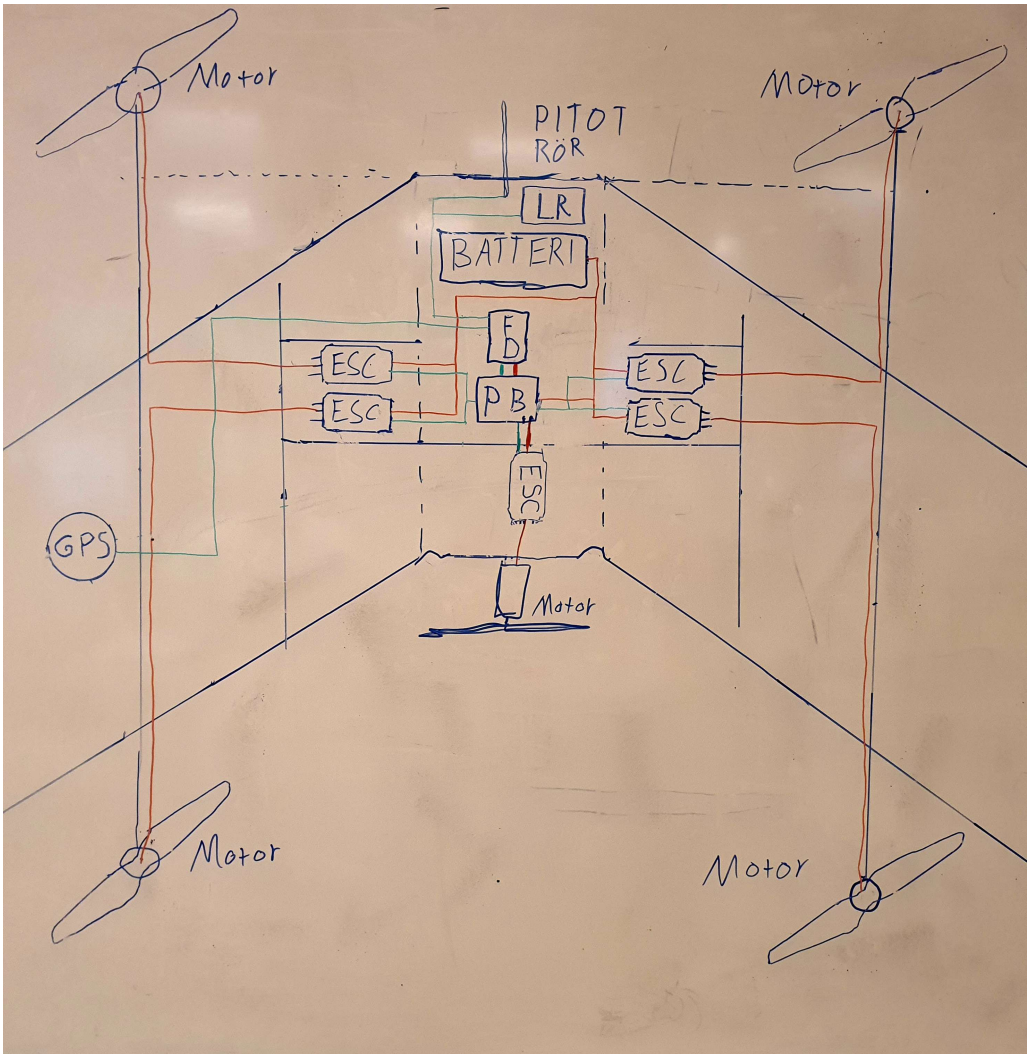
3.3.2.1 Strömförsörjning

Elsystemet kan potentiellt dra upp mot 300 A om alla motorer körs fullt ut samtidigt. Dimensioneringen av elsystemet gjordes i följande ordning propellrar, motorer, ESC's och sist batteri. Denna ordning ser till att komponenterna blir rätt dimensionerade gentemot varandra. Det kan också tilläggas att den powerboarden som användes inte var kapabel till att driva alla fem motorer.

3.3.2.2 Schematiskt elschema

I figur 3.6 nedan visas en skiss över hur de elektriska komponenterna är kopplade till varandra. I figur 3.6 representeras strömförsörjningen med röda linjer och signalkab-

lar med gröna linjer. Observera att det i verkligheten är tre strömkablar mellan ESC och motorerna, medan övriga enheter har två strömkablar. Anledningen till att det finns tre strömkablar är att motorerna är trefas växelströmsmotorer. Signalkablarna till pitotröret, LIDAR och GPS förser även dessa enheter med ström. LIDAR är en teknik för avståndsmätning där laser används som kommer appliceras för att mäta avståndet till marken när drönaren landar.



Figur 3.6: Schematiskt elschema, Fökortningarna har följande betydelser: LR = LIDAR, FD = flygdator, PB = powerboard, ESC = motordrivare.

3.3.2.3 Batteri

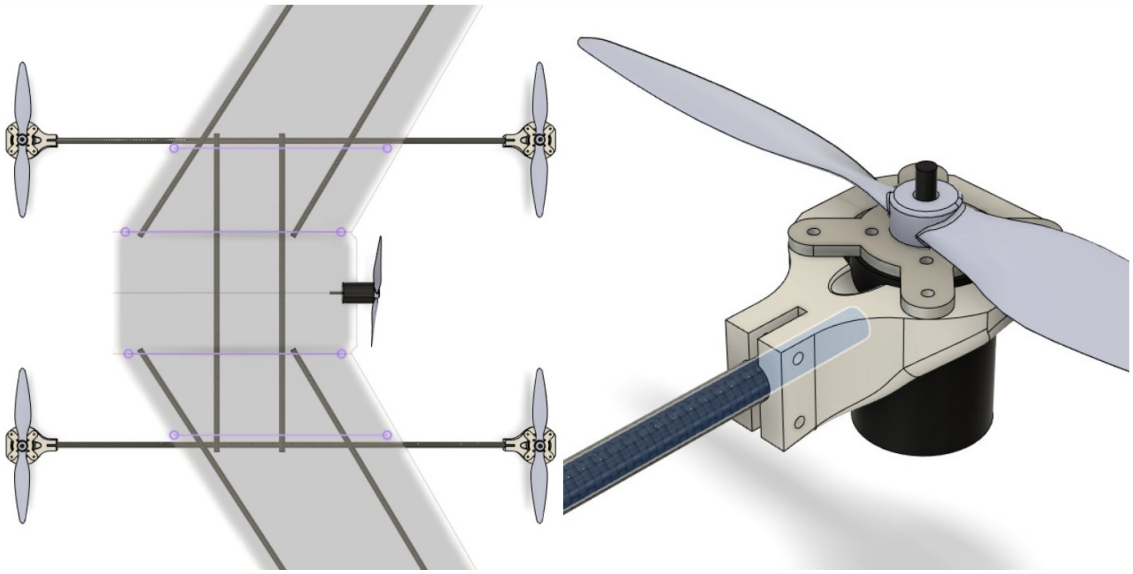
Batteripaketet på drönaren valdes för att få lång räckvidd för lite pengar. Eftersom det inte fanns en överväldigande budget att arbeta med fick pouchceller med Li-Ion kemi väljas bort trots batteritypens höga energidensitet. För att hitta ett batteri som fungerade var spänningen redan begränsad till nominell spänning på 14,8V. Detta innebär att fyra 3,7 V batterier sitter i serie. Begränsningen uppkom då motorerna

var begränsade till den spänningen. Med en högre spänning hade inte kablar och liknande varit lika grova vilket antagligen hade varit bättre. Men eftersom högspänningsmotorer är betydligt dyrare än de som gick att få tag på gick det inte. För att kunna leverera den maximala strömmmen till motorerna och flygdatorn krävs att batteriet har tillräckligt hög urladdningshastighet. Därför valdes batterier av typen Li-Po (litium-polymer) då denna batterityp vanligtvis har ett mycket högre urladdningstal än Li-Ion batterier.

Enligt tillverkarens hemsida [7] ska batteriet ligga på 65C, vilket innebär att batteriet ska kunna laddas ur på 1/65e del av en timme. I detta fallet är det 9,5 Ah i batteriet och detta innebär att den maximala strömmen som kan gå ur batteriet momentant är således ungefär 600A vilket är dubbla det som krävs. Det finns dock risk att dessa värden är uppblåsta av tillverkaren och att batteriet inte alls kan leverera 600 A i ca 60 sekunder. Detta är svårt att veta utan destruktiv provning av batteriet. Något som inte ämnas undersökas.

3.4 Ram

När det kommer till drönarens bärförmåga är det nödvändigt att drönaren är kapabel att bära sin egen vikt med en säkerhetsfaktor och även kunna stå emot mindre stötar med marken eller andra föremål. stötar uppkommer oftast i samband med start och landning av drönaren. I figur 3.7a syns vingens kolfiberrör och drönarmotorernas kolfiberrör, de lila linjerna i figuren representerar solida väggar som ska överföra krafter från de yttre kolfiberrören in till de två kolfiberrören i mitten. I figur 3.7b visas ett utav drönarlägets motorfäste.



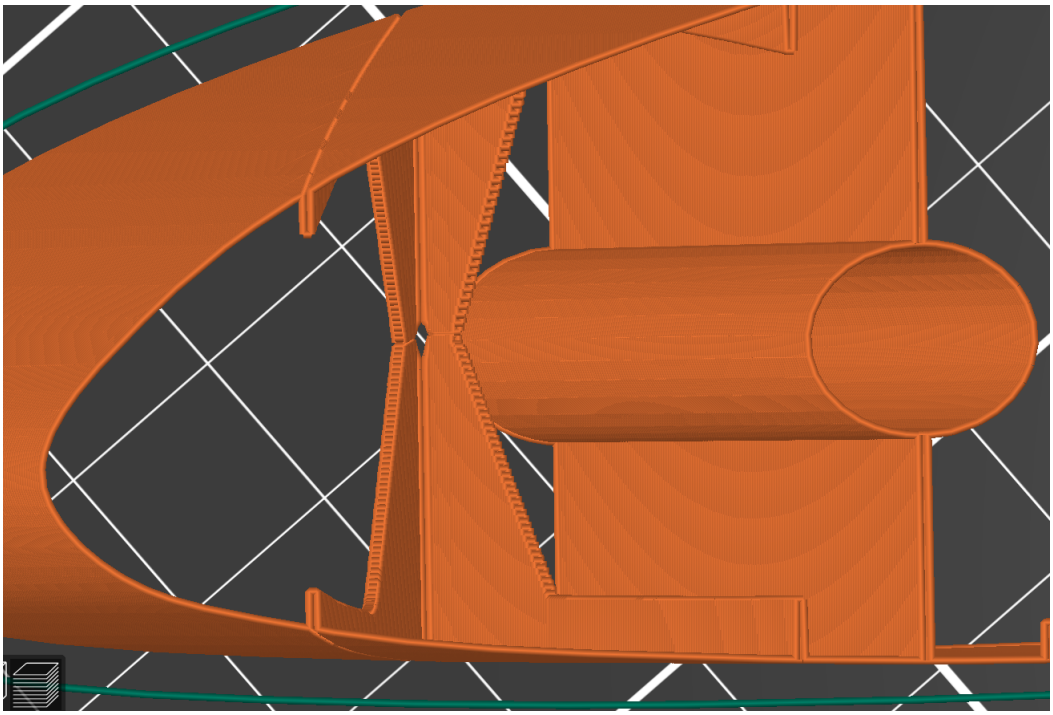
Figur 3.7: Vingstruktur (a) och motorfäste (b)

3.4.1 Vingens internstruktur

Vingen är designad med en internstruktur som fördelar dem aerodynamiska kraften över hela vingen och in till kolfiberören. Denna internstruktur stärker upp ytterlagret på vingen för att behålla samma form även då trycket förändras runt vingen i olika hastigheter och olika anfallsvinklar på vingen. De krafter som bildas i dessa processer kommer sedan att fördelas i kolfiberrören som finns inuti vingen. Dessa rör är även placerade på ett sätt att det är enkelt att demontera vingen i mindre bitar för att underlätta transport.

På grund av storleksbegränsning hos de tillgängliga 3D-skrivarna är vingprofilen uppdelad i 16 delar. Vingens beståndsdelar fogas samman med hjälp av kolfiberrör och lim. Vingens segment är 3D-utskrivna med en tillverkningsteknik som kallas för "vase-mode", detta gör att 3D skrivaren tillverkar vingsegmentet i en kontinuerlig sträng. Detta kräver en speciell CAD-teknik för att det ska fungera. Denna teknik har valts då delarna blir starkare. Det finns även praktiska skäl till att vase-mode användes för att skriva ut delarna. Eftersom det plast materialet som fanns till hands när vingen skulle skrivas ut var gammalt och skört blev det problem när matarhjulet skulle mata fram plasten. När skriver ut med en 3D skrivare drar vanligtvis 3D-skrivaren tillbaka materialet för det inte ska läcka ut när munstycket förflyttas. När 3D skrivaren i vårt fall drog tillbaka och matade fram materialet gick det till slut sönder och det gick inte längre att mata fram mer material. Med vase-mode matas materialet istället fram kontinuerligt utan några tillbakadragningar av materialet.

Vase-mode i praktiken gör att 3D-skrivarmunstycket matar ut plasten i en kontinuerlig sträng. Detta innebär således att internstrukturen och den yttre profilen är gjord av samma sträng. I vanliga fall då ett föremål 3D-skrivs ut görs först yttre profilen, sen skrivs internstrukturen ut. Här görs båda två sammanhängande. Detta innebär att internstrukturen är två lager i bredd och att yttre profilen är ett lager, se figur 3.8.



Figur 3.8: Vase mode

För att få låg vikt i förhållande till styvheten på vingen har den interna strukturen designats med hexagonal struktur. Den hexagonala strukturen är även vinklad inuti vingen för att göra det möjligt att skriva ut den. Det finns även genomgående hål genom hela vingen där kolfiberrören sedan ska sitta. Syftet med dessa genomgående hål är att fördela lasten från ytterlagren på vingen, på grund av tryckskillnaden, till kolfiberrören istället. Det sitter även tjockare plattor där kolfiberrören möter varandra, detta för att överföra krafterna mellan kolfiberrören.

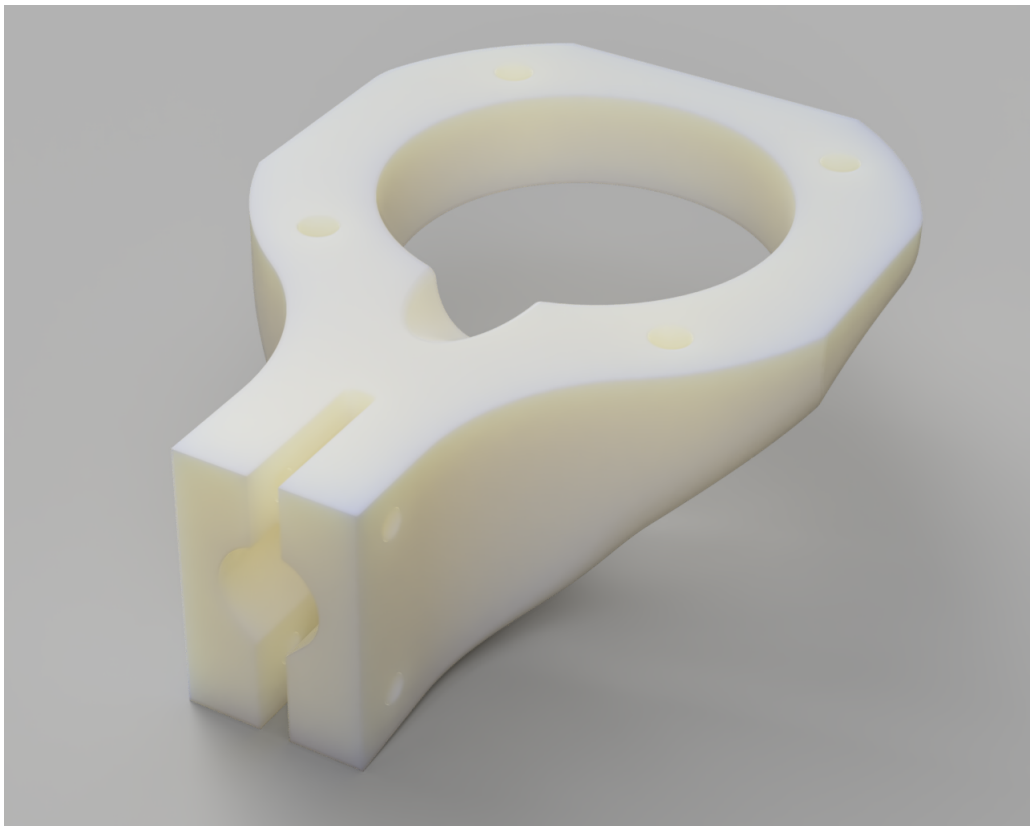
3.4.2 Kolfiberör

Kolfiberrören ser till att alla 3D-utskrivna delar kan sättas ihop rakt gentemot varandra och förser extra styvhet för vingen. Dessa rör löper genom hela drönaren och tillåter också att drönaren kan plockas ner till tre delar för att enkelt transportera den.

Kolfiberrören bildar även ramen för drönarmotorerna. Dessa är sammankopplade genom 3D-utskrivna segment som klämmer rören mot varandra.

3.4.3 Motorfäste

Motorfästet (figur 3.9) för drönarläget är 3D-utskrivet. För att hålla ner drönarens tyngdpunkt valdes en placering av motorn som sticker ut utanför kolfiberröret istället för ovanpå. Detta kan vara problematiskt med 3D-utskrivna delar om inte utskriftsorienteringen beaktas. Att placera motorn upphöjt i förhållande till kolfiberröret hade varit bättre för kraftöverföringen, men genom att säkerställa att utskriftslagren ligger parallellt med kolfiberrören kan fästet bli tillräckligt starkt.



Figur 3.9: Renderad bild på motorfästet

3.5 Tillverkningsteknik

De delar som inte går att köpa färdiga har skrivits ut på en 3D skrivare. Materialet som hade högst styvhet per kg som fanns tillgängligt var PLA, vilket blev materialet som användes. Metoden för att skriva ut den interna strukturen på vingen har beskrivits tidigare. De delar som tillverkats av oss är vinge och motorfästen för alla fem propellermotorerna.

3.6 Funktion

För att maximera räckvidden och effektiviteten hos en VTOL-drönare är det viktigt att minimera tiden i drönarläge och övergå till flygplansläge så snabbt som möjligt.

Övergången från drönarläge till flygplansläge sker genom att framdrivningsmotorn gradvis ökar varvtalet medan drönarmotorerna gradvis minskar sitt varvtal, och vice versa vid övergången från flygplansläge till drönarläge. För att säkerställa en mjuk övergång övervakas hastigheten med hjälp av GPS och pitotrör. När den förutbestämda hastigheten uppnås kan drönarmotorerna stängas av helt.

Drönaren kan styras på två sätt, radiostyrd eller GPS waypoint mission. Med waypoint mission så planeras rutten på datorn som sedan överförs till drönaren med

telemetriradion. På detta vis kan rutter förprogrammeras enkelt och göra drönaren mer autonom.

4

Slutsatser

- Trots de teknologiska framstegen och potentialen för användning i leveransapplikationer, utgör nuvarande lagstiftning ett betydande hinder för drönarleveranser. Strikta regler och komplexa tillståndsprocesser för flygning över bebodda områden och på låga höjder försvårar praktisk implementering av drönarbaserade leveranssystem. Dessa regulatoriska utmaningar begränsar drönarens användbarhet och bromsar utvecklingen inom detta lovande område.

- En vinge förlänger räckvidden på en drönare.

- En av de mest betydande förbättringarna som uppnåtts är förlängningen av drönarens räckvidd tack vare den aerodynamiska vingdesignen. Beräkningar och simuleringar visar att vingen minskar det totala energibehovet för horisontell flygning flerfaldigt jämfört med drönarläge, vilket ökar drönarens potentiella flygtid och räckvidd avsevärt. Denna förbättring möjliggör längre operationer med samma batterikapacitet, vilket är avgörande för uppdrag som kräver större täckningsområde.

5

Diskussion och fortsatt arbete

5.1 Diskussion

5.1.1 VTOL-drönare användningsområden

Användningsområden för drönare i civila sektorn i Sverige är väldigt restriktiv. En stor anledning till detta är de lagar som är för drönare just nu, stora ändringar måste ske i lagarna för att det ska bli ekonomiskt utförbart att göra leveranser i bebyggda områden.

Inom lantbruk, landmätning och militära applikationer så finns det möjligheter för VTOL drönare just nu.

5.1.2 Vingens uppbyggnad och material

Att använda en 3D-utskriven vinge är en lämplig metod för att testa design och skapa prototyper. Trots det är det inte den optimala lösningen på grund av begränsningar i 3D-skrivarens storlek, vilket kräver att vingen delas upp i flera delar. Dessutom har 3D-utskrivna vingar flera nackdelar, inklusive känslighet för UV-ljus, bräcklighet och en potentiellt högre vikt jämfört med andra material.
Vid utvecklingen av mer avancerade prototyper eller produkter skulle andra material såsom kolfiber eller EPO-plast (expanderad polyeten och polystyren i förhållandet 30% respektive 70%) vara mer lämpliga för drönare. Dock kräver användningen av dessa material mer resurser i form av både pengar och tid.

5.1.3 Elsystem

El-systemet är huvudsakligen dimensionerat med hänsyn till vår budget för prototypen. Vid en framtida utvecklingsfas skulle det vara möjligt att investera mer pengar och tid för att identifiera ännu mer passande produkter. Detta kan potentiellt resultera i ökad effektivitet för drönaren.

5.1.4 Mjukvara

Ardupilot mjukvaran är ganska versatilt men en egen specialiserad mjukvara hade varit gynsamt vid en utveckling av drönaren.

5.2 Fortsatt arbete

Praktiska flygtester: Genomföra flygtester för att verifiera prestanda och identifiera eventuella förbättringsområden.

Finkalibrera programvaran: Justera Ardupilot-programvaran baserat på flygtester för att optimera drönarens kontroll och stabilitet.

Byggnation av prototyp: Efter examensarbetet är klart är planen att färdigställa prototypen i verkligheten och testa den.

Litteraturförteckning

[1] Xu, J. (2017) Design Perspectives on Delivery Drones . RAND Corporation.

[2] Van Milligan, T. (2000) Theory and Practice of Using Flying Wings . Apogee Components, Inc.

[3] Borenius, J m.fl . (2019) Analysis, Design and Build of RC Composite Flying Wing . Chalmers University of Technology.

[4] Yuksek, B m.fl . (2014) Transition Flight Modeling of a Fixed-Wing VTOL UAV . Springer Science.

[5] Son, S. (2016) A Wing Design Optimization for a Long-Endurance UAV using FSI Analysis and the Kriging Method . ijass.

[6] ArduPilot . www.ardupilot.org/ . [2024-05-31].

[7] Produkthemsida för valt batteri . https://www.banggood.com/ZOP-Power-4S-14_8V-9500mAh-65C-140_6Wh-LiPo-Battery-XT60-Plug-for-Long-Range-RC-FPV-Racing-Drone-p-1998173.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_organic&gmcCountry=SE&utm_content=minha&utm_campaign=aceng-pmax-se-en-pc&currency=SEK&cur_warehouse=CN&createTmp=1&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_pt&utm_content=meruem&utm_campaign=aceng-pmax-se-cae-ca1-240226-meruem&ad_id=&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6uWyBhD1ARIsAIMcADq4kPjipN3aUPjvPP_vljX7X5VRMcdhqYWFR2x4Q3KmuuEcoNIodZ4aAheUEALw_wcB . [2024-05-31].

[8] Transportstyrelsen . www.https://www.transportstyrelsen.se/dronare . [2024-06-06].

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY