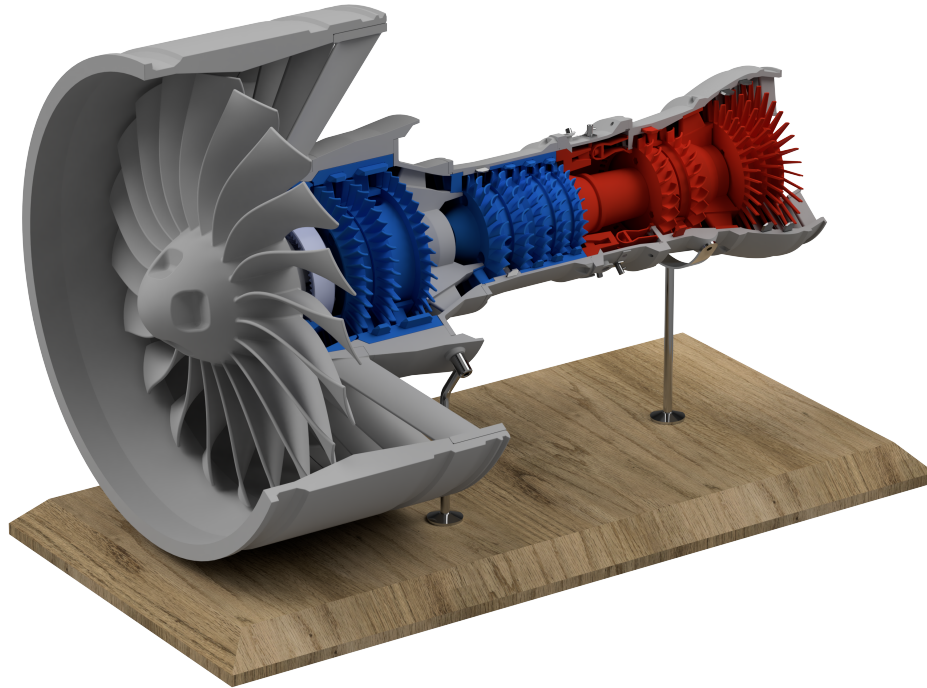




CHALMERS



Utveckling av 3D-printad funktionsmodell av flygmotor

Development of a 3D-printed functional model of an aircraft engine

IMSX16-VT24-07

Lina Brink
Felix Christensson
Petter Hemå
Fabian Karlsson
Vera Lundkvist
Alfred Wäpling

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2024

Utveckling av 3D-printad funktionsmodell av flygmotor

Kandidatarbete vid institutionen för industri- och materialvetenskap

Lina Brink
Felix Christensson
Petter Hemå
Fabian Karlsson
Vera Lundkvist
Alfred Wäpling



CHALMERS

Institutionen för industri- och materialvetenskap

IMSX16-VT24-07

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2024

Utveckling av 3D-printad funktionsmodell av flygmotor
Kandidatabete vid institutionen för industri- och materialvetenskap

© Lina Brink, Felix Christensson, Petter Hemå,
Fabian Karlsson, Vera Lundkvist, Alfred Wäpling, 2024.

Handledare: Julian Martinsson Bonde, Institutionen för industri- och
materialvetenskap
Examinator: Ola Isaksson, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Kandidatarbete 2024
Institutionen för industri-
och materialvetenskap
IMSX16-VT24-07
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: CAD-modell, designad under projektet

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2024

Abstract

In today's society the environment has gained much attention, causing more and stricter regulations to be set regularly regarding aircrafts and their fuels. Emissions need to be minimized while transports need to get longer and faster. That is why this area is under continuous development, requiring updated information and educational tools that can aid visualizing modern and future concepts. Physical models are required to visualise the developments made, which has therefore been one of the main goals of this project to produce. A literary study has been made to collect information regarding common commercial aircrafts and fuels, as well as the most popular concepts for the near future. These concepts have then been compared and their advantages and disadvantages explored. A physical model has been created based on the information to show differences and similarities, as well as the function of different configurations of turbofan engines. This model specifically show differences regarding bypass and gears, among other things.

Sammandrag

Dagens miljömedvetenhet ställer hela tiden fler och hårdare krav på flygfarten med avseende på drivmedel och flygplan. Utsläpp ska minimeras samtidigt som fler och längre transporter ska möjliggöras. Det sker därför kontinuerlig utveckling inom området, vilket ställer krav på att information och undervisning måste vara uppdaterad och visa på framtida möjligheter. Därför behövs bland annat tydliga fysiska modeller, vilket är ett av resultaten av projektet. En litteraturstudie har genomförts som samlat information kring några av de mest populära kommersiella motorkonfigurationer som används idag och kan komma att användas i en nära framtid, samt populära drivmedel. En modell har tagits fram med hjälp av informationen, som efterliknar en turbofläktmotor och påvisar skillnader i konfigurationer och dess funktion, speciellt med avseende på bypass och växling.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Etiska aspekter	3
2	Metod	4
2.1	Litteraturstudie	4
2.2	Intervju	4
2.3	Konstruktion	5
2.3.1	Modifikationer	5
2.3.2	Förenklingar	5
2.3.3	Sammanställning	5
2.4	Resurser	6
3	Resultat av studie av motorer	7
3.1	Motortyper	7
3.1.1	Turbojet	8
3.1.2	Turbofläktmotor	9
3.1.3	Turbopropmotor	10
3.1.4	Propfanmotor	11
3.1.5	Elmotorer	13
3.2	Data för jämförelse	14
3.2.1	Ljudnivå	14
3.2.2	Utsläpp och miljöpåverkan	15
3.2.3	Prestanda	16
4	Resultat av studie av bränsletyper	18
4.1	Flygfotogen	18
4.1.1	Hållbarhet	18
4.1.2	Användning idag och i framtiden	19
4.2	Hållbart flygbränsle	19
4.2.1	Hållbarhet	19

4.2.2	Godkända bränsletyper	21
4.2.3	Begränsningar	21
4.2.4	Tillverkningsprocesser	21
4.2.5	Användning av SAF, idag och i framtiden	23
4.3	Vätgas	23
4.3.1	Tillverkningsprocesser	23
4.3.1.1	Vattenelektrolys	24
4.3.1.2	Vätgas från biomassa	25
4.3.1.3	Reformering av naturgas	25
4.3.1.4	Förgasning av kol	26
4.3.2	Hållbarhet	26
4.3.3	Begränsningar	26
4.3.4	Användning idag och i framtiden	27
4.4	Modifikationer	28
4.4.1	Hållbart flygbränsle	28
4.4.2	Vätgas	28
4.4.2.1	Stag	28
4.4.2.2	Avgaskona	29
4.4.2.3	Kylning av kompressorluft	29
4.4.2.4	Turbinkylning	30
5	Resultat av modell	32
5.1	Komponenter	32
5.1.1	Fläkt	32
5.1.2	Växel	32
5.1.3	Kompressorer	33
5.1.4	Förbränningskammare	33
5.1.5	Turbiner	33
5.1.6	Axlar	33
5.2	Kravspecifikation	34
5.3	Anpassningar i modell	35
5.3.1	Modularitet	35
5.3.2	CAD	36
5.3.3	Pedagogik	37
5.3.4	Ergonomi	39
5.3.5	Anpassning för 3D-utskrift	40
5.4	Fysisk modell	43
5.4.1	Maskinelement	44
5.4.2	Motorstativ	46
5.4.3	Utskrivna delar	48
5.4.3.1	Planetväxel	48
5.5	Kravuppfyllnad	49
5.5.1	Komponenter	49
5.5.2	Prestanda	50
5.5.3	Användningsmiljö	50
5.5.4	Livslängd	50

5.5.5	Storlek	50
5.5.6	Massa	50
5.5.7	Ergonomi	50
5.5.8	Säkerhet	50
5.5.9	Estetik	50
5.5.10	Material	50
5.5.11	Tillverkningskostnad	51
5.5.12	Underhåll	51
6	Diskussion	52
6.1	Fråga 1	52
6.2	Fråga 2	52
6.3	Fråga 3	53
6.4	Säkerhet hos resultat	54
6.5	Vidareutveckling	54
7	Slutsats	56
7.1	Motorer	56
7.1.1	Turbofläkt	56
7.1.2	Turboprop	56
7.1.3	Propfan	56
7.1.4	Elektriska motorer	57
7.2	Bränslen	57
7.2.1	SAF	57
7.2.2	Vätgas	57
7.3	Framtidsutsikter	57
A	Insamlad Data för jämförelse	I
B	Modell	II
C	Ritningar	V

Förkortningar

ATJ Alcohols-to-Jet. Typ av biobränsle. 22, 23

CAD Computer Aided Design. iii, vii, 5, 6, 36, 43

CORSIA Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. 20

EASA European Union Aviation Safety Agency. 14, 23

FT Fischer-Tropsch processen. Typ av biobränsle. 21

GDPR General Data Protection Regulation. 3

GKN Aerospace Företag som tillverkar komponenter till flygmotorer. 4, 12, 13, 15, 29, 54

HEFA Hydrotreated Esters and Fatty Acids. Typ av biobränsle. 21, 22, 57

IATA International Air Transport Association. 19, 23

ICAO International Civil Aviation Organization. 20

NO_x Kväveoxid, gemensamt samlingsnamn för kvävemonoxid. 20, 57

PETG Polyethylene Terephthalate with Glykol (Polyetylentereftalat glykol). En vanlig typ av filament för 3d-skrivare. Bättre egenskaper för mekaniska delar än PLA. 41–43, 50

PLA PolyLactic Acid (Polymjölksyra). En vanlig typ av filament för 3d-skrivare. Nedbrytningsbar. ix, 41, 50

SAF Sustainable Aviation Fuel. vii, 4, 19–23, 28, 53, 57, 58

SIP Synthesized iso-paraffinic. Typ av biobränsle. 22

STOL Short Take-Off and Landing. 11

TAT turbinavgastemperatur. 30

1

Introduktion

Den ständiga utvecklingen inom flygbranschen innebär ett stort behov av djupgående och korrekt kunskap inom området, samt tydliga modeller för utbildning. Därför har detta projekt utförts för att bidra till förståelsen av vart flygbranschen är på väg.

1.1 Bakgrund

Flyg är idag ett av de vanligaste transportmedlen (Sanders, 2022), (Bureau of Transportation Statistics, 2017), vilket innebär att flygplan och deras motorer ständigt måste utvecklas och förbättras. En av de mest påtagliga globala utmaningarna vi står inför idag är klimatförändringarna, och flygindustrin betraktas som en stor bidragande faktor till dagens klimatproblem (Tiseo, 2023). Därför har det på senare tid skapats ett stort intresse att utforska och implementera nya flygbränslen och motorer som inte har samma negativa påverkan på miljön som de nuvarande. Till dessa hör bland annat motorer som drivs av vätgas eller biobränslen. Elektriska och hybrid-elektriska drivlinor har också fått allt större intresse, med flygplanstillverkare som exempelvis Airbus som har påbörjat forskning inom området (AirBus, 2024).

Det är inte bara bränsleförbrukning och alternativa drivmedel som präglar utvecklingen när det kommer till flygmotorer, utan även aspekter som ljudnivån är viktiga, där en lägre nivå av buller är något som eftersträvas vid framtagandet av flygplansmotorer (Liu m. fl., 2022).

Jetmotorn har sitt ursprung i det tidiga 1900-talet och har utvecklats till att bli en avgörande beståndsdel i dagens samhälle. Redan under andra världskriget började industrin experimentera med olika motorer och jetmotorn blev snabbt en konkurrent till kolvmotorn, vilket blev en tydlig indikation på att jetmotorns era hade börjat (Crouch m. fl., 2024). Jetmotorn var till en början endast en militär produkt men har idag blivit mycket populär även inom den civila sektorn där nästan alla kommersiella flygplan använder sig av jetmotorer. Specifikt används främst turbofläktmotorer som nyttjar en stor fläkt för att öka luftflödet. Med hjälp av fläkten accelererar motorn en större massa luft till en lägre hastighet jämfört med en turbojetmotor, vilket resulterar i lägre bränsleförbrukning för en motor med samma kraft. Även andra typer av jetmotorer, så som turbopropsmotorn är populära kommersiellt.

För att framstegen inom utvecklingen av flygplansmotorer ska fortsätta i stadigt

tempo är det avgörande att förbättra undervisningen och lärandet inom ämnet. Först behövs en god kunskap om vilka alternativ som finns, både gällande bränslen och de olika typerna av motorer. Med denna kunskap kan likheter och skillnader mellan de olika alternativen pekats ut, vilket sedan kan bidra till att kombinationer av redan existerande varianter, samt helt nya koncept, kan tas fram. För att tydligt förklara motorns funktion är det också viktigt att kunna illustrera och visa hur de olika komponenterna interagerar och samverkar. Därför är det av stor betydelse att skapa väl utformade modeller för att underlätta undervisningen.

1.2 Syfte

Syftet med projektet var att genomföra en teoretisk studie av flygmotorer och drivmedel, där studien sedan användes för att tillverka en fysisk modell. Den teoretiska studien jämförde olika typer av motorer och tog fram likheter och skillnader mellan dessa, samt ämnades att ge en indikation på vart flygindustrin är på väg. Även olika drivmedel undersöktes och jämfördes på liknande sätt. Modellens syfte var att förenkla visualisering av hur en flygmotor, av modellturbofläkt, fungerar. Dessutom skulle modellen visa de senaste trenderna i konstruktion av turbofläktmotorer.

1.3 Frågeställningar

För att ge en mer konkret uppfattning av vad som skulle uppnås togs tre frågeställningar fram. Det var framför allt tre saker som skulle uppnås; en översiktlig kunskap om utvecklingen inom området, en förståelse för vilka likheter och skillnader som fanns hos de olika motor- och bränslealternativen, samt en fysisk modell som uppfyller den eftersträlvade funktionen. Därmed blev de tre frågorna följande:

1. Vilka alternativ finns det för drivning av kommersiella flygplan i framtiden, med avseende på motorer och drivmedel?
2. Vilka likheter och skillnader finns det hos de mest populära motor- och drivmedelsalternativen för drivning av kommersiella flygplan i framtiden?
3. Hur kan en fysisk modell demonstrera funktion och olika konfigurationer hos en turbofläktsmotor på ett pedagogiskt sätt?

1.4 Avgränsningar

I litteraturstudien undersöktes konventionella jetmotorer (bland annat turbofläktmotorer), elektriska motorer och så kallade propfanmotorer. Kolvmotorer, scramjets, ramjets och liknande undersöktes inte. En numerisk jämförelse utfördes endast av motorer där data fanns tillgänglig, resterande jämförelser resonerades fram. De olika drivmedel som behandlades, förutom konventionellt flygfotogen, var flytande väte och hållbara flygbränslen, där endast de vanligaste tillverkningsmetoderna hanterades. Framför allt skulle teknologi från de senaste 20 åren undersökas.

I konstruktionsfasen behövde modellen avgränsas och anpassas efter de tillgängliga metoderna för att vara möjlig att tillverka. Endast motorns geometri och ändringar av denna studerades, det vill säga att bränslesystem och andra delar som driver motorn inte undersöktes. Inte heller vilka ändringar i material som behövdes för de olika konfigurationerna undersöktes. Modellen avgränsade sig även till att endast behandla flygmotorer av modell turbofläkt. En del förenklingar gjordes av motorgeometri och detaljkonstruktion, därmed var den slutgiltiga produkten inte skalbar mot en verklig motor. Projektet hade även en tidsbegränsning på fem månader och en bestämd budget på 2000 kr.

1.5 Etiska aspekter

Att göra nytta och undvika skada tillhör de centrala etiska aspekterna (Chalmers, 2022). Dessa aspekter speglar främst det slutgiltiga resultatet, och för att göra en etisk avvägning krävs en närmare granskning av målgruppen för modellen. Eftersom resultatet utgörs av en fysisk modell, placerad i en kontorsmiljö på institutionen för industri- och materialvetenskap på Chalmers Tekniska Högskola, är målgruppen vuxna människor som arbetar på platsen. Modellen kan också komma att användas i utbildningssyfte, och även i detta fall kommer den att hanteras av vuxna. Med detta i åtanke behövde modellen utformas för att minska risken att en vuxen användare skulle skada sig på den. Detta innebar att modellen inte skulle ha några vassa delar och att den skulle stå stabilt för att förhindra att den välter.

Att arbetet ska göra nytta, som ovan nämnt, innebar i detta fall att det skulle kunna användas i utbildningssyfte. För att uppnå detta kriterium behövde den slutgiltiga modellen vara tydlig och anpassad så att de teorier som projektet hanterat demonstreras på ett pedagogiskt sätt. Det innebar dessutom att extra stor vikt behövde läggas på att modellen inte var missvisande mot verkligheten då detta skulle kunnat bidra till felaktig inlärning, och att möjliga avvikelser redogjordes för.

Vidare behövde åtgärder vidtas för att säkerställa att projektet inte inskränkte på andras autonomi och integritet. Detta gällde särskilt intervjun som genomfördes, som behövde följa bland annat dataskyddsförordningen (GDPR), (Integritetsskyddsmyndigheten, 2023) gällande hantering av personlig information. Generellt skulle de grundläggande principerna följas; laglighet, korrekthet och öppenhet (Svensk nationell datatjänst, 2022). I och med detta behövde respondenten vara väl informerad om intervjun, syftet med intervjun samt om hur informationen skulle användas och publiceras. Valet av intervju material var också av stor vikt för att undvika ledande eller vilseledande frågor. Samtidigt behövde gruppen vara källkritisk och uppmärksam vid intervjutillfället då informationen kunde vara färgad av expertens bakgrund.

2

Metod

För att underlätta arbetet bestämdes inledningsvis en arbetsprocess, som delades upp i en litteraturstudie och en konstruktionsdel. Därefter påbörjades litteraturstudien, för att sedan följas av konstruktionsdelen då tillräckligt med information hade samlats in för att påbörja denna.

2.1 Litteraturstudie

För att erhålla en mer effektiv process delades litteraturstudien in i delar, dels med avseende på den information som skulle hämtas, dels med avseende på de metoder som skulle användas. Den information som skulle införskaffas delades upp i tre delar; motorer, drivmedel och jämförelse. Projektet tog inspiration från “Systematisk litteraturöversikt som examensarbete” (2023) som anser att en strukturerad litteraturstudie bör följa sex steg, enligt följande:

1. Formulera och avgränsa din forskningsfråga
2. Hitta sökord och skapa sökblock
3. Sök strukturerat
4. Bredda och smalna av din sökning
5. Välj ut och granska artiklar
6. Redovisa din sökning

Sökningen skedde framför allt på engelska då en större del av forskningen inom området sker på detta språk. Därför var lämpliga sökord bland annat 'turbofan' (turbofläktsmotor), 'hydrogen' (väte) och 'SAF' (hållbara flygbränslen).

För att underlätta och försäkra att jämförelsen blev korrekt bestämdes först ett antal kriterier att basera jämförelsen på. Därefter togs ett flertal numeriska värden fram för de olika typerna av motorer och drivmedel. Detta gjordes med hjälp av flera olika databaser. Målet var att endast använda data från de senaste 20 åren. Från datan togs sedan likheter och skillnader fram, vilka användes för att jämföra och förutsäga de olika motorernas och bränslenas framtidsutsikter.

2.2 Intervju

En intervju genomfördes med en expert anställd på företaget GKN Aerospace som är ett välkänt och utbrett företag inom tillverkning av delar till flygmotorer. De

frågor som ställdes följde ett underlag, vilket togs fram efter att en större del av litteraturstudien hade genomförts. Frågorna var främst utformade för att bekräfta den insamlade informationen, men också för att bidra med ny intressant information. Efter intervjun transkriberades den för att underlätta vid användning av eventuella citat.

2.3 Konstruktion

Då tillräckligt med information hade samlats in kring den valda motorkonfigurationen (turbofläktsmotor) påbörjades konstruktionen av modellen. Inledningsvis togs en grundmodell fram, vilken utgick ifrån en bestämd, redan existerande turbofläktsmotor. Modellen gjordes digitalt med hjälp av CAD för att underlätta vidare modifikationer.

2.3.1 Modifikationer

När grundmodellen hade färdigställts var nästa steg att ta fram vilka modifikationer som behövde göras. Detta gjordes genom att först betrakta de olika motorkonfigurationer som önskades att visualiseras. Information från litteraturstudien användes för att bestämma likheter och skillnader mellan de olika konfigurationerna. Från likheterna bestämdes vilka komponenter som skulle ingå i den fysiska modellen. Skillnaderna användes för att bestämma vilka komponenter som lätt skulle kunna bytas eller på annat sätt justeras för att tydligt kunna visa skillnaderna.

En idégenerering gjordes sedan för att hitta olika lösningar på hur komponenterna skulle utformas och interagera med varandra, samt hur olika skillnader skulle kunna visualiseras. Lösningarna genomgick en grov eliminering och kombinerades sedan till ett fullständigt koncept.

2.3.2 Förenklingar

Då motorn behövde vara relativt liten i förhållande till en fullskalig modell behövde vissa delar förenklas och detaljer tas bort eftersom de annars hade varit mycket svåra att tillverka. Beslut togs angående i hur stor grad modellen skulle efterlikna en verklig motor. Även viktiga dimensioner och begränsningar bestämdes. Därefter togs en kravspecifikation fram över modellen för att kunna användas vid utvärdering och bedömning av ifall slutprodukten uppfyllde kraven. En utvärdering gjordes med hjälp av denna angående vilka komponenter som kunde förenklas eller elimineras från modellen för att uppfylla kraven.

2.3.3 Sammanställning

När CAD-modellen närmade sig ett färdigt resultat anpassades komponenterna för additiv tillverkning. Fördelen med att snabbt kunna testa delar utskrivna på 3D-skrivare utnyttjades för att effektivt modellera komponenter som passade ihop. Även delar i mindre skala skrevs ut för att spara tid vid test av exempelvis spel mellan

två komponenter. Vissa komponenter bedömdes vara olämpliga att tillverka med 3D-skrivare, varefter ändringar gjordes på modellen. Dessa var bland annat axlar, skruvar, lager och en del andra maskinelement. Dessa köptes istället in från andra parter eller tillverkades på annat sätt. Axlarna svarvades till rätt diameter och spår gjordes för segersäkringar. Vissa ytor frästes plana för att förhindra rotation mellan komponenter.

Det sista steget i konstruktionen var att skriva ut alla modellens komponenter, montera ihop dem och sedan utvärdera ifall den uppfyllde alla krav och behov som fastställts i kravspecifikationen och syftet.

2.4 Resurser

För att genomföra projektet och ta fram den slutgiltiga modellen krävdes tillgång till en del resurser. Dessa resurser var dels rent fysiska, så som material, och dels i form av information. För att ta fram CAD-modellen krävdes en passande programvara för solidmodellering. Autodesk Fusion 360 var passande för ändamålet eftersom det är molnbaserat vilket möjliggjorde att flera användare kunde se filerna samtidigt. I tillverkningsprocessen behövde gruppen åtkomst till 3D-skrivare, vilket fanns tillgängligt i ett flertal lokaler på universitetets område, så som institutionen för Industri- och Materialvetenskap, i prototyplabbet och lokalen på FUSE. Under framtagandet av modellen behövdes även material till 3D-skrivarna samt vissa delar som exempelvis rullningslager. Denna typ av material införskaffades med gruppens tilldelade budget på 2000 kr. Majoriteten av plasten gick att få från skolan utöver budgeten. Resurser i form av information inhämtades från olika databaser, litterära verk med mera.

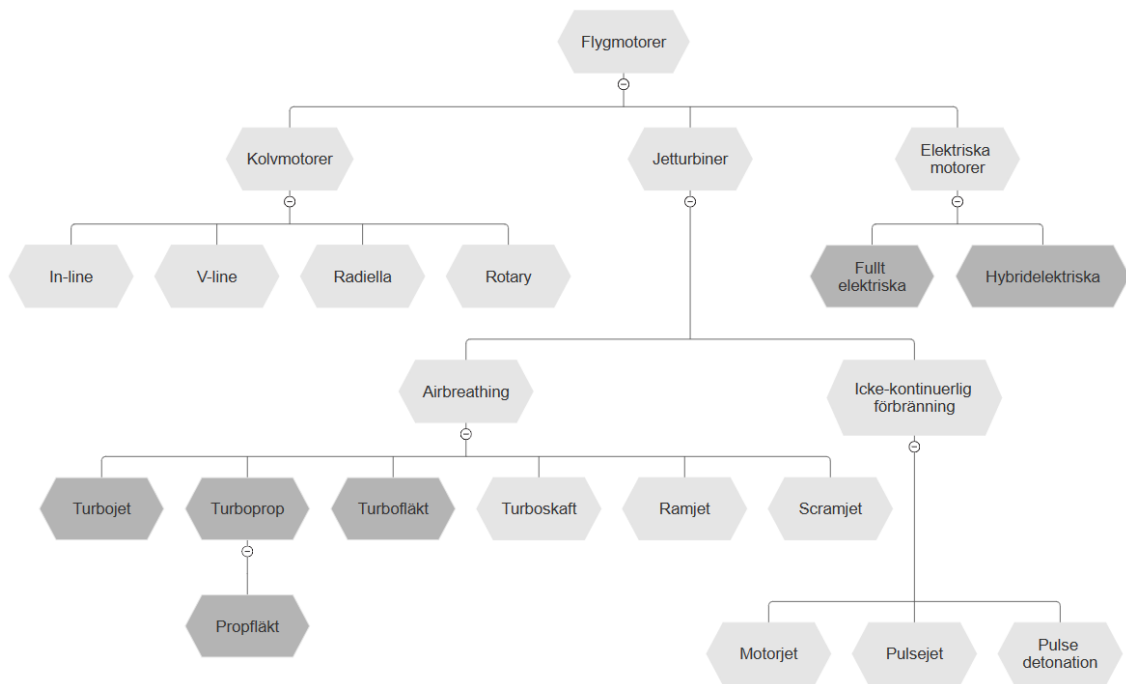
3

Resultat av studie av motorer

Litteraturstudiens resultat är som tidigare beskrivet uppdelat i två sektioner, där den ena fokuserar på motorer och den andra på drivmedel. Studien har granskat några av de motortyper som är mest använda idag, samt några varianter som kan komma att bli vanligare i framtiden. De motorer som störst fokus har lagts på är turbofläktsmotorer, turbopropsmotorer, propfanmotorer och elmotorer. Fördelar och nackdelar, samt likheter och skillnader mellan de olika motortyperna har undersökts med hjälp av några bestämda kriterier.

3.1 Motortyper

Först gjordes en översiktlig undersökning av vilka motortyper som finns i bruk. Resultatet av denna undersökning kan ses i figur 3.1, där de mörkt markerade typerna är de som behandlades vidare i projektet. Enligt Britannica (2024) är de större grupper av flygmotorer som finns idag huvudsakligen kolvmotorer, jetturbiner och elektriska motorer. Då kolvmotorer inte kommer behandlas i projektet har dessa inte studerats vidare. Till elmotorerna hör bland annat fullt elektriska motorer och hybridmotorer. Helt elektriska motorer driver propellern med hjälp av elektricitet under hela färden, medan hybridmotorer främst använder elektricitet vid start och landning, och en kolv- eller jetmotor för 'cruising'.

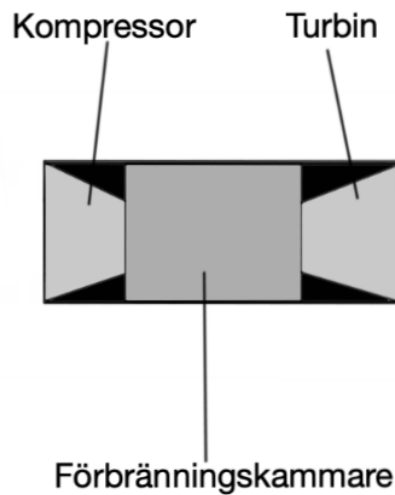


Figur 3.1: Träddiagram som visar de olika motortyperna.

Jetturbinerna kan delas in i jetmotorer med kontinuerlig förbränning och motorer med icke-kontinuerlig förbränning. Bland motorerna med kontinuerlig förbränning finns turbojetmotorn, turbofläktsmotorn, turbopropsmotorn, turboskaftsmotorn, propfanmotorn, ramjet och scramjet. De första fyra består alla utav kompressorer, förbränningskammare och turbiner. Luften komprimeras i kompressorerna, antänds tillsammans med bränsle i förbränningskammaren och passerar sedan turbinerna där den expanderar och på så sätt genererar kraft. Turbofläktsmotorerna har en fläkt i början av motorn, medan turbopropsmotorer istället har en propeller, båda drivna av turbinen. Turboskaftsmotorer är väldigt lika turbopropsmotorerna men istället för att driva en propeller som bidrar till framdrift driver turbinerna en axel som kan generera kraft för andra tillämpningar. Propfanmotorer (även kallade 'open rotor' eller 'unducted fan') liknar de föregående jetmotorerna men har många små, korta och mycket vridna blad för att öka effektiviteten. Resterande motorer i träddiagrammet behandlades inte i projektet och har därför inte undersökts vidare.

3.1.1 Turbojet

Turbojet var den först framtagna jetmotorkonstruktionen som introducerades i slutet av 1930-talet (Crouch m. fl., 2024). Denna typ av turbinmotor används än idag till vissa applikationer, men har till stor del ersatts av nya konstruktioner, framför allt för att minska bränslekonsumtion och buller. Däremot kan många likheter urskiljas mellan de modernare motorkoncepten och turbojetmotorn.

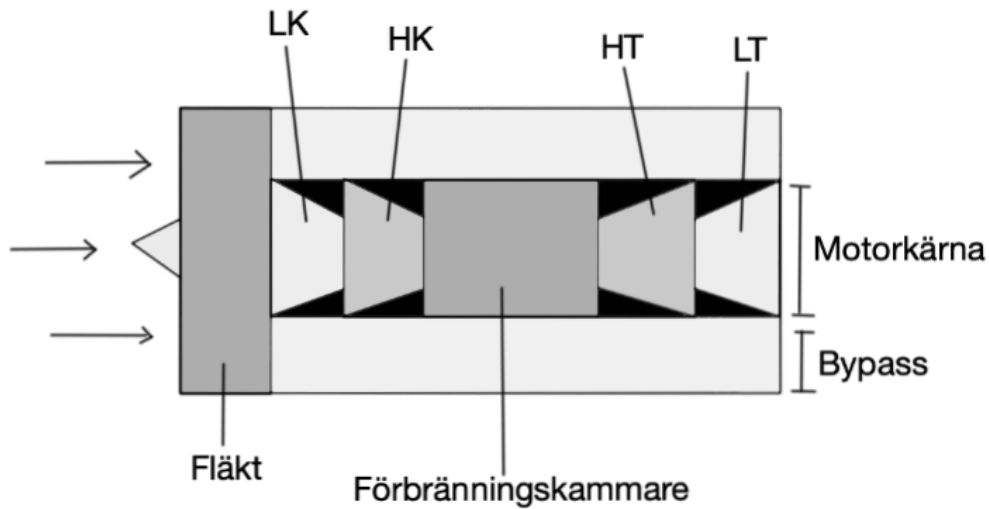


Figur 3.2: Grundläggande komponenter för en turbojetmotor.

Grundprincipen, vilken illustreras i figur 3.2, består av att luft sugas in i motorn genom ett inlopp och förs sedan genom en kompressor, där den komprimeras. Efter att luften komprimerats tillförs bränsle som antänds i förbränningskammaren och ger upphov till en kraftig expansion av gasblandningen. Expansionen resulterar i ett högt flöde som fortsätter igenom en turbin. Turbinen är kopplad till, och driver på så vis runt, kompressorn så att mer luft kan sugas in i motorn. Den expanderande gasblandningen accelereras ytterligare genom ett utlopp och skapar en kraft motriktad färdriktningen, varpå reaktionskraften nyttjas för framdrivning av flygplanet.

3.1.2 Turbofläktmotor

I en turbojetmotor accelereras en liten volym gas mycket hastigt. Om en större volym gas accelereras till en något lägre hastighet, erhålls fortfarande samma kraft men också en högre verkningsgrad följt av lägre bränsleförbrukning. Principen återfinns numera i de flesta trafikflygplan efter att turbofläktmotorn introducerades på 1960-talet (Henrich, 2024).



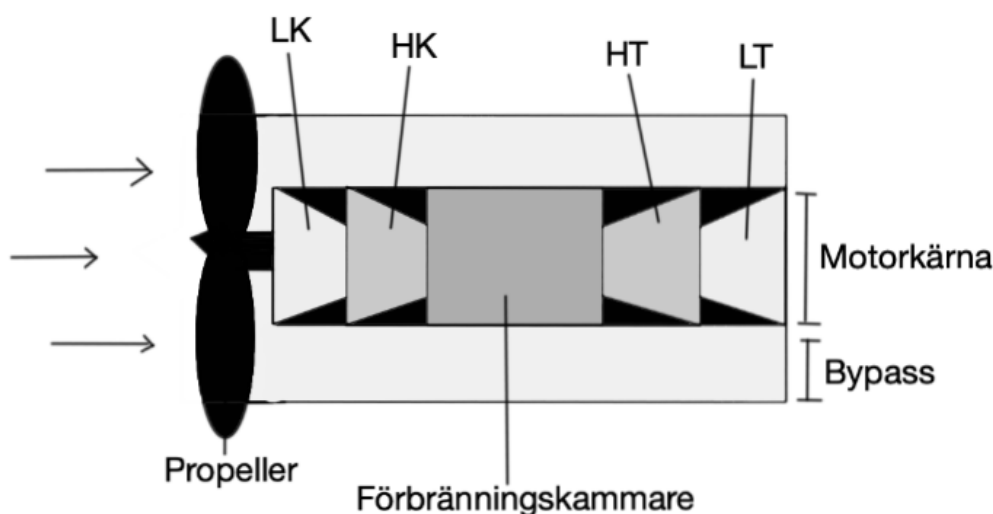
Figur 3.3: Grundläggande komponenter för en turbofläktmotor, där *LK* = lågtryckskompressor, *HK* = högtryckskompressor, *HT* = högtrycksturbin och *LT* = lågtrycksturbin.

Denna typ av motor liknar turbojetmotorn, men med en fläkt innan kompressorerna (Henrich, 2024). En illustration av motorn kan ses i figur 3.3. Fläktens syfte är att generera drivkraft genom att förse motorkärnan med luft, men även att accelerera stora luftvolymmer runt motorkärnan. Till skillnad från turbojetmotorn strömmar alltså inte all luft igenom motorkärnan. Istället leds en stor andel av luften runt kärnan, som tillsammans med gasen från kärnans utlopp ger upphov till den totala framdrivningskraften (Henrich, 2024). Förhållandet mellan flödena kallas för bypass-förhållande och beror således på hur mycket av luften som leds förbi respektive genom motorkärnan. Detta förhållande genererar ungefär 80 % av kraften.

Efter fläkten kommer luften i motorkärnan till kompressorerna. Både kompressorerna och turbinerna är vanligen uppdelade i två steg, med ett lågtryckssteg och ett högtryckssteg, se figur 3.3. Lågtrycksturbinen driver fläkten och lågtryckskompressor medan högtrycksturbinen driver högtryckskompressorerna. Detta möjliggörs med två separata, koaxiala axlar som tillåts rotera med olika hastighet och därmed möjliggör mer optimala driftsförhållanden. Denna typ av motor kallas 'växlad turbofläktmotor' (Kurzke, 2009).

3.1.3 Turbopropmotor

Turbopropmotorn liknar turbofläktmotorn men har en propeller längst fram istället för en fläkt, se figur 3.4. I en turbopropmotor kommer cirka 95 % av drivkraften från propellern, främst genom bypass, resten kommer från kärnan som fungerar på samma sätt som hos både turbofläktmotorn och jetmotorn (University, 2022).



Figur 3.4: Grundläggande komponenter för en turbopropmotor, där *LK* = lågtryckskompressor, *HK* = högtryckskompressor, *HT* = högtrycksturbin och *LT* = lågtrycksturbin.

Normalt drivs propellern av lågtrycksturbinen genom en växellåda för att hålla propellerbladens hastighet under ljudets hastighet, då de inte fungerar bra i överljudshastighet (University, 2022). Ett flygplan drivet av en turbopropeller flyger därför långsammare än ett plan drivet av en turbojet eller turbofläkt, men fungerar bättre på lägre höjd. Det beror främst på dess höga bypass-förhållande, vilket ökar effektiviteten då flyghöjden minskar. Eftersom den har mer kraft på låg höjd krävs kortare startsträcka för att lyfta. Turbopropmotorn används därför främst på mindre plan som flyger kortare sträckor på lägre höjd. Den har relativt hög miljöpåverkan och drivkostnad, men utveckling sker och turbopropmotorn kan därför ändå vara ett alternativ för framtiden (Academy, 2023).

3.1.4 Propfanmotor

Under 70-talet höjdes priserna på flygbränsle drastiskt vilket skapade ett stort behov av att effektivisera flygmotorerna och göra de mer bränslesnåla. Flera företag inom branschen, bland annat GE och NASA, började undersöka nya alternativ, där ett av dessa var den så kallade propfanmotorn (också kallad ‘open rotor’ och ‘unducted fan’). En av de allra första modellerna fick namnet Q-FAN (Rosen, 1971). På 80-talet sjönk dock priserna igen och många av de projekt som startats för att utveckla propfanmotorn lades på is. I moderna tider har dessa planer tagits upp på nytt i samband med åter stigande priser, klimatproblem med mera. Även möjligheten att göra medium-långa STOL-transporter (Short Take-Off and Landing) billigare har gjort den relevant (Rosen, 1971). En av de moderna varianterna, Rise utvecklad av Safran, kan ses i figur 3.5.



Figur 3.5: Bild av propfanmotorn Rise , Copyright Mamberti, T, Safran. (2023). Rise ,France ; Le Bourget ; Parc des expositions, Paris, <https://medialibrary.safran-group.com/Photos/media/433938> .

Propfanmotorn har många likheter med både turbofläktmotorn och turbopropsmotorn. Därför kallas den ibland även för ‘avancerad turbopropsmotor’. Motorns kärna är lik de flesta jetmotorer med kompressorer, förbränningskammare och turbiner, med samma typ av förbränningsförlopp. Motorn har utstickande propellerblad, men till skillnad från turbopropsmotorn är propellerns blad relativt små och många, och liknar därför fläktbladen i en turbofläktmotor. Ofta finns det flera rader med blad, där vissa rader kan rotera åt motsatt håll eller vara stilla (statorer) för att räta upp luften (Blain, 2023). Detta, tillsammans med den aerodynamiskt formade kroppen gör bränsleåtgången mer effektiv. Motorn kan placeras på olika ställen på flygplanets kropp, exempelvis under eller över vingarna, men behöver ofta anpassas till flygplanstypen. Beroende på om propellern placeras framtill eller baktill på motorn kallas det för en puller- respektive pusher-konfiguration, enligt expert på GKN Aerospace.

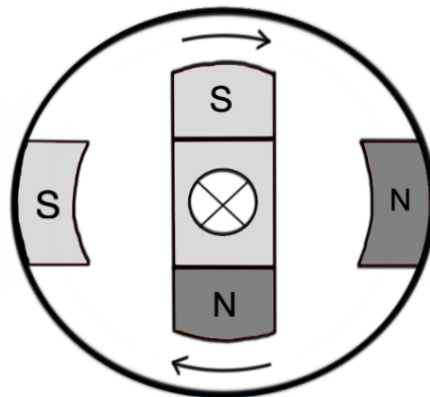
Propfanmotorn kombinerar den goda startkraften från turbopropsmotorn med prestandan hos turbofläktmotorn för ‘cruising’ i höga hastigheter (Rosen, 1971). För att uppnå den ökade effektiviteten krävs bland annat att propellerbladen är av låg vikt men ändå starka, vilket idag är möjligt då man kan använda sig av den djupgående forskning som gjorts av propellrar. De gynnas även av att ha vinklade framkanter, där de främre bladen ofta är vridna i motsatt riktning jämfört med de bakre bladen. Ofta är bladen omställningsbara för att kunna kontrollera dess stigning (Blain, 2023).

Under 70-talet var en av nackdelarna med motorn dess ljudnivå, men man har förhoppningar att med dagens teknik kunna förbättra denna (Blain, 2023). En fördel som tas upp av Blain (2023) är att detta är en produkt som redan har kommit en bit i utvecklingen. Trots att det troligtvis är först på 2030-talet som en färdig produkt kan hamna på marknaden är det en relativt kort process jämfört med flera andra alternativ, så som motorer drivna på vätgas. Ett exempel på en produkt som redan är i utveckling är den tidigare nämnda Rise (Blain, 2023).

3.1.5 Elmotorer

När det kommer till elektrifiering av flygplan finns det ett flertal olika koncept, däribland helt elektriska, hybrid- och turboelektriska. Helt elektriska flygplan fungerar genom att en eller flera motorer drivs av ett batteri som finns ombord på planet. Hybridlösningarna fungerar genom att en gasturbins generator genererar energi till ett batteri som i sin tur driver motorerna. Ett exempel på ett flygplanskoncept som ännu är i ett konstruktionsstadium, där en hybridlösning implementerats, är ES-30 (Aerospace, 2024) som drivs av fyra elmotorer och som sedan kompletteras av en generator. Turboelektriska flygplan fungerar genom att en gasturbin driver en generator som i sin tur genererar kraft till de elektriska motorerna.

En stor utmaning för elektriska flygplan ligger i batteritekniken då det än idag är en lång väg kvar för att närma sig energidensiteten hos flygfotogen. Detta gör att elektriska flygplan främst lämpar sig till kortare sträckor i nuläget, enligt expert på GKN Aerospace. Värt att notera är att för turboelektriska flygplan krävs det ingen utveckling inom batteriteknik vilket gör tekniken intressant för användning inom en snar framtid (Zhang m. fl., 2022).



Figur 3.6: Grundläggande uppbyggnad en AC-motor, med en rotor och en stator.

En mycket vanlig motortyp i elektriska transportmedel är induktionsmotorn, vars funktion illustreras i figur 3.6. När trefasströmmen passerar genom lindningarna i statorn genereras ett roterande magnetfält, vilket inducerar en ström i rotorn och ger upphov till ett nytt magnetfält. Rotorns magnetfält påverkas av det roterande magnetfältet från statorn, vilket resulterar i att rotorn börjar rotera, och på så sätt genereras kraft till motorn (Grunditz, 2024).

3.2 Data för jämförelse

När generell information om motorerna hade samlats in förbereddes en jämförelse av dessa. För att kunna utföra jämförelsen på ett rättvist sätt bestämdes ett antal kriterier. De kriterier som bestämdes för jämförelsen var:

1. Ljudnivå - Jämförelse ljudnivå vid tre olika tillstånd; när motorn ger maximal dragkraft, vid överflygning, samt vid landning.
2. Utsläpp och miljöpåverkan - Jämförelse av utsläpp vid tillverkning och användning.
3. Prestanda - Jämförelse av hastighet, höjd och räckvidd samt antal säten.

Efter att kriterierna bestämts togs data fram med avseende på dessa kriterier, vilken kan hittas i Bilaga A. När numerisk data inte fanns tillgänglig användes resonemang för att bidra till jämförelsen. För att möjliggöra jämförelse mellan de olika motorerna användes olika databaser.

3.2.1 Ljudnivå

För data angående motorernas ljudnivå användes EASA Certification Noise levels databas (ICAO, 2023), vilken innehöll alla godkända flygplanskonfigurationer för vilka EASA har tillverkat en TCDSN (Type Certificate Data Sheet for Noise). Därifrån har totalt tre vanligt förekommande flygplan från kategorierna tung propeller och turbofläkt tagits fram. För projektet har endast data från de senaste 20 åren undersökts.

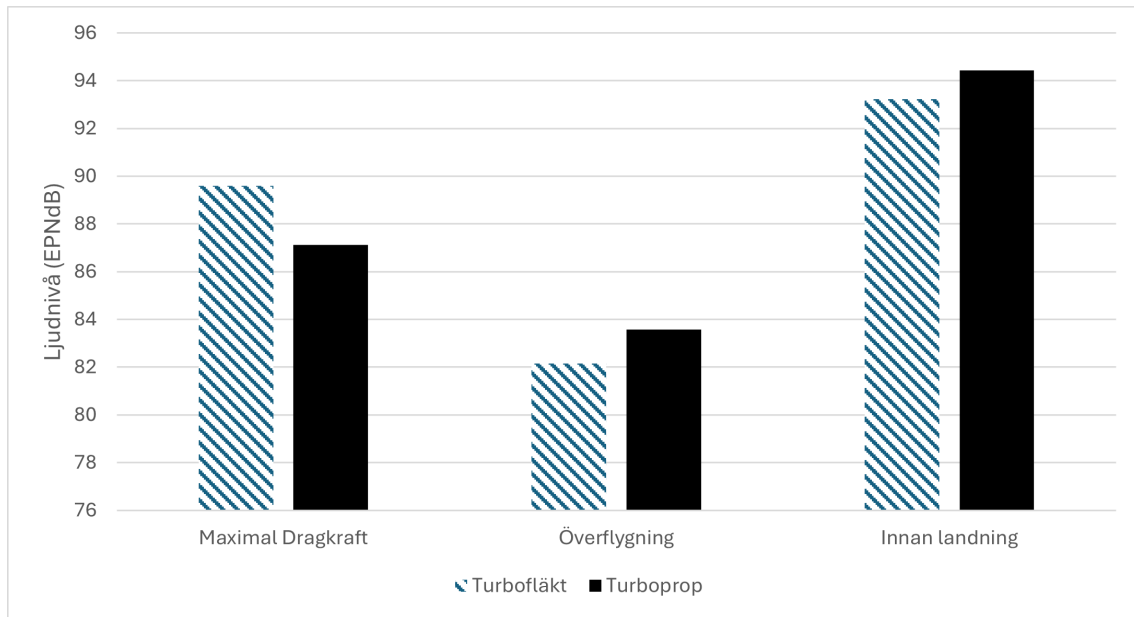
För kategorin tunga propellerflygplan valdes följande flygplan:

1. ATR 42-600
2. Dash 8-400
3. ATR 72-600

För kategorin turbofläktflygplan valdes följande flygplan:

1. A320neo
2. Boeing 737-900
3. A220-100

Tre olika ljudnivåer undersöktes. Den första är den ljudnivå som motorn skapar vid maximal dragkraft, den andra nivån är den som uppnås vid överflygning och den tredje nivån är den som uppnås inför landning. Ljudet mäts i enheten EPNdB (Depitre, 2006), det vill säga enheten av 'människoirritation till flygplansljud' och jämförelsen kan ses i figur 3.7.



Figur 3.7: Diagram som jämför flygplans ljudnivå vid maximal dragkraft, överflygning och landning. Mätt i EPNdB

Enligt figur 3.7 har turbopropsmotorer ett mindre ljudutsläpp vid maximal dragkraft, men högre ljudutsläpp vid de två andra kategorierna. Eftersom flygplan spenderar majoriteten av tiden i luften är överflygning den mest intressanta kategorin, men också ljudnivån vid landning är relativt viktig. Slutsatsen från figur 3.7 är därför att turbofläktsmotorer har en mindre negativ påverkan på människor än turbopropsmotorer, vilket även framgick vid intervjun med experten på GKN Aerospace.

Vid intervjun, och från tidigare insamlad information, har det också framgått att propfanmotorer länge har haft problem med ljudnivån och att det är ett område som kräver utveckling. Gällande elmotorer är dessa generellt tystare än jetturbiner. Då elmotorer ofta använder en propeller likt turbopropsmotorns antas ljudnivån av denna motor därför vara lägre än för ett konventionellt propellerflygplan. Även vid hybrid-drift antas ljudnivån vara lägre då jetmotorn används i mindre mängd.

3.2.2 Utsläpp och miljöpåverkan

Gällande utsläpp för de olika motorerna är det ett område under ständig utveckling, där miljöproblem har ställt stort fokus på området. Därför måste de databaser som används vara nyligen uppdaterade. Eftersom det finns väldigt få uppdaterade databaser tillgängligt är detta ett kriterium där jämförelsen behövs grundas främst på resonemang. Det finns framför allt två tillfällen under motorns livstid som behöver analyseras; dels tillverkningen av motorn, dels användningen av den.

Från tidigare insamlad information kan slutsats dras att turbopropsmotorer och turbofläktsmotorer har mycket lik arkitektur, och därför anses dessa vara på liknande nivå gällande utsläpp vid tillverkning. Propfanmotorn är ännu inte fullt utvecklad, men även denna kommer troligtvis ha en lik motorarkitektur med avseende på

materialanvändning. Det motoralternativ som sticker ut mest i denna kategori är elmotorn som har en helt annan uppbyggnad och därför kräver en helt annan typ av resurser vid tillverkning. Denna typ av motor är oftast mindre i storlek, och från Mukhopadhaya och Graver (2022) kan dock slutsatsen dras att den bidrar till lägre utsläpp än tillverkningen av jetmotorer.

Vid användning är motorns utsläpp i hög grad kopplad till dess prestanda. Turbopropmotorer har högre bypass än turbofläktsmotorer och kräver därför mindre bränsle, vilket bidrar till lägre utsläpp. Detta gäller dock bara på lägre höjd och kortare sträckor, medan turbofläktsmotorerna presterar bättre vid längre sträckor på högre höjd. Ett av huvudmålen med utvecklingen av propfanmotorn är att den ska vara bränsleeffektiv, vilket innebär att denna motor borde vara ett av de bästa alternativen gällande utsläpp, när den väl är färdigutvecklad. Elmotorn, till skillnad från övriga motorer, ger inga utsläpp vid användning då den inte förbränner något bränsle, och är därför det bästa alternativet.

3.2.3 Prestanda

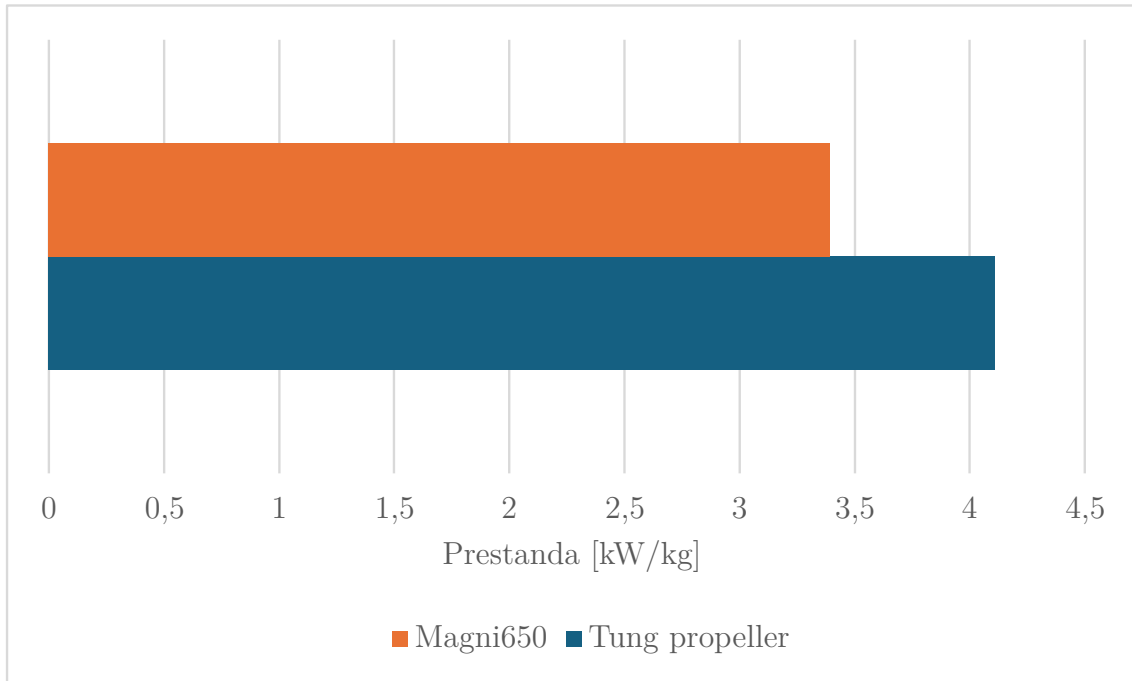
Med hjälp av samma flygplanstyper som användes till jämförelsen av ljudnivåer har räckvidd, tillåten flyghöjd och topphastighet vid cruising jämförts. Ett genomsnitt för respektive motortyp togs sedan fram och en sammanställning av datan återfinns i Tabell 3.1. Även antalet säten för varje flygplan togs med i tabellen för att påvisa skillnaden i storlek mellan planen. Från tabellen framgår att turbofläktsmotorer är bättre i samtliga kategorier, vilket stärks av tidigare inhämtad information då denna typ av flygplan främst används för längre transporter på högre höjd, medan turbopropsdrivna flygplan främst används för kortare transporter.

Tabell 3.1: Tabellen visar räckvidd, tillåten flyghöjd och maximal marschfart för tre flygplan inom kategori turbofläkt samt tung propeller. Tabellen är framställd genom följande källor (Airbus (2024b), Airbus (2024a), Alaska Airlines (2024), Fiji Airways (2024a), Fiji Airways (2024b), Icelandair (2024), Air Tahiti (2024), Westjet (2024))

	Motor typ	Distans [km]	Maximal altitud [m]	Maximal hastighet [km/h]	Antal säten
A320neo	Turbofläkt	3000	12100	840	180
Boeing 737-900	Turbofläkt	4092,92	12497	853	178
A220-100	Turbofläkt	2850	12500	840	125
Medelvärde	Turbofläkt	3314,307	12365,66667	844,3333	
ATR 42-600	Turboprop	1483,45	6000	463	46
Dash 8-400	Turboprop	2400	7620,00	630	76
ATR 72-600	Turboprop	1648,28	6000	463	68
Medelvärde	Turboprop	1843,91	6540	518,6667	

Till sist jämfördes snittet för tung propeller mot en elmotor (Magni650) med avseende på axeleffekt vid start, vilket kan ses i figur 3.8. Från figuren fås att det eldrivna flygplanet har en axeleffekt på 3,2 kW/kg , medan en turbopropsmotor ligger i snitt på 2,7 kW/kg . Eftersom endast en elmotor har använts i jämförelsen är dessa värden

endast ungefärliga, men kan ändå ge en indikation på att elmotorer är mer effektiva än turbopropmotorer. Elmotorer har en enklare konstruktion med mindre mängd delar, samt en lägre vikt, vilket gör den lättare att underhålla och bidrar till dess goda prestanda. Däremot har batterierna låg energidensitet, vilket bidrar till att den har relativt kort räckvidd och endast kan användas för kortare flygningar.



Figur 3.8: Jämförelse av axeleffekt för elmotor (Magni650) och tunga propellerflygplan.

4

Resultat av studie av bränsletyper

I den andra delen av litteraturstudien har tre bränsletyper undersökts; flygfotogen, vätgas och biobränslen. Den allra vanligaste typen av bränsle är konventionellt flygfotogen, men även biobränslen, syntetiska bränslen och vätgas kan vara troliga alternativ för framtiden. För att underlätta en jämförelse av drivmedlen togs även här några kriterier fram:

1. Hållbarhet - Miljöpåverkan vid framställning och användning.
2. Tillgänglighet - Hur stor tillgång på resurser som finns.
3. Krävda anpassningar - Hur lätt det är att anpassa konventionella flygmotorer för drift med bränslet.
4. Framtidsutsikter - Hur mycket utveckling som krävs för användning i stor skala.

Med dessa kriterier i åtanke samlades sedan information in om respektive drivmedel.

4.1 Flygfotogen

Flygfotogen används idag för i stort sett all flygfart, antingen som rent flygfotogen eller med en viss del biobränsle inblandat. Flygfotogen framställs genom destillering av rå olja, vilket ger 'straight run'-fotogen, eller från krackning (sönderdelning) av kolväten, vilket ger 'cracked'-fotogen. Dagens flygfotogen är uppdelad i två olika typer, Jet A och Jet A1 (Shell, 2024), där A1 har en lägre fryspunkt på $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ jämfört med $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ för A.

Det som gör flygfotogen populärt är, förutom den höga energidensiteten, att det också har en del smörjande och tätande egenskaper. Det är också det bränsle som har använts längst och majoriteten av alla motorer är anpassade för att drivas med flygfotogen.

4.1.1 Hållbarhet

En av de största nackdelarna med flygfotogen är att det består av kolväten och därmed är ett fossilt bränsle, vilket många idag vill undvika till följd av dess negativa miljöpåverkan och bidrag till klimatförändringarna. Vid förbränning av 1 kg fotogen i en flygmotor produceras 3,16 kg CO_2 , vilket motsvarar i genomsnitt 706 kg CO_2 per passagerare i ekonomiklassen på en tur-och-retur-flygning mellan Frankfurt och

New York (ICAO, 2024b). Totalt sett står flygindustrin för 2,5 % av världens CO₂ utsläpp (EASA, 2024a).

4.1.2 Användning idag och i framtiden

Idag är Jet-A1 det mest använda jetbränslet globalt, då den lägre fryspunkten är bra för ett varierande klimat, medan Jet-A är det mest använda bränslet i USA (Academy, 2021). Enligt IATA uppskattas förbrukningen av flygbränsle år 2024 vara 374,75 miljarder liter (Wilchek, 2024).

4.2 Hållbart flygbränsle

Hållbart flygbränsle, eller SAF (Sustainable Aviation Fuel) som det kallas på engelska, är en hållbar variant av flygbränsle avsedd att ersätta konventionellt flygfotogen. SAF är ett paraplybegrepp för olika bränslen som betraktas som hållbara, jämfört med det traditionella flygfotogenet. De två huvudkategorierna inom SAF är biobränsle, vilket produceras av biomassa, och syntetiskt flygbränsle, vilket främst framställs genom förnybar el, vatten och återvunnen koldioxid (Nagel, 2024).

4.2.1 Hållbarhet

Hållbara flygbränslen bidrar generellt med 50-80 % mindre växthusgaser jämfört med traditionella flygbränslen (Shehab m. fl., 2023). Eftersom dessa bränslen produceras från biomassa eller restprodukter introduceras inget nytt kol till den globala kolcykeln, utan den utsläppta mängden koldioxid från förbränningen balanseras mot den mängd som de organiska materialerna tar upp under sin livstid, vilket illustreras i figur 4.1. Därför kan nettovärdet på global nivå vara nära noll, beroende på bränsletyp, trots att förbränningen av bränslet resulterar i koldioxidutsläpp.



Figur 4.1: *Det cirkulära kretsloppet. Återanvänd med godkännande från Nagel (2024).*

Utöver utsläpp av koldioxid sker utsläpp av NO_x (kväveoxider) vid användning av förbränningsmotorer. Kväveoxider bidrar till luftföroreningar och kan ha olika miljö- och hälsoeffekter. Det bidrar dessutom till försurning av regn och kan ha negativa effekter på ekosystem. Mängden NO_x-utsläpp beror på flamttemperatur och hastighet. Då SAF och flygfotogen används i samma syfte och i samma motorer är därför NO_x-utsläppen detsamma för SAF som för det kommersiella flygbränslet (Proesmans & Vos, 2022).

För att anses som ett hållbart alternativ måste enligt Shehab m. fl. (2023) bränslet uppfylla den internationella standarden från ICAO, (International Civil Aviation Organization) där de samlade kriterierna kallas CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Dessa kriterier är enligt Ershov m. fl. (2023):

1. Bränslet ska, jämfört med traditionellt flygbränsle, reducera utsläppen av växthusgaser med minst 10 % under dess livscykel.
2. Bränslet ska inte framställas av biomassa odlad på mark med betydande biologisk mångfald.
3. Framställning av bränslet ska minska den negativa effekten på luften och får inte försämra kvalitén på vatten och jord eller hota ekosystemets mångfald.
4. Under framställningen av bränslet ska mänskliga rättigheter, arbetsförhållan-

den samt rättigheter till land och vatten respekteras.

5. Bränsleframställningen ska bidra till socioekonomisk tillväxt i regionerna samt säkra tillgången till livsmedel.

För att uppnå dessa kriterier framställs hållbara bränslen från förnybara källor som biomassa, eller syntetiskt, till skillnad från traditionellt flygbränsle som främst framställs av fossila resurser (Ershov m. fl., 2023).

4.2.2 Godkända bränsletyper

Utöver krav på produktion och tillverkning av bränslet finns även krav för bränslets egenskaper (Shahriar & Khanal, 2022). Dessa regleras utifrån en standard kallad ASTM D7566 (Specification for Aviation Turbine Fuels Containing Synthesized Hydrocarbons), vilken säkerställer att bränslet har rätt viskositet, fryspunkt, smältpunkt och prestanda vid låga temperaturer. Om ett bränsle uppfyller denna standard är det godkänt för användning i kommersiellt syfte. Sedan juni 2023 har elva SAF-bränslen blivit godkända enligt ASTM D7566, vilka har framställts med olika tillverkningsprocesser (ICAO, 2024a). Ytterligare SAF-bränslen är under utvärdering för att bli godkända.

4.2.3 Begränsningar

När bränsle framställs från oljor och fetter, saknar produkten aromatiska bindningar av kolväten (Shahriar & Khanal, 2022), vilka förekommer naturligt i traditionellt flygfotogen. Sådana bränslen har sämre smörjförmåga vilket påverkar packningarnas funktion och kan leda till läckage i motorn (Ershov m. fl., 2023). Därför finns regler på att så kallad 'drop-in' SAF ska begränsas till en 50 % blandning av SAF i bränslet. Till dessa hör de bränslen som tillverkas genom HEFA. Det är dock möjligt att framställa bränslen med aromatiska bindningar, vilket innebär att det är teoretiskt möjligt att flyga på 100 % SAF. Dessa bränslen kan framställas genom Fischer-Tropsch-processen eller katalytisk hydrotermolys (CHJ). Dock är dessa processer tekniskt krävande, kostsamma och inte tillräckligt effektiva ännu (Shehab m. fl., 2023).

4.2.4 Tillverkningsprocesser

I Tabell 4.1 jämförs några av de vanligaste processerna för framställning av hållbara flygbränslen, med data hämtad från Shehab m. fl. (2023).

Fischer-Tropsch processen (FT) innebär att syntesgas, som ofta framställs genom förgasning av biomassa, konverteras till kolväten, vilka i sin tur kan bearbetas vidare till bland annat FT-SPK (Shahriar & Khanal, 2022).

Hydrotreated Esters and Fatty Acids (HEFA) är en så kallad biokonversionsprocess, vilken resulterar i ett antal biprodukter så som diesel och propan (Shahriar & Khanal, 2022). Hållbara bränslen producerade genom HEFA är bland de vanligaste och har flera bra egenskaper, men eftersom de har relativt få aromatiska bindningar

finns det en viss risk för bränsleläckage hos motorer vid användning.

Alcohols-to-Jet (ATJ) produceras med hjälp av alkohol från förnyelsebara källor som sockerrör och stärkelse och är därför ett bra alternativ med avseende på tillgång av resurser. Synthesized iso-paraffinic (SIP) liknar ATJ då även detta bränsle produceras från socker, men till skillnad från ATJ behöver inte SIP något mellansteg av alkohol. Däremot får man endast använda upp till 10 % SIP enligt regulationer, till skillnad från de 50 % man får använda av ATJ (Shahriar & Khanal, 2022).

Tabell 4.1: Tillverkningsprocesser.

Produktionsprocess	Råvara	Fördelar	Nackdelar
HEFA	Vegetabilisk olja	Hög energidensitet	Relativt kostsamt råmaterial
	Animalisk olja	Mest ekonomisk	Begränsad tillgång till hållbart råmaterial
	Använd matolja	Lågt utsläpp av växthusgaser	
FT	Kol	Råmaterialet påverkar inte mattillgång	Lägre energidensitet än HEFA
	Naturgas	Flexible användning av råmaterial	Behöver utföras i stor skala då det är kostsamt
	Biomassa	Lägst utsläpp av växthusgaser	
ATJ	Etanol	Restgas från industrier och hushållsavfall kan användas som råmaterial	Lång processväg
	Isobutanol	Näst mest ekonomisk efter HEFA	Produktion kan ha låg avkastning
	Isobuten		
SIP	Majs		
	Socketbetor	Hög avkastning från mängd råmaterial	Låg bränsleblandning (10%)
	Socketrör		

Den mest etablerade och använda processen idag är HEFA, vilken även används vid produktion av biodiesel (Shehab m. fl., 2023). Råmaterialet för HEFA kan vara kostsamt och svåråtkomligt, men restprodukterna från produktionen, så som diesel, kan ofta säljas vilket sänker den totala kostnaden av framställningen och gör denna process till den mest ekonomiska (Shahriar & Khanal, 2022). Dock finns det faktorer som försämrar dess framtidsutsikter, till exempel att tillgången på råmaterial är begränsad och förväntas minska med tiden. Dessutom produceras en betydande del av råmaterialet utanför EU, vilket kan göra det svårt att säkerställa en hållbar produktion och att garantera tillgång under perioder av konflikt eller brist.

Alla processer leder till lägre utsläpp, men den process som reducerar utsläppen mest effektivt, under produktion och användning, är Fischer–Tropsch-processen. Denna process är också lovande då tillgången på råmaterial är större och geologiskt mer gynnsam för produktionen. Råmaterialet är dessutom billigare och mer flexibelt. Det är också möjligt att införa aromatiska bindningar i denna process vilket öppnar upp för potentialen att flyga på 100 % SAF som bränsle.

När det gäller att omvandla råmaterial till SAF-bränsle är SIP den mest effektiva, med en avkastning på upp till 100 %. Dock har denna teknologi inte utvecklats i samma grad som de andra processerna och är begränsad till en 10 % inblandning, vilket gör den till den minst lovande processen av de fyra. ATJ däremot liknar SIP men får användas i högre grad och kan därför vara ett bättre alternativ.

4.2.5 Användning av SAF, idag och i framtiden

Från och med år 2025 är det enligt EU-parlamentet krav på att alla plan som flyger från de större flygplatserna i EU måste ha en minimum-mängd hållbart flygbränsle i tanken (EASA, 2024b), där miniminivån ökar successivt vart femte år. Det första kravet är på 2 %, följt av 5 % och slutligen 63 % år 2050 (Shehab m. fl., 2023).

Enligt EASA:s miljörapport avseende europeisk luftfart från 2022 är det nuvarande utbudet av hållbart flygbränsle lågt, mindre än 0,05 % av EU:s totala användning av flygbränsle (EASA, 2022). Uppskattningsvis krävs 2,3 miljoner ton SAF för att uppnå målet om 5 % SAF år 2030.

Enligt IATA uppgick volymen av hållbara flygbränslen globalt till 0,5 miljoner ton under 2023, en fördubbling jämfört med året innan (IATA, 2023). Denna volym förväntas tredubblas under 2024 till 1,5 miljoner ton, vilket motsvarar 0,53 % av all använd flygbränsle. Trots denna ökning är volymen av SAF-bränsle fortfarande låg, vilket EASA anser snarare beror på låg tillgång än bristande efterfrågan. Ett tydligt bevis på efterfrågan är att all producerad SAF har sålts och använts, samt att många flygbolag har ingått avtal för att öka användningen av SAF fram till år 2030.

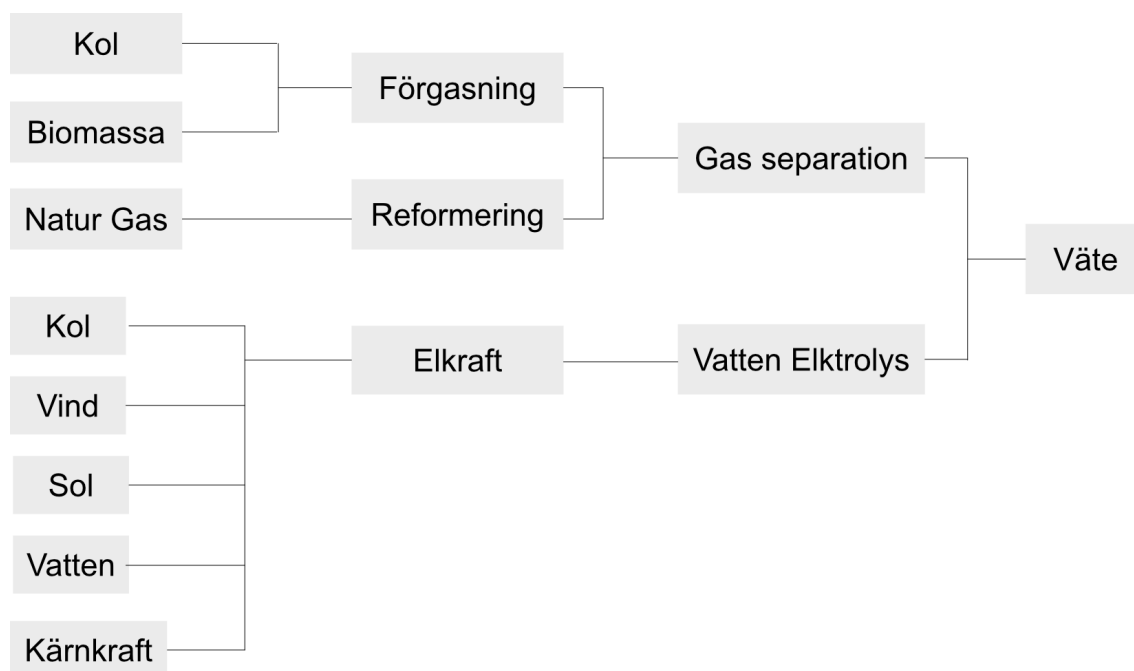
För att öka tillgången till SAF finns flera åtgärder som kan vara lämpliga (IATA, 2023). Det inkluderar ökade investeringar i produktionen av hållbara bränslen från traditionella oljeföretag. Dessutom behöver produktionen av SAF diversifieras genom att öka användningen av metoder som Fischer-Tropsch och ATJ. Ytterligare föreslår EASA att regeringar bör sätta krav på att en betydande del av produktionen av förnybara bränslen måste vara hållbara (Shehab m. fl., 2023).

4.3 Vätgas

Vätgas förväntas spela en mycket stor roll i framtida lösningar för att minimera flygindustrins klimatpåverkan (EASA, 2024c). Det som gör vätgas attraktivt är att det kan tas fram helt utan koldioxidutsläpp, samt att det finns lättillgängligt i vatten. Nackdelarna för vätgas ligger främst i bränsleförvaring och system, eftersom vätgas har en lägre energidensitet än flygfotogen, vilket gör att dagens tankar inte kommer räcka för mer än mycket korta sträckor. Dessutom saknas det en hel del infrastruktur för att möjliggöra en mer utbredd användning av vätgas.

4.3.1 Tillverkningsprocesser

De finns flera olika tillverkningsmetoder för vätgas vilka kan ses i figur 4.2 och beskrivs mer i detalj nedan.



Figur 4.2: Träddiagram över metoder för framställning av vätegas. Återskapad och modifierad från *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 30, B.C.R. Ewan, R.W.K. Allen, *A figure of merit assessment of the routes to hydrogen*, 809-819, Copyright 2005 med godkännande från Elsevier.

4.3.1.1 Vattenelektrolys

Vattenelektrolys innebär att, som namnet antyder, vätegas framställs från vatten med hjälp av en elkälla, så att väte och syre spjälkas från vattenmolekylerna. Elektrolys används idag vid framställning av vätegas för mat-, medicin- och elektronikindustrin.

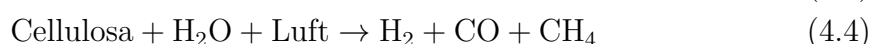
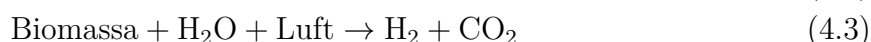
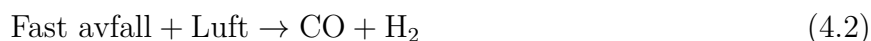
Vid spjälkning används en elektrolyt för att öka konduktiviteten av vatten, som annars har en låg sådan. En elektrolyt är ett lösligt basiskt jon-medium, till exempel NaOH som skapar Na^+ och OH^- när det löses i vatten. Reaktionen som sedan sker när elektricitet leds genom mediumet sker enligt Ekvation 1 (Aslam m. fl., 2023) och resulterar i en gas som innehåller en blandning av väte och syre. För att sedan utvinna ren vätegas måste en gasseparator implementeras som separerar vätegasen från syret.



Reaktionen är 50-70 % effektiv, vilket innebär att 50-70 % av den applicerade elektriska energin resulterar i kemisk energi (Aslam m. fl., 2023). Den kemiska processen vid elektrolys är mycket hållbar eftersom den enda biprodukten är syre. Hållbarheten för processen beror därför inte på framställandet utan främst på var elektriciteten som driver processen kommer ifrån. Kostnaden för produktion av ett kilo vätegas genom elektrolys är mellan 10-24 USD (Aslam m. fl., 2023). Dock beror kostnaden på energikällan som driver elektrolysen. Enligt Aslam m. fl. (2023) är vattenkraft den mest ekonomiska och pålitliga källan för att driva vätegasproduktion via elektrolys.

4.3.1.2 Vätgas från biomassa

Vätgas kan även framställas från biomassa genom ett flertal olika termokemiska processer. Processer som används är pyrolys, förgasning, ångförgasning och ångreforming av bio-oljor. De mest använda processerna är förgasning och vatten-gas-skifte. Framställning av väte från biomassa är generellt baserad på följande reaktioner (Balat & Balat, 2009):



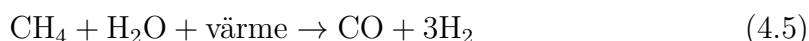
Förgasning av biomassa sker genom att värma solid biomassa till dess att termisk nedbrytning sker, vilket resulterar i väte, kolmonoxid, koldioxid, metan samt vatten i gasform. Produkterna genomgår sedan en katalystdriven ångreformation. Förgasning av biomassa har identifierats som ett möjligt produktionsalternativ för mer förnybar vätgas. Genom att använda förgasning i stor skala skulle därför beroendet av fossila bränslen kunna minimeras. Produktionen har dock endast en effektivitet på 35-50 % vilket innebär relativt stora utsläpp av metan, kolmonoxid och koldioxid som biprodukter (Aslam m. fl., 2023). Eftersom produktionen är beroende av biomassa kan en storskalig produktion också leda till avskogning som kan påverka både biokultur och biodiversitet. För att vätgas producerad från biomassa ska anses vara hållbar måste därför råvarorna också vara hållbara, med krav på hur dessa tas fram och hanteras.

Kostnaden för att producera ett kilo vätgas från biomassa är 2.05USD (Aslam m. fl., 2023). Produktionen beror även på kostnaden av biomassan och betraktas endast som ekonomiskt gynnsam då biomassan är billig.

4.3.1.3 Reformering av naturgas

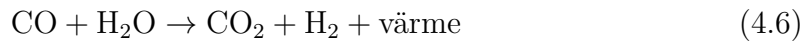
Reformering av naturgas är en metod som bygger på existerande infrastruktur ("Hydrogen Production", 2024) och är den mest utvecklade produktionsmetoden av vätgas (Aslam m. fl., 2023). 50 % av världens vätgasproduktion sker idag genom reformering av naturgas (Zare m. fl., 2023).

Naturgas innehåller metan och tillsammans med olika termiska processer produceras vätgas. De två huvudsakliga reaktionerna är ång- och metanreforming, samt partiell oxidation. Vid ång- och metanreforming reagerar metan med ångan med hjälp av en katalyst vid ett tryck mellan 1-25 bar. Reaktionen resulterar i vätgas och kolmonoxid. Processen kan ses i Ekvation 4.5. Eftersom reaktionen är endotermisk måste värme appliceras för att reaktionen skall ske.



En biprodukt av processen är kolmonoxid, vilket sedan kan reagera med ånga med

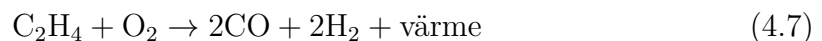
hjälp av en katalyst och på så sätt producera koldioxid och vätgas. Användning av denna reaktion, vilken visas i Ekvation 4.6, ökar mängden utvunnen vätgas.



Kostnaden för framställandet av ett kilo vätgas med hjälp av processen kostar ungefär 2,03 USD (Aslam m. fl., 2023). Effektiviteten av reaktionen är mellan 74-85 %, vilket är relativt högt men innebär att det fortfarande sker en del utsläpp av kolmonoxid och koldioxid (Aslam m. fl., 2023).

4.3.1.4 Förgasning av kol

Förgasning av kol är en process som omvandlar kol till syntesgas, som är en kombination av kolmonoxid och vätgas. 17 % av vätgas produceras genom förgasning av kol. Processen sker genom uppvärmning av kol till 900-1700 °C, då det förgasas. Spannet för temperaturen beror på vilken förgasningsmetod som används (Tyagi & Lo, 2016). Reaktionen sker enligt följande formel:



Biprodukten kolmonoxid reagerar sedan med ånga med hjälp av en katalyst vilket resulterar i ytterligare vätgas och koldioxid. Från ett kilo kol produceras 0,1-0,17 kg vätgas (Midilli m. fl., 2021), vilket kostar 1,48 USD. Produktionsmetoden är 60-75 % effektiv, men kräver vatten och producerar en relativt stor mängd koldioxid (Aslam m. fl., 2023).

4.3.2 Hållbarhet

Användning av vätgas som flygbränsle skulle kunna minska flygindustrins koldioxidutsläpp med drygt 50 % ("Hydrogen | Airbus", 2021). Dock kan det endast realiseras vid en hållbar vätgasproduktion, med krav på mer än bara produktionsmetoden. Råvaror och drivkällor som produktionen utnyttjar måste också vara hållbara (Aslam m. fl., 2023). Om vätgasproduktionen kan ställas om till exempelvis en elektrolytprocess driven av förnybar elektricitet, kan hållbarheten garanteras utan påverkan på biologisk mångfald.

4.3.3 Begränsningar

Jämförs flytande väte och fotogen med avseende på vikt är väte cirka tre gånger så energirikt som fotogen. För att kunna förvara väte i flytande form krävs det dock stora förändringar i bränslesystem och bränsletankar, eftersom det måste kylas ned till -253 °C. Det ökar vikten på bränslesystemet så pass mycket att det överväger den goda energieffektiviteten hos väte. Detta tillsammans med att flytande väte har en volym som är fyra gånger så stor som fotogen gör att det stora problemet för användning av vätgas i flygplan blir hur man ska få plats med bränslet (Klug & Faass, 2001). Tankarna man behöver för att förvara flytande väte behöver dessutom

vara cylindriska eller sfäriska vilket betyder att man inte längre kommer kunna förvara bränslet i vingarna (Khandelwal m. fl., 2013).

4.3.4 Användning idag och i framtiden

Idag är användningen av väte som energikälla fortfarande begränsad till vägfordon, där det används i cirka 40 000 bränslecellsdrivna fordon. Det största användningsområdet för vätgas är i dagsläget för att producera ammoniak, som i sin tur används i tillverkning av gödsel. Användningen av väte ökar årligen med 6 %. För att väte ska vara ett möjligt alternativ i framtiden krävs det att mycket utveckling sker inom sektorn. Vätets lägre energidensitet och behov av kryogen förvaring kräver designförändringar för både flygplan och flygplatser om det ska användas som bränsle i framtiden (IEA, 2019).

4.4 Modifikationer

Ett av målen med projektet var att analysera designskillnader i flygmotorer då olika drivmedel används. Utgångspunkten var en konventionell, fotogen-driven turbofläktsmotor. I detta avsnitt beskrivs vilka förändringar med avseende på motorns konstruktion som behöver göras för drivning med SAF och vätgas.

4.4.1 Hållbart flygbränsle

Syftet med hållbart flygbränsle (SAF) är att det ska efterlikna flygfotogen så mycket som möjligt, för att på så sätt undvika modifieringar av motorn och andra delar av flygplanet. Denna typ av bränsle kallas ofta 'drop-in'-bränsle, vilket innebär att det ska kunna användas direkt i flygplanet (IATA, 2024). Som beskrivet tidigare i 4.2.3 är dock inte SAF certifierat för en större andel än 50 % av det totala flygbränslet i motorn ännu. Därför behövs just nu en del modifieringar göras för att kunna använda 100 % SAF, snarare på framställningen av bränslet än på själva flygmotorerna. Alternativt behöver flygmotorer modifieras på så vis att SAF-bränslets sämre smörjförmåga inte riskerar läckage. Detta genom möjligtvis andra packningar och tätningar. Detta motsäger dock resonemanget om att SAF är ett 'drop-in'-bränsle, ifall designändringar på motorerna är nödvändiga.

4.4.2 Vätgas

För drivning på vätgas krävs en del ändringar i förbränningskammaren eftersom vätgas har andra egenskaper än flygfotogen. Vätgasen måste också förvärmas innan det ankommer till förbränningskammaren för att försäkra om att det är helt förångat. Det beror på att bränslet används i gasform men förvaras i flytande form i tanken. Enligt (Svensson & Singh, 2004) finns det två alternativ för att värma bränslet, antingen med en värmeväxlare eller med en extern värmekälla. Genom att använda en extern värmekälla påverkas inte motorns prestanda, det kan dock vara mer komplicerat att integrera bränslesystemet med andra flygplanssystem som kan agera som värmekälla. Vid placering av en intern värmeväxlare måste säkerhetsåtgärder tas och minimal förändring betraktas både för tekniska aspekter och säkerhetsaspekter.

Det finns flera olika koncept för placering av värmeväxlare, men alla koncept delar det gemensamma målet att förånga det flytande vätet (Khandelwal m. fl., 2013). Nedan beskrivs fyra av dessa koncept. Gemensamt för de första två systemen som beskrivs är att de använder den varma avgasen från turbinen för att förånga vätgasen. De andra två alternativen använder sig istället av kylning av kompressorluft respektive turbin.

4.4.2.1 Stag

Enligt (Svensson & Singh, 2004) kan de stag som håller motorkärnan och är placerade i lågtrycksturbinen användas för att förånga vätgasen. Detta är det alternativ som innebär att minst antal ändringar måste genomföras. Storleken av stagen behöver dock ändras för att få en högre verkningsgrad inom värmeväxlaren. Vid tester

såg Svensson och Singh (2004) en minskning från 121,7 KN till 120,7 KN då temperaturen av väte gick från 250°K till 600°K, medan effektiviteten av värmväxlaren ökade från 0,295 % till 0,755 % på grund av dess ökade yta.

4.4.2.2 Avgaskona

Ett annat alternativ är att använda en avgaskona, likt den som kan ses i ett patent från GKN Aerospace (Strömberg m. fl., 2024), där en del av avgasflödet dirigeras om in i avgaskonan. Patentet visas i Figur 4.3. I avgaskonan finns då en värmväxlare där vätgas förångas.

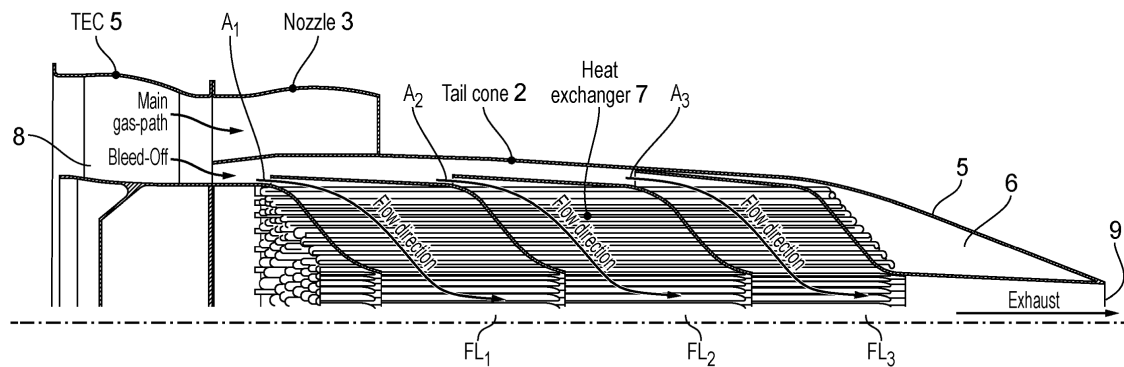


FIG. 4

Figur 4.3: *Exhaust cone heat exchanger. Återanvänd med godkännande av GKN Aerospace Strömberg m. fl., 2024*

4.4.2.3 Kylning av kompressorluft

Enligt Svensson och Singh (2004) är arbetet över kompressorn proportionerlig med förändringen i temperatur. Genom kylning av ingående luft till kompressorn kan ytterligare prestanda utvinnas. Om en bestämd utgående lufttemperatur används ökar det totala tryckförhållandet vilket är gynnsamt för specifik bränslekonsumtion. Kylningen kan antingen ske innan kompressorn, mellan högtrycks- och lågtrycks-kompressorn eller kontinuerligt genom alla kompressorns steg. Det sistnämnda alternativet ger högst prestandaresultat men är också det svåraste att implementera. Det kan implementeras genom att kyla mellanliggande ledskenor längs kompressorns steg.

Vid ett experimentellt försök att kyla den ingående luften till kompressorn, utfört av Svensson och Singh (2004), erhöles en minskning i specifik bränslekonsumtion med 5,7 % samt en ökning i specifik dragkraft (dragkraft per enhet luftmassflöde) med 6,7 % i jämförelse mot deras referenscykel. Experimentet genomfördes genom placering av en värmväxlare innan lågtryckskompressorn, vilket med den ökade vikten från värmväxlaren ökade vikt-kraftsförhållandet med 1,2 % (Svensson & Singh, 2004). Det finns ett flertal negativa aspekter med placering av värmväxlaren enligt ovan, till exempel ökad vikt av motorn och ökad komplexitet. Utöver detta ökar även risken för skador vid främmande objekt i kompressorstegen. Ett annat återkommande

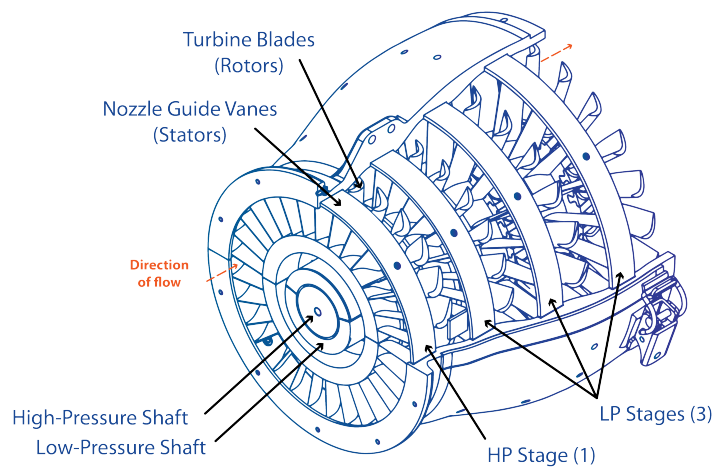
problem för förkylda system är isbildning på luftsidan av värmeväxlaren. Om luften kyls tillräckligt kommer ett lager av is att bildas på värmeväxlaren, vilket leder till en högre effektivitet hos värmeväxlaren men att luftflödet begränsas. Det är dock möjligt att uppfylla motorns bränslebehov utan att isbildning sker.

4.4.2.4 Turbinkylning

Normalt för en turbinmotor är att ledskenorna i turbinstativet och rotorerna i högtrycksturbinen måste kylas eftersom turbinavgastemperaturen (TAT) är högre än vad materialet tillåter (Svensson & Singh, 2004). I figur 4.4 kan placering av turbinstativledskenor och turbinblad ses. Ofta kyls dem genom att omdirigera en del av det komprimerade luftflödet genom kylkanaler i turbinbladen och i ledskenorna. 35 % av den omdirigerade luften används för att kyla högtrycksturbinrotorerna (Shinmyo m. fl., 2013). Genom att placera en värmeväxlare vid denna luft kan den kylas samtidigt som den förångar vätet. Den kylda luften kommer då vara mer effektiv, då den kyler både ledskenor och turbinrotorn, och därmed kan TAT höjas ytterligare (Svensson & Singh, 2004).

Denna metod tillåter en högre effektutvinning ur motorkärnan eftersom effekten ur kärnan är beroende på TAT-nivån. Vid en förhöjd TAT behövs även en ökad bränsletillförsel, men det tillåter en signifikant ökning i kraft. Genom att applicera metoden under ett experiment kunde TAT ökas med 140 °K vilket resulterade i en ökning av vikt kraftförhållandet med 8,4 % samtidigt som den specifika bränslekonsumtionen minskade med 2,1 % (Svensson & Singh, 2004). De negativa aspekterna av detta system är att det krävs en komplex förändring av designen för att implementeras, samt att överkylning av turbinmotorn kan leda till lågcykelsutmattning. Det kan även finnas möjlighet att kyla relevanta delar utan en värmeväxlare genom att kyla dem med vätgasen, dock är detta väldigt avancerat, men genom att göra det kan alla förluster från värmeväxlaren elimineras (Svensson & Singh, 2004).

» Turbine Section of the X-Plorer 1 EC



Figur 4.4: *Figuren visar turbin delen av en turbofläkt motor. I figuren kan turbinblad, turbinstativledskenor (nozzle guide vanes), låg och hög trycks axel. Återanvänd med godkännande från JetX, C. Triantafyllou (2024)*

5

Resultat av modell

Den fysiska modellen har baserats på turbofläktsmotorn och utvecklats så att den ska vara pedagogisk och modulär. För att motorn ska vara verklighetstrogen har den i grova drag baserats på en redan existerande modell, Pratt and Whitney 1100G-JM, som är en växlad turbofanmotor och används i flygplansmodellen Airbus A320neo.

5.1 Komponenter

Först fastställdes de komponenter som skulle ingå i motormodellen. Eftersom modellen är ämnad att användas i undervisningssyfte, behövde den vara tydlig och endast innehålla de komponenter som bidrog till förståelse för hur en turbofläktsmotor fungerar. Detaljer som inte bidrog till den övergripande förståelsen, eller som var för små för att skrivas ut, exkluderades i designen. Invändiga geometrier som inte syntes valdes också att inte tas med i modellen eftersom de inte hjälper användaren att förstå motorkonceptet, dessutom förenklade detta tillverkningsprocessen något. I stora drag kunde motorn delas in i sex huvudsakliga delar; fläkt, växel, kompressorer, förbränningskammare, turbiner och axlar. Förutom dessa gjordes även ett stativ som motorn monterades på, så att användaren kunde manövrera modellen på ett enkelt sätt.

5.1.1 Fläkt

När luft strömmar in i motorn möts den först av fläkten. Denna omsluts av ett hölje och består bland annat av ett flertal rotorblad samt en så kallad "spinner cone". Det kan också finnas skydd mot isbildning och liknande inbyggt i konstruktionen. Det brukar även finnas statorblad och ledskenor som rätar upp luften innan den kommer till nästa steg i motorn. Då fläkten har en större diameter än övriga motorn bidrar den till så kallad bypass. Det är den luft som sedan strömmar runt motorkärnan istället för igenom, och på så sätt bidrar till mer dragkraft och ökad verkningsgrad.

5.1.2 Växel

I nya motorer sitter nu ofta en planetväxel i anslutning till fläkten. Då både kompressorer och fläkt drivs av turbinerna används växeln för att ändra varvtalet mellan dessa. Det gör att fläkten kan ha ett annat varvantal än kompressorerna, och på så sätt drivs mer optimalt. Fläktens hastighet begränsas för att undvika överljudshastighet i bladspetsarna. Vridmomentet överförs via olika axlar genom motorn.

5.1.3 Kompressorer

Efter fläkten och växeln når luften kompressorerna. Dessa är ofta uppdelade i två steg, men även ett steg och tre steg förekommer. När den är uppdelad i två steg möts luften först av en lågtryckskompressor, för att sedan komma till högtryckskompressorn. Båda kompressorerna består dels av roterande rotorblad, dels av stillastående statorblad, samt höljen och ledskenor. På så sätt kan luften komprimeras till mycket högt tryck medan det leds mot förbränningskammaren.

5.1.4 Förbränningskammare

I förbränningskammaren blandas luften med bränsle och antänds, vilket skapar ett ännu högre tryck och högre temperatur. Detta är en av de mest komplexa delarna i motorn och har genomgått stor förändring sen motorn först introducerades. Förutom skal och höljen, består förbränningskammaren av många delar, så som bränsleinsprut och blandare. Det är också denna del som behöver genomgå störst förändring då man ska ändra motorns drivmedel.

5.1.5 Turbiner

Efter förbränningskammaren kommer luften till turbinerna. Dessa är likt kompressorerna ofta uppdelade i en högtrycksturbin och en lågtrycksturbin. Målet med turbinerna är att utvinna dragkraft från den strömmande luften. De är uppbyggda mycket likt kompressorerna med rotor, statorer och höljen. När luften går igenom turbinerna expanderar den och får rotorerna att rotera. Rotationen orsakar vridmoment i axlarna och används för att driva kompressorerna och fläkten. Lågtrycksturbinen driver lågtryckskompressorn som är kopplad till växeln och/eller fläkten, medan högtrycksturbinen driver högtryckskompressorn.

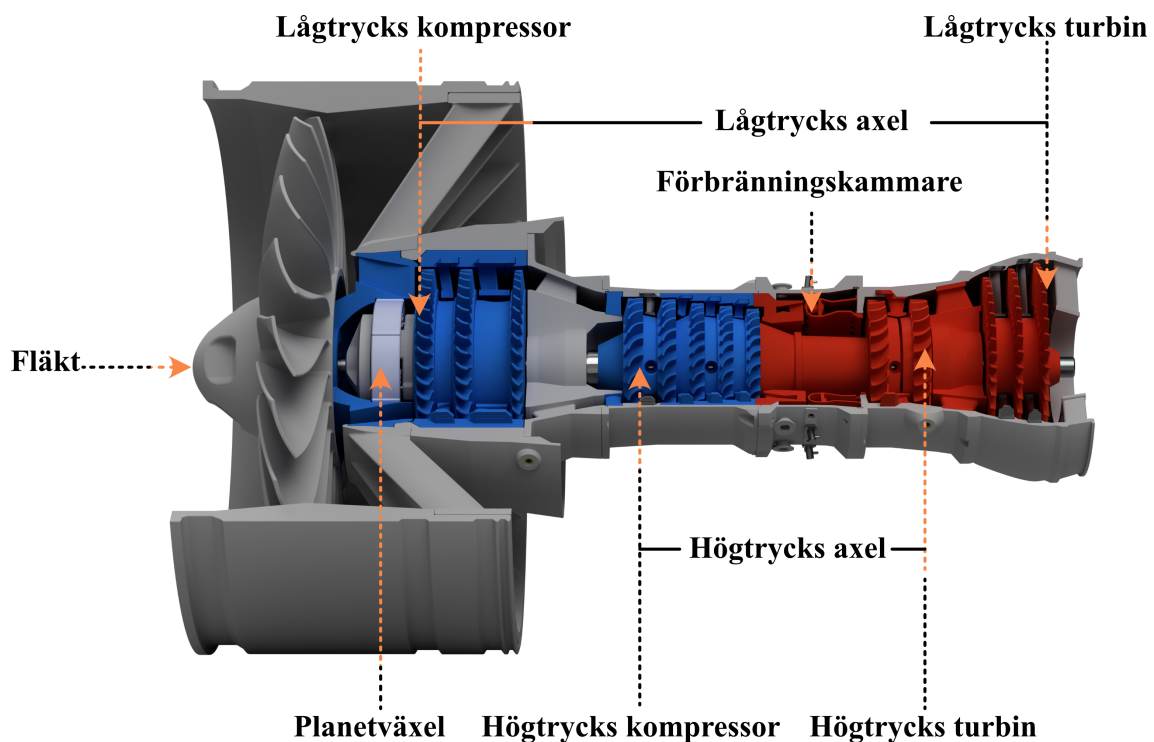
Efter turbinerna lämnar luften motorn och bidrar till dragkraft som driver flygplanet framåt. Även den luft som strömmat kring motorn, som så kallad bypass, bidrar till denna dragkraft.

5.1.6 Axlar

När motorn har två kompressor- och turbinesteg har den också två axlar. På lågtrycksaxeln sitter de rörliga delarna i lågtryckskompressorn och turbinen fast. Axeln är solid och är lagrad bakom lågtryckskompressorn och framför lågtrycksturbinen. Högtrycksaxeln består av ett rör som sitter utanpå lågtrycksaxeln. I ändarna sitter lager som befinner sig lite innanför lagren till lågtrycksaxeln. Bakom det främre lagret sitter de roterande delarna i högtryckskompressorn. De roterande delarna i högtrycksaxeln sitter lite före det bakre lagret. Högtrycksaxeln roterar fritt och är inte kopplad till lågtrycksaxeln eller fläkten.

5.2 Kravspecifikation

Efter att komponenterna undersökts och listats togs en kravspecifikation fram, vilken kan hittas i Bilaga B, med bestämmelser och riktlinjer för arbetet. Förutom att modellen skulle inkludera de komponenter som beskrevs i föregående avsnitt var målet att axlar med rotorerna skulle kunna rotera för att visa funktion och ge användaren förutsättningar att enklare förstå motorprincipen genom interaktion med modellen. Dessutom skulle fläkt och växel kunna bytas ut, dels för att visualisera en ändring av bypass, dels för att visa motorer utan växel. För att göra modellen pedagogisk skulle olika delar färgmarkeras och en skylt som förklarar de olika komponenterna skulle vara synliga, se figur 5.1.



Figur 5.1: *Displaybild*

Eftersom modellen skulle placeras på en hylla i en samlingsal behövde den vara anpassad för utrymmet. Det innebar att motorn behövde ha en längd under 700 mm, en höjd under 450 mm och ett djup under 450 mm. Dessa dimensioner inkluderar förutom själva motorn även stativet och övriga delar. Modellen skulle även ha en maximal vikt på under 15 kg. Den skulle också vara användarvänlig med låg säkerhetsrisk, vilket innebar att modulära delar skulle vara lätta att byta utan redskap och inga vassa kanter eller andra hälsorisker fick förekomma.

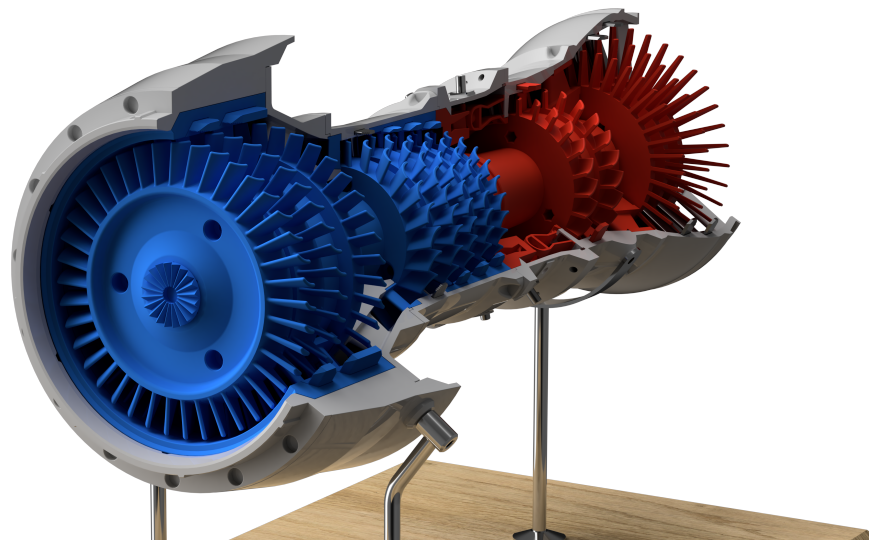
5.3 Anpassningar i modell

Modellen behövde anpassas för att delar skulle vara utbytbara, för att visualisera skillnader och likheter mellan olika konfigurationer, samt för att vara pedagogisk.

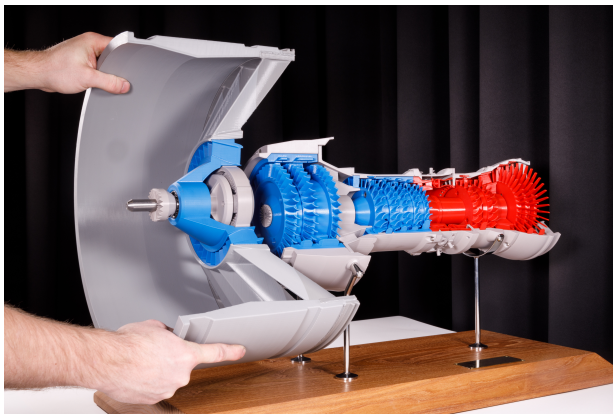
5.3.1 Modularitet

Huvudmålet med framtagandet av modellen var att visa hur en modern flygmotor i kommersiellt bruk fungerar, samt att spegla trender i flygmotordesign under de senaste två decennierna. På så sätt skulle användaren ges en bättre förståelse för de huvudsakliga förändringar i geometri som skett över tid i syfte att förbättra egenskaper som bränsleeffektivitet och bullernivå. Som tidigare nämnts är bland annat ett högt bypass-förhållande något som utmärker moderna flygmotorer av typen turbofläkt.

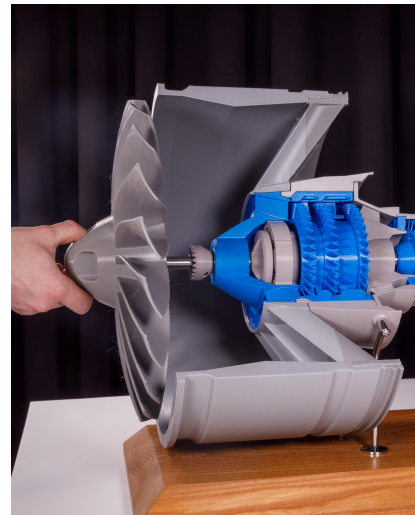
I konventionella turbofläktsmotorer är fläkten direktkopplad till lågtrycksaxeln, medan de modernaste motorerna istället har en nedväxling mellan lågtrycksaxeln och fläkten för att erhålla ytterligare bypass och på så vis förbättra verkningsgraden utan att kompromissa med ljudnivå. För att åskådliggöra detta utformades funktionsmodellen för att vara modulär så att hela det främre partiet av motorn enkelt kunde demonteras från motorkärnan och bytas ut. Två olika moduler konstruerades varav den ena med lägre bypass och med fläkten monterad direkt på lågtrycksaxeln utan växel. Den andra modularades med ett större bypass-förhållande och med en planetväxel monterad mellan fläkten och lågtrycksaxeln, som på så vis minskar fläktens rotationshastighet i förhållande till den drivande axeln. Modell utan fläkt och växel kan ses i Figur 5.2. Montering av modulerna och fläkt kan ses i Figur 5.3.



Figur 5.2: *Modell utan fläkt eller växel monterad*



(a)



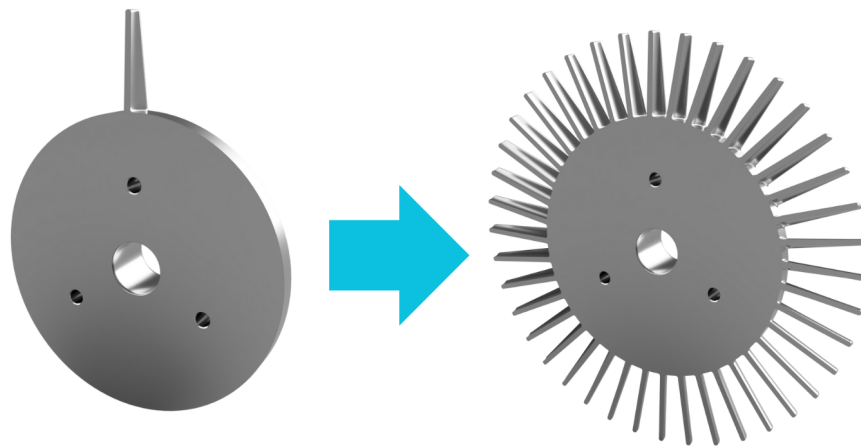
(b)

Figur 5.3: Modellen är modulärt konstruerad. Figur 5.3a visar hur främre modulen monteras och Figur 5.3b visar hur fläkten monteras.

5.3.2 CAD

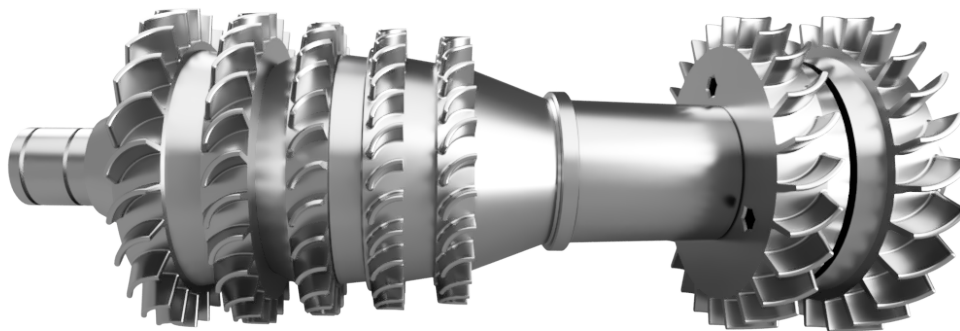
Designen av modellen, som utvecklades i CAD, krävde optimering för att minska belastning på mjukvara och för att förkorta tidsåtgången under designfasen. För att effektivisera arbetet utformades skisser och komponenter för att underlätta dimensionella ändringar utan felkoder. Exempelvis var skisser anpassade så att relaterade dimensioner följde med när måttändringar utfördes.

CAD-programmets prestandakrävande funktioner, så som att inkludera skruvar i modellen, kunde fördröja arbetet då dem kräver tunga beräkningar. På liknande sätt betar sig verktyget “circular pattern”, som distribuerar kopior av en funktion kring en axel i designen. Ett exempel på när detta verktyg använts kan ses i figur 5.4. För att minimera belastningen beslutades det att inte inkludera skruvar i den digitala modellen samt att funktionen circular pattern inte utfördes innan komponenten var redo att printas, eller då renderingar skulle göras.



Figur 5.4: *Utförande av delar, från att de ser ut som den vänstra bilden, fram till att de exporterades som bilden till höger.*

Vidare förenklades designprocessen genom att vissa delar utelämnades som inte hade varit synliga i den slutgiltiga utformningen av modellen. Beslutet resulterade i en lägre arbetsbelastning och en optimerad resursanvändning. Ett exempel på detta är geometrin mellan bliskar och statorer som utformades utan genomskärning med en enklare design, resultatet visas i figur 5.5.

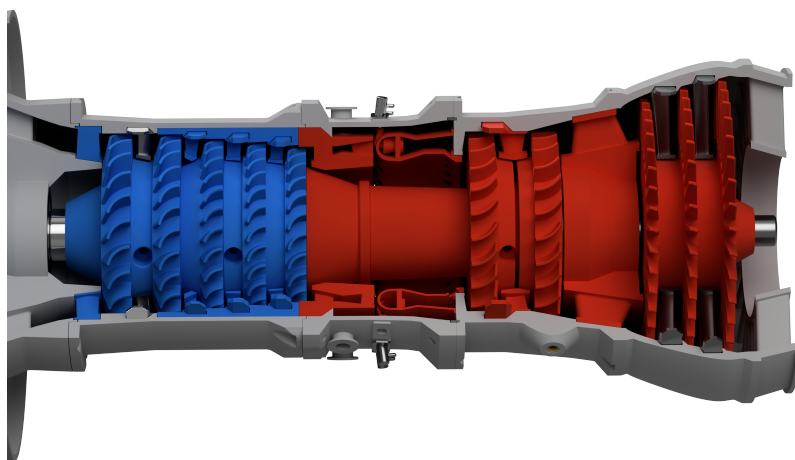


Figur 5.5: *Solid geometri mellan bliskar på högtrycksaxel.*

5.3.3 Pedagogik

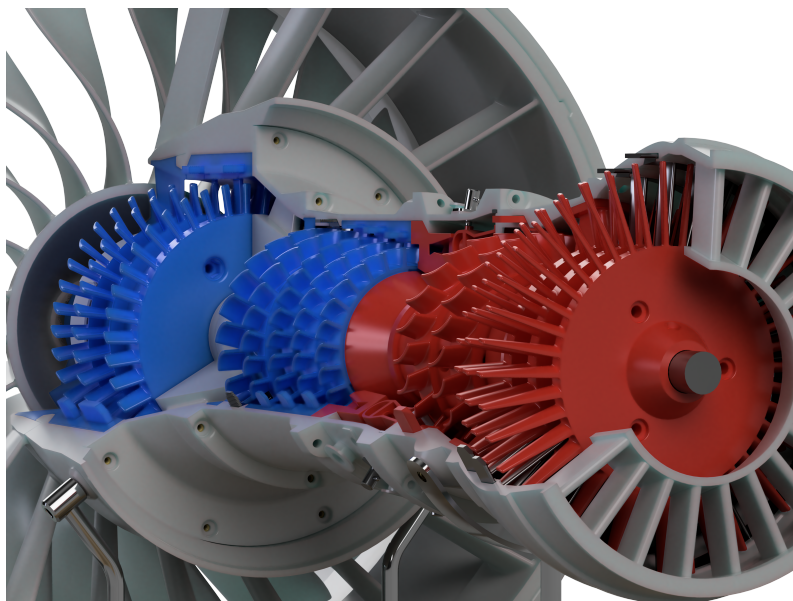
För att göra modellen pedagogisk gjordes specifika designval för att underlätta förståelsen. Det var viktigt att de olika komponenterna inte bara kunde urskiljas, utan också att sambandet mellan dem framgick för att uppfylla modellens syfte. En metod som användes var därför färgkodning av komponenterna, som visualiserar vilket temperatursteg dessa befinner sig i. I praktiken innebär detta att kompressorerna färgades blå för att påvisa att de hanterar kallare luft, medan turbinerna och

förbränningskammaren färgades röda för att representera passagen av den varma luften, se Figur 5.6. På grund av begränsad tillgång av nyanser av färger valdes endast blå och röd istället för till exempel ljusblå, mörkblå, orange, mörkröd eller någon annan färgkombination.



Figur 5.6: Färgkodade komponenter: blå för att representera kall luft, röd för varm luft.

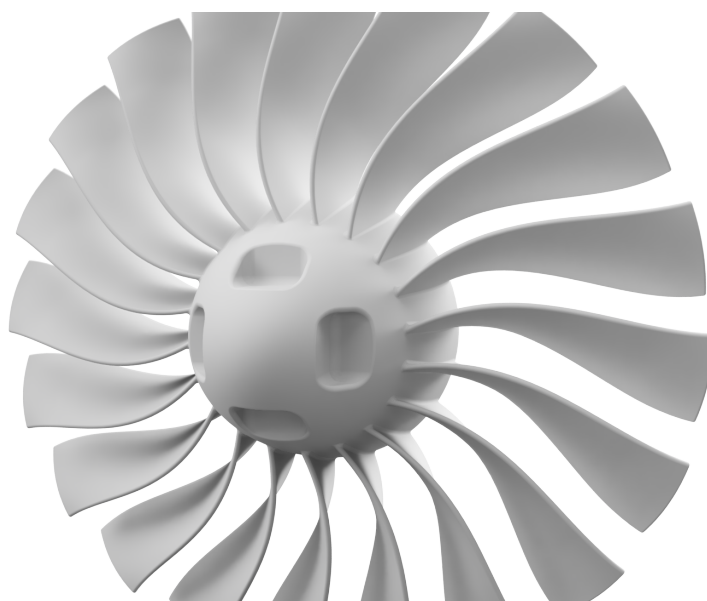
Vidare gjordes en genomskärning av modellen där en tredjedel av de statiska komponenterna avlägsnades. Från ett vertikalt plan skars 120 grader bort från alla delar som inte roterade, bortsett från fästen för lager och ringhjulet i planetväxeln. Detta gjordes för att synliggöra de roterande delarna samt statorerna och förbränningskammaren inuti i motorn, se Figur 5.7. Vidare gjordes förenklingar i geometrin för att eliminera onödiga detaljer och därmed förbättra förståelsen för motorns funktion.



Figur 5.7: *Borttagen geometri för att synliggöra roterande komponenter.*

5.3.4 Ergonomi

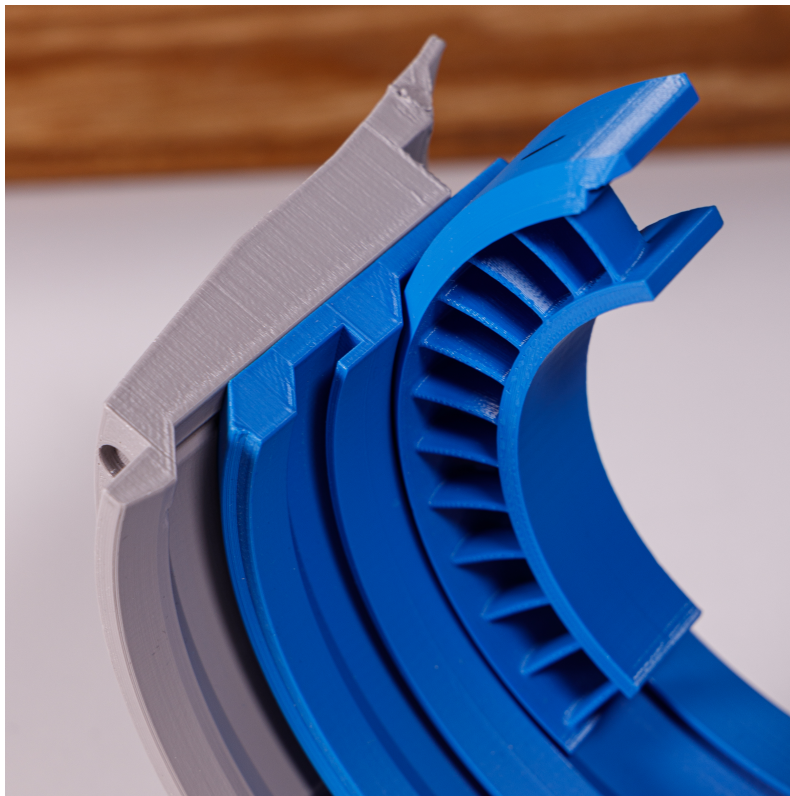
Under designprocessen ägnades ytterligare uppmärksamhet åt den ergonomiska aspekten av modellens användning, med särskilt fokus på de komponenter som var avsedda att vara utbytbara för att demonstrera de olika koncepten. Turbinbladet designades med ett grepp för att enkelt kunna avlägsna delen, se Figur 5.8. Dessutom konstruerades de modulära statorerna med handtag, vilket både förenklade monteringen och utbyte av delar vid behov.



Figur 5.8: *Grepp på fläkt för enkelt utbyte.*

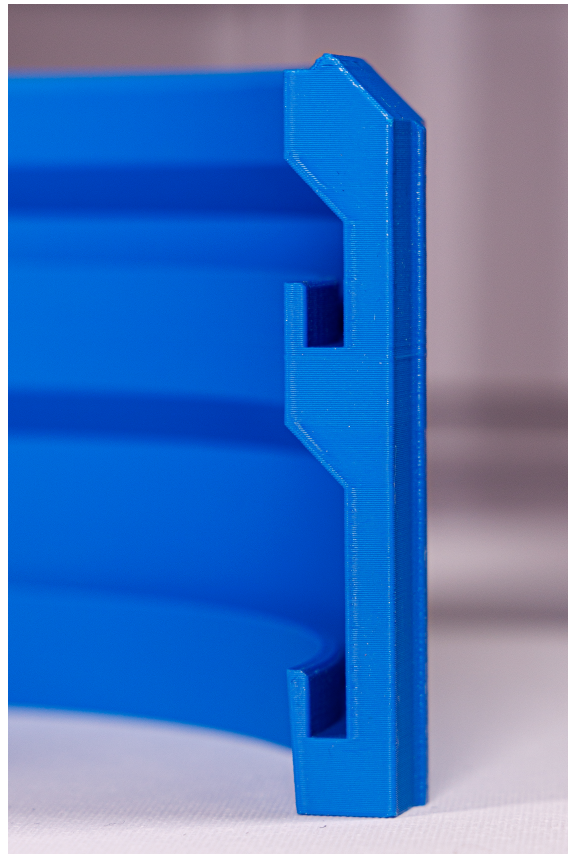
5.3.5 Anpassning för 3D-utskrift

Under tillverkningen av modellen, som främst skedde genom 3D-utskrift, gjordes en del Anpassningar för att underlätta montering och tillverkning. På grund av att precisionen inte är tillförlitlig vid 3D-utskrift designades alla sammansatta delar med visst glapp. Det glapp som valdes i de flesta fallen var 0,3 mm, detta för att säkerställa en god passform. Se Figur 5.9.



Figur 5.9: Delar med lite glapp mellan så att de enkelt kan monteras ihop.

Axiella spår implementerades för att förhindra rotation av delar kring motorns axel. Vidare krävdes stödmaterial för utstickande sektioner, då 3D-skrivare skapar objekt lager för lager. Fokus lades på att minimera behovet av stödmaterial genom att undvika horisontella ytor på undersidan av överhängande detaljer. Istället gjordes en fas med lutning på 45 grader, se Figur 5.10. Där stödmaterial var svårt att undvika ökades det vertikala glappet till intilliggande delar från 0,2 till 0,4 mm för att kompensera för den grova ytan där stödmaterial fästs. Även i programvaran för utskriftsförberedelser justerades avståndet mellan stödmaterial och den utskrivna delen till cirka 0,23 - 0,26 mm för att underlätta separation och efterbearbetning.



Figur 5.10: *Inga vertikala överhäng eller för mycket lutning gör att många delar kunde skrivas ut helt utan stödmaterial.*

Specifika komponenter, så som fläkten med dess höga lutningsvinkel på bladen, krävde stödmaterial vid utskrift. Dessutom ökades tjockleken på vissa komponenter, eller så fylldes deras interna volym, då dessa hade blivit för tunna om de hade följt skalenliga mått.

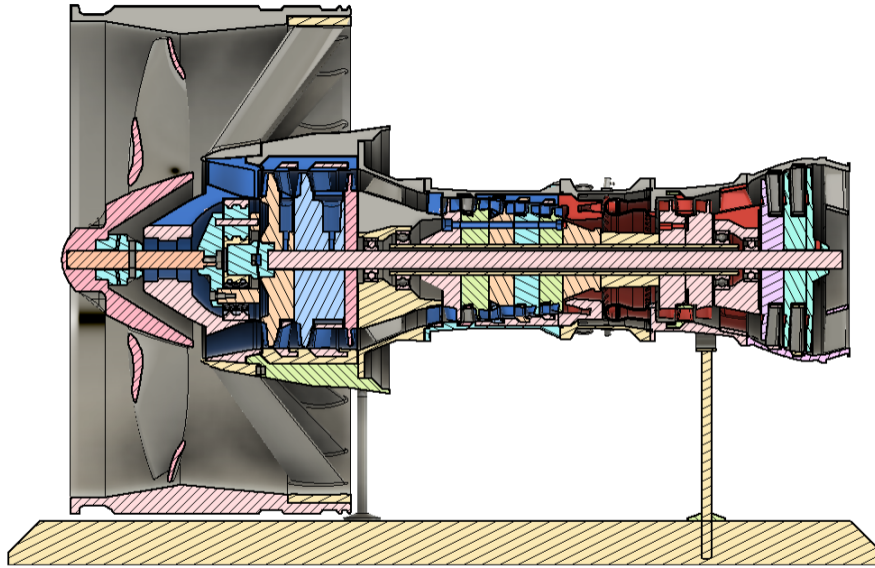
Anpassningar genomfördes även för montagedetaljer för axlar, skruvar och lager. För de delar som sitter på axlarna ökades håldiametern mellan 0,1 - 0,3 mm. Hos majoriteten av de hål där skruvar fästes ökades diametern med 0,25 mm och lagersätenas diameter med cirka 0,05 mm. För att kompensera mot radien som skapades i hörn där skrivaren byter riktning, omformades hålen för muttrar från en hexagonal till en konvex form. På andra delar kunde detta problem undvikas genom att fasa ett yttre hörn som låg mot ett inre hörn i en annan del. En del skruvhål, som var tvungna att skrivas ut vertikalt, designades med ett tunt lager material över hålet för att utnyttja skrivarens förmåga att skriva utan stödmaterial. Detta lager kunde enkelt genomträngas när skruven sedan skulle monteras.

Som material på modellen användes i första hand PETG på utskrivna delar, eftersom det lämpar sig väl som material för utskrift av mekaniska delar. De största delarna skrevs ut med PLA på en större skrivare eftersom PLA skrivs ut med en lägre temperatur. Detta beslut togs eftersom PETG kan vara problematiskt vid utskrift i kalla miljöer. Då den större tillgängliga skrivaren saknade ett hölje för att hålla

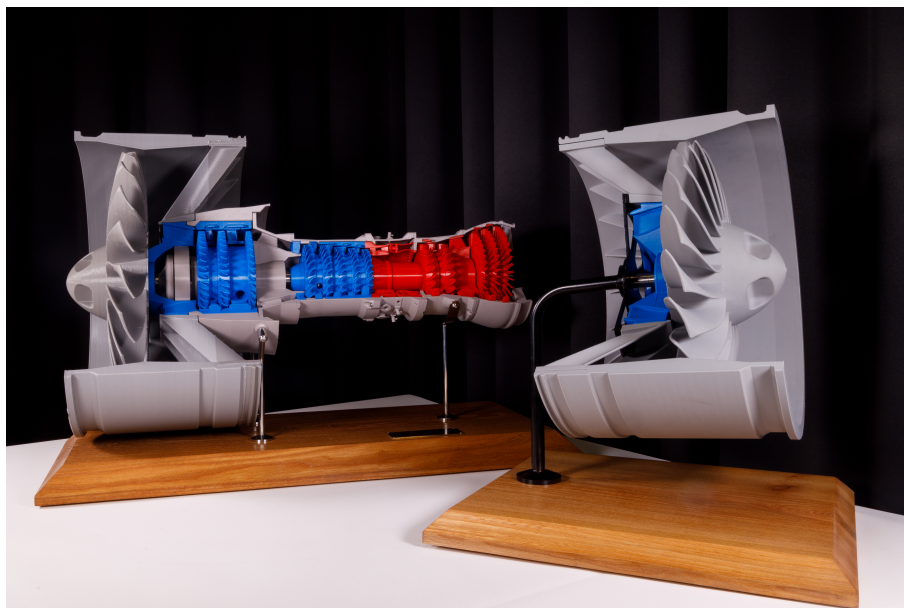
komponenten i stadig temperatur under utskrift riskerades annars komponenten att utsättas för inre spänningar och deformation om PETG hade använts.

5.4 Fysisk modell

Den fysiska modellen tillverkades i stor utsträckning genom 3D-utskrift i PETG, som tidigare nämnt. Utöver 3D-utskrift användes dessutom andra delar så som inköpta maskinelement och stativ för att kunna montera alla komponenter. En fullständig CAD-modell av motorn visas i Figur 5.11, och den färdiga modellen visas i Figur 5.12.



Figur 5.11: *Genomskäring av fullständig CAD-modell.*



Figur 5.12: *Visar den färdiga modellen*

5.4.1 Maskinelement

I ett tidigt skede av designfasen bestämdes vilka maskinelement och standardkomponenter som skulle integreras i konstruktionen, så som rullningslager, skruvar och spårningar. Genom att prioritera användning av standardkomponenter kunde fokus läggas på övriga delar på modellen, för att undvika att specialtillverka alla komponenter. En lista på de standardkomponenter som använts kan hittas i Bilaga B.

För att minimera den totala kostnaden av modellen, och på så vis möta budgeten, valdes rullningslager och axeldiametrar ut tidigt i designprocessen. Totalt blev det fyra roterande axlar i modellen; lågtrycksaxeln, högtrycksaxeln och två olika fläktaxlar, en för vardera utbytbar modul. Varje axel lagrades med hjälp av två rullningslager. Genom att välja enkelradiga spårkullager av populär serie och utan tätningar kunde kostnaden hållas låg. Dessutom nyttjades enbart två olika lagerdimensioner för att minska komplexiteten och för att minimera antalet unika komponenter i modellen. Till högtrycksaxeln valdes spårkullager från SKF med beteckningen 6005 och till lågtrycksaxeln samt båda fläktaxlarna valdes spårkullager med beteckningen 6202, se Figur 5.13. Tätningar bedömdes inte behövas eftersom den färdiga funktionsmodellen skulle befinna sig i ett inomhusklimat och lagren borde på så vis inte utsättas för kontaminanter i någon utsträckning som kunde påverka funktionen. Dessutom var den mekaniska belastningen på lagren försumbar, vilket gjorde livslängdsberäkningar överflödiga. På grund av friktion beroende på val av tätning hade axlarna roterat med ett större motstånd vilket inte heller var önskvärt.

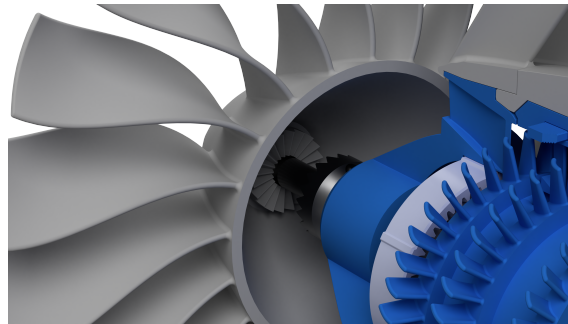


Figur 5.13: *Fläktaxel, lågtrycks- och högtrycksaxel, samt tillhörande spårkullager.*

Med lagren bestämda kunde även axeldiametrarna fastslås. Dessa dimensioner påverkade i sin tur designen av övriga komponenter som sedan skulle monteras på axlarna. Till lågtrycksaxeln, och de båda fläktaxlarna, valdes axelmaterial med diameter 15 mm och till högtrycksaxeln valdes ett rör med ytterdiameter 25 mm och godstjocklek 2 mm. Detta material fanns tillgängligt på institutionen och behövde således inte köpas in.

Eftersom motorns främre modul skulle vara enkelt demonter- och utbytbar krävdes en lösning för att koppla samman fläktaxlarna med lågtrycksaxeln så att vridmomentet kunde överföras utan att noggrant behöva passas in av användaren. Att nyttja en plattkil skulle medföra att användaren tvingas vrida och passa in kilspåret med kilen, vilket medför onödig komplexitet i processen. Även en polygonformad koppling eller ett långsgående bomförband valdes bort av samma anledning. Istället föll valet på att nyttja så kallade Hirth-kopplingar som både linjerar axlarna och tillåter vridmoment att överföras, samtidigt som de inte kräver mycket inpassning för att kopplas samman. Hirth-kopplingarna består av radiella kuggar med en spetsvinkel

på 60 grader som styr upp och centrerar axlarna när de förs samman. Kopplingarna syns i Figur 5.14 och Figur 5.15.



Figur 5.14: *Hirth-koppling mellan fläkt och fläktaxel*

För att fixera axlarna i längdled användes utvändiga spårningar, två stycken per axel, så att rörelse i båda riktningar förhindrades. Vidare användes fjäderstift för att fixera Hirth-kopplingarna mellan fläkt och fläktaxel, samt fläktaxel och lågtrycksaxel. Till axlarna som bar upp planeterna i växeln köptes cylindriska pinnar in för att minska friktionen jämfört med utskrivna stift i plast som först testades, se Figur 5.18.

På de ställen där skruvar behövde dras i plast monterades värmeinsatsgängor i mäsing med lödkolv för att dels vinna viss hållfasthet men även för att tillåta att demontera och återmontera modellen utan att gängorna slits ut.

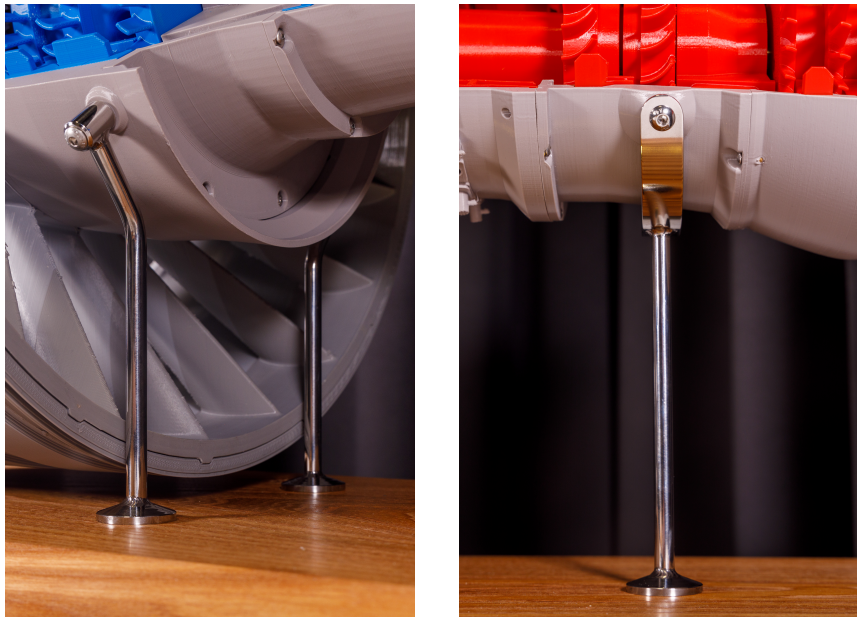
I modellen sitter även magneter mellan höljet till fläktarna och kärnans hölje, vilket kan ses i Figur 5.15. Dessa används för att lätt kunna byta mellan de två fläktmodulerna. Utöver magneterna är anläggningsytan på kärnan konisk, med tillagda spår för att säkerställa att höljet styrs in till rätt position. Det placerades också magneter mellan fläktarna och deras axlar, samt i Hirth-kopplingarna mellan fläktaxeln/planetväxeln och lågtrycksaxeln.



Figur 5.15: *Kärnan framifrån. Längs ytterkanten sitter magneter som dockas ihop med magneterna i respektive fläkthölje.*

5.4.2 Motorstativ

För att motormodellen skulle vara enkel att handha och kunna användas som tänkt, förutsattes att den stod stadigt monterad i ett stativ. Ett minimalistiskt designspråk valdes för stativet med motiveringen att modellens upphängning inte skulle dra fokus från själva turbofläktmotorn. Det framtagna stativet bestod av en träplattform med fasade kanter av träslaget alm. Tre rostfria stänger förband därefter motorkärnan med bottenplattan. De rostfria pelarna placerades så att de främre modulerna enkelt kunde skiftas utan att interferera med stativet, se Figur 5.16. Ritningar för stativet återfås i Bilaga C.



(a)

(b)

Figur 5.16: *Stativ som fäster motornkärnan i träskivan. Figur 5.16a visar det främre stativet och Figur 5.16b visar det bakre stativet.*

Eftersom modellen hade två olika fläktmoduler med tillhörande höljen saknade alltid det ena höljet en avlastningsplats. Därför tillverkades ytterligare ett stativ för att hålla fast och skydda det hölje som inte sitter på motorn för tillfället. Stativet bestod av en liknande träplatta med en fast stång som böjdes ca 94 grader en bit upp. Där svetsades sedan en vattenskuren plåt fast, formad för att utnyttja magneterna som redan satt på höljet. Kanterna bockades för att avlasta vikten av höljet. Stången och plåten pulverlackerades till sist i svart färg. Stativet kan ses i Figur 5.17.



Figur 5.17: *Extra stativ som den oanvända fläktmodulen kan monteras på.*

5.4.3 Utskrivna delar

Den färdiga modellen bestod huvudsakligen av delar utskrivna med 3D-skrivare. Eftersom mycket fokus lades på att delarna skulle passa ihop från början var det ytterst få delar som behövde ändras eller skrivas ut flera gånger. Tre utskrifter misslyckades av okända anledningar, men lyckades vid ett andra försök. Statorerna, vilka skjuts in från sidan igenom ett cirkulärt spår, behövde ändras för att öka mellanrummet mellan de statiska bladen och de roterande bladen.

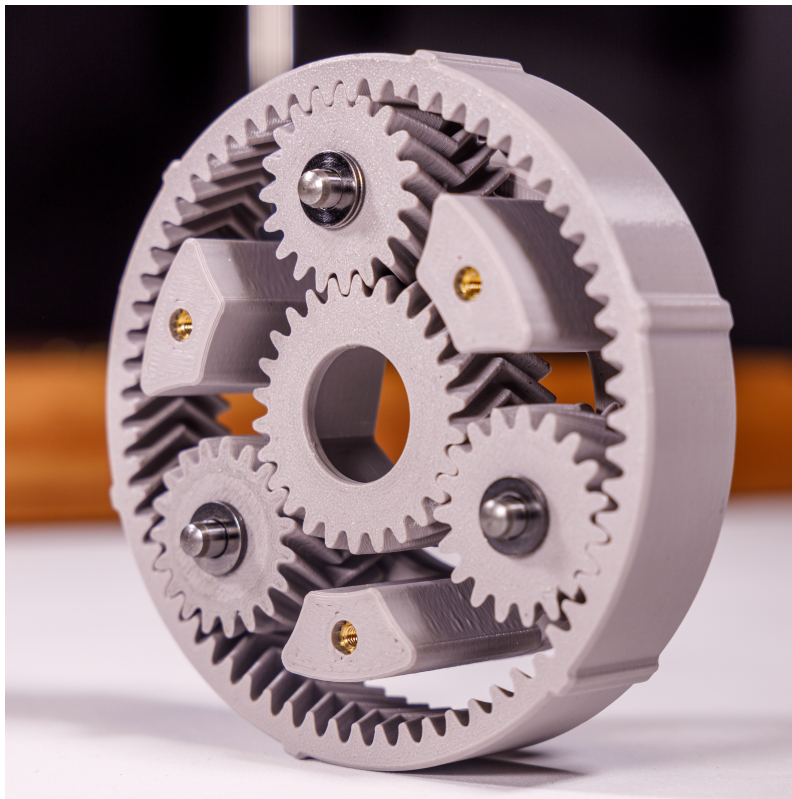
Nästan alla delar passade ihop utan någon efterbearbetning. De delar som krävde mest bearbetning var de som skulle sitta på högtrycksaxeln. På grund av att axeln inte var perfekt cirkulär och hålen i de utskrivna delarna var för små krävdes upprymning av hålen för god passform. Flera av delarna med blad krävde också en del stödmaterial. Delarna hade därför kunnat designas annorlunda för att minska mängden överblivet material, men då resultatet blev bra av efterbearbetningen gjordes inga sådana förändringar.

5.4.3.1 Planetväxel

Den mest komplexa komponenten i modellen var planetväxeln, vilken designades med ekvationsbaserade kurvor för att få fram evolventprofilerna på kuggarna. Det yttersta kugghjulet (ringhjulet) hade 64 kuggar, de tre planeterna hade 19 kuggar vardera, och solhjulet i mitten har 26 kuggar. Ringen fästes i höljet och kunde därmed inte rotera, medan solhjulet kopplades till lågtrycksaxeln, och en bärare kopplad till planeterna kopplades till fläktaxeln. Utväxlingen från fläkten blev 3,46 och valdes inte för att efterlikna den riktiga motorn, utan anpassades för att tydlig-

göra skillnaden i rotationshastighet hos axlarna. Beräkningar utfördes endast för val av antal kuggar, samt för att kugghjulen skulle passa i varandra med vald modul. Eftersom kugghjulen var ekvationsbaserade kunde de enkelt ändras i en textfil med variabler.

Kugghjulen snedskars för att förhindra axiell rörelse, se Figur 5.18. Eftersom planetväxeln skrevs ut med 3D-skrivare kunde den skrivas ut färdigmonterad. För att få lagom glapp mellan kuggarna, så att de inte smälte ihop, anpassades storleken på kuggarna hos planeterna tills glappet blev lagom stort för att skrivas ut. För att minska friktion och minimera krafter på kuggarna i annan riktning än radiell gjordes bäraren till planeterna relativt robust. Lagren på axlarna användes också för att minska axiell kraft mot planetväxeln.



Figur 5.18: Planetväxeln tillsammans med ena halvan av planetbäraren

5.5 Kravuppfyllnad

Modellen uppfyller de flesta krav och önskemål som kan ses i tabell B.1 i bilagor.

5.5.1 Komponenter

Modellen uppfyller alla krav för komponenter då den har fläkt, växel, kompressor, förbränningskammare och turbiner.

5.5.2 Prestanda

Modellen uppfyller även kraven för prestanda då alla axlar kan rotera fritt samt att komponenterna är färgkodade och framdelen med fläkt, hölje och växel enkelt går att byta ut.

5.5.3 Användningsmiljö

Modellen tål att stå i rumstemperatur och klarar därav kraven på användningsmiljö. De mest känsliga materialen ansågs som plasterna. PLA tål upp till 60 °C och PETG upp till 75 °C. Plasten tål inte UV-ljus speciellt bra och därför bör inte modellen stå vid ett fönster.

5.5.4 Livslängd

Det är svårt att säga om modellen uppfyller kraven för livslängd. Men vid normal användning i kontorsmiljö utan direkt solljus bör det enda slitaget vara på kullagren som är överdimensionerade för lasten.

5.5.5 Storlek

Modellen klarar av alla krav för storlek då den håller sig inom ramen på 700 mm i längd samt 450 mm i höjd och djup.

5.5.6 Massa

Kravet på massa låg på 15 kg och modellen väger in på 12 kg och klarar därmed kraven i massa.

5.5.7 Ergonomi

Modellens utbytbara delar är både lätta att byta utan verktyg och lättåtkomliga och modellen klarar därmed kraven i ergonomi.

5.5.8 Säkerhet

Modellen klarar av kraven i säkerhet då den står stabilt och inte har några vassa kanter.

5.5.9 Estetik

Genom hela design processen har olika turbofläktsmotorer studerats och modellen är gjort för att efterlikna dessa så mycket som möjligt och uppfyller därmed kravet i estetik.

5.5.10 Material

Då nästintill hela modellen är 3D-printad uppfyller den kraven i material.

5.5.11 Tillverkningskostnad

Önskemålet i tillverkningskostnad var att hålla sig till en budget på 2000 kr något som gjorts och därmed är önskemålet uppfyllt.

5.5.12 Underhåll

Under processen att bygga modellen har olika delar gått sönder och då behövt bytas ut därmed uppfyller den kravet att trasiga delar ska kunna bytas ut.

6

Diskussion

För att verifiera projektets resultat har aspekter som måluppfyllnad, säkerhet hos resultatet och potential för vidareutveckling diskuterats. Syftet med projektet var att genomföra en teoretisk studie av flygmotorer och drivmedel, samt att tillverka en fysisk modell för undervisning. Den teoretiska studien skulle jämföra olika typer av motorer och drivmedel, ta fram likheter och skillnader mellan dessa, samt ge en indikation på vart flygindustrin är på väg. Modellen skulle visa designskillnader mellan olika konfigurationer av turbofläktmotorer. Dessutom skulle projektet besvara tre frågor, vars resultat analyseras i följande avsnitt.

6.1 Fråga 1

Vilka alternativ för drivning av kommersiella flygplan i framtiden finns det, med avseende på motorer och drivmedel?

Den teoretiska studien har undersökt framförallt fem olika typer av motorer och fyra olika typer av drivmedel, inklusive flygfotogen och elektricitet. Genom att analysera för- och nackdelar med varje alternativ har dess framtidsutsikter undersökts. Resultatet blev att turbofläktmotorer och turbopropmotorer troligtvis kommer fortsätta användas i relativt stor utbredning, men att även propfanmotorn och elektriska motorer kan komma att användas mer i framtiden. Gällande drivmedel är både bibränsle och vätgas relevanta alternativ för framtiden, där bibränslen redan tillämpas till viss del och har en stor potential att kunna ersätta mycket av användningen av flygfotogen inom en relativt snar framtid. Vätgas däremot har fortfarande en hel del utveckling kvar för att kunna användas i en större skala, men har en mycket hög potential när det väl kan börja användas. Genom detta resultat kan det bekräftas att frågan har undersökts och besvarats. Däremot finns det stor potential till fortsatt forskning inom området då endast ett fåtal nya koncept har undersökts och på relativt ytlig nivå. Säkerheten i resultatet är däremot rätt hög då flera källor har undersökts och samma information har påträffats på flera ställen, samt bekräftats av den genomförda intervjun.

6.2 Fråga 2

Vilka likheter och skillnader finns det hos de mest populära motor- och drivmedelsalternativen för drivning av kommersiella flygplan i framtiden?

Relevanta motoralternativ för framtiden har diskuterats och likheter och skillnader har undersökts. Jämförelsen har baserats på tre utvalda kriterier; ljudnivå, utsläpp och prestanda. Resultatet av jämförelsen beskrivs mer i detalj i slutsatsen, men det som kan vara värt att nämna är att varje motor har både för- och nackdelar vilket visar på att de troligtvis kommer användas parallellt i olika grad.

Även relevanta drivmedelalternativ har jämförts med avseende på ett flertal kriterier. Bland drivmedlen är den tydligaste likheten mellan flygfotogen och SAF, då den senare har tagits fram för att efterlikna flygfotogen så mycket som möjligt. Dock skiljer sig hållbara flygbränslen mot varandra beroende på tillverkningsprocess och råmaterial. En stor fördel är de låga utsläppen. Till skillnad från SAF skiljer sig vätgas en hel del från flygfotogen både i tillverkning, utsläpp och användning. Dessutom måste vätgas kylas ned för att omvandlas till flytande form, något som kräver en del modifikationer. En stor fördel med vätgas är att det, till skillnad från flygfotogen, kan vara helt fritt från koldioxidutsläpp, om det produceras på rätt sätt.

Med detta kan det alltså bekräftas att även denna fråga har besvarats, om än ytligt. Även här beror säkerheten främst på källorna och det finns stor potential till vidareutveckling. Ett exempel skulle vara att analysera elektricitet som drivmedel ytterligare och jämföra mot de andra valda drivmedlen.

6.3 Fråga 3

Hur kan en fysisk modell demonstrera funktion och olika konfigurationer hos en turbofläktsmotor på ett pedagogiskt sätt?

Vid framtagandet av den fysiska modellen specificerades krav och önskemål i en kravspecifikation, vilken återfinns i Bilaga B. För att analysera modellens måluppfyllnad jämförs därför lättast det färdiga resultatet mot kravspecifikationen.

Till att börja med har samtliga komponenter som nämndes i kravspecifikationen inkluderats i modellen, inklusive roterande axlar och utbytbar fläktmodul. Fläktmodulen gick lätt att byta utan verktyg och var lättåtkomlig, dessutom gjordes modellen stabil med hjälp av stativet och innehöll inga vassa kanter. Även övriga komponenter gick att byta vid behov. Genom hela designprocessen har olika turbofläktsmotorer studerats och modellen har utformats för att efterlikna dessa så mycket som möjligt, men också anpassats för att vara pedagogiskt genom färgkodning. Modellen klarar också alla krav för storlek då den håller sig inom kraven på 700mm i längd, samt 450mm i höjd och djup. Vikten av modellen uppgick till 12 kg.

De valda materialen gjorde modellen tålig i rumstemperatur då de mest känsliga materialen ansågs vara plasterna, vilka tålde upp till 60 °C respektive 75 °C. De tålde dock inte UV-ljus speciellt bra och modellen bör därför inte ställas vid ett fönster, vilket den inte är ämnad att göra. Vid normal användning i kontorsmiljö utan direkt solljus uppskattades det enda slitaget vara på kullagren, vilka är överdimensionerade

för lasten och därmed bör modellen även uppnå kraven på livslängd. Budgeten för modellen var 2000 kr, vilken har hållits och därmed är även det önskemålet uppfyllt. Med detta kan slutsatsen dras att samtliga krav och önskemål uppfylldes.

Vidareutvecklingspotentialen ligger främst i att få med fler detaljer och konfigurationer, samt undersöka hur funktionen kan visualiseras på ett ännu mer pedagogiskt sätt.

6.4 Säkerhet hos resultat

Då flera av de undersökta områdena ännu är under utveckling är antalet pålitliga källor relativt få. Företag vill hålla sina projekt hemliga, och en del experiment kan vara missvisande då de ännu inte hunnit bekräftats genom att utföras på större skala. För att hitta information om dessa nya koncept har därför ett stort antal källor behövts undersökas, vilket kan innebära en ökad risk för felaktig och/eller missvisande information. För att minska denna risk har åtgärder vidtagits, så som att endast använda pålitliga källor för ny information, medan mindre pålitliga källor endast fått användas för att bekräfta tidigare funnen information. Alla källor har redovisats i rapporten så att läsaren kan undersöka informationen vidare och dra egna slutsatser kring hur tillförlitlig källorna är.

En intervju har också genomförts med en representant från företaget GKN Aerospace. Då detta endast varit en muntlig källa kan information vara felaktig. För att minska risken för detta har en transkribering skickats till respondenten som därefter kunnat bekräfta att informationen är korrekt. Dessutom har information endast använts för att bekräfta andra källor, och därmed inte som en självstående källa.

Då modellen har anpassats för undervisning kan det antas säkert att denna uppfyller målen på någon nivå. Eftersom den ännu inte använts i lärandeändamål är det dock osäkert om utomstående personer kommer att uppfatta den som tillräckligt pedagogisk, och därmed är det oklart till vilken nivå som modellen uppfyller just detta krav. Övriga krav, så som att vara modulär och visa på skillnader i konstruktion vid olika drivmedel är uppfyllda då sådana anpassningar har gjorts.

6.5 Vidareutveckling

Då det finns en viss risk för felaktig eller bristande information i litteraturstudien hade en vidareutveckling varit att inkludera fler källor för att kunna bekräfta informationen ytterligare. Om tid och resurser finns hade även egna experiment kunnat utföras, samt fler intervjuer, för att bekräfta informationen ytterligare.

Gällande den fysiska modellen hade en rimlig vidareutveckling varit att göra undersökningar där modellen använts i praktiken och användare fått utvärdera hur väl den uppfyller de pedagogiska målen. Därmed kan bristande delar hittas och utvecklas för att göra modellen mer pedagogisk. Vidare hade undersökningar av design och

lärande kunnat göras för att hitta mer optimala val av bland annat färgkodningen. Till sist hade även fler detaljer kunnat tas fram och modellen hade kunnat göras ännu mer modulär för att underlätta visualisering av mindre komponenter.

7

Slutsats

Av litteraturstudien kan ett flertal slutsatser dras gällande både motorer och drivmedel. Även slutsatser angående framtidsutsikter inom flygbranschen har gjorts.

7.1 Motorer

Slutsatserna för motorerna sammanfattades enligt följande.

7.1.1 Turbofläkt

Fläkten längst fram i motorn bidrar med mycket kraft utan att öka bränsleförbrukningen, vilket gör den mycket mer effektiv än exempelvis en turbojetmotor. Den är dock mindre effektiv än en turboprop, om inte dess bypass-förhållande är mycket hög. Den är väldigt effektiv vid höga hastigheter och används för långa transporter i hög hastighet och på hög höjd.

7.1.2 Turboprop

Turbopropsmotorn har högre bypass än turbofläktsmotorn och är därmed ännu mer bränslesnål. Den är även mer effektiv på låg höjd och kan både starta och landa på kortare sträckor tack vare propellerbladens luftmotstånd. Motorn har relativt låg vikt och ger därför mer kraft per kilogram, samt kräver mindre och lättare underhåll. Den största nackdelen är att turbopropsmotorn inte är lämplig för långa transporter då den tappar effektiviteten på hög höjd, samt nära och över ljudhastigheten. Därför används den främst för lägre hastigheter än turbofläktsmotorn och på lägre höjd, där den ofta utsätts för större risk för turbulens, oljud och oväder. Propellern gör den även mer högljudd vid högre hastigheter.

7.1.3 Propfan

På samma sätt som turboprop- och turbofläktsmotorerna ger propellern och dess bypass mycket bra effektivitet. Det gör den energisnål och bra för både klimat och ekonomi. Den lämpar sig även för lägre hastigheter och lägre höjd, och är därför ett bra alternativ jämfört med konventionella STOL-flygplan. Dock är propfanmotorn relativt högljudd, samt inte fullt utvecklad än. Man tror att det är först på 30-talet som den kan komma ut på marknaden, vilket är en bit in i framtiden, men fortfarande relativt snabbt jämfört med till exempel vätgasdrivna flygplan.

7.1.4 Elektriska motorer

En stor fördel med elektriska motorer är effektiviteten, samt att det är ett av få alternativ som har möjligheten att vara helt utsläppsfria. En annan fördel är ljudnivåerna som jämfört med andra motortyper kommer vara mycket lägre. Nackdelarna ligger främst i batteritekniken som idag inte är tillräcklig för att kunna ersätta de bränsle drivna flygplanen på annat än mycket korta sträckor.

7.2 Bränslen

Slutsatserna för drivmedlerna sammanfattades enligt följande.

7.2.1 SAF

Just nu är HEFA det mest tillgängliga bränslet bland alla hållbara flygbränslen, men jämfört med flygfotogen är SAF fortfarande mindre tillgängligt då mängden producerat bränsle är begränsad. En annan skillnad som begränsar användandet av SAF i större utsträckning är att bränslet har sämre smörjförmåga jämfört med flygfotogen. Jämfört med vätgas som ännu inte används konventionellt är det dock mer tillgängligt då det redan används till viss grad. Miljöpåverkan för SAF jämfört med flygfotogen är betydligt bättre. Utsläpp av växthusgaser är mellan 50 och 80 % mindre än flygfotogen. Dock släpper SAF fortfarande ut koldioxid och har samma NO_x-utsläpp.

7.2.2 Vätgas

Vätgas skiljer sig åt mot SAF och flygfotogen i och med att de krävs större modifikationer av bränslekammare för förbränning av vätgas. Det beror bland annat på vätgasens uppbyggnad, samt att det är betydligt mer lättantändligt. Produktionen skiljer sig också eftersom det inte ställs några krav på hur framställningen av väte sker med avseende på utsläpp. För att åstadkomma en hållbar användning av väte inom flygsektorn måste även produktion och råmaterial vara hållbara. Likt SAF behöver produktionskapaciteten öka för att möta den ökande efterfrågan.

7.3 Framtidsutsikter

Från de motor- och drivmedelsspecifika slutsatserna har slutsatsen gjorts att framtiden troligtvis kommer bestå av en blandning av olika alternativ. Inom en snar framtid är det mest rimligt att fokusera på att öka användningen av SAF, tillsammans med elektriska flygplan och att förbättra redan existerande konfigurationer som turbofläktmotorn och turbopropsmotorn. På längre sikt är det dock rimligt att först tänka att propfanmotorn kan utvecklas och börja användas kommersiellt. Därefter, när teknologin kring vätgasanvändningen utvecklats tillräckligt, kommer troligtvis vätgas användas parallellt med SAF och elektricitet.

Det är också rimligt att tänka att olika lösningar kommer användas till olika tillämp-

ningar. Exempelvis kommer det krävas mycket utveckling för att använda elektriskt drivna flygplan för längre sträckor, därför är det mer troligt att dessa kommer användas för kortare sträckor. Däremot har SAF och vätgas relativt hög energidensitet och kan användas för längre sträckor, tillsammans med propfanmotorerna.

Då det sker mycket utveckling inom området är det inte helt orimligt att tänka att ännu fler alternativ kan komma att bli aktuella i framtiden. Ett exempel på detta är så kallad 'water enhanced turbofan', vilken inte undersökts i detta projekt men nämndes under intervjun och ansågs intressant.

Litteratur

- Academy, N. A. (2021 november). What Are the Different Types of Aviation Fuel? - National Aviation Academy. Hämtad 29 april 2024, från <https://www.naa.edu/aviation-fuel/>
- Academy, N. A. (2023). Advantages and Disadvantages of Turbo-prop Engines. <https://www.naa.edu/advantages-and-disadvantages-of-turbo-prop-engines/>
- Aerospace, H. (2024). Learn more about the ES-30. <https://heartaerospace.com/es-30/>
- Air Tahiti. (2024, 26. april). *ATR - official website - air tahiti* [Official website]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.airtahiti.com/atr>
- AirBus. (2024). Hybrid and electric flight. Hämtad 6 februari 2024, från <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight>
- Airbus. (2024a, 26. april). *AIRBUS A220-100* [Airbus A220-A100]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.lufthansagroup.com/en/company/fleet/swiss-and-edelweiss-air/airbus-a220-100.html>
- Airbus. (2024b, 26. april). *AIRBUS A320NEO* [AIRBUS A320NEO]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.lufthansagroup.com/en/company/fleet/lufthansa-and-regional-partners/airbus-a320neo.html>
- Alaska Airlines. (2024). *Boeing 737-900 Aircraft Information* [Alaska Airlines]. Hämtad 26 april 2024, från <http://www.alaskaair.com/content/travel-info/our-aircraft/737-900>
- Aslam, S., Rani, S., Lal, K., Fatima, M., Hardwick, T., Shirinfar, B., & Ahmed, N. (2023). Electrochemical hydrogen production: Sustainable hydrogen economy. *Green Chemistry*, 25(23), 9543–9573. <https://doi.org/10.1039/D3GC02849F>
- Balat, M., & Balat, M. (2009). Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 3589–3603. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.067>
- Blain, L. (2023 juni). GE resurrects the propfan aircraft engine, cutting fuel burn by 20%. <https://newatlas.com/aircraft/ge-cfm-rise-open-fan/>
- Britannica. (2024). Airplane - Jet, Propeller, Glider. <https://www.britannica.com/technology/airplane/Types-of-aircraft>
- Bureau of Transportation Statistics. (2017 maj). Long-Distance Travel | Bureau of Transportation Statistics. Hämtad 6 februari 2024, från https://www.bts.gov/bts/archive/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_survey/section_03

- Chalmers. (2022 december). Genomföra kandidatarbete. Hämtad 6 februari 2024, från <https://www.chalmers.se/utbildning/dina-studier/kandidat-och-examensarbete/kandidatarbete/genomfora-kandidatarbete/>
- Crouch, T. D., William Kingdon, R., & James Boyne, W. (2024). History of flight - Jet Engines, Aviation Pioneers, Air Travel | Britannica. Hämtad 6 februari 2024, från <https://www.britannica.com/technology/history-of-flight/The-jet-age>
- Depitre, A. (2006 november). Noise Certification Workshop. https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/Noise-Certification-Workshop-2006/Depitre_4.pdf
- EASA. (2022). Miljörapport avseende europeisk luftfart 2022. https://www.easa.europa.eu/eco/sites/default/files/2023-02/EnvironmentalReport_EASA_summary_SV_13-online.pdf
- EASA. (2024a). Climate change | EASA Eco. Hämtad 29 april 2024, från <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/adapting-changing-climate/climate-change>
- EASA. (2024b). Fit for 55 and ReFuelEU Aviation. <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation>
- EASA. (2024c). Hydrogen and its potential in aviation | EASA. Hämtad 16 april 2024, från <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation>
- Ershov, M. A., Savelenko, V. D., Burov, N. O., Makhova, U. A., Mukhina, D. Y., Aleksanyan, D. R., Kapustin, V. M., Lobashova, M. M., Sereda, A. V., Abdelatif, T. M., Baroutaji, A., & Ali Abdelkareem, M. (2023). An incorporating innovation and new interactive technology into obtaining sustainable aviation fuels. *Energy*, 280, 128156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128156>
- Fiji Airways. (2024a, 26. april). *ATR 42-600* [ATR 42-600]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.fijiairways.com/en-eu/book/our-fleet/ATR-42-600/>
- Fiji Airways. (2024b, 26. april). *ATR 72-600* [ATR 72-600]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.fijiairways.com/en-eu/book/our-fleet/atr-72-600/>
- Grunditz, E. (2024, 7. maj). *Introduktion till AC-maskiner* (Presentation) [Presentation].
- Henrich, I. (2024 januari). How Does a Turbofan Engine Work. <https://aeroreport.de/en/good-to-know/how-does-a-turbofan-engine-work>
- Hydrogen | airbus*. (2021, 1. juli). Hämtad 22 april 2024, från <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen>
- Hydrogen production: Natural gas reforming* [Energy.gov]. (2024). Hämtad 22 april 2024, från <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- IATA. (2023 december). SAF Volumes Growing but Still Missing Opportunities. <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>
- IATA. (2024). What is SAF? <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e99saf-what-is-saf.pdf>
- ICAO. (2023). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

- ICAO. (2024a). Conversion processes. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>
- ICAO. (2024b). ICAO Carbon Emissions Calculator (ICEC). Hämtad 29 april 2024, från <https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx>
- Icelandair. (2024, 26. april). *De havilland canada (DHC) aircraft | icelandair US* [De havilland canada DHC-8-400]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.icelandair.com/about/our-fleet/dhc-8-400/>
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. Paris. Hämtad 20 mars 2024, från https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- Integritetsskyddsmyndigheten. (2023 augusti). Dataskydd. Hämtad 6 februari 2024, från <http://www.imy.se/verksamhet/dataskydd/>
- Khandelwal, B., Karakurt, A., Sekaran, P. R., Sethi, V., & Singh, R. (2013). Hydrogen powered aircraft : The future of air transport. *Progress in Aerospace Sciences*, 60, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.12.002>
- Klug, H. G., & Faass, R. (2001). CRYOPLANE: Hydrogen fuelled aircraft — status and challenges. *Air & Space Europe*, 3(3), 252–254. [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(01\)90110-8](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90110-8)
- Kurzke, J. (2009 juni). *Fundamental Differences Between Conventional and Geared Turbofans* (Vol. Volume 1: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Electric Power; Awards and Honors). <https://doi.org/10.1115/GT2009-59745>
- Liu, X., Zhao, D., Guan, D., Becker, S., Sun, D., & Sun, X. (2022). Development and progress in aeroacoustic noise reduction on turbofan aeroengines. *Progress in Aerospace Sciences*, 130, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100796>
- Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(50), 25385–25412. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>
- Mukhopadhyaya, J., & Graver, B. (2022 juli). PERFORMANCE ANALYSIS OF REGIONAL ELECTRIC AIRCRAFT. <https://theicct.org/publication/global-aviation-performance-analysis-regional-electric-aircraft-jul22/>
- Nagel, K. +. (2024). Hållbart Flygbränsle SAF. <https://se.kuehne-nagel.com/sv/-/tjanster/flygfrakt/hallbart-flygbransle-saf>
- Proesmans, P., & Vos, R. Comparison of future aviation fuels to minimize the climate impact of commercial aircraft [Cited by: 4; All Open Access, Green Open Access]. I: Cited by: 4; All Open Access, Green Open Access. 2022. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3288>
- Rosen, G. (1971). Prop-Fan – A High Thrust, Low Noise Propulsor. *SAE Transactions*, 80, 1654–1664. Hämtad 16 april 2024, från <http://www.jstor.org/stable/44651814>

- Sanders, L. (2022 juli). Top Four Modes of Transport | Logistics | Supply Chain. Hämtad 6 februari 2024, från <https://wearedg.com/news/article/modes-of-transport-logistics>
- Shahriar, M. F., & Khanal, A. (2022). The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*, 325, 124905. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>
- Shehab, M., Moshhammer, K., Franke, M., & Zondervan, E. (2023). Analysis of the Potential of Meeting the EU's Sustainable Aviation Fuel Targets in 2030 and 2050. *Sustainability*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/su15129266>
- Shell. (2024). Civil Jet Fuel Grades. <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/civil-jet-fuel-grades.html>
- Shinmyo, T., Teramoto, S., Okamoto, K., & Nagashima, T. (2013). Optimization of Intercooled Turbofan Jet Thermodynamic Cycle Considering Weight Penalty and Pressure Loss of Heat Exchanger. *Japanese Society of Aero Space Science*, 57(5), 247–254. Hämtad 22 mars 2024, från https://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsass/57/5/57_247/_pdf
- Strömberg, H., Andersson, S., & Lundblad, A. (2024, 3. januari). *Exhaust cone heat exchanger (HEX)*.
- Svensk nationell datatjänst. (2022 november). Forskningsdata med personuppgifter. Hämtad 2 februari 2024, från <https://snd.gu.se/sv/hantera-data/planera/forskningsdata-med-personuppgifter#:~:text=Grundl%C3%A4ggande%20principer,-All%20personuppgiftsbehandling%20ska&text=Personuppgifterna%20ska%20bland%20annat%20behandlas,uttryckligt%20angivna%20och%20ber%C3%A4ttigade%20%C3%A4ndam%C3%A5l>
- Svensson, F., & Singh, R. (2004). Effects of using hydrogen on aero gas turbine pollutant emissions, performance and design. Hämtad 2 mars 2024, från <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=22e8a3b9ec3158dda62330d02d48c0b496b7d902>
- Systematisk litteraturöversikt som examensarbete. (2023 oktober). Hämtad 6 februari 2024, från <https://kib.ki.se/soka-vardera/systematiska-oversikter/systematisk-litteraturoversikt-som-examensarbete>
- Tiseo, I. (2023 september). Transport CO2 emissions shares by type. Hämtad 6 februari 2024, från <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>
- Triantafyllou, C. (2024). *Turbine of the X-Plorer 1 EC*. Hämtad 23 april 2024, från https://www.jet-x.org/uploads/4/0/3/9/40399345/turbine-01_1_orig.png
- Tyagi, V. K., & Lo, S. -. (2016 januari). Chapter 10 - Energy and Resource Recovery From Sludge: Full-Scale Experiences. I M. N. V. Prasad & K. Shih (Red.), *Environmental Materials and Waste* (s. 221–244). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00010-X>
- University, E. R. A. (2022). Turbofan & Turboprop Engines. <https://doi.org/https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066.n33>
- Westjet. (2024, 26. april). *De havilland dash 8-400 (q400)* [De havilland dash 8-400 (q400)]. Hämtad 26 april 2024, från <https://www.westjet.com/en-ca/aircraft/dehavilland-dash-8-400>

- Wilchek, C. (2024, 16. januari). *Jet fuel demand continues to recover in 2024 as sustainable aviation fuel use increases* [OPIS, a dow jones company]. Hämtad 29 april 2024, från <https://www.opisnet.com/blog/jet-fuel-demand-continues-to-recover/>
- Zare, A. A. D., Yari, M., Nami, H., & Mohammadkhani, F. (2023). Low-carbon hydrogen, power and heat production based on steam methane reforming and chemical looping combustion. *Energy Conversion and Management*, *279*, 116752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116752>
- Zhang, J., Roumeliotis, I., & Zolotas, A. (2022). Sustainable Aviation Electrification: A Comprehensive Review of Electric Propulsion System Architectures, Energy Management, and Control. *Sustainability*, *14*(10), 5880. <https://doi.org/10.3390/su14105880>

A

Insamlad Data för jämförelse

Tabell A.1: Data för ljudnivå vid olika tillfällen för turbofläkt flygplan

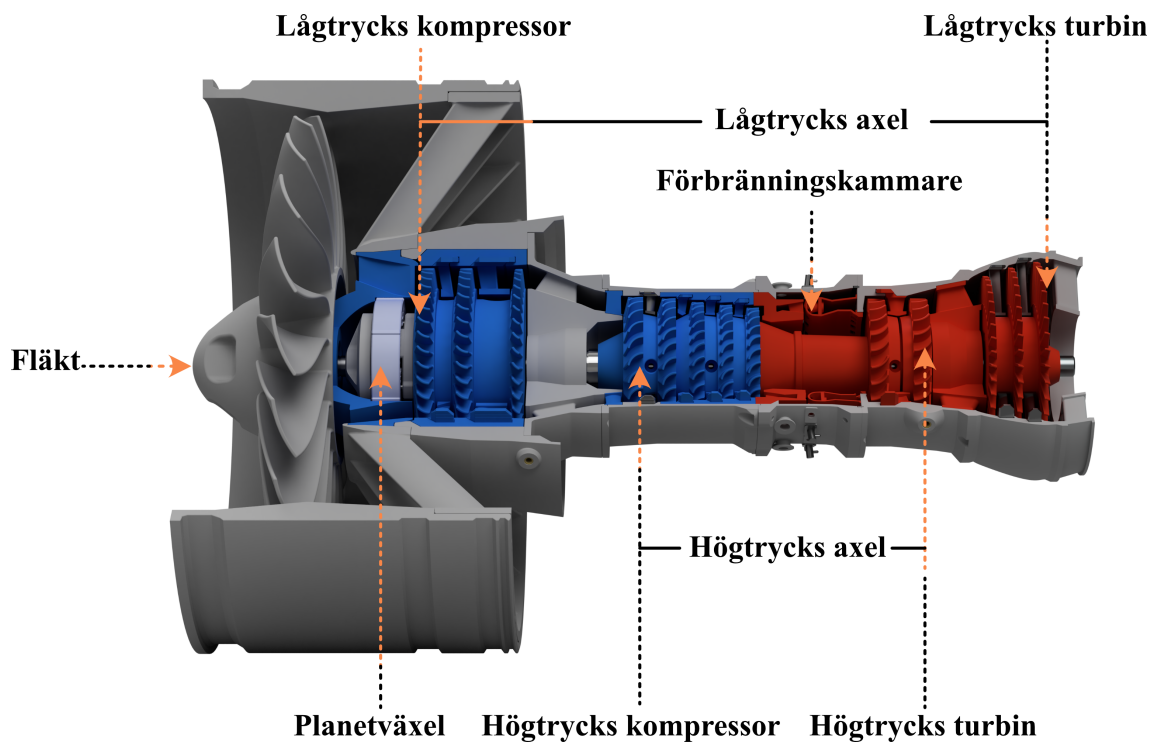
Modell	År	Maximal Dragkraft	Överflygning	Innan landning
A320-273N	2018	87,70555556	79,21388889	92,28888889
A320-273N	2020	87,16666667	79,07708333	92,36666667
A320-273N	2021	87,825	79,3	92,36666667
737-900	2008	93,82916667	83,95	95,80833333
737-900	2011	93,50769231	87,27692308	96
737-900	2012	93,49666667	85,66222222	
737-900	2015	93,63428571	85,75657143	96,27803475
737-900	2016	93,6	86,5	96,5
A220-100	2016	88,24	77,42	91,36
A220-100	2018	86,7	80,3	91,3
A220-100	2022	86	82,14	91,88
A220-100	2023	86,44	80,34	91,48333333
A220-100	2024	86,6	81,1	91,05
Medelvärde		89,59577181	82,15666838	93,22349364

Tabell A.2: Data för ljudnivå vid olika tillfällen för turboprop flygplan

Modell	År	Maximal Dragkraft	Överflygning	Innan landning
ATR 42-500	2016	94	89	98
ATR 42-500	2021	94	89	98
ATR 42-500	2022	94	89	98
DHC-8-401	2022	94	89	98
ATR 72	2010	84,35454545	81,98181818	92,87272727
ATR 72	2014	82,525	79,9	92,2
ATR 72	2015	82,6	78,35	92,25
ATR 72	2016	86,26666667	86,73333333	94,26666667
ATR 72	2018	82,55	79,38333333	92,21666667
ATR 72	2021	83,22692308	79,72692308	92,30384615
ATR 72	2022	83,15	80,24999983	92,608335
ATR 72	2023	84,75	80,5	92,5
Medelvärde		87,1185946	83,56878398	94,43485348

B

Modell



Figur B.1: *Displaybild*

Tabell B.1: Kravspecifikation

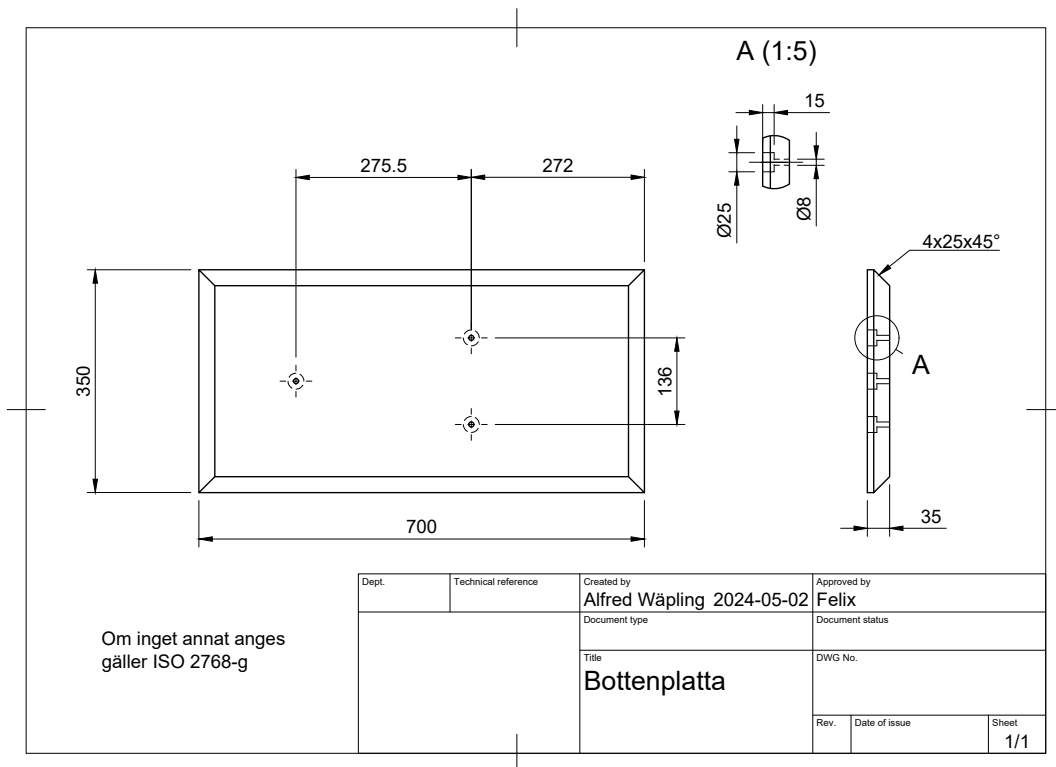
Kandidatarbete:		3d-modell av flygmotor	
Startdatum: 16-1-2024		Slutdatum: 25-5-2024	
Handledare: Julian Martinsson Bonde			
Kriterium	Målvärde	Krav/Önskemål	Verifieringsmetod
Mål			
Fysisk modell för undervisning.			
1. Komponenter			
1.1 Fläkt		Krav	Visuell kontroll
1.2 Växel		Krav	Visuell kontroll
1.3 Kompressor		Krav	Visuell kontroll
1.4 Förbränningskammare		Krav	Visuell kontroll
1.5 Turbin		Krav	Visuell kontroll
2. Prestanda			
2.1 Axlar kan rotera	360 graders rotation	Önskemål	Fysiskt test
2.2 Bypass, stator och växel i modellen kan bytas ut		Önskemål	Fysiskt test
2.3 Komponenter är färgkodade		Önskemål	Visuell kontroll
3. Användningsmiljö			
3.1 Modellen tål rumstemperatur	Mellan 10C till 40C	Krav	Ta fram arbetstemperatur för material som bedöms vara känsliga
4. Livslängd			
4.1 Modellen har lång livslängd	10 år	Önskemål	Kvalificerad bedömning
4.2 Komponenter kan bytas ut x antal gånger	100 gånger	Önskemål	Kvalificerad bedömning
5. Storlek			
5.1 Maximal längd	700 mm	Önskemål	Mätning
5.2 Maximal höjd	450 mm	Krav	Mätning
5.3 Maximalt djup	450 mm	Krav	Mätning
6. Massa			
6.7 Maximal vikt	15 kg	Önskemål	Vägning
7. Ergonomi			
7.1 Utbytbara delar är lättåtkomliga		Krav	Fysiskt test
7.2 Delar kan bytas utan verktyg		Krav	Fysiskt test
8. Säkerhet			
8.1 Modellen har inga vassa kanter		Krav	Visuell kontroll
8.2 Modellen står stabilt		Krav	Fysiskt test
9. Estetik			
9.1 Modellen efterliknar en riktig motor		Krav	Visuell kontroll
10. Material			
10.1 Större delen av modellen ska kunna 3d-printas		Krav	Visuell kontroll av kvalitet
11. Tillverkningskostnad			
11.1 Budget	2000 kr	Önskemål	Kontinuerlig uppföljning av kassa
12. Underhåll			
12.1 trasiga komponenter kan bytas ut		Krav	Fysiskt test

Tabell B.2: Standardkomponentlista

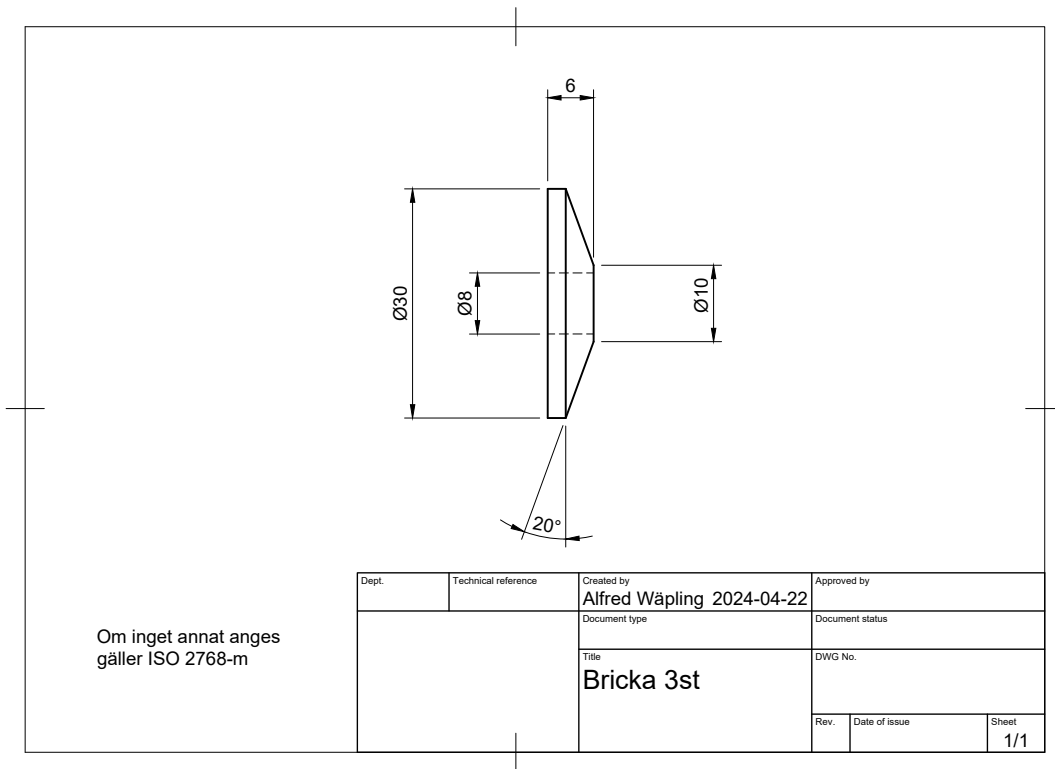
Standardkomponenter					
Skruv, muttrar					
Namn	beteckning	längd	dimension	antal	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	8	M3	10	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	12	M3	23	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	16	M3	4	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	20	M3	1	
rostfri insexskruv	MC6S A4	30	M3	3	
rostfri insexskruv	MC6S A4	40	M3	3	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	16	M4	1	
rostfri insexskruv	MC6S A4	70	M4	3	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	12	M5	2	
rostfri kullrig insexskruv	K6S A4	25	M5	2	
rostfri insexskruv	MC6S A4	90	M5	3	
rostfri mutter	M6M A4		M3	3	
rostfri mutter	M6M A4		M4	6	
rostfri mutter	M6M A4		M5	3	
rostfri mutter	M6M A4		M8	4	
Brickor					
Namn	beteckning	d	D	t	antal
rostfri rundbricka	BRB A4	3.2	7	0.5	31
rostfri rundbricka	BRB A4	4.3	9	0.8	3
rostfri rundbricka	BRB A4	5.3	10	1	12
rundbricka	BRB FZB	10.5	20	2	4
Stift					
	diameter	längd	antal		
Cylindrisk pinne	5	32	3		
Fjäderstift	5	30	3		
Lager					
	d	D	B	antal	
SKF 6005	25	47	12	2	
SKF 6202	15	35	11	6	
Värmeinsatsgångor					
	dimension	antal			
	M3	33			
	M5	4			
Magnet					
	diameter	tjocklek	antal		
Rå rundmagnet i neodym	8	3	35		
Rostfri stång 8mm					
Rostfri stång 12mm					
Rostfri stång 40mm					
Stållaxlar					
	längd	diameter	godstjocklek		
Stång	se ritningar	15	-		
Röraxel	se ritningar	25	2		

C

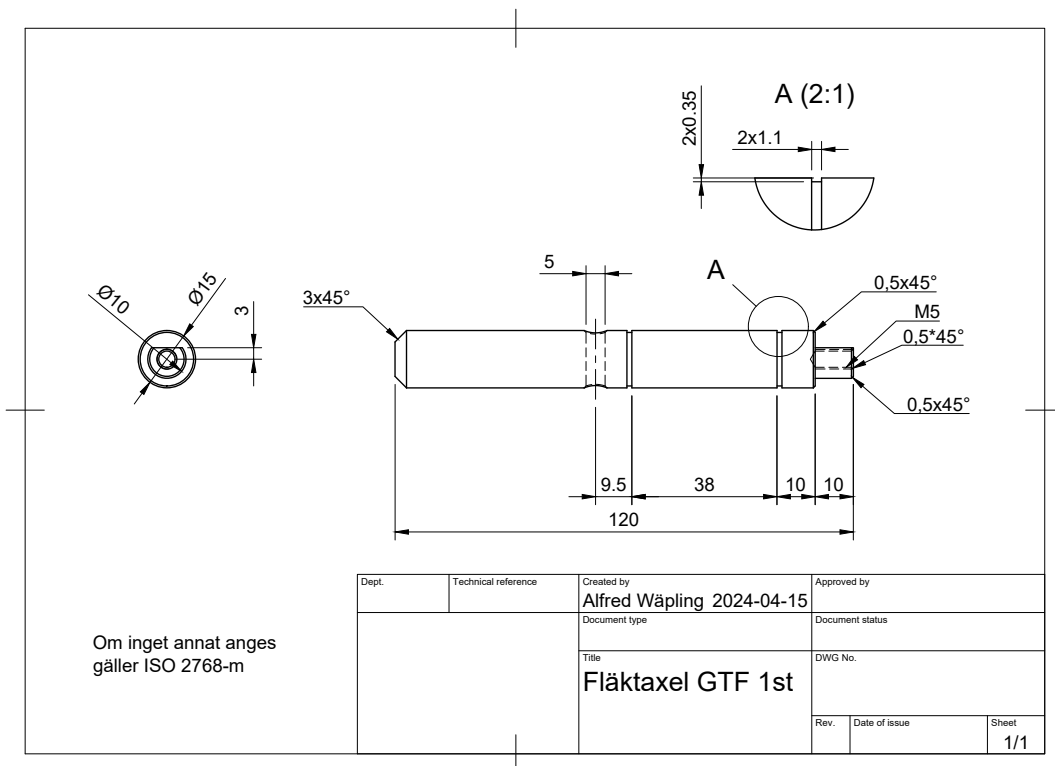
Ritningar



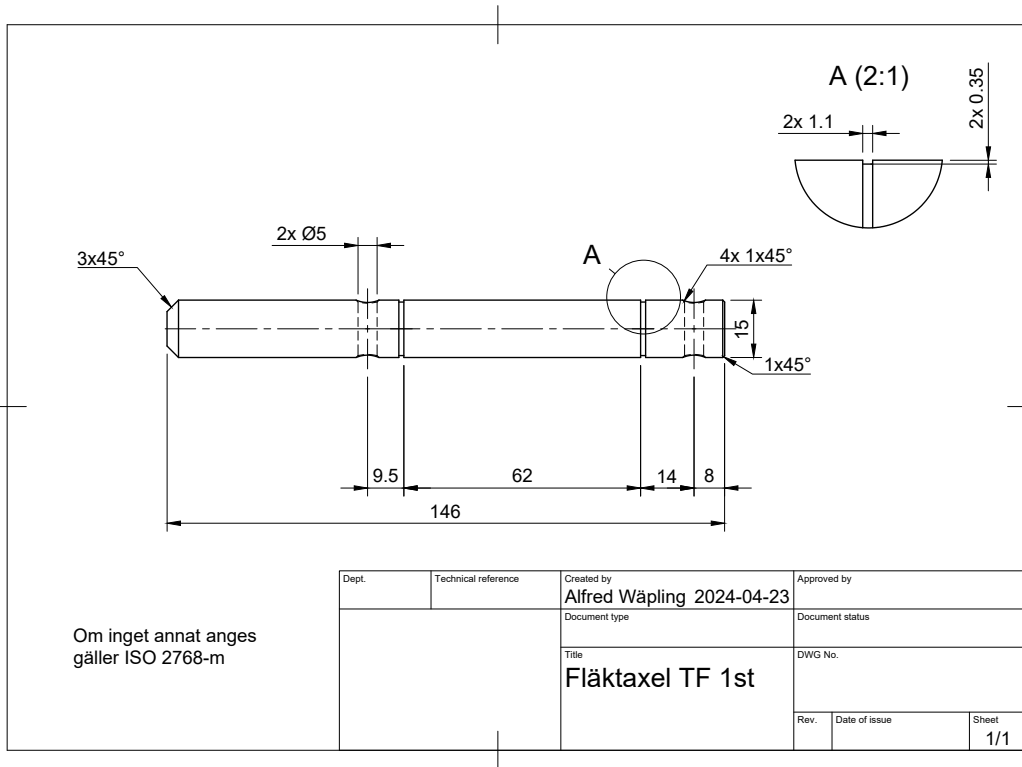
Figur C.1: Ritning för borrhål i Bottenplatta



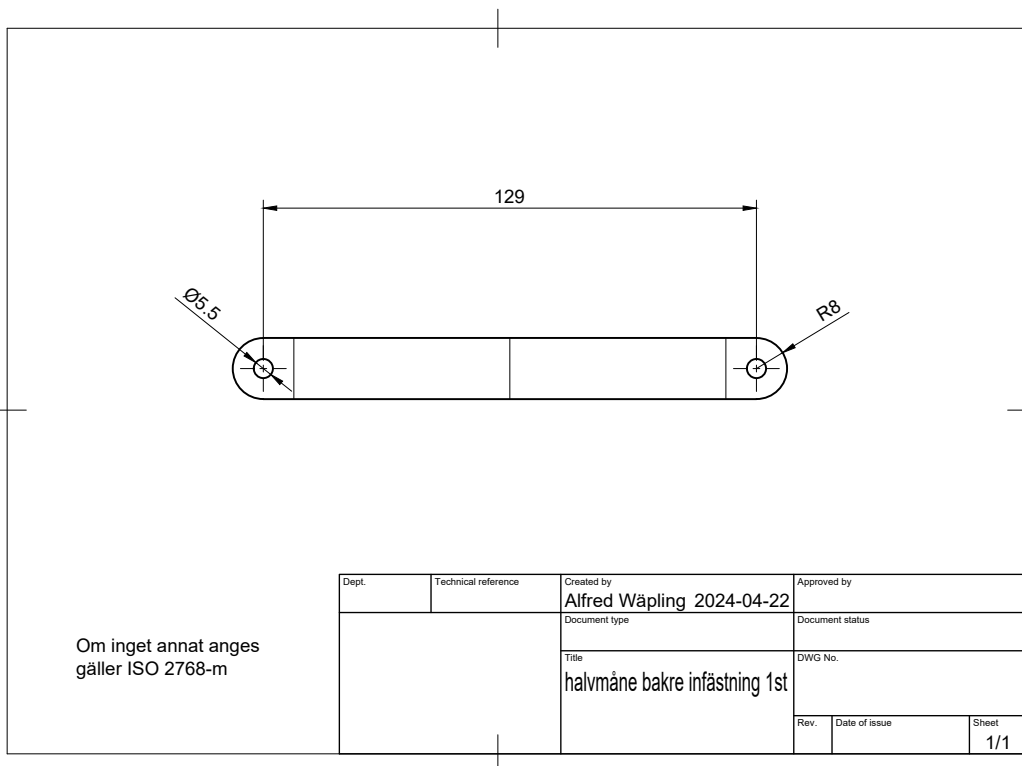
Figur C.2: Ritning svetsbricka till stativ



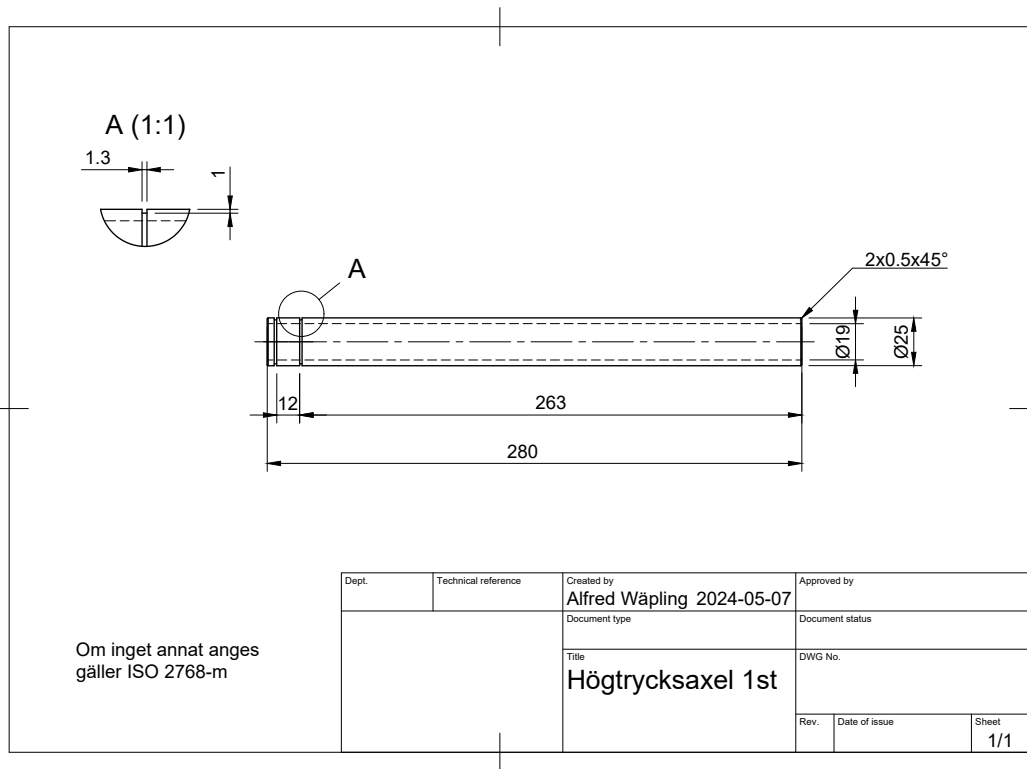
Figur C.3: Ritning fläktaxel växlad motor



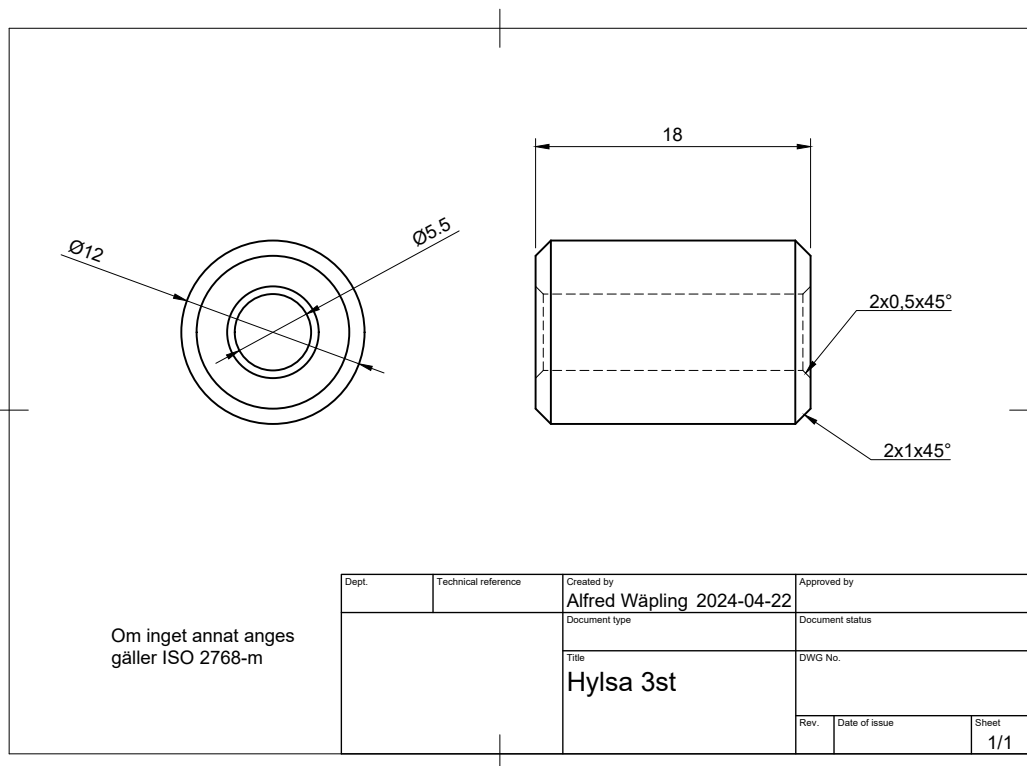
Figur C.4: Ritning fläktaxel oväxlad motor



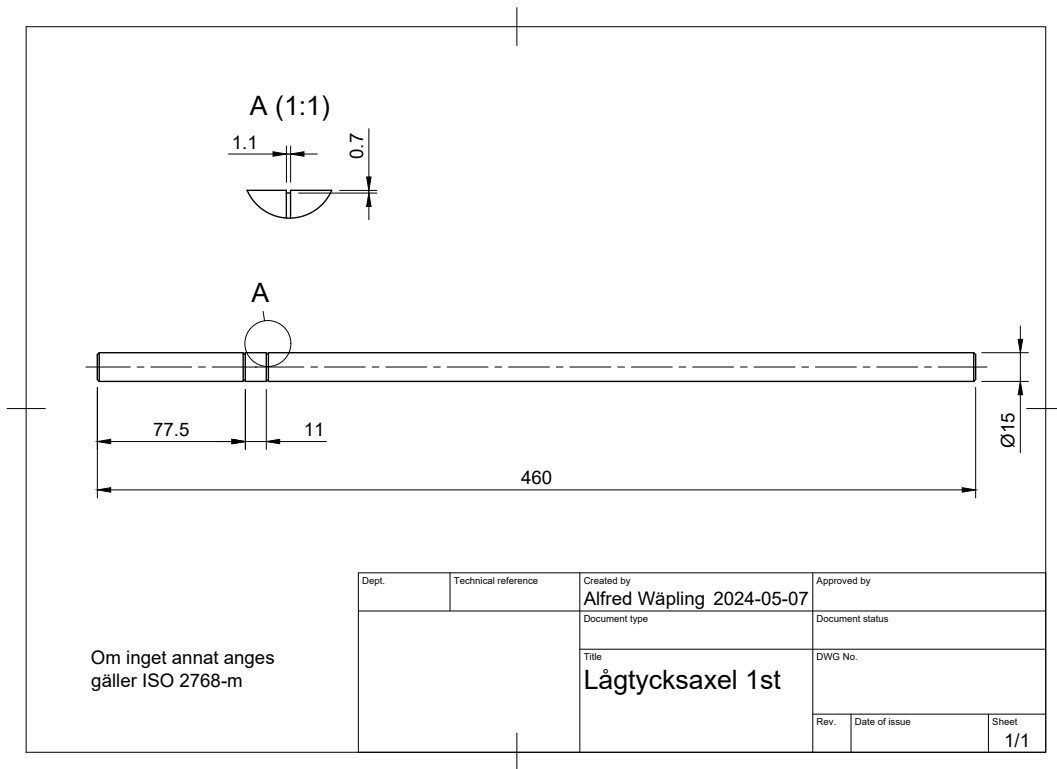
Figur C.5: Ritning halvmåne stativ



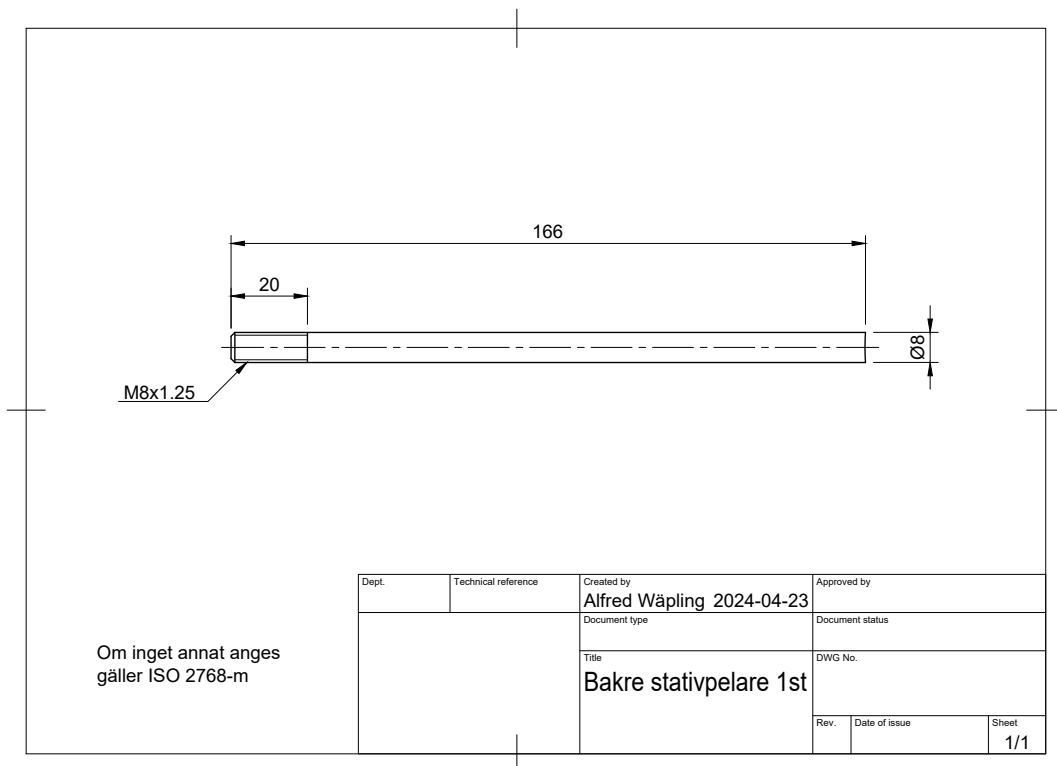
Figur C.6: Ritning högtrycksaxel



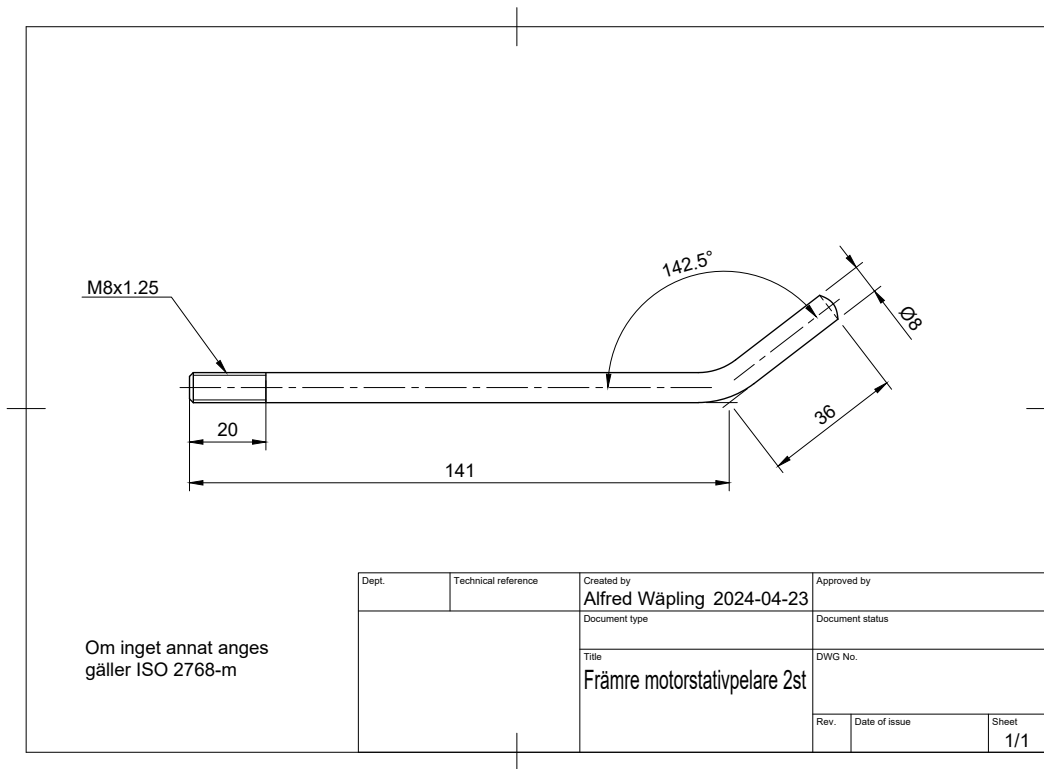
Figur C.7: Ritning svetshylsa stativ



Figur C.8: Ritning Lågtrycksaxel



Figur C.9: Ritning bakre stativpelare



Figur C.10: Ritning främre stativpelare

Institutionen för industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS