

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Elektrisk fläkt för framdrivning	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Electric Fan Thruster	
Universitet/högskola/företag GKN Aerospace Sweden AB	Avdelning/institution Global Technology Centre
Adress Flygmotorvägen 1	
Namn på projektledare Marcus Lejon (GKN)	
Namn på ev övriga projektdeltagare Mattias Billson (GKN), Max Jacobson (GKN), Nenad Glodic (KTH), Mauricio Gutierrez Salas (KTH), Akshay Prafulla Chalke (KTH)	
Nyckelord: 5-7 st Elframdrift, Elfläkt, Flyg, Buller, Fossilfritt, Hållbarhet	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och deltagande industripartner GKN Aerospace Sweden AB. Akademisk partner i projektet har varit Kungliga Tekniska Högskolan.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	5
Resultat	9
Diskussion.....	21
Publikationslista.....	22
Referenser, källor.....	23
Bilagor	23

Sammanfattning

En elektriskt driven fläkt har i EleFanT-projektet dimensionerats för ett bränslecellsdrivet flygplan med fokus på hög verkningsgrad och låg bullernivå.

Omfattande arbete har lagts på dimensioneringen av fläkten då storleken är avgörande för både motorns vikt och prestanda. Hänsyn har tagits till integration av nyckelkomponenter som t.ex. skiva, elmotor, växellåda och inverter. Detaljerad aerodynamisk design har gjorts av fläktblad, fläktutloppsledskenor och den yttre fläktkåpan. För att hålla nere motorns vikt har materialvalet för fläktbladen undersökts i mer detalj med avseende på mekaniska och aeromekaniska egenskaper, samt från ett hållbarhetsperspektiv. Som en del av det arbetet har fläktblad tillverkats i både aluminium och kolfiberkomposit och testat i vibrationsrigg på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Metodutveckling har skett kopplat till dimensionering av en elfläktsmodul, för aerodynamisk design av fläktblad samt för uppskattning av buller från fläktar och propellrar. En första jämförelse har också gjorts mellan en elfläkt och propeller med avseende på bullernivå och prestanda.

En skalbar prestandamodell har tagits fram samt en viktmodell för att uppskatta hur dimensionsförändringar påverkar elfläktens vikt. Dimensioneringsstudierna har ökat projektparternas förståelse för hur olika designparametrar bidrar till hög prestanda. Studierna påvisar bland annat att ett variabelt utloppsmunstycke kan vara mycket gynnsamt för elfläktskonceptet. En jämförelse av fläkt och propeller visade på en stark fördel för elfläkt med avseende på bullernivå, men som kommer till en kostnad av lägre framdrivningsverkningsgrad vid låga flyghastigheter.

Ett alternativ till ett variabelt utloppsmunstycke för att nå ännu högre prestanda är att placera nästa version av elfläkten i en del av designrymden som hittills är relativt utforskad i litteraturen. Som en del av framtida arbete vore det därför av intresse att genomföra studier som kan ge bättre förståelse av utmaningarna som uppkommer när man rör sig utanför den konventionella designrymden. I EleFanT-projektet undersöktes en elfläkt dimensionerad för ett mindre passagerarflygplan. Det vore därför också intressant med vidare studier kring hur elfläktens prestanda påverkas när den dimensioneras för större flygplan och för andra flyghastigheter.

Resultat framtagna i projektet har kommunicerats i form av två presentationer och artiklar på ICAS-konferensen i Stockholm, hösten 2022. Projektet presenterades även på ett webinarium anordnat av Energimyndigheten i början av 2023. Två examensarbeten med koppling till projektet har genomförts, två examensarbeten är fortfarande pågående och EleFanT-motorn bidrog med kontext och en designutmaning till ett projekt i en produktutvecklingskurs på Chalmers. Projektet beskrevs även på en presentation under GKN's IGE-day (Introduce a Girl to Engineering).

Summary

A low noise high efficiency electric fan has been dimensioned for a small regional fuel-cell powered aircraft in the EleFanT project.

Extensive effort has been put on determining the size of the fan, which is the main driver for engine weight and performance. Engine sizing has been done with respect to integration of key components such as the fan disk, electric motor, gearbox and inverter. Detailed aerodynamic design has been done of the fan blades, fan outlet guide vanes as well as the center body and nacelle. Low engine weight is vital, and low-weight fan blades has been one of the focus areas in the project. Different materials for the fan blades have been evaluated with respect to mechanical and aeromechanical properties, as well as from a sustainability perspective. Fan blades have been manufactured in both aluminum and carbon fiber and tested in a vibration rig at the Royal Institute of Technology in Stockholm. The results from the vibration provided data for both material choices that can be used for method development and validation. Method development has been done with respect to fan sizing, aerodynamic design of fan blades as well as noise estimation from fan modules and propellers. Furthermore, a first comparison has been made between an electric fan and propeller with respect to performance and noise.

A weight model and an engine performance model was generated as part of the engine sizing effort. The models were used to determine how key performance parameters and engine weight were impacted by different design choices. The results show that a large fan diameter is advantageous to enable high propulsive efficiency, as well as the potential of a variable nozzle to further increase engine performance. A performance and noise comparison of an electric fan and propeller showed the advantage of fans with respect to low noise, at a cost of lower efficiency at low flight speeds.

An alternative to a variable nozzle to enable higher performance is to venture into a previously relatively unexplored part of the design space for fans. It would therefore be of interest to explore this new design space as part of future work, and to understand the associated challenges. The electric fan in the EleFanT project was sized for a small regional passenger aircraft, and a continuation of this work would explore how fan performance scales to different flight speeds and to higher power fans, suitable for larger aircraft.

Results produced in the project were presented at the ICAS-conference in Stockholm during the autumn of 2022. The project was also presented at a webinarium organized by the Swedish Energy Agency in the beginning of 2023. Two master thesis projects have been carried with connection to the EleFanT project, two master thesis projects are still on-going, and the EleFanT project has contributed with context, guidance, and a design challenge to students in a product development course project at Chalmers. The project was also described on a presentation at GKN's IGE-day (Introduce a Girl to Engineering).

Inledning/Bakgrund

Ökad elektrifiering av framförallt regionalt flyg kommer att bli en viktig del i resan mot fossilfritt flyg. Framdrivningen av elektriska flygplan, där elektriciteten exempelvis kommer från batterier eller bränsleceller, kan då komma från en fläkt eller propeller. Det här projektet har framförallt riktat sig mot utvecklingen av en elfläkt, samtidigt som studier i mindre utsträckning också genomförts av en propellerlösning.

Grundläggande skillnader mellan propeller och fläkt gör att en propeller kan göras mer effektiv än en fläkt vid låga flyghastigheter, och förhållandet blir det omvända vid höga flyghastigheter. Den högre effektiviteten för en propeller vid låga hastigheter kommer dock till en förväntad kostnad i form av högre bullernivå. En fläkt omges av ett hölje vilket skärmar av buller från passagerare i kabin och från boende i närheten av flygplatser. Höljet möjliggör också integrering av bullerdämpande paneler och det reducerar styrkan på vissa strömningsmekaniska fenomen med stark inverkan på buller.

Ett övergripande mål i projektet är att bidra med ökad förståelsen i avvägandet mellan buller och prestanda i olika driftpunkter för ett elektriskt flygmotorkoncept.

En elfläkt för framdrivning av passagerarflygplan är en ny produkt som inte finns väl beskriven i litteraturen, och det är betydande skillnad mellan vad som ingår i en eldriven fläkt jämfört med en konventionell turbofläktmotor. Istället för ett kärnflöde som passerar genom kompressorer, brännkammare och turbiner, så innehåller kärnan en elmotor, eventuell växellåda samt en inverter. Det här påverkar den inre strukturen och bär med sig andra utmaningar. Fläkten behöver dimensioneras med avseende på prestandakrav från flygplanet och med hänsyn till tillgänglig effekt från batterier och/eller bränsleceller. Motorn ska vara tillräckligt robust att den klarar olika typer av extrema förhållanden, samtidigt som den har hög verkningsgrad och så låg vikt som möjligt för att maximera flygplanets nyttolast och räckvidd.

Utveckling av en eldriven fläkt kräver förståelse för vilka prestandakrav ett elektriskt drivet flygplan har samt vilka begränsningar ett valt batterisystem eller bränslecellssystem bär med sig. En prestandamodell, gärna kalibrerad mot detaljerade aerodynamiska beräkningsresultat, behövs för att skapa en god helhetsbild av konceptets prestanda. Det krävs även god förståelse för sambandet mellan fläktens rotationshastighet vid olika operationspunkter och hur det påverkar val av, och dimensionerna för, en elmotor och växellåda. Med avseende på buller krävs en metod för att uppskatta bullernivå från en elfläkt med och utan akustiska bullerdämpande paneler. Låg motorvikt är önskvärt och för att hålla vikten så låg som möjligt så behöver olika materialval utvärderas. Inverkan av olika materialval på motorns slutliga vikt, och dess inverkan på flygplanets prestanda behöver uppskattas. Arbetet med att dimensionera en elfläkt berör i hög grad flera olika ämnesområden, och ett väl fungerande samarbete mellan alla inblandade parter krävs för att nå målen i projektet.

Elfläkten i EleFanT-projektet dimensionerats mot prestandakrav med sitt ursprung i projektet H2Gear, som leds av GKN Aerospace i England. I det projektet ligger fokus på elsystem i bränslecellsdrivna regionala flygplan, där prestandamodeller för flygplanen är en del av arbetet. Samarbetet mellan EleFanT och H2Gear har medfört att en hel flygning, från start till landning, har simulerats med prestandatabeller framtagna för EleFanT-fläkten.

Projektet har letts av Marcus Lejon, Senior Research Engineer på GKN Aerospace, och av Nenad Glodic, forskare på Kungliga Tekniska Högskolan i egenskap av arbetspaketledare. EleFanT-projektet påbörjades 1:a juli 2021 och avslutades 30:e april 2023. Projektet har finansierats av svenska Energimyndigheten samt av GKN Aerospace Sweden AB.

Genomförande

Projektledning

Projektkoordinering har huvudsakligen skett genom möten ledda av Marcus Lejon, GKN, i genomsnitt varannan vecka under hela projekttiden. Under intensiva perioder i projektet har mötesfrekvensen ökat och under semestertider har möten skett mer sällan. Insamlande av leverabler i form av rapporter och vetenskapliga publikationer har skett löpande.

Konceptval

GKN har jämfört grundläggande aerodynamiska och aeroakustiska skillnader mellan fläkt och propeller. En hållbarhetsanalys av olika materialval för fläktbladstillverkning har utförts med avseende på tillverkning, inverkan på energianvändning under drift, reparerbarhet samt återvinning. Ett examensarbete kring propellerdesign utfördes på plats på GKN av en student vid KTH och Liège Universitet. Efter examensarbetet fortsatte utvecklingen av en propellergeometri, som sedan undersöktes med avseende på buller och prestanda av GKN Aerospace som en del av jämförelsen av olika framdrivningskoncept.

Fläktarkitektur för elframdrift

GKN har arbetat med integration av en elmotor, växellåda och inverter i kärnan av motorn samt tagit fram en ansats till lastbärande struktur. En 3D modell av hela motorn har tagits fram, där detaljgraden successivt ökat på de komponenter som varit i fokus under projektets gång på GKN och KTH.

Aerodynamisk design av elfläkt

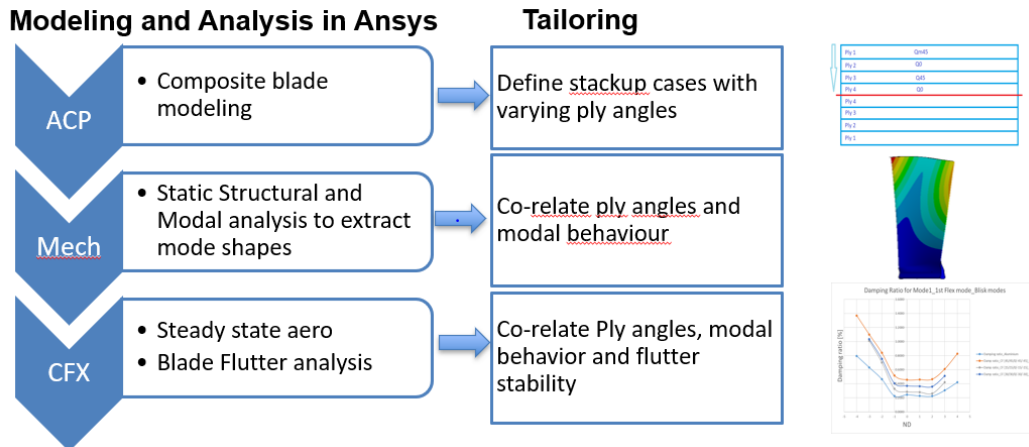
GKN har utfört detaljerad aerodynamisk design av fläktblad och fläktutloppsledskenor, geometrier som sedan inkluderats som en del av 3D modellen av elfläkten. Fläktkåpans aerodynamiska design togs fram som en del av ett examensarbete med en student från Chalmers tekniska högskola som handledes av en doktorand på Chalmers och av specialister från GKN. Omfattande arbete har lagts på dimensioneringen av elfläkten, där den slutgiltiga storleken på motorn inom ramen för projektet är baserad på ett noggrant avvägande mellan aerodynamisk prestanda och vikt. Fläktens prestanda vid en rad olika operationspunkter, bland annat vid start, stigning, cruise och landning har undersökts i projektet. Detaljerad strömmingsmekaniska beräkningar har utförts av

elfläkten vid ett antal operationspunkter och en prestandamodell har kalibrerats mot de detaljerade beräkningsresultaten. En metod för uppskattning av bullernivå från en elfläkt har utvecklats kontinuerligt under projekttiden, något som inte fanns på GKN vid projektstart. Utvärdering av bullernivån från ett antal olika varianter av elfläkten har gjorts av GKN med och utan bullerdämpande paneler integrerade i fläktkåpan.

Konstruktion i lättviktsmaterial

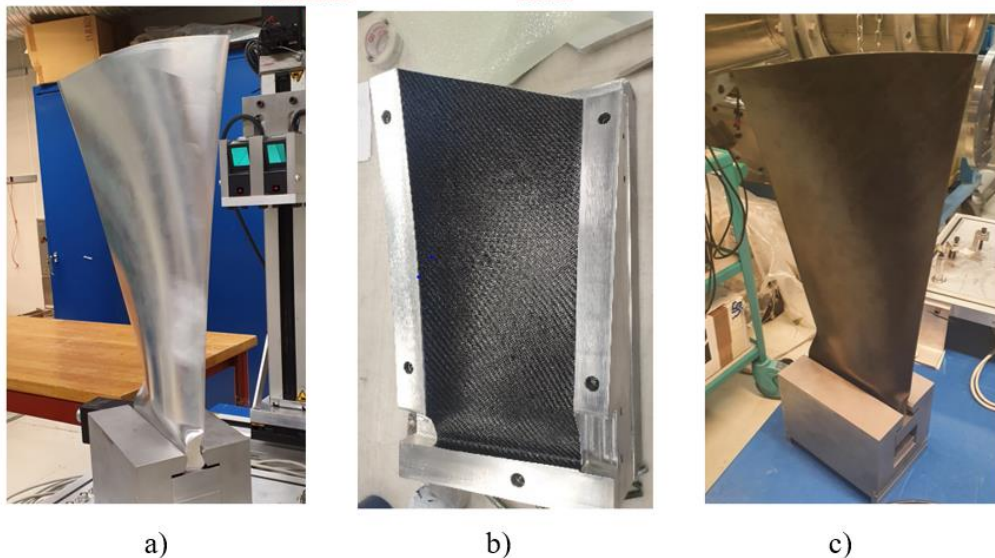
GKN och KTH har jämfört komposit med aluminium som materialval för fläktblad utifrån ett hållfasthetsperspektiv, med avseende på vibrationer samt utifrån tillverkningsaspekter. Som en del av hållbarhetsanalyser av materialval för fläktblad har GKN tillämpad en metod kallad *Fingerprint*, utvecklad av Blekinge tekniska högskola och GKN. I projektet har även potentiell viktminskning uppskattats som resultat av olika materialval av olika komponenter. GKN har analyserat vad ett "Fan blade off" scenario innebär i termer av obalanslaster för motorn. Ett examensarbete har initierats på KTH med fokus på numerisk modellering av "Fan blade off"- event i ett kommersiellt analysverktyg (LS-Dyna, baserad på explicit FEM). Syftet är att ta fram en tillförlitlig modell för effektiv utvärdering av fläkthöljets inneslutningsförmåga (containment), där olika tjocklekar, materialval och fläkthöljets utformning kan analyseras, och därmed erhålla nya och säkrare marginaler för att kunna sänka vikten på komponenten. I ett annat parallellt-pågående examensarbete på KTH utvecklar man i LS-Dyna en modell för prediktering av skador som kan uppstå på kompositfläktbladet då ett främmande föremål flyger in i motor. I ett senare steg kommer modellen att användas för dimensionering av metallisk framkantsskydd som ska integreras i kompositfläktbladet.

För att ta fram fläktblad i kolfiberkomposit har KTH använt sig av en metod som tidigare utarbetats inom NFFP7 projektet VIND [1], där man genom olika upplägg i laminatet styr bladets modformer för att uppnå fördelaktiga aeroelastiska egenskaper hos bladet som t.ex. förbättrad fladderstabilitet. KTH har genomfört grundliga aeromekaniska analyser av fläktblad vid ett antal kritiska driftpunkter för att säkerställa att designen uppfyller krav gällande fladderstabilitet. Dessa analyser har utförts både för base-line aluminiumfläktbladet och kolfiberfläktbladet med flertal olika fiberriktningar i kompositlaminatet, och en jämförelse mellan dessa har gjorts.



Figur 1: Flödesschema för design och aeromekanisk analys för kompositfläktblad

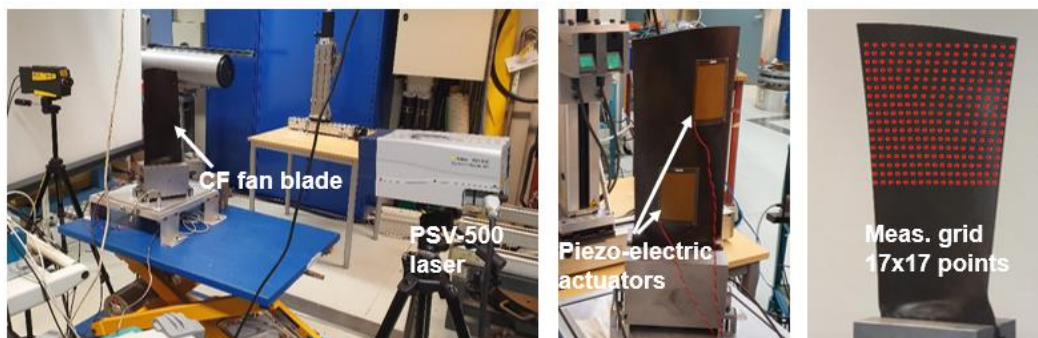
Fläktbladsprototyper med identisk geometri har tillverkats i base-line materialet Al-7075, samt i kolfiberkomposit. Tillverkningen av kolfiberblad har lagts ut på Marstrom Composite AB som använder sig av pre-preg tekniken med härdning i autoklav. Det har också gett möjlighet att kunna utvärdera om pre-preg tekniken lämpar sig för byggnation av fläktbladen. Fläktbladsprototyper har byggts enligt laminatupplägget som tillhandahållits från KTH och två olika materialsystem har använts (HexPly® 8552 AS4, CM-Preg UD200).



Figur 2: a) Aluminiumfläktblad; b) formverktyg för tillverkning av kompositfläktblad; c) Fläktblad i kolfiberkomposit

Experimentell uppsättning för vibrationsprov på KTH visas i Figur 3. Huvudsyftet med dessa vibrationsprov har främst varit att generera data nödvändig för validering av numeriska modeller och metoder som används i design av fläktblad samt att riskreducera ett framtida demonstratorbygge. Kontrollerad vibration av fläktbladet under vibrationsprovning fås genom piezo-elektriska aktuatorer som applicerades på bladets yta och matas med en spänningsignal med samma frekvens som bladets egenfrekvens. Bladets modform under excitationen skannas

av med en laser vibrometer (Polytec PSV-500) och en lokal amplitudfördelning över hela bladet kan erhållas.



Figur 3: Experimentell uppsättning för vibrationsprovning av kompositprototypblad

Förstudier av fläktrigg och verifieringsbehov

Aktiviteter under projektets gång inom alla de olika arbetspaketen har successivt bidragit till en tydligare bild av vad som vore intressant att validera i en framtida fläktrigg. Det handlar framförallt om två områden som kan vara av intresse. Det ena området är akustiska mätningar av en fläktrigg för att validera existerande beräkningsmodeller för den här tillämpningen. Det andra området är att utvärdera prestanda hos en elfläkt som rör sig in i ett aerodynamiskt designområde som historiskt är relativt outforskat. För att undersöka hur en elfläkt skulle kunna se ut för en framtida fläktrigg så har GKN först skalat ner en elfläktens design till olika subskalor (1:2, 1:2.5, 1:3, 1:4). KTH har därefter undersökt det kommersiella utbudet av elmotorer i små storlekar som kan passa tillämpningen. Baserat på KTHs studier kring existerande elmotorer så designade GKN om en nerskalad fläktgeometri för att tillåta integration av en vald elmotorlösning, samtidigt som den bibehåller de aerodynamiska prestandaparametrarna som är av intresse att undersöka i en rigg. KTH har undersökt en modulär design av riggen, där fläktriggens utformning kommer att vara anpassningsbar för provning av olika konfigurationer. Ett annat mål i det preliminära designstadiet har varit att eftersträva en mobil lösning, där elmotor är integrerad i riggen och försörjs med ström från ett batteripack. På det viset så är man mindre beroende av en fast installation och inte kräver en kostsam permanent infrastruktur för drift av riggen. Samtidigt så har man i konceptutlägget av riggens olika komponenter försökt ta hänsyn till hur den verkliga fläkten skulle kunna vara konstruerat, och med detta demonstrera genomförbarhet av konstruktionslösningar. Genom att ha en mer mobil lösning för fläktriggen så öppnas också upp en möjlighet att enkelt kunna anpassa riggen för framtida prov i en låghastighetsvindtunnel, där man skulle kunna testa fläkten under olika sidovindförhållanden och göra aeroakustiska mätningar i kritiska delar av flygningen, som vid start och landning.

Resultat

En central del i projektet har varit den kontinuerliga mognaden av en 3D modell av elflärkten, illustrerad i sitt slutgiltiga (inom ramen för projektet) utseende i Figur 4. Bland annat innehåller modellen geometrier av fläktblad, fläktutloppsledskenor, fläktytterkåpa, skiva, pylon från motor till flygplansvinge, elmotor, växellåda och inverter. Platshållare finns även bland annat för bullerdämpande paneler, lastbärande struktur, samt inneslutande förstärkt hölje som krävs i händelse av att ett fläktblad skulle lossna under drift.



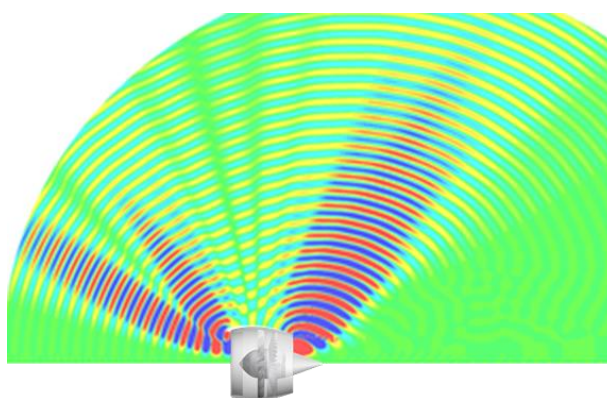
Figur 4: Rendering av EleFanT-flärkten vid projektets slut

I projektet har en prestandamodell utvecklats för en elektrisk driven fläkt. Prestandamodellen har använts i kombination med en framtagen viktmodell för att dimensionera flärkten mot prestandakrav för ett bränslecellsdrivet regionalt flygplan med sitt ursprung i samarbetsprojektet H2Gear. Dimensioneringsarbetet av flärkten var en av de största utmaningarna i projektet, då hänsyn måste tas till många olika aspekter varav några kräver mogna modeller som tar tid att utveckla. Komplicerade samband gjorde att mycket tid fick läggas på att hitta en bra balans mellan varvtal, storlek och verkningsgrad. Ändringar av geometriska parametrar påverkar också ett flertal aerodynamiska parametrar vid olika operationspunkter, där kompromisser måste göras för att hitta en så bra designlösning som möjligt för tillämpningen. Många lärdomar har gjorts i projektet kring dimensionering av en fläkt med hög prestanda, vilket tillsammans med successivt mer detaljerade modeller gjort att prestandan ökat för varje ny version av motorn som släppts inom projektet. Detaljerade strömmingsmekaniska beräkningar har genomförts vid ett flertal operationspunkter för att undersöka elflärkens prestanda och som en del av att mogna det aerodynamiska designarbetet av motorn. Resultaten från detaljerade beräkningarna har också varit en viktig faktor för att kalibrera prestandamodellen och därmed höja dess tillförlitlighet för dimensioneringsstudier och för snabb analys av ett stort antal operationspunkter. Ett examensarbete utfördes också på EleFanT-motorn av en student vid Chalmers

med handledning av en doktorand på Chalmers och av specialister på GKN. I examensarbetet genomfördes aerodynamisk design av fläktytterkåpan med avseende på lågt luftmotstånd och hög tolerans mot extrema sidvindsförhållanden.

Verktyget Fingerprint, utvecklat av Blekinge tekniska högskola och GKN Aerospace, tillämpades i projektet för att göra en hållbarhetsanalys av materialvalet för fläktbladen i elfläkten. Aluminium och kolfiberkomposit jämfördes med avseende på klimatpåverkan under tillverkning, klimatpåverkan under drift och hur det påverkar återvinning. Andra aspekter som verktyget också tar hänsyn till är bland annat hur mycket återvunnit material som används vid tillverkningen, om konfliktmineraler är en del av tillverkningen och hur nära leverantörer är från kund. Studien illustrerade tydligt att det finns en fördel med kolfiberkomposit under användning på grund av dess lägre vikt, men att aluminium är bättre ur ett tillverknings- och återvinningsperspektiv.

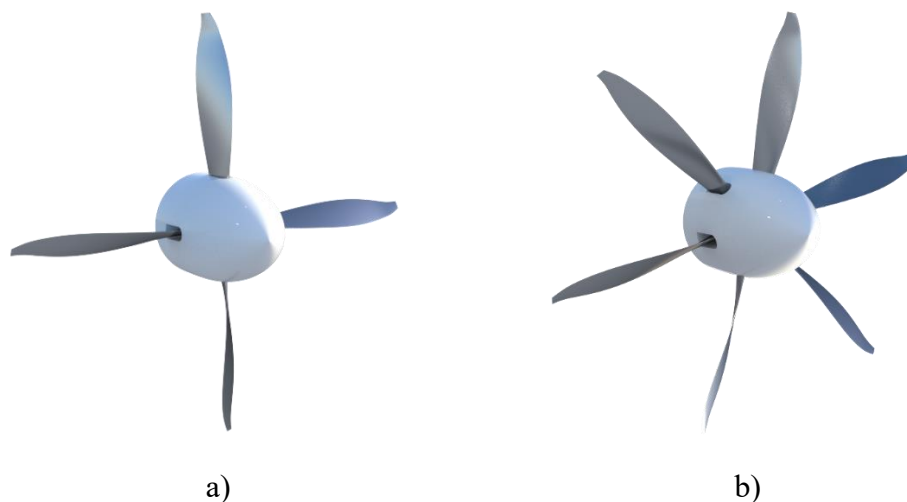
En prognos från Airbus [2], en av de ledande flygplanstillverkarna i världen, spår 3.6% årlig tillväxt av passagerartrafik de närmaste 20 åren. Växande problematik förväntas därför med ökande bullernivåer för boende nära flygplatser. En metod för uppskattning av buller från en elfläkt, med och utan akustiska bullerdämpande paneler, fanns inte på plats vid projektstart utan har utvecklats på GKN under projektets gång. Bilden i Figur 5 kommer från en bulleranalys i projektet och illustrerar ljudvågor från fläkten. Analyser i projektet visar att bullerdämpande paneler kan bidra till märkbar bullerreducering. Inverkan av antalet fläktutloppsledskenor på bullernivå har också utvärderats i projektet. Det är känt sedan tidigare att antalet ledskenor har stark inverkan på bullernivå, men många parametrar är väldigt fallberoende, vilket gjorde det intressant att göra en utvärdering av EleFanT-fläkten, som är en lågt lastad fläkt med relativt låg topphastighet på fläktbladen



Figur 5: Buller från en elektrisk fläkt visualiseras genom dess inverkan på det statiska tryckfältet

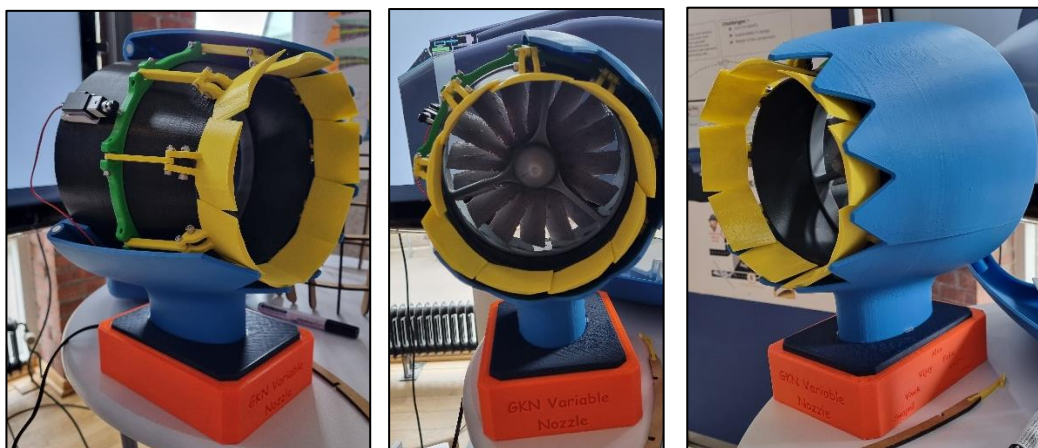
Som en del av projektet har en fyrbladig och en sexbladig propellerdesign tagits fram, illustrerade i Figur 6. Propellerdesign var fokus i ett examensarbete kopplat till projektet, men även efterföljande designarbete gjordes för att i slutändan jämföra en eldriven fläkt och en propeller med avseende på både bullernivå och

verkningsgrad. Jämförelsen mellan elfläkt och propeller visade på betydligt lägre bullernivå för elfläkt, men till en kostnad av lägre framdrivningsverkningsgrad vid låga flyghastigheter.



Figur 6: Propellergeometrier designade och analyserade i projektet a) Fyrbladig propeller, b) Sexbladig propeller

EleFanT-projektet bidrog med kontext och en designutmaning till ett projekt i en produktutvecklingskurs på Chalmers som startade i slutet av 2022. Produkten de fick i uppgift att utveckla var en variabel utloppsgeometri till fläkten med fokus på låg komplexitet och låg vikt. I slutet av projektkursen 3D-printades den variabla fläktgeometrin i plast på Chalmers. Resultatet ses i Figur 7.



Figur 7: Mekanism för variabel utloppsgeometri för en elfläkt studerad av en projektgrupp på Chalmers

Genom detaljerade mekaniska och aeromekaniska analyser genomförda vid KTH har man fastställt en design av fläktbladet som uppfyller kraven gällande de statiska och dynamiska laster som fläktbladet kommer att utsättas för under drift. I den här processen, så har man utgått från en base-line fläktbladdesign i aluminium Al-7075. En iterativ mekanisk-aerodynamisk designprocess mellan KTH och GKN var

nödvändig för att kunna fastställa en optimal geometri på bladet för att uppnå acceptabla utböjning och spänningar i strukturen. KTH elaborerade också fram en geometri på fläktbladets rotsektion, med mål att minimera spänningskoncentrationen i den kritiska delen av bladet. Den resulterande geometrin visas i Figur 8.



Figur 8: CAD bild av den resulterande fläktbladgeometrin

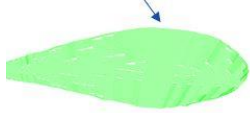
Med samma geometri som utgångspunkt, så har man tittat på design av bladet i kolfiberkomposit och olika laminatupplägg utvärderades med hänsyn till bladets strukturella egenskaper, modformer och fladderstabilitet. Genom att manipulera kolfibers vinklar i laminatupplägget så har man kunnat styra bladets vibrationsmodformer och med det påverka hur bladet interagerar med omgivande luftflödet dvs. påverka aeroelastiskt dämpning som är kritiskt för fladderstabilitet. Samtidigt så har man säkerställt att man undviker farliga resonanser i fläktens driftområde genom att styra bladets egna frekvenser så att de inte sammanfaller med frekvensen av möjliga excitationer som kan uppstå i motorn.

För att begränsa antalet av möjliga laminatupplägg i det preliminära designstadiet, har man itererat fram ett upplägg som då följer olika riktlinjer och rekommendationer kring laminering, som kommer från de utförliga litteraturstudier som man genomförde i början på projektet. Därefter analyserade man påverkan av olika fiberriktningar genom att variera fiberriktning i hela laminatet. I denna övning låg fokus på tre olika vinklar: 15°, 30° och 45° som då genomgående introducerades i laminatet i respektive upplägg. Störst påverkan på modformen har fiberriktning i de skikt som ligger närmast bladets ytor, så t.ex. om man har vinklar som $\pm 45^\circ$ -skikt närmare ytan så ökar bladets vridstyvhet, och om man däremot har skikt med låga vinklar (0°) närmare bladets ytor så ökar bladets böjstyvhet. Laminatuppläggen som användes för aeromekanisk analys av kompositbladet visas i Figur 9. Fiberriktning på de skikten som sträcker sig in i bladet är av betydelse för hur bladets modegenskaper kan komma att se ut, medans de utfyllnadsskikten som endast sträcker sig in i roten och övergångsregionen på bladet är av en mindre betydelse och har därför erhållit en fiberriktning på 0° .

Tot. number of plies :170 (79 plies extending into the blade region), symmetric layup

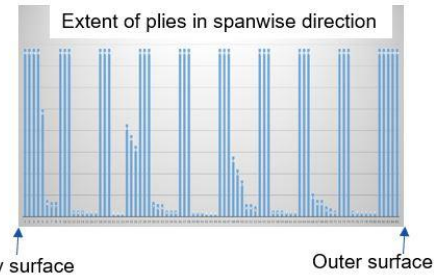
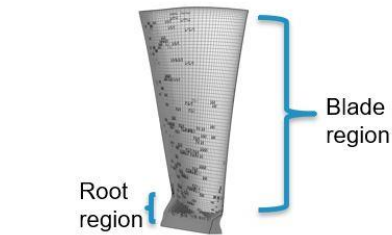
Ply material: Hex Ply 8552 AS4 UD carbon prepregs

Suction surf (S)(Ply 1)



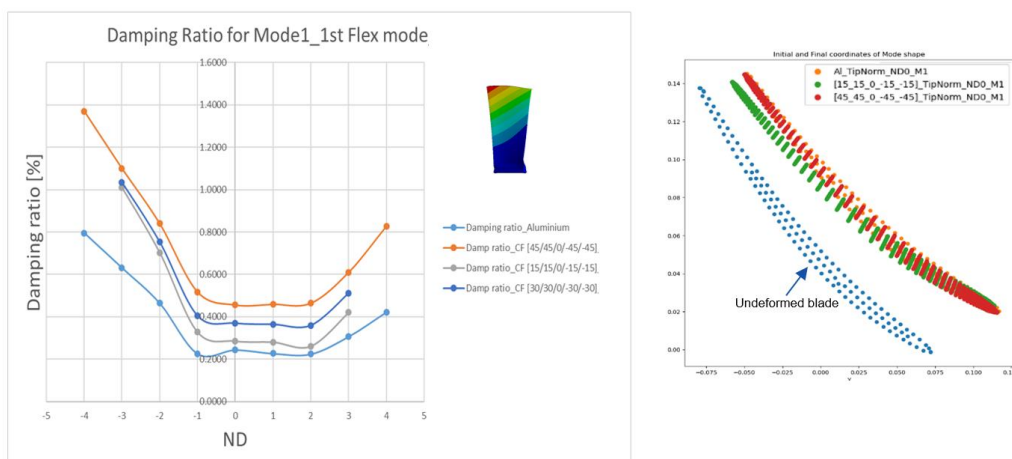
Pressure surf (P)(Ply 1)

Ply no (S)	Ply no (P)	C1	C2	C3
1	170	15	30	45
2	169	15	30	45
3	168	0	0	0
4	167	-15	-30	-45
5	166	-15	-30	-45
6	165	0	0	0
7	164	15	30	45



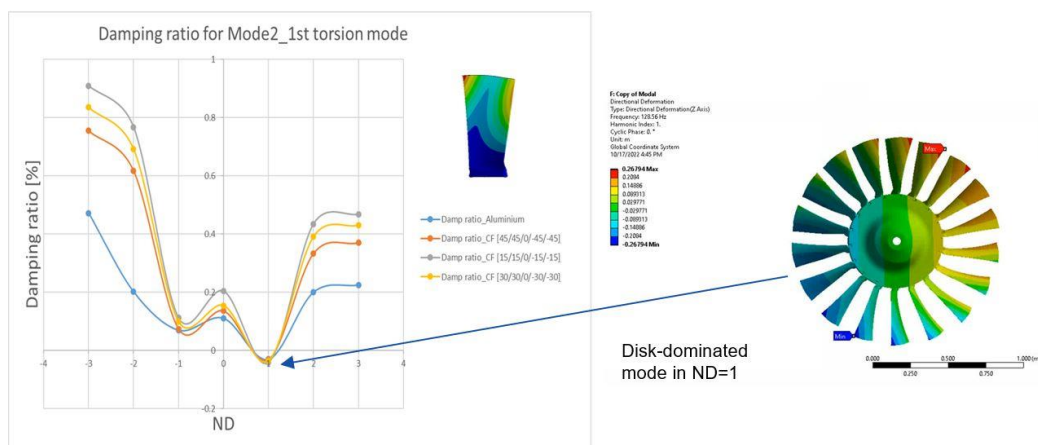
Figur 9: Detaljer från kompositbladmodellen

Jämförelse av resultat från aeromekaniska analyser för fläkten med baseline bladen i Al-7075 och kolfiberkompositbladen i olika utförande påvisar att det är möjligt att styra laminatupplägningen i kompositbladen för att uppnå högre fladdersstabilitet. För fladderstabiliteten är de första två modformer av intresse att analysera. Figur 10 nedan visar aeroelastisk dämpning för modform #1 eller den första böjmoden. Man kan observera att samtliga laminat uppvisar högre dämpning jämfört med aluminium fläkten, och att laminatet med $\pm 45^\circ$ fibrar (laminatet som kallas C3 i Figur 9 ovan) visar mest positiva dämpning över alla ND dvs. uppvisar högre fladderstabilitet jämfört med de andra bladen. Detta tros bero på att böjmoden för C3 laminatet har mindre andel vridning i böjmoden jämfört med de andra två laminaten. C3 laminatets modform har en liknande form som aluminiumbladet, men eftersom modfrekvensen för kompositlaminatet är högre så stiger i regel också den aeroelastiska dämpningen.



Figur 10: Aeroelastisk dämpning för modform #1 (första böjmoden)

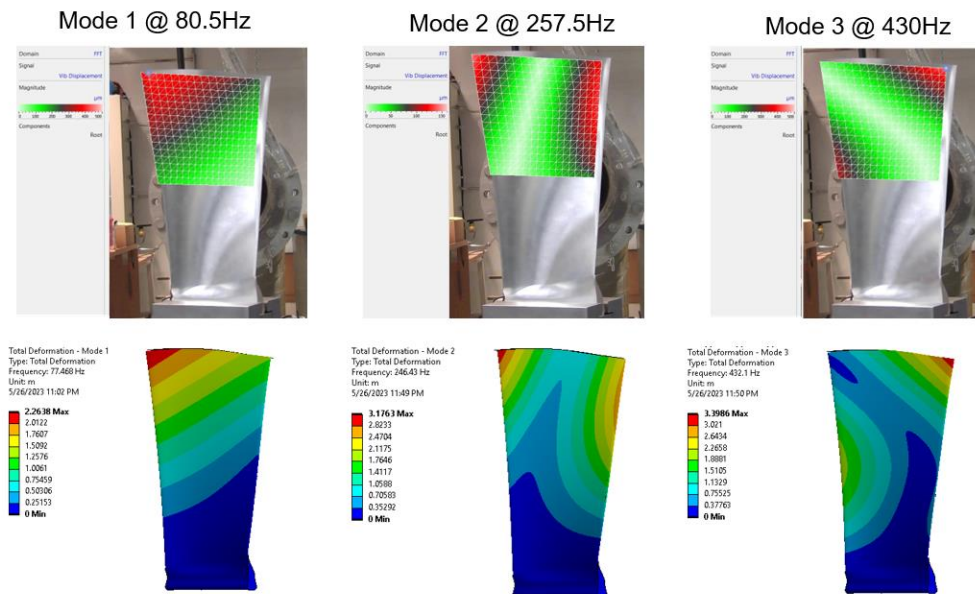
För modform nr.2 (den första vridmoden) som visas i Figur 11 nedan ser man en motsatt effekt: laminatet med lägre vinklar (kombination av 0° och $\pm 15^\circ$ skikt) uppvisar högre aeroelastisk dämpning jämfört med laminatet byggd med 0° och $\pm 45^\circ$ skikt. Detta är i linje med vad som har observerats tidigare och rapporterats i [1]. En annan observation är att vridmoden för "nodal diameter" ND=1 uppvisar negativ aeroelastisk dämpning, vilket kan potentiellt leda till fladder. Detta beteende är oberoende av materialet eller laminatupplägget och tros vara kopplat till att vid ND=1 är deformationen främst dominerat av skivans modform och inte bladdominerat. Även om den negativa aeroelastiska dämpningen troligtvis skulle motverkas av positiv dämpning som kommer från friktionen i kontaktytorna mellan bladen och skivan (vilket tas inte hänsyn till i den nuvarande modellen), så skulle en rekommendation för framtida arbete därför vara att skivan ska designas om för att undvika den potentiella fladderinstabiliteten.



Figur 11: Aeroelastisk dämpning för modform #2 (första vridmoden)

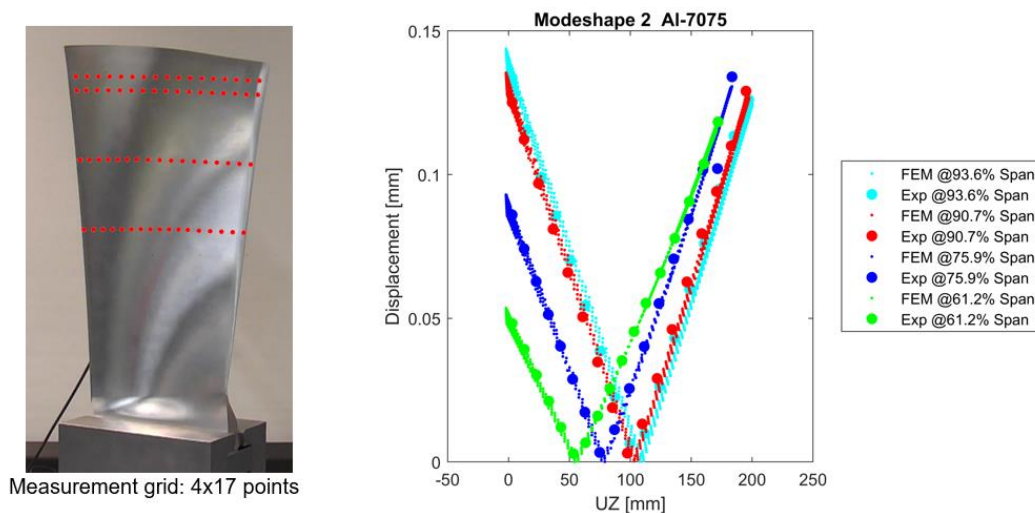
Ett antal fläktbladsprototyper med identisk geometri har tillverkats både i base-line materialet Al-7075 och kolfiberkomposit för att genomgå specifikt utformade vibrationsprov vid KTH med syftet att generera data nödvändig för validering av numeriska modeller som användes i design av komponenter. Aluminiumbladet framställdes med CNC-skärande bearbetningsmetoden med fullständigt uppfyllda toleranskraven på ytprofilen på 0.1mm och ytråheten på $Ra < 1.6\mu m$.

Figur 12 nedan visar resultat från mätningar med PSV-500 laser vibrometer (17x17 mätpunkter), då aluminiumbladet exciterats med piezoelektriska aktuatorer med frekvens sammanfallande med bladets tre första egenmodfrekvenser. En kvalitativ jämförelse kan göras med modformer från modalanalys i FEM modellen.



Figur 12: Aluminiumbladets första tre modformer: uppmätt utböjning (övre raden) vs. FEM resultat (nedre raden)

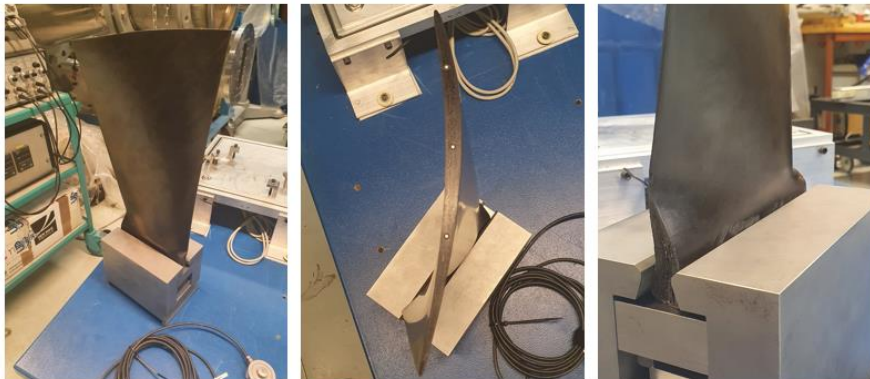
För att kunna göra mera detaljerade jämförelse och validering av numeriska modellen, plottas mätdata erhållen vid mätningar tillsammans med FEM predikterad deformation vid specifika spannpositioner i Figur 13 nedan.



Figur 13: Jämförelse mellan uppmätt och predikterad utböjning (Al-7075 bladet)

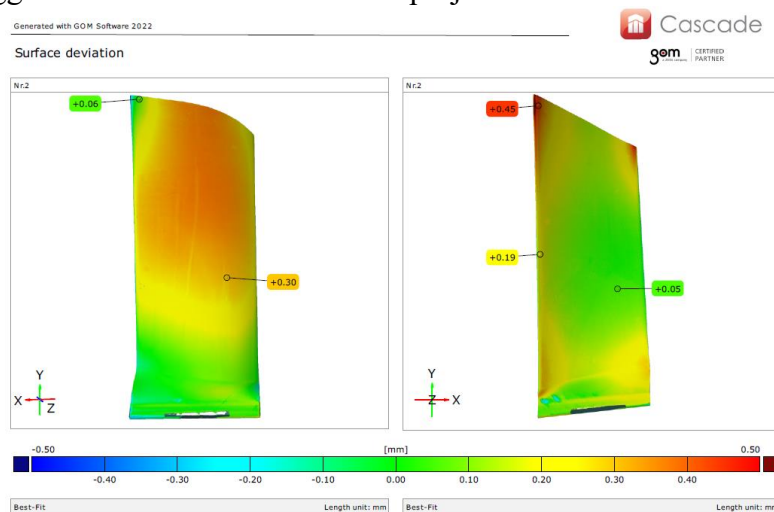
Det kan observeras en väldigt bra överenskommelse mellan den predikterade lokala utböjningen och den uppmätta utböjningen från laserskanningen av aluminiumbladet. Liknande jämförelse kan göras för de andra två modformer. Man har dock observerat att resultat från FEM modellen kan vara väldigt känsliga mot randvillkoren i infästningen på bladet och en finjustering av modellen var nödvändig för att matcha data från experiment.

Prototyper av kompositfläktblad tillverkades med pre-preg metoden, som beskrivet i det föregående kapitlet. Laminatupplägget som användes för tillverkning motsvarar laminat C3, med 0° och $\pm 45^\circ$ skikt. Tidigt under tillverkningsprocessen upptäcktes att antalet skikt som användes i modelleringen var för högt för att kunna få plats med i verktygsformen under lamineringen. Orsaken till detta tros ligga i att man under modelleringen antog en nominell tjocklek angiven i databladet för materialsystemet som var då 0,139mm per lager. Den verkliga uppmätta tjockleken på materialet före härdning var 0,23mm. En handpåläggning var därför nödvändig under tillverkningen och antalet lager i bladet reducerades avsevärt, i synnerhet i rot- och övergångsregionen på bladet.



Figur 14: Fläktbladprototyp i kolfiberkomposit (HexPly 8552-AS4)

Den tillverkade kompositbladprototypen skickades för 3D skanning av geometrin för att fastställa avvikelse från den nominella CAD geometrin, och resultat visas i Figur 15 nedan. GOM mätningar genomfördes av Cascade Control AB med systemet Atos 5 MV320. Resultat visar att störst avvikelse (ca 0.5mm) mellan tillverkade bladet och CAD modellen existerar på trycksidan nära toppen på bladet, både vid bladets fram- och bakkant. På sugsidan så existerar en relativt stor region där avvikelse uppgår mot $\sim 0,35\text{--}0,4\text{mm}$ gentemot CAD geometrin. En ytterligare justering av tillverkningsprocessen skulle behövas för att minska denna avvikelse, men det ligger utanför ramarna för det här projektet.



Figur 15: Geometriskanning (GOM) av kompositblad prototypen

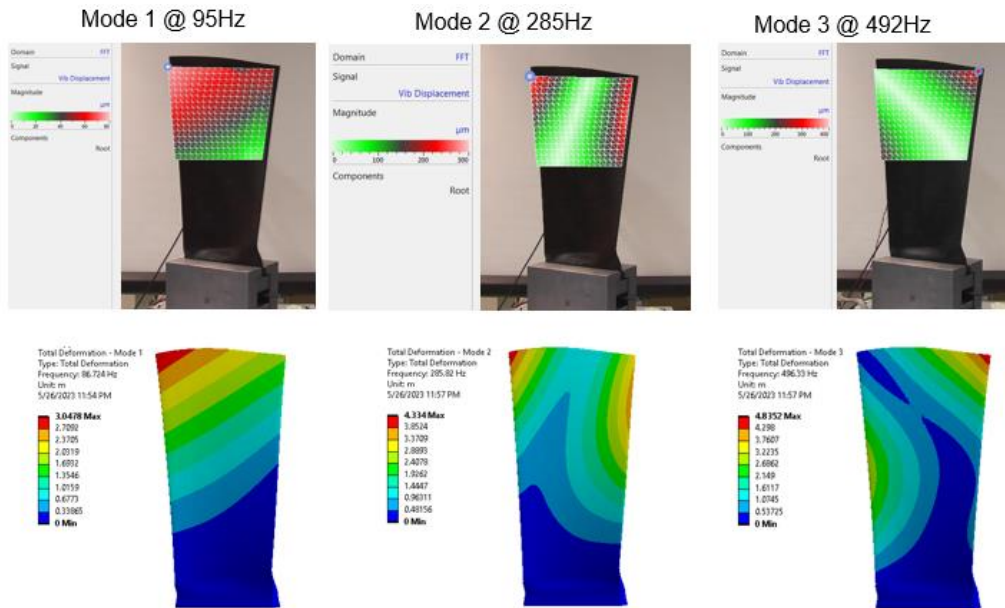
En annan utmaning som man mötte under tillverkningen av kompositbladet var i byggnation av rotdelen ("dovetail") på bladet. Det var svårt att bestämma optimalt antal och placering av utfyllnadsskikt i rotsektionen och trots upprepade försök lyckades man inte få den epoxibaserade matrisen att fylla ut ihålligheter i den regionen, vilket kan ses i Figur 16 nedan. Anledningen tros ligga i att man inte kunde uppnå den rekommenderade trycket under härdningen. För det valda materialsystemet (HexPly 8552-AS4) är den rekommenderade maxtemperaturen och trycket vid härdningsprocessen var 180°C och 7bar, medan i autoklaven hos tillverkaren kunde ett max tryck på 4.2bar erhållas. I de andra försöken, som gjordes med samma antal lager i regionen, men med ett annat material (CM-Preg UD200) där härdningen sker vid ett lägre tryck, så har man erhållit betydligt bättre resultat och epoxi-matrisen tycktes fylla ut alla ihålligheter. En CT skanning av prototypbladen rekommenderas i nästa steg för att kunna analysera den verkliga andelen ihålligheter i tvärsnittet.



Figur 16: Närbild på rotsektionen med synliga defekt i laminatet

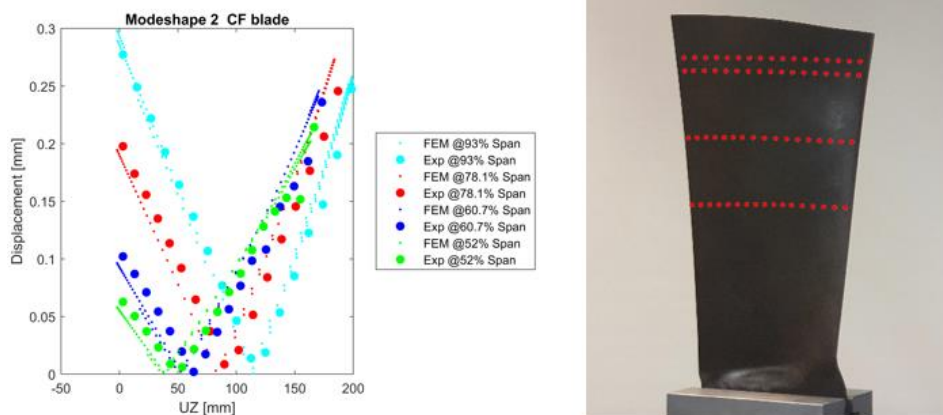
Ett av huvudsyften med att titta närmare på kolfiberkompositdesign i projektet var en potentiell viktreducering jämfört med att ha metalliska fläktblad. Vägning av de tillverkade bladprototyper visar att en besparing på ca 0,6kg per blad kan åstadkommas. Vikten på aluminiumbladet låg på 1360 gram, medan vikten på kompositbladet låg på 780 gram. Den totala potentiella viktbesparingen för en fläkt med 18 blad är ca 10,8 kg om man tillverkar fläktblad i kolfiberkomposit. På en helmotornivå kan det i sin tur innebära en viktreducering på uppemot ~35 kg, då man antar en potentiell viktreducering i andra komponenter tack vare den lägre vikten på de roterande komponenter. Den potentiella viktbesparingen kommer att minska något, eftersom en metallisk framkantsskydd behöver integreras i kompositbladet, vilket i sin tur kommer att öka vikten per individuellt blad.

Figur 17 nedan visar resultat från vibrationsmätningar genomförda på kompositbladet med fokus på bladets tre första egenmodfrekvenser. En kvalitativ jämförelse kan göras med modformer från modalanalys i FEM modellen.



Figur 17: Kompositbladets första tre modformer: uppmätt utböjning (övre raden) vs. FEM resultat (nedre raden)

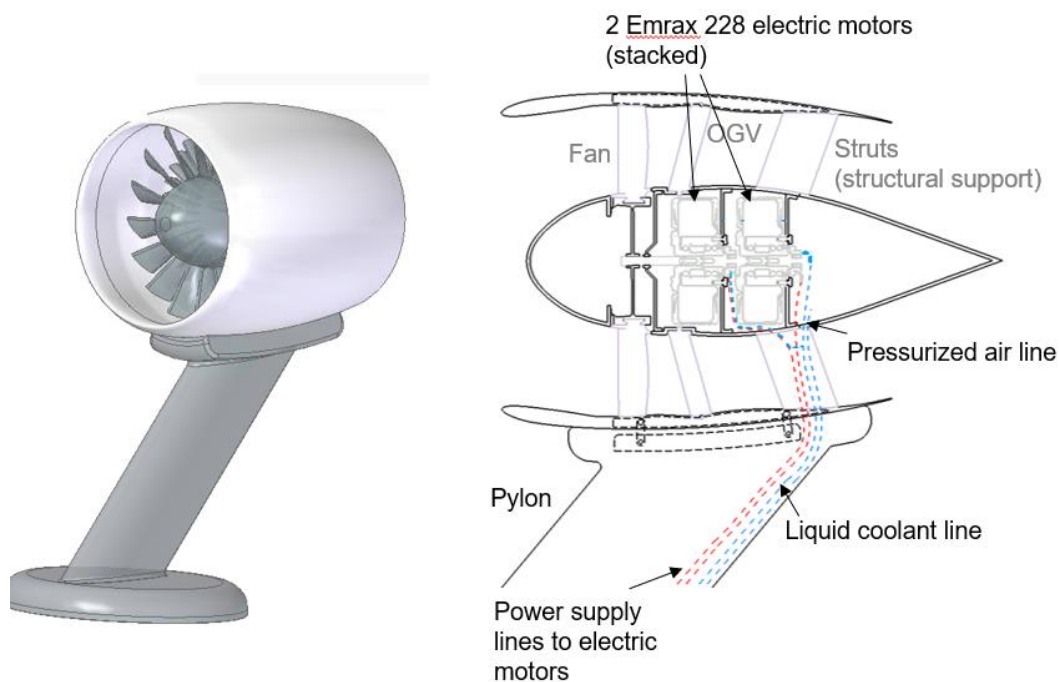
En detaljerad jämförelse vid specifika spannpositioner (Figur 18), visar dock att det existerar skillnader mellan den predikterade modformen för kompositbladet och mätresultaten. En av orsaker till de observerade skillnader tros vara att FEM modellen för kompositbladet inte har blivit uppdaterad för att ha samma antal lager i laminatet som det tillverkade kompositbladet. Arbetet med uppdateringen av FEM modellen pågår och en ny jämförelse kommer att göras då modellen är uppdaterad och nya simuleringar har körts. Det andra orsaken till skillnader kan vara att materialegenskaper som användes i modellen baseras på materialdata från databladet, och inte från ett materialprov. Dessa kommer att uppdateras och matas in i modellen då man avser att genomföra materialprov med provstavar som har erhållits från tillverkaren.



Figur 18: Jämförelse mellan uppmätt och predikterad utböjning (kompositbladet)

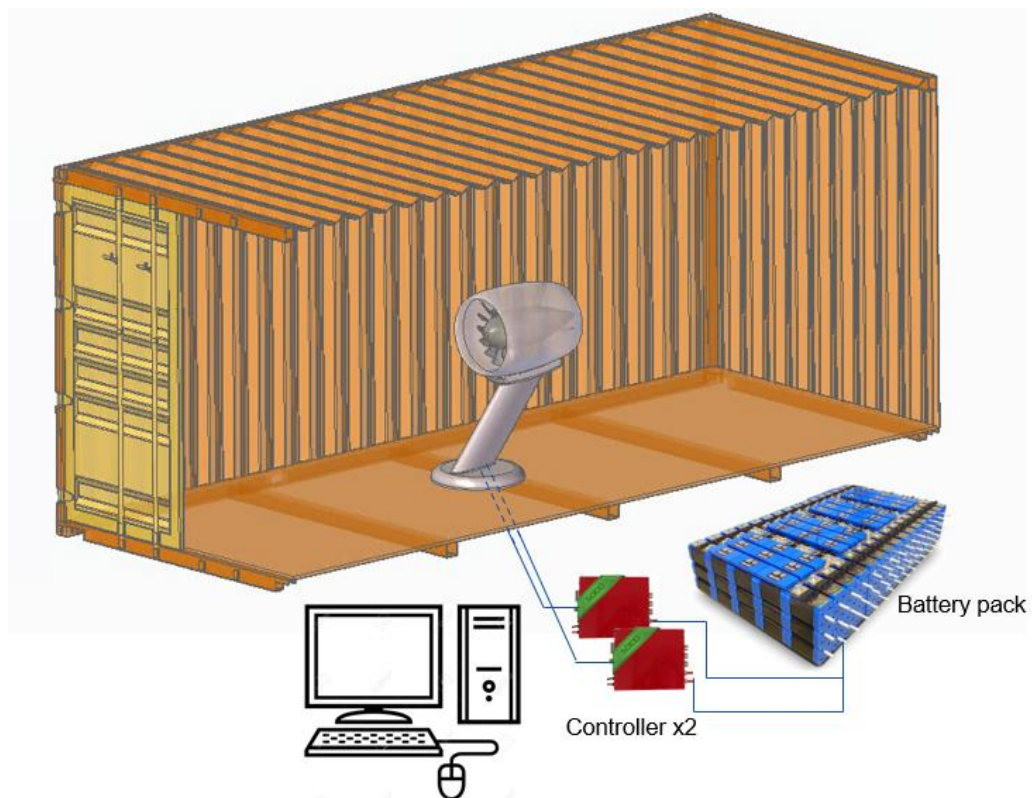
En förstudie av en fläktrigg har utförts i projektet och en konceptuell design av riggen har gjorts. I riggdesignen som har föreslagits och som visas i Figur 19 nedan ser man att fläkten drivs av två elektriska motorer av märke Emrax 228 (ytterdiameter på 228mm). Motorer tillsammans levererar en kontinuerlig effekt på

150kW och en topp effekt på ca 248kW vid 6500rpm. Vridmomentet blir 260Nm kontinuerligt, och ca 460Nm i toppvridmoment. Detta möter de effekt- och vridmomentkrav som erfordras för en nerskalad och delvis modifierad version av fläkten i skalan 1:3. Motorer kyls främst med vätskan och för att uppnå en optimal kylning så skulle en värmeväxlare behöva integreras för att sänka temperaturen på köldmedium därmed förbättra kontinuerlig effekt och vridmoment som kan tas ur motorer (effekt- och vridmomentvärden angivna ovan är vid köldmediums temperatur 50°C). Förutom vätskekylning så krävs det en luftcirkulation kring motorer för att ta emot värme som alstras från rotorn på elmotorn och därför föreslås en lösning med tryckluft som leds in under hubben.



Figur 19: Förslagen konceptuell design av fläktriggen

En kompakt design av riggen med elmotorer integrerade under hubben öppnar upp för en mera mobil helhetslösning, där strömförsörjningen fås från ett batteripack och reglering av spänningen/strömmen till motorer sker via två kompakta frekvensstyrenheter. Samtliga komponenter för det föreslagna utförandet (elmotorer, styrenheter och batterier) finns redan tillgängliga som kommersiella produkter och är prisvärda i jämförelse med om man skulle gå för en rigg med en mera traditionell, fast installation med en större industriell elmotor och växellåda. En kompakt lösning som denna som föreslås här gör att riggen går lätt att flytta och att den kan köras oberoende av vilken infrastruktur finns tillgänglig. Det gör också att man enkelt ska kunna anpassa och transportera riggen för framtida prov i en låghastighetsvindtunnel, eller testa den med andra komponenter i drivlinan.



Figur 20: Kompakt och anpassningsbar lösning för fläktriggen med fokus på mobilitet (här visas inom en standard 20-foot container)

Diskussion

Projektet har bidragit till ökad förståelse av hur framdrivningen av elektriska flygplan skulle kunna se ut i framtiden. Om elektriciteten har ursprung från en förnybar energikälla så skulle en del av det regionala flygsegmentet kunna få en mycket låg klimatpåverkan. EleFanT-projektet bidrar också bland annat till de ACARE-mål [3] som sätter medborgaren i fokus (Putting the citizen at the centre). Flygplatser förväntas ligga nära tätbebyggda områden även i framtiden för att upprätthålla god infrastruktur och korta restider. För att uppfylla målbilden i ACARE behöver därför en rad aktiviteter genomföras, exempelvis förbättrad planering av flygrutter, ljudisolering av hus som byggs i närheten av flygplatser samt nya motorer med lägre bullernivå. Elfläkten, som enligt resultaten i projektet har en lägre bullernivå jämfört med en propeller, kan bli en viktig del av det miljöarbetet.

Utvecklingen av metoder för analys av bullernivå från en elfläkt kommer även att gynna andra delar av flygmotorutveckling på GKN Aerospace, vilket på sikt kan leda till produkter med lägre bullernivå även för andra typer av motorer. En viktig del av framtida arbete kring buller kommer att vara validering av de metoder som används för bulleranalys av elfläktar. Det är också av stort intresse att genomföra ytterligare jämförelser mellan fläkt och propeller, gärna med toppmoderna propellrar som designats för låg bullernivå.

Ett intressant resultat i projektet var att det kan vara gynnsamt att bege sig in i ett hittills relativt outforskat designområde för fläktar. Ett framtida riggtest av en fläkt som designats för att arbeta i det området hade varit mycket intressant, och något som skulle ge bättre förståelse av hur en framtida elfläkt borde se ut för att maximala prestanda.

Undersökningar av fläktbladdesign i lättviktsmaterial påvisar att kolfiberkomposit kan vara ett rimligt alternativ som materialval för fläktbladet, då det resulterar i ~40% viktreducering per komponent. Detta i sin tur kan leda till ytterligare viktreducering på motornivå då kringliggande bärande komponenter kan konstrueras med lägre vikt. En noggrann design av kompositlaminatet där anisotropa egenskaper av kolfiber materialet nyttjas för att styra komponentens strukturella egenskaper kan också ge en förbättrad aeroelastisk prestanda för fläktbladet och undvika potentiella vibrationsproblem.

Utvärdering av pre-preg tekniken för tillverkning av kompositfläktbladet visar metodens potential, men för att kunna uppnå de uppsatta toleranskraven på profilgeometrin så krävs det ytterligare finjusteringar av metoden. En annan design för bladets rotsektion bör beaktas, som då skulle underlätta lamineringsprocessen i den här sektionen, samt minska risk för skador i laminatet då bladet utsätts för centrifugal last. Ett annat orosmoment med pre-preg metoden är repeterbarhet i processen då tillverkningen innebär mycket handpåläggning som i sig är beroende på den mänskliga faktorn. Trots att prototyp tillverkningen visade ganska bra repeterbarhet, det är något som behöver beaktas mera noggrant om man avväger en mera serieliknande produktion av kompositbladen för integrering in den framtida fläktriggen. Design av kompositbladen kommer att kompliceras ytterligare då en metallisk framkantsskydd behöver integreras i designen.

Konceptuell design av fläktriggen som genomfördes som en del av denna förstudie föreslår att en kompakt och kostnadseffektiv lösning kunde hittas för konstruktion av riggen, samtidigt som man försökte efterlikna ett upplägg som man har i den riktiga fläkttmotorn. På ett sådant sätt så skulle fläktriggen kunna användas för att demonstrera genomförbarhet av olika konstruktionslösningar i som senare kan appliceras i konstruktion av fläkttmotorn.

Publikationslista

Konferensartikel: Tavares Silva, V., Venkatesh, A., Lejon, M., Lundbladh, A., Xisto, C. (2022). **Multipoint Aerodynamic Design of a Nacelle for an Electric Fan**, ICAS2022-0138, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Stockholm, Sweden, 4-9 September.

Konferensartikel: Andersson, P., Lejon, M., Pradas, A., Jacobson, M. (2022) . **Demonstrating an approach for multidisciplinary set-based design within an aerospace research project**, ICAS2022-0661, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Stockholm, Sweden, 4-9 September.

Examensarbete: Baruah, P., **Aerodynamic design and optimization of a propeller for a regional electric aircraft**, 2022. KTH and Liege University.
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/16361>

Examensarbete: Venkatesh, A., **Multi-point aerodynamic design and optimization of a nacelle for an electric fan**, 2022. Chalmers.
<https://odr.chalmers.se/items/df7710cc-4dd1-4324-8c3a-38ca62b487fe>

Artikel i NyTeknik: <https://www.nyteknik.se/premium/forskarnas-flakt-ska-ge-tysta-flygplan-pataglig-skillnad-7029400>

GKN press release: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-to-lead-development-of-electric-fan-thruster-for-electric-aircraft/>

KTH artikel: <https://www.kth.se/itm/nyheter/en-elefant-ovan-molnen-1.1139490>

Omnämning i artikel på Flight Global:
<https://www.flightglobal.com/aerospace/gkn-aerospace-details-progress-on-h2gear-hydrogen-fuel-cell-powertrain/147006.article>

Presentation på GKN's IGE-day (Introduce a Girl to Engineering), 2022-03-25

Referenser, källor

- [1] Chalke, A., Glodic, N., Gutierrez M. S., 2022, “ Aeroelastic Tailoring of Compressor Blades”, ICAS-2022-0507, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences
- [2] Airbus Global Market Forecast 2022-2041, accessed 29 May 2023. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>
- [3] ACARE goals, accessed 22 May 2023, www.acare4europe.org/acare-goals

Bilagor

Se bifogade dokument.