



CHALMERS



Strukturoptimering av ett fäste i en jetmotor med varierande last

Produktutveckling av ett fäste mellan kompressormellanhus och yttre fläktledskenor

Examensarbete i maskinteknik

Julia Skoog
Anna Åström

INSTITUTIONEN INDUSTRI OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2026

Strukturoptimering av ett fäste i en jetmotor med varierande last

Produktutveckling av ett fäste mellan
kompressormellanhus och yttre fläktledskenor

JULIA SKOOG
ANNA ÅSTRÖM



CHALMERS

Institutionen industri och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Strukturoptimering av ett motorfäste i en jetmotor vid varierande last
Produktutveckling av ett fäste mellan kompressormellanhus och yttre fläktledskenor
JULIA SKOOG & ANNA ÅSTRÖM

© JULIA SKOOG & ANNA ÅSTRÖM, 2026.

Handledare: Göran Gustafsson
Examinator: Peter Hammersberg

Examensarbete 2026
Institutionen industri och materialvetenskap
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Koncept A3 det slutgiltiga fästet mellan IMC och OGV.

Göteborg 2026

Sammanfattning

Detta examensarbete genomfördes på uppdrag av GKN Aerospace och behandlar möjligheten att flytta ett motorfäste från kompressormellanhuset (IMC) till monteringsringen för fläkthuset (FCMR). I samband med en sådan förändring uppstår behovet av att utveckla ett nytt fäste mellan IMC och fläktledskenorna (FEGV) som kan skapa en fungerande lastväg och samtidigt uppfylla tekniska krav avseende hållfasthet, vikt och monterbarhet. Projektets syfte har därför varit att utveckla och utvärdera olika koncept för ett sådant fäste.

Projektet följde en strukturerad produktutvecklingsprocess med fokus på problemformulering, datainsamling, kravspecifikation, funktionsanalys, konceptgenerering och konceptutvärdering. Under arbetets gång identifierades viktiga krav såsom låg vikt, god hållfasthet, monterbarhet, kompatibilitet med befintlig konstruktion samt möjlighet till tillverkning. Ett flertal koncept genererades och utvärderades översiktligt. Efter urvalsprocesser valdes de mest lovande alternativen ut för vidare modellering i CAD och analys med FEM i ANSYS. Vid utvärderingen användes konceptens spänningsnivåer i förhållande till materialets brottgräns samt vikt som huvudsakliga kriterier.

Efter genomförda analyser bedömdes koncept A3, en lösning med stag, vara det mest lämpliga alternativet. Konceptet uppvisade god strukturell funktion, acceptabla spänningsnivåer och konkurrenskraftig vikt jämfört med övriga alternativ. Slutsatsen från arbetet är att det finns god potential att skapa ett lastoptimerat fäste mellan IMC och FEGV. Med fortsatt utveckling, geometrioptimering och mer detaljerade analyser kan koncept A3 vara ett intressant alternativ för framtida industriell användning.

Abstract

This bachelor thesis was carried out on behalf of GKN Aerospace and examines the possibility of moving an engine mount from the Intermediate Compressor Case (IMC) to the Fan Case Mount Ring (FCMR). Such a change creates a need for a new connection between the IMC and the Fan Exit Guide Vanes (FEGV) that can provide a functional load path while also meeting technical requirements regarding strength, weight and assembly. The purpose of the project was therefore to develop and evaluate different concepts for such a connection.

The project followed a structured product development process with focus on problem definition, data collection, requirement specification, functional analysis, concept generation and concept evaluation. During the project, important requirements were identified, such as low weight, good strength, ease of assembly, compatibility with the existing design and manufacturability. Several concepts were developed and evaluated. The most promising concepts were then modelled in CAD and analysed with finite element method in ANSYS. The concepts were mainly compared based on stress levels in relation to the materials properties and weight.

After the analyses, concept A3, a solution with support struts, was considered the most suitable alternative. The concept showed good structural performance, acceptable stress levels and competitive weight compared with the other concepts. The conclusion of the project is that there is good potential to create a functional connection between the IMC and FEGV. With further development, geometry optimisation and more detailed analyses, concept A3 could be an interesting alternative for future industrial use.

Akronymer

Nedan finns en alfabetiskt ordnad lista över de akronymer som används i denna rapport:

CAD	Datorstödd design (computer-aided-design)
EML	Motorupphängingsfäste (engine-mount-lug)
FBO	Fläktbladbrott (fan-blade-out)
FCB	Främre centraldel (front-canter-body)
FCMR	Monteringsring för fläkthus (fan-case-mount-ring)
FEGV	Fläktledskenor (fan-exit-guide-vane)
FEM	Finita elementmetod (finite-element-method)
IMC	Kompressormellanhus (intermediate-case)
LPC	Lågtryckskompressor
TL	Flygplanets motorfästen (trust-lug)

Innehåll

Akronymer

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	2
1.2	Syfte	2
1.3	Mål	2
1.4	Frågeställningar	3
1.5	Avgränsningar och antaganden	3
2	Teori	4
2.1	Jetmotorn	4
2.1.1	Luftintag och fläkt	5
2.1.2	Kompression	5
2.1.3	Förbränning	5
2.1.4	Turbin och energiutvinning	6
2.1.5	Utströmning och dragkraft	6
2.2	Kompressormellanhus	6
2.3	Fläktledskenor	7
2.4	Motorfäste	7
2.5	Material	8
3	Metod	9
3.1	Produktutvecklingsprocess	9
3.2	Problemformulering	9
3.3	Datainsamling	9
3.4	Kravspecifikation	10
3.5	Funktionsanalys	10
3.6	Konceptgenerering	11
3.7	Konceptutvärdering	11
3.8	Verifiering	11
4	Genomförande	12
4.1	Kravspecifikation	12
4.2	Funktionsanalys	13
4.3	Konceptgenerering	13
4.3.1	Morfologisk matris	13
4.3.2	Patentsökning	23

4.3.3	Brainstorming	26
4.4	Gruppering av koncept	30
4.5	Jämförande av grupper	31
4.6	Konceptkatalog	31
4.7	Eliminering av koncept	38
5	Resultat	43
5.1	Verifiering	43
5.1.1	Analys av C5	44
5.1.2	Analys av A3	45
5.1.3	Analys av B4	46
5.2	Slutgiltigt jämförande	48
6	Diskussion	51
6.1	Tillförlitlighet och inverkan	51
6.2	Etiska och miljö aspekter	52
7	Slutsats	53
7.1	Övergripande slutsatser	53
	Referenser	54

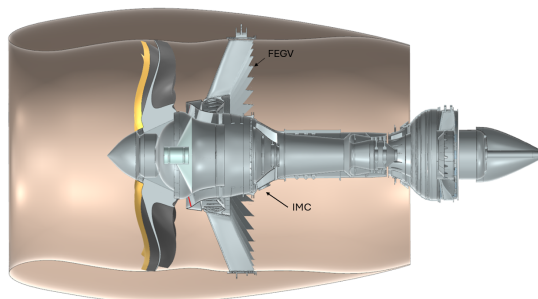
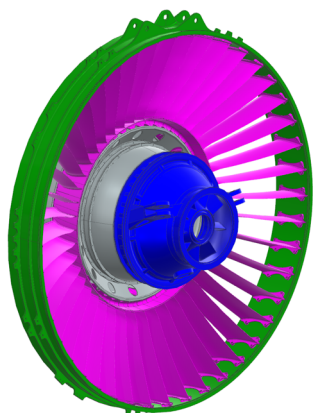
1

Inledning

GKN Aerospace i Trollhättan utvecklar, konstruerar och tillverkar flygmotorkomponenter som kompressorstativ och turbinstativ. Dessa komponenter används i jetmotorer, designade för att generera dragkraften för framdrivning av flygplan. Civila turbofläktmotorer har den största delen av dragkraften från by-passflödet, som inte deltar i förbränningen. Utloppsflödet från det roterande fläktsteget är virvlande och behöver riktas upp axiellt för att minska buller. Denna prestandaoptimering sker genom ledskenor (FEGV) som är en aerodynamisk komponent. De framdrivande lasterna förs in genom det främre lagret genom stativet (IMC), en avgörande statisk strukturell komponent, in i flygplanets motorfäste (TL). Manöverlasten under flygning förs också över strukturellt i samma IMC genom fästen (EML). Strukturen dimensioneras primärt för lossnat fläktblad (FBO) en exceptionell belastning. IMC:n leder också luft till förbränningen och är en viktig del av motorns stomme (ryggrad), som att tillgodose styvhet och strukturell integritet mellan roterande och statiska delar. Låg- och högtrycksaxeln har ett kullager som normalt är lokaliserat vid det främre stativet.

En vanlig design är en gjuten IMC av titan med integrerat motorfäste med både TL och EML. För att förbättra by-passflödet önskas flytta motorfästet från IMC till fläkthuset (FCMR). Det innebär att lasterna förs igenom ledskenorna FEGV genom en komponent som inte normalt överför last. Konceptet som arbetet fokuserar på är att utvärdera effekten av att flytta lastvägen från IMC till FEGV och framför allt därigenom sammanbinda på ett effektivt sätt, se figur 1.1 och 1.2.

FCMR – Fan Case Mount Ring
FEGV – Fan Exit Guide vane
FCB – Front Center Body
IMC – InterMediate Case



Figur 1.1: Benämningar på komponenterna.

Figur 1.2: Lokalisering av FEGV och IMC i en jetmotor.

1.1 Bakgrund

Flygindustrin ställer höga krav på låg vikt, minskad bränsleförbrukning, hög säkerhet och god hållfasthet [1]. Företag som levererar komponenter till stora motortillverkare och flygplansproducenter konkurrerar därför främst genom teknisk prestanda, kvalitet, leveranssäkerhet och innovationsförmåga. GKN Aerospace i Trollhättan konstruerar och tillverkar avancerade flygkomponenter till kunder över hela världen. För att behålla en konkurrenskraftig position inom branschen krävs kontinuerlig innovation och teknisk utveckling. Inom företaget arbetar Global Technology Center (GTC) med att utveckla framtidens lösningar och stärka företagets konkurrenskraft. Ett centralt mål inom denna utveckling är att minska komponenternas vikt och därigenom reducera flygplanens bränsleförbrukning. Skälet till att fästet på IMC ses över är att det finns potential att minska storleken och vikten på hela flygplanspylonen som bär upp motorn. För att det ska vara möjligt behöver även interna komponenter effektiviseras och förenklas. Däremot finns det inga nuvarande undersökningar av vad som händer med resterande komponenter om fästet flyttas eller tas bort. Lastvägarna kommer därför att anpassas och förflyttas samt styvheten på komponenten kommer att förändras. Mot denna bakgrund finns ett intresse av att ersätta det befintliga motorfästet med ett nytt koncept där motorfästet flyttas till FCMR:s framkant, se figur 1.1. För att säkerställa att IMC hålls stabilt på plats krävs en ny lastväg mellan IMC och FEGV. Denna lösning måste vara strukturellt effektiv samt inte försämra aerodynamiken eller öka den totala vikten jämfört med den nuvarande konstruktionen.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att utveckla och utvärdera olika koncept för fästen mellan IMC och FEGV för att möjliggöra en ny lastväg. De framtagna koncepten ska analyseras och jämföras med avseende på spänningar i förhållande till materialets brottgräns samt vikt för att identifiera den mest lämpliga lösningen utifrån ställda krav.

1.3 Mål

Målet med examensarbetet är att ta fram ett konceptuellt designförslag för ett fäste mellan IMC och FEGV som möjliggör flytt av motorfästet från IMC till FCMR. Konstruktionen ska uppfylla ställda krav avseende funktion, styrka, styvhet, vikt och monterbarhet. Vidare är målet att jämföra framtagna koncept och identifiera den mest lämpliga lösningen utifrån deformation, spänningar och massa med givet material.

1.4 Frågeställningar

- Hur kan en koppling mellan IMC och FEGV utformas för att möjliggöra ny lastväg?
- Vilka krav och egenskaper ska kopplingen besitta?
- Hur kan olika koncept modelleras och jämföras i CAD?
- Vilket koncept är mest lämpligt med avseende på deformationer, spänningar och vikt?

1.5 Avgränsningar och antaganden

- Arbetet avgränsas till konceptutveckling och omfattar inte framtagning av en färdig produktlösning.
- Slutleveransen består av ett konceptuellt designförslag i form av en CAD-modell.
- Kostnadsberäkningar samt detaljritningar med tillverkningstoleranser ingår inte i arbetet.
- Verifiering genomförs med förenklade lastfall i hållfasthetsprogrammet ANSYS.
- Fullständig analys av aerodynamiska effekter och påverkan på övriga delar av flygplanet ingår inte i arbetet.
- Om koncepten skapar öppningar mellan IMC och FEGV antas dessa tätas med en tunn plåt för att förhindra luftgenomströmning i modellen.
- Förutbestämt material Titan 6-4.

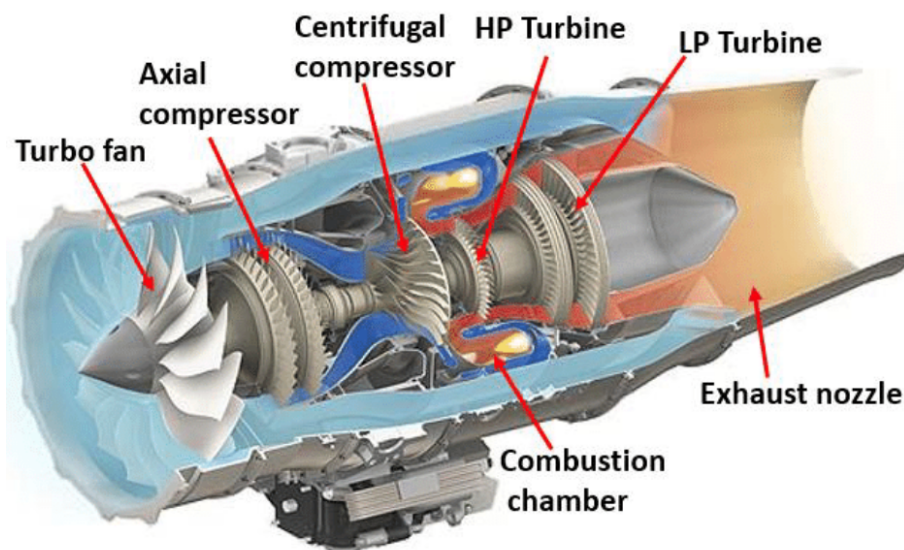
2

Teori

Följande kapitel redogör för de teorier och tekniska principer som är relevanta för utvecklingen av ett nytt strukturellt fäste mellan IMC och FEGV. Avsnittet beskriver de funktioner och lastvägar som präglar motorns främre struktur samt de krav, begränsningar och designmässiga överväganden som påverkar konstruktionen. Syftet är att etablera en teoretisk grund som stödjer analysen av problemområdet och motiverar de metodval och konceptlösningar som presenteras i efterföljande kapitel.

2.1 Jetmotorn

En modern civil jetmotor är vanligtvis en turbofläktmotor. I figur 2.1 visas jetmotorns huvudsakliga delar och arbetsförlopp. Motorn bygger på principen om kontinuerlig förbränning och energiomvandling i en gasturbinprocess enligt Braytoncykeln. Luft sugas först in och komprimeras i kompressorn, därefter sker förbränning där bränsle tillsätts och energi frigörs vid nästan konstant tryck. Den heta gasen expanderar sedan genom turbinen och accelereras slutligen genom ett munstycke. Motorns funktion kan delas in i fyra huvudsteg: insug, kompression, förbränning och expansion [2].



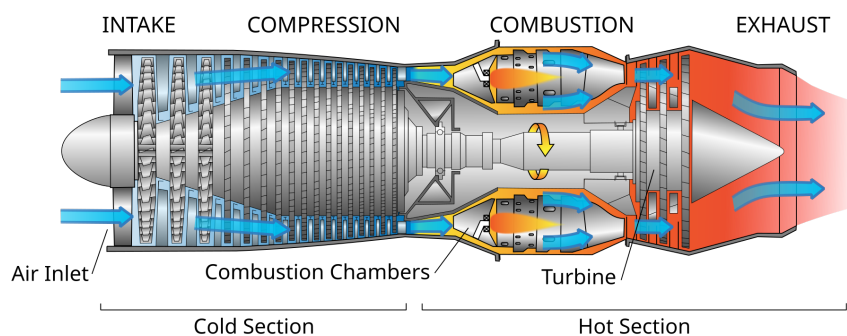
Figur 2.1: Genomsnitt av jetmotorn och dess interna delar [3].

2.1.1 Luftintag och fläkt

Luft sugas in genom motorns inlopp och passerar först fläkten som är den största roterande komponenten i motorn. Fläkten accelererar luftströmmen och bidrar direkt till dragkraftproduktionen. I en turbofläktmotor delas luftströmmen upp i två delar:

- Bypassflöde som leds runt kärnmotorn och genererar en stor del av dragkraften.
- Kärnflöde som fortsätter in i kompressorn.

Förhållandet mellan dessa två flöden kallas bypassförhållande och är en central designparameter i moderna motorer. Ett högt bypassförhållande ger förbättrad bränsloeffektivitet och lägre bullernivåer, eftersom en större luftmassa accelereras med lägre hastighetsökning [2], se figur 2.2.



Figur 2.2: Övergripande bild på jetmotorns arbetsförlopp [4].

2.1.2 Kompression

I kompressorn ökar luftens tryck och temperatur genom flera steg av roterande rotorblad och stillastående ledskenor. Varje steg bidrar till en gradvis tryckhöjning, vilket resulterar i ett högt totalt tryckförhållande över kompressorn. Den ökade trycknivån är avgörande för motorns verkningsgrad eftersom en högre kompression leder till effektivare energiutvinning i turbinen [2], se figur 2.2.

2.1.3 Förbränning

Den komprimerade luften leds in i förbränningskammaren där den blandas med finfördelat bränsle. Blandningen antänds och skapar en kontinuerlig förbränning. Förbränningen sker vid nästan konstant tryck och resulterar i en kraftig temperaturökning, vilket ger upphov till en högenergirik gasström. Förbränningskammaren är konstruerad för att säkerställa stabil låga, effektiv bränsleblandning och kontrollerade utsläppsnivåer. Endast en del av den inkommande luften används direkt i förbränningsprocessen, resterande luft används för kylning och för att reglera temperaturen innan gasen når turbinen [2], se figur 2.2.

2.1.4 Turbin och energiutvinning

Den högtempererade och högtryckssatta gasen från förbränningskammaren expanderar genom turbinen. Turbinens uppgift är att utvinna en del av gasens energi och omvandla den till mekaniskt arbete, genom att gasen passerar de roterande turbinbladen som är monterade på en axel. När gasen expanderar minskar dess tryck och temperatur samtidigt som rörelseenergi överförs till turbinen. I en modern turbofläktmotor finns vanligtvis både en högtrycksturbin (HPT) och en lågtrycksturbin (LPT). Högtrycksturbinen driver högtryckskompressorn via en inre axel, medan lågtrycksturbinen driver fläkten och lågtryckskompressorn via en yttre koncentrisk axel. Denna uppdelning möjliggör effektiv drift vid olika varvfrekvenser i motorns olika delar. Turbinens funktion är avgörande för att upprätthålla kompressionsprocessen och därmed hela motorns kontinuerliga drift [2], se figur 2.2.

2.1.5 Utströmning och dragkraft

Efter att energi har utvunnits i turbinen fortsätter gasen att expandera genom motorns utloppsmunstycke. I munstycket omvandlas gasens återstående tryckenergi till rörelseenergi genom acceleration av flödet bakåt. Enligt Newtons tredje lag genererar denna acceleration en motriktad kraft, vilket ger upphov till dragkraft. I en turbofläktmotor genereras dock en betydande del, och i moderna motorer, majoriteten av dragkraften genereras av bypassflödet som accelereras av fläkten. Följande flöde passerar utanför kärnmotorn och bidrar till högre verkningsgrad och lägre bränsleförbrukning jämfört med äldre turbojetmotorer. Förhållandet mellan bypassflöde och kärnflödet är därför en central designparameter i moderna civila motorer [2], se figur 2.2.

2.2 Kompressormellanhus

Kompressormellanhuset (IMC) utgör en central strukturell komponent i motorns främre kärnstruktur [5]. Dess primära funktion är att säkerställa strukturell styvhet och lastöverföring mellan låg- och högtryckskompressorn [5],[6]. IMC fungerar som en bärande struktur som tar upp axiella, radiella och böjande laster från roterande komponenter och leder vidare dessa genom motorns primärstruktur [5].

IMC inrymmer huvudaxellager som stödjer de koncentriska axlarna mellan kompressorn och turbinen [5]. Dessutom integreras ofta växellådor och tillhörande stödfunktioner i denna sektion [7]. Strukturen tillhandahåller även infästningspunkter för motorfästen och dragkraftsfästen/-öglor som överför laster mellan motor och pylon [5]. I högtrycksområdet fungerar IMC dessutom som en del av högtryckskompressorns brandzon och separerar olika zoner enligt säkerhetskrav [7]. Aerodynamiskt leder strukturen kärnflödet mellan kompressionsstegen och säkerställer korrekt genomströmning [5],[6]. Utöver sina primära funktioner hanterar IMC även sekundära system. Den innehåller kanaler för avtappningsluft, sekundärluft och anti-is-luft samt interna passager för oljeförsörjning till lager och växellådor [5],[7]. Därmed utgör IMC en integrerad systemplattform där både strukturella och funktionella krav

uppfylls [7].

2.3 Fläktledskenor

Fläktledskenorna är placerade i nedströmsfläkten och har både aerodynamiska och strukturella funktioner. Aerodynamiskt omvandlar FEGV den roterande luftströmmen från fläkten till ett mer axiellt riktat flöde genom att reducera den roterande komponenten [8],[9]. Vilket leder till en förbättrad propulsiv verkningsgrad och mer effektiv dragkraftgenerering [8]. Strukturellt är FEGV-sektionen en del av fläktstrukturen och bidrar till att upprätthålla geometrisk stabilitet i motorns främre struktur genom att koppla samman den inre och yttre kåpstrukturen [8],[2]. Genom att koppla samman den inre och yttre kåpstrukturen motverkas deformation av FCMR under aerodynamiska och mekaniska laster. En FEGV kan utformas i olika geometriska konfigurationer beroende på motorarkitektur och lastkrav [8]. Vanliga material är titanlegeringar, aluminiumlegeringar eller kolfiberförstärkta kompositer, där materialvalet styrs av krav på styvhet, densitet, temperaturlåghet och kostnad [2],[10]. Primära funktioner är att FEGV förvandlar den roterande luftströmmen från fläkten till ett mer axiellt luftflöde vilket skapar dragkraft, samt att ledskenorna ger strukturell styvhet för att förhindra deformation av FCMR [8],[2].

2.4 Motorfäste

I jetmotorer utgör IMC och FEGV två centrala strukturella element i motorns främre sektion. IMC fungerar som ett bärande lagerhus som tar upp kompressorns lastvägar [2],[11], medan FEGV-sektionen har både en aerodynamisk funktion genom att räta upp luftflödet efter fläkten samt en strukturell funktion genom att vara en del av fläktstrukturen [8]. För att dessa två strukturer ska kunna arbeta tillsammans krävs ett effektivare fäste som säkerställer geometrisk stabilitet, lastöverföring och korrekt relativ positionering mellan IMC och FEGV [2].

Fästet mellan IMC och FEGV är inte ett traditionellt motorfäste, utan ett internt strukturellt kopplingsfäste. Dess huvudsakliga uppgift är att stabilisera IMC i förhållande till FEGV, överföra tvärkrafter, moment och vibrationslast, säkerställa att IMC bibehåller korrekt axiell och radiell position och även bidra till en styv och förutsägbar lastväg genom motorns främre struktur [2]. Eftersom IMC och FEGV utsätts för olika typer av mekaniska och aerodynamiska laster är kopplingsfästet en kritisk del för att systemet ska fungera som en stabil helhet [11].

Arbetet med att utveckla ett nytt fäste mellan IMC och FEGV grundar sig i industrins behov av viktreduktion, kompaktare motor- och pylonlösningar, optimerade lastvägar och bättre monteringsvänlighet [2]. Eftersom målet är att flytta det externa motorfästet från IMC till FCMR måste IMC fortfarande hållas stabilt. Vilket kräver en ny intern konstruktion som kan överföra laster utan att öka vikt eller försämra aerodynamik. Eftersom vikten är en avgörande konkurrensfaktor måste fästet ha en enkel lastväg, integrera funktioner där det är möjligt och ersätta flera sepa-

rata komponenter där det är lämpligt [2]. En väl integrerad lösning kan reducera både vikt och komplexitet. Att skapa ett nytt fäste mellan IMC och FEGV innebär flera utmaningar såsom begränsat utrymme mellan fläktledskenorna, komplex geometri runt IMC och FEGV som begränsar infästningspunkter, krav på hög styvhet men låg vikt, kombinerad last från både aerodynamik och struktur samt potentiellt komplicerade monteringsvägar [8].

2.5 Material

Titanlegeringar används i stor utsträckning inom flygindustrin tack vare deras höga hållfasthet i kombination med låg densitet, god korrosionsbeständighet samt förmåga att bibehålla goda mekaniska egenskaper vid förhöjda temperaturer [12]. Dessa egenskaper gör titan särskilt lämpligt för komponenter i flygmotorer där låg massa och hög strukturell prestanda är viktiga faktorer för motorns prestanda och livslängd.

En av de vanligaste titanlegeringarna inom flygindustrin är Ti-6Al-4V, även kallad Titan 6-4. Materialet består huvudsakligen av titan med tillsatser av aluminium och vanadin, vilket ger en god kombination av hög hållfasthet, god seghet och relativt låg densitet [13]. Materialet har en densitet på cirka 4,43 g/cm³, vilket är lägre än för stål, samtidigt som det erbjuder hög mekanisk hållfasthet [13]. Titan 6-4 har en elasticitetsmodul på cirka 114 GPa och en sträckgräns på 830 MPa [13]. Materialet uppvisar även god utmattningshållfasthet och korrosionsbeständighet, vilket är viktigt i flygmotorer där komponenter utsätts för cykliska belastningar och varierande miljöförhållanden. Titan 6-4 bibehåller dessutom sina mekaniska egenskaper vid temperaturer upp till cirka 400 °C, vilket gör materialet lämpligt för flera komponenter i flygmotorer [13].

För komponenter i varmare delar av flygmotorn används även mer temperaturbeständiga titanlegeringar, exempelvis Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, även kallad Titan 6-2-4-2. Denna legering kan användas vid temperaturer upp till cirka 550 °C och erbjuder förbättrade högttemperaturegenskaper jämfört med Titan 6-4 [14], [15].

I examensarbetet är materialet förutbestämt av GKN Aerospace och utgörs av titanlegeringen Ti-6Al-4V. Samma material används i den befintliga konstruktionen, vilket möjliggör relevanta jämförelser mellan framtagna koncept. Därmed kan fokus läggas på geometrisk utformning och strukturell prestanda snarare än skillnader i materialegenskaper.

3

Metod

Examensarbetet genomfördes enligt en systematisk produktutvecklingsprocess där analytiska och simuleringsbaserade metoder kombinerades med datainsamling. Metoden valdes för att möjliggöra utveckling, utvärdering och verifiering av de konceptuella designlösningar för fästen mellan IMC och FEGV.

3.1 Produktutvecklingsprocess

Produktutvecklingsprocessen användes i följande projekt för att strukturera arbetet från problemformulering till verifierad konceptlösning. Processen omfattade de steg som är relevanta för utvecklingen av ett motorfäste, inklusive datainsamling, kravspecifikation, funktionsanalys, konceptgenerering och konceptutvärdering. Dessa steg följs av CAD-modellering och FEM-baserad verifiering för att säkerställa att de framtagna koncepten uppfyller de tekniska kraven. Genom att arbeta enligt en strukturerad utvecklingsprocess skapas tydlighet, spårbarhet och ett systematiskt underlag för beslut under projektets gång.

3.2 Problemformulering

Arbetet inleddes med en tydlig problemformulering utan koppling till någon specifik lösning. Fokus låg på att identifiera orsakerna till höga spänningar i IMC samt analysera skillnader mellan konfigurationer med och utan motorfäste. Problemområdet avgränsades till fästet mellan IMC och FEGV med fokus på spänningsnivåer i förhållande till materialets brottgräns, strukturell funktion och vikt. Syftet med följande steg var att skapa en tydlig förståelse för problemet och undvika att tidigt låsa arbetet vid en viss lösning. Ett lösningsoberoende arbetssätt gav bättre förutsättningar att ta fram flera koncept som senare kunde jämföras mot uppställda krav och funktionsmål.

3.3 Datainsamling

För att fastställa vilka krav den nya lösningen ska uppfylla samlades behov in från relevanta intressenter. Med hjälp av intervjuer med konstruktörer och ingenjörer inom företaget samt genom analys av interna tekniska dokument och tidigare projekt. De identifierade behoven omfattar bland annat krav på funktionell integration,

tillverkningsbarhet och kompatibilitet med befintliga komponenter. En litteraturstudie genomfördes i ett tidigt skede av arbetet för att skapa en teoretisk förståelse för problemområdet. Studien omfattade vetenskapliga artiklar, tekniska rapporter samt tidigare examensarbeten inom områden som strukturell analys, deformationer, styvhet och konstruktion av flygkomponenter. Resultatet sammanställdes sedan och användes som grund för vidare arbete.

Insamling av krav från flera källor användes för att säkerställa att både praktiska, tekniska och verksamhetsrelaterade aspekter beaktas i utvecklingsprocessen. Genom att kombinera intervjuer med intern dokumentation kan både fastställda krav och erfarenhetsbaserade kunskap från tidigare projekt tas tillvara. Vilket minskar risken för att viktiga begränsningar eller funktionskrav förbises i senare skeden av arbetet. Den kompletterande litteraturstudien bidrar till att skapa en teoretisk referensram och möjliggör jämförelse mellan befintliga lösningar, etablerade analysmetoder och aktuella forskningsresultat inom området. Därigenom ges ett bättre underlag för att tolka simuleringsresultat och förstå tekniskt motiverande beslut under konceptutvecklingen.

3.4 Kravspecifikation

De identifierade behoven från datainsamlingen översattes till en kravspecifikation bestående av tydliga och mätbara tekniska krav samt prioriterade önskemål. Kraven avsåg egenskaper som den framtagna lösningen ovillkorligen skulle uppfylla, medan önskemål användes för att jämföra och värdera alternativa koncept. Kravspecifikationen omfattade både funktionella krav, som beskrev vad motorfästet skulle uppfylla, samt icke-funktionella krav kopplade till exempelvis geometri, kompatibilitet, vikt och tillverkningsbarhet. Dokumentet användes som ett styrande underlag under den fortsatta konceptutvecklingen.

Metoden valdes för att säkerställa att utvecklingsarbetet baserades på verifierbara kriterier snarare än subjektiva antaganden. Kravspecifikationen låg till grund för konceptgenerering, konceptjämförelse och senare verifiering av den valda lösningen. Detta bidrog även till spårbarhet mellan identifierade behov, tekniska lösningar och slutligt resultat. Den framtagna kravspecifikationen visas i figur 4.1.

3.5 Funktionsanalys

Problemet analyserades genom en funktionsanalys där de funktioner som den nya konstruktionen måste uppfylla identifierades. Syftet var att beskriva vad kopplingen mellan IMC och FEGV skulle åstadkomma utan att tidigt låsa arbetet till en specifik teknisk lösning. Identifierade funktioner omfattade bland annat lastöverföring mellan IMC och FEGV, stabilisering av komponenterna, möjliggörande av montering samt tillräckligt utrymme för monteringsverktyg. Genom att tydliggöra dessa funktioner skapades en tydlig koppling mellan uppställda krav och möjliga konstruktionslösningar. Den genomförda funktionsanalysen presenteras i figur 4.2.

Funktionsanalysen valdes som metod för att strukturera ett komplext konstruktionsproblem och säkerställa att relevanta tekniska funktioner beaktades under utvecklingsprocessen. Metoden bidrog även till att hålla fokus på konstruktionens funktionella behov snarare än att tidigt låsa designen vid specifika geometriska former.

3.6 Konceptgenerering

Utifrån resultaten från funktionsanalysen genomfördes konceptgenerering för att ta fram flera alternativa lösningar till den definierade problemställningen. Syftet var att generera maximalt antal koncept innan någon tidig utvärdering genomfördes. Som stöd i arbetet användes kreativa och systematiska metoder, exempelvis patentsökning, brainstorming och morfologisk matris. Genom att kombinera olika metoder kunde både etablerade konstruktionsprinciper och nya idéer identifieras. Metoden valdes för att öka antalet möjliga lösningsförslag och skapa ett bättre underlag för efterföljande konceptutvärdering och urval.

3.7 Konceptutvärdering

Inom konceptutvärderingen genomfördes en mer detaljerad jämförelse mellan återstående alternativ, där ytterligare koncept successivt sorterades bort baserat på prestanda och genomförbarhet. Resultatet var ett eller flera koncept som uppfyllde arbetets mål och krav samt har potential att vidareutvecklas inom projektets givna ramar.

3.8 Verifiering

Verifiering genomfördes genom detaljerad CAD-modellering. Därefter utfördes FEM-analyser för att utvärdera och jämföra konceptens spänningsnivåer, deformation och strukturella egenskaper. Metoden användes för att säkerställa att den valda lösningen uppfyllde uppställda krav och tekniska mål.

4

Genomförande

I följande kapitel beskrivs hur de valda metoderna tillämpades under projektets genomförande. Arbetet omfattade informationsinsamling, analys av insamlad data, produktutvecklingsmetoder samt konceptgenerering och vidareutveckling i CAD.

4.1 Kravspecifikation

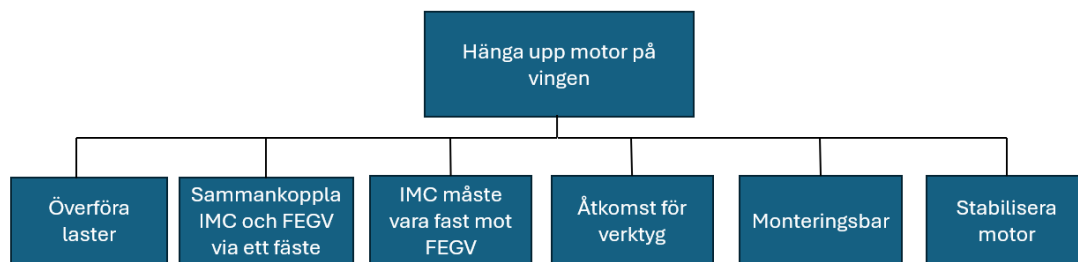
Kravspecifikationen sammanfattar de krav som identifierats för fästet och utgör en utgångspunkt för den fortsatta konceptutvecklingen. Kravspecifikationen redovisar både funktionella och konstruktionsrelaterade krav som lösningen ska uppfylla, samt önskvärda krav som eftersträvas men inte är prioriterade, se figur 4.1.

Chalmers	Dokumenttyp	Kravspecifikation				
	Projekt	Koppling mellan IMC och FEGV				
Utfärdare:	Julia Skoog Anna Åström	Skapad: 2026-02-02 Modifierad: 2026-03-30				
Kriterier	Målvärde	K/O	Vikt	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)	
Funktion(er)						
	Koppligen ska ge strukturellt stöd Minst som nuvarande	K		CAD-modellering + FEM	Projekt mål	
	Kopplingen ska täppa igen eventuella luckor mellan IMC och FEGV 100% tät	K		Geometrikontroll	IMC & FEGV design	
	Kopplingen får inte störa aerodynamiken i FEGV-passagen 0% blockage	K		Geometrikontroll	FEGV-design	
1. Prestanda						
1.1	Styhhet	Under brottgräns för Titan 6-4	K	FEM	Projekt mål	
1.2	Styrka	mot limit 0.2% och fbo 6% plasticering	K	FEM	Projekt mål	
2. Miljö						
2.1	Temperaturlåghet	Ska fungera upp till 90°C	Ö	1	Materialdata	Materialspec
2.2	Bränsleförbrukning	Mindre massa ger mindre utsläpp (se 5.1)	Ö	4	CAD-volymer	Produktplanering
3. Underhåll						
3.1	Montering i motor	Bör underskrida 4 steg	Ö	4	Konstruktionsbedömning	Montering
3.2	Fästanelordning	Monterbar koppling mellan IMC och FEGV	K		Konstruktionsbedömning	Projekt mål
4. Tillverkningskostnad						
4.1	Materialåtgång	Jämföra materialåtgång per koncept	Ö	3	CAD-volymer	Projekt mål
5. Massa						
5.1	Minimera	1500 dollar/pound jämföra	Ö	4	CAD-volymer	Produktplanering
6. Storlek						
6.1	Max höjd & längd	Längd < 350 mm, höjd < 155 mm	K		CAD	Konstruktion

Figur 4.1: Kravspecifikation.

4.2 Funktionsanalys

Funktionsanalysen visar en nedbrytning av problemet och hur motorfästet hänger ihop med resterade delar. Analysen utgår från huvudfunktionen att hänga upp motorn på vingen och bryts ner i delfunktioner kopplade till lastöverföring, stabilisering och montering. Resultatet gav en strukturerad bild av vad fästet behövde uppfylla och låg till grund för den fortsatta konceptgenereringen, se figur 4.2.



Figur 4.2: Funktionsanalys.

4.3 Konceptgenerering

Utifrån funktionsanalysen togs en morfologisk matris fram i syfte att systematiskt strukturera och kombinera olika dellösningar. Därefter genomfördes en patentsökning för att identifiera befintliga och relevanta lösningar som kunde bidra med teknisk insikt och verifiera genomförbarheten hos de framtagna principerna. Slutligen genomfördes en brainstorming, där resultaten från patentsökningen användes som underlag och inspiration vid utveckling av fler koncept.

4.3.1 Morfologisk matris

Här presenteras den morfologiska matrisen med de dellösningar som togs fram utifrån den genomförda funktionsanalysen, se figur 4.3. Med hjälp av matrisen kunde totalt $5 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 4 = 9600$ teoretiska koncept genereras genom att kombinera en lösning från varje delfunktion. För att minska antalet koncept genomfördes därefter en grundlig analys där olämpliga alternativ sorterades bort.

4. Genomförande

	Lösningalternativ					
Delfunktioner	A	B	C	D	E	F
Överföra laster	 Vinkeljärn	 Länkarm	 Bultförband	 Klämförband	 Distanser	
Sammanbinda IMC och FEGV	 Skjuvförband	 Dragstag	 OGV med inbyggda infästningsfunktioner för IMC länkarm	 Klickfäste	 Bajonettfattning	
Stabilisera motorn	 Trepunktsfäste	 Kardanknut	 Kryssfäste (dragstag)	 Ribbförstärkning		
Fixera IMC mot FEGV	 Flänsförband + bult	 Styrtappar	 Styrfläns + greppansning	 Styrklack	 Spår + styklack	 Excenterkoppling
Underlätta slutmontering	 Delad komponent	 Förmonterad	 Styrpinnar	 Slisade hål		
Åkomst för verktyg	 Vinklad infästning	 Friggande bulthuvuden	 Urkapad geometri runt bult	 Förlängda bulthuvuden		

Figur 4.3: Morfologisk matris före eliminering.

Delfunktion: överföra laster

Vinkeljärn, har en L formad profil för att skapa starka stabila konstruktioner. Det används ofta för att förstärka konstruktioner, där styrkan beror på storlek, materialjocklek och eventuell förstärkning [16]. De flesta vinkeljärn tillverkas av stål och vikten beror därför på storleken. Titan väger ungefär 45% mindre än rostfritt stål [17]. Ett vinkeljärn med dimensionerna 2.5 x 50 x 50 x 35 mm väger 0.08 kg [18], vilket motsvarar ca 0.044 kg vid tillverkning av titan. Konceptet bedöms därför vara en rimlig kandidat eftersom det uppfyller vikt-, storlek-, montering- och underhållskraven.

En **länkarm** är en rörlig mekanisk komponent som är triangelformad eller trapetsformad. Den används för att koppla samman delar och överföra krafter mellan dem. Den håller komponenterna i rätt position samtidigt som den kan ta upp belastningar och rörelser [19]. Länkarmar tillverkas vanligtvis i material med hög hållfasthet, såsom stål eller aluminium, beroende på krav på vikt och styrka [20]. I detta projekt bedömdes en länkarm initialt vara relevant för att koppla samman IMC och FEGV samt överföra krafter mellan dem. Eftersom länkarmen är en rörlig komponent kan infästningen få lägre styvhet, vilket kan påverka positioneringen negativt. Vidare är traditionella länkarmar ofta dimensionerade för större system, vilket innebär att en motsvarande lösning för en jetmotor hade krävt anpassning avseende vikt och hållfasthet. Därför behölls konceptet inledningsvis för vidare diskussion och utvärdering.

Bultförband, även kallat skruvförband, är en mekanisk sammanfogning där komponenter hålls samman med skruv och mutter genom en förspänningskraft. Förbanden utsätts ofta för drag-, skjuv- och torsionslast, vilket gör korrekt åtdragning avgörande för funktion och hållfasthet [21]. Skruvförbandets vikt kan minimeras genom optimerande dimensioner och utnyttjande av materialets hållfasthet [22]. Last

överförs främst genom friktion från förspänningen, vilket motverkar glidning [23]. Bultförband är en etablerad lösning inom flygindustrin men kräver ofta sekundär låsning. Konceptet bedömdes uppfylla aktuella krav och behölls för fortsatt arbete.

Klämförband är en infästningsmetod där komponenter hålls samman genom en klämkraft mellan kontaktytorna. Klämkraften uppstår när klämskruvar dras åt och skapar en friktionskoppling mellan komponenterna [24]. På detta sätt kan både axiella krafter och andra belastningar överföras, samtidigt som en stabil infästning erhålls. Klämförband används ofta i mekaniska konstruktioner där säker lastöverföring och stabil infästning krävs [24]. Lösningen möjliggör även montering och demontering vid behov. I detta projekt bedömdes ett klämförband vara en lämplig lösning för lastöverföring mellan IMC och FEGV, eftersom det kan ge en stabil koppling samt optimeras för låg vikt genom materialval. Konceptet bedömdes uppfylla aktuella krav och behölls för fortsatt arbete.

Distanser är mekaniska komponenter som används för att skapa ett definierat avstånd mellan två delar i en konstruktion. De kan även bidra till att överföra tryckkrafter och bibehålla strukturell styvhet [25]. Vid belastning säkerställer distanser att komponenter hålls i rätt position och att krafter leds genom distansens ändytor [26]. I detta projekt bedömdes distanser vara mindre lämpliga eftersom de fungerar som ett tryckelement snarare än en självständig infästning och kräver därför kombination med exempelvis bult eller skruv. Detta hade ökat komplexiteten samt antalet monteringssteg. Eftersom konceptet inte erbjöd någon självständig infästningslösning valdes det bort från fortsatt arbete.

Sammanfattningsvis återstår vinkeljärn, länkarm, bultförband och klämförband som kandidater.

Delfunktion: sammanbinda IMC och FEGV

Skjuvförband är en sammanfogning där den huvudsakliga lastöverföringen sker genom skjuvkrafter mellan två komponenter. Detta kan uppnås genom formlåsning, exempelvis via styrklackar, tappar eller spår, eller genom friktionssskjuvning där en förspänd bult skapar friktion mellan kontaktytorna [27]. Syftet är att förhindra relativ rörelse mellan delarna vid tvärkrafter [27]. I detta projekt bedömdes skjuvförband vara mindre lämpligt för kopplingen mellan IMC och FEGV, eftersom lösningen är känslig för toleranser och kräver små spel för att undvika glapp. Toleransavvikelse kan leda till vibrationer och utmattningsproblem, vilket är olämpligt nära turbin-komponenter. För denna applikation bedömdes ett traditionellt bultförband ge en enklare, styvare och mer förutsägbar lastöverföring [28]. Konceptet valdes därför bort.

Dragstag används för att sammanbinda två delar och överföra dragkrafter mellan dem. Det består vanligtvis av en stång eller ett stag som är fastsatt i båda ändar, vilket gör att krafter kan överföras samtidigt som komponenterna hålls i rätt position [29]. Dragstag tillverkas ofta i material med hög hållfasthet, såsom stål el-

ler titan, och kan utformas med låg vikt tack vare sin enkla geometri [29]. I detta projekt bedömdes dragstag vara en möjlig lösning för att sammanbinda IMC och FEGV, eftersom det kan överföra dragkrafter samtidigt som komponenterna hålls i rätt position. Dock är dragstag främst anpassade för dragbelastning och har begränsad förmåga att hantera tryck- och böjbelastningar [29]. Lösningens lämplighet bedömdes därför bero på lastfallet mellan IMC och FEGV, varför konceptet gick vidare för fortsatt utvärdering.

FEGV med inbyggda infästningsfunktioner för IMC har inkluderats som ett eget koncept eftersom en integrerad lösning kan minska antalet separata komponenter och skapa tydligare lastvägar. Genom att utforma infästningen direkt i FEGV-strukturen kan högre strukturell styvhet, bättre positioneringsnoggrannhet och enklare montering uppnås. En integrerad infästning minskar även toleranskedjor och vikt. Istället för separata vinkeljärn, distanser eller mellanliggande förband kan FEGV:n förses med exempelvis formpassade fickor, styrytor, klackar eller flänsar som möjliggör direkt montering av IMC. Lastöverföringen kan ske via kontakttryck eller formläsning. Konceptet motiveras främst genom sina strukturella och tillverkningsmässiga fördelar. Genom att integrera infästningar i FEGV minskar antalet separata komponenter, vilket reducerar monteringssteg och potentiella felkällor. Det ger även bättre kontroll över lastvägar och styvhet. Konceptet behövs för fortsatt utvärdering.

Ett **klickfäste** är ett fjäderbaserat fästelement som använder materialets elastiska återfjädring för att klämma fast två komponenter utan skruv eller mutter. Lösningen används ofta där snabb montering och demontering är viktig, exempelvis för paneler, kåpor och mindre komponenter inom flygindustrin. I detta projekt bedömdes klickfäste vara mindre lämpligt som huvudlösning mellan IMC och FEGV, eftersom gränssnittet kräver stabil positionering, kontrollerad lastöverföring och hög strukturell integritet. Klickfästen används främst för icke-bärande applikationer och saknar i sig tillräcklig bärförmåga samt robusthet för denna tillämpning och valdes därför bort från fortsatt arbete.

Bajonettfattning är en infästningsmetod där två komponenter kopplas samman genom att en del förs in i den andra och vrids för att låsas fast. Metoden möjliggör snabb montering och demontering samt tydlig positionering [30]. En fördel med bajonettfattningar är den användarvänliga monteringen, medan begränsningen är att lösningen främst lämpar sig för koppling och positionering snarare än höga strukturella laster. I detta projekt skulle en bajonettfattning kunna användas för att positionera och sammanbinda IMC och FEGV, men sannolikt behövs kompletteras med ett annat fästelement för att säkerställa tillräcklig hållfasthet. Konceptet valdes därför bort från fortsatt arbete.

Sammanfattningsvis återstår dragstag och FEGV med inbyggda infästningspunkter för IMC som kandidater.

Delfunktion: stabilisera motorn

Ett **trepunktsfäste** bygger på tre styva kontaktpunkter placerade i en triangulär geometri. Denna typ av infästning används i maskin- och turbomaskinsystem för att skapa en stabil och icke-överbestämd infästning, där komponenter positioneras geometriskt definierat och lasten fördelas på ett förutsägbart sätt utan risk för glapp eller deformation. Metoden är beprövad och bidrar till hög styvhet samt säker lastöverföring. Trepunktsfästet kan dock innebära ökad vikt beroende på utformning och hur övriga delar sammanbinds. Konceptet bedömdes därför vara ett rimligt alternativ och behölls för fortsatt utvärdering.

En **kardanknut**, även kallad universalknut, är en mekanisk koppling som används för att överföra rotation och rörelse mellan två axlar som inte ligger i linje med varandra. Den möjliggör vinkelrörelse mellan komponenter och används ofta i applikationer där rörelse behöver tillåtas [31]. En fördel är att kardanknuten kan hantera vinkelförändringar och rörelse mellan komponenter. Nackdelar är ojämn rörelse samt risk för vibrationer och slitage, vilket gör lösningen mindre lämplig i konstruktioner som kräver hög stabilitet och precision [31]. För detta projekt där syftet är att stabilisera motorn, bedöms därför kardanknuten inte vara en lämplig lösning eftersom den är avsedd för rörelse snarare än styv stabilisering.

Ett **kryssfäste** används för att koppla samman två korsande stag och skapa en styv knutpunkt som kan överföra och fördela krafter i flera riktningar [32]. Genom att binda stagen i ett korsmönster stabiliseras konstruktionen och risken för sidoförskjutning eller vridning minskar [33]. Konceptet visar en tydlig princip för strukturell stabilisering och gav därför värdefull inspiration i konceptfasen kring hur en komponent kan stagas upp. Däremot är geometri och användningsområde främst anpassade för byggkonstruktioner snarare än maskinmontage. Matrisen ska endast innehålla praktisk genomförbara lösningar för motorstrukturen bedömdes konceptet därför mindre lämplig och uteslöts.

Ribbförstärkning innebär att förstärkningar läggs till på en komponent för att öka styvheten utan nämnvärd viktökning. Ribbor hjälper till att fördela laster över en större yta och minska spänningskoncentrationer, vilket reducerar deformationer och lokala toppspänningar [34]. Därmed kan högre styvhet uppnås med effektiv materialanvändning. Ribbförstärkning bedömdes vara en lämplig lösning för att öka styvheten och stabilisera motorn.

Sammanfattningsvis återstår trepunktsfästet och ribbförstärkning.

Delfunktion: fixera IMC mot FEGV

Ett **flänsförband + bult** är en infästningsmetod där två komponenter med flänsar sammanfogas med bultar och muttrar för att skapa en stabil och demonterbar koppling. När bultarna dras åt uppstår en klämkraft mellan flänsytorna som håller delarna fixerade och ger en jämn tryckfördelning. Flänsförband används i mekaniska system där stark och servicevänlig sammanfogning krävs [35]. Flänsförband med

mutter bedömdes vara lämplig för att fixera IMC mot FEGV, eftersom den ger en stabil och kontrollerad sammanfogning mellan strukturerna.

En **styr tapp** är ett maskinelement som används för att positionera, centrera eller koppla ihop komponenter med hög precision [36]. I detta projekt fungerar den som ett geometriskt styrande element som säkerställer att IMC hamnar i rätt läge mot FEGV. Den kan minska monteringsfel och avlasta bultförbandet från positioneringsarbete [37]. Däremot är styrtappen främst en positioneringskomponent och kan inte bära huvudlast eller hålla ihop komponenterna själva. Den kräver därför ett kompletterande lastupptagande förband, exempelvis bultförband, och uteslöts som huvudlösning.

Styrflänsar + grepppassning (presspassning) innebär att flänsens innerdiameter är något mindre än axelns ytterdiameter vilket skapar ett fast förband genom friktion när delarna monteras ihop [38]. Lösningen används för att säkra komponenter mot rotation och axiell förflyttning. Montering kräver ofta uppvärmning av flänsen eller nedkyllning av axeln för att underlätta passningen. Grepppassning ger en stabil och precis fixering utan extra låselement, men ställer höga krav på toleranser vid tillverkning. Lösningen bedömdes som relevant eftersom den erbjuder en självständig och industriellt etablerad fixeringsprincip. Konceptet behölls därför för fortsatt utvärdering.

Enbart en **styrklack**, utan spår, fungerar främst som ett enkelt orienteringsstöd och måste fästas separat, exempelvis med skruv eller bult. Den kan hjälpa till att rikta komponenterna vid montering men saknar formluten guidning och kan därför inte förhindra sidledes- eller rotationsrörelser [39]. Funktionen bedöms därmed vara begränsad och kan inte skapa ett stabilt eller spelfritt gränssnitt. En ensam styrklack uppfyller därför inte funktionskravet att fixera IMC mot FEGV och uteslöts från fortsatt arbete.

Spår + styrklack är en formlutande metod där ett spår kombineras med en styrklack för att styra och fixera två komponenter relativt varandra. Lösningen kombineras med separat fästelement, exempelvis bultar, som säkerställer sammanfogningen [39]. När IMC förs mot FEGV leds styrklacken in i spåret, vilket ger tydlig geometrisk styrning och säker orientering vid montering. Spåret begränsar sidledsförflyttning och kan beroende på utformning, även motverka rotationsrörelser. Lösningen fungerar främst som styrnings- och positioneringsprincip snarare än primär lastbärare. Spår + styrklack behölls eftersom det är en robust och tydligt avgränsad funktionsprincip som skiljer sig från de andra alternativen. Lösningen är relativt enkel att tillverka samt effektiv för att säkerställa korrekt orientering.

En **excenterkoppling** är en mekanisk låsanordning där en excentriskt placerad axel eller geometri skapar klämkraft när komponenten roteras. Lösningen används ofta för justering och fastlåsning vid montering [40]. Fördelen är enkel montering och justerbar fixering utan höga åtdragningsmoment. Funktionen bygger dock främst på friktion och klämkraft, vilket ger lägre styvhet och mindre förutsägbar lastöverföring

än form Slutande alternativ. Excenterkopplingen bedöms därför mindre lämplig för att fixera IMC mot FEGV och togs därför inte vidare i det fortsatta arbetet.

Sammanfattningsvis är flänsförband + bult, styrflänsar + grepppassning och spår + styrklack kvar som relevanta kandidater.

Delfunktion: underlätta slutmontering

För att underlätta monteringen kan en **delad komponent**, exempelvis en tvådelad fläns, vara relevant eftersom den kan monteras runt befintliga strukturer utan att dessa behöver demonteras [41]. Genom att dela komponenten i flera sektioner minskar behovet av monteringsutrymme och installation möjliggörs även vid begränsad åtkomlighet. Lösningen bedömdes därför relevant eftersom den ger en flexibel monteringssekvens och minskar behovet av omfattande förmontering.

En **förmonterad** lösning innebär att flera komponenter monteras samman till en modul innan slutmontering i den övergripande konstruktionen. Syftet är att minska antalet monteringsmoment i slutskedet samt förenkla installation och positionering av komponenter [42]. Genom att komponenterna redan är monterade kan monteringstiden minska och risken för monteringsfel reduceras. Konceptet bedömdes därför bidra till att underlätta slutmontering och tas vidare för fortsatt utvärdering.

Styrpinnar används för att underlätta montering genom att säkerställa korrekt positionering och orientering mellan komponenter [43]. Som mekaniska guidningar minskar de risken för felinriktning och kan vara värdefulla vid trånga montageförhållanden eller när hög precision krävs. Om komponenternas geometri redan ger tillräcklig självriktning bedömdes styrpinnar vara överflödiga och medföra extra bearbetning samt ökade kostnader. Konceptet togs därför inte vidare.

Slitsade hål används för att underlätta montering genom att ge justerbarhet och kompensera för toleransavvikelser vid inpassning av komponenter. De möjliggör mindre sidledsförflyttningar och kan vara värdefulla vid efterjustering eller när rörelsemån krävs [44]. Om monteringen redan är stabil och tillräcklig precision uppnås bedömdes lösningen däremot vara överflödigt eftersom den kan introducera onödigt spel och minska strukturell styvhet. Konceptet togs därför inte vidare.

Sammanfattningsvis behålls delad komponent och förmonterad som alternativ.

Delfunktion: åtkomst för verktyg

En **vinklad infästning** innebär att fästelement placeras i vinkel mot huvudstrukturen för att förbättra åtkomst för monteringsverktyg. Lösningen används när begränsat utrymme försvårar rak verktygsåtkomst [45]. Genom vinklad infästning kan montering och demontering underlättas utan större förändringar av omgivande geometri. Lösningen kan förbättra servicebarhet och monterbarhet, men kan samtidigt introducera sneda lastkomponenter som måste beaktas vid dimensionering. Konceptet togs därför inte vidare.

tet bedömdes kunna förbättra verktygsåtkomsten och tas därför vidare för fortsatt utvärdering.

Friliggande bulthuvuden är synliga och åtkomliga fästelement, exempelvis sexkantsbultar eller maskinskruvar, som ger bra grepp för skiftnyckel eller hylsa och underlättar service [46]. Lösningen behålls eftersom den ger god verktygsåtkomst och förenklar montering samt service. Samtidigt bör den följas upp, bulthuvuden kan vara överflödiga om åtkomsten kan lösas på annat sätt eller om de påverkar konstruktionens funktion, utrymme eller integrationskrav.

Urkapade geometri runt bult säkerställer att verktyg kan föras in utan att kollidera med omgivande strukturer, vilket förbättrar monterbarhet och kvalitetssäkring [47]. Lösningen skapar frigång för standardverktyg såsom hylsor och skruvdragare samt minskar risken för felaktigt åtdragningsmoment, underdragning och skador på bult eller gänga. Den kan även bidra till snabbare och mer robust montering. Samtidigt kan urkapad geometri försvaga konstruktionen genom materialborttagning och skapa lokala spänningskoncentrationer [48]. Den kan även samla smuts eller föroreningar vid drift. Konceptet tas därför inte vidare.

En lösning med **förlängda bulthuvuden** innebär att bulthuvudets geometri anpassas, exempelvis genom ökad höjd, för att förbättra åtkomsten för monteringsverktyg. Lösningen används när begränsat utrymme försvårar installation eller demontering [49]. Ett längre bulthuvud kan ge bättre verktygsfrigång och därmed förenkla montering utan större konstruktionsändringar. Lösningen kan förbättra monterbarhet och servicebarhet, men kan samtidigt medföra ökade lokala belastningar i bulten som måste beaktas vid dimensionering. Konceptet bedömdes kunna förbättra verktygsåtkomsten och tas därför vidare.

Sammanfattningsvis behålls vinklad infästning, friliggande bulthuvuden och förlängda bulthuvuden som kandidater.

Ytterligare bortfall

Efter den första elimineringen genomfördes ett möte med GKN där kvarvarande dellösningar diskuterades ur ett industriellt och praktiskt perspektiv. Syftet var att jämföra alternativen inom varje delfunktion och identifiera de mindre lämpliga lösningarna.

Inom delfunktionen **överföra laster** framkom att vinkeljärn i praktiken kräver kompletterande infästning, vanligtvis i form av bultförband eller klämförband, för att kunna överföra laster på ett tillförlitligt sätt. Eftersom följande infästningsprinciper redan representeras som egna dellösningar och dessutom används i majoriteten av industriella tillämpningar, bedöms vinkeljärn inte tillföra någon ytterligare funktionalitet och tas därför bort.

Vidare diskuterades länkarm som alternativ för lastöverföring. Eftersom länkarmar utgör rörliga komponenter kräver de smörjning och introducerar rörlighet i en struktur som i detta fall eftersträvas vara stadig och stabil. Dessutom innebär smörjbehovet begränsningar vid höga temperaturer. I jämförelse med bultförband och klämförband, vilka erbjuder enklare och mer robusta lösningar, bedöms länkarm som mindre lämplig och tas bort.

För delfunktionen **fixera IMC mot FEGV** bedömdes lösningen spår + styrklack innebära flera tillverknings- och monteringssteg utan att erbjuda tydliga fördelar jämfört med övriga kvarvarande alternativ. Lösningen ansågs därför mer komplex samt funktionellt svagare och togs därför bort.

Inom delfunktionen **åtkomst för verktyg** diskuterades förlängda bulthuvuden. Enligt GKN bidrar inte lösningen med någon tydlig ytterligare förbättring som andra koncept såsom friliggande bulthuvuden eller vinklad infästning. Om bulthuvudena orienteras i samma riktning som friliggande bulthuvuden uppstår i praktiken samma funktion, medan en annan orientering istället ger en effektliknande vinklad infästning. Lösningen bedömdes därför överlappa funktionellt med andra alternativ och togs därför bort.

Inom delfunktionen **stabilisera motorn** diskuterades trepunktsfästets relevans för lösningsalternativen. Detta fäste kan bidra till ökad vikt och om ett trepunktsfäste önskas måste det inte nödvändigtvis se ut som i matrisen. Det kan framkomma i form av tre dragstag som kraftbärare istället för att ha ett fäste som sitter rakt på IMC och FEGV. Om trepunktsfästet skulle implementeras hade ett alternativ varit att det sitter två stycken fästen på IMC och två stycken på FEGV där dragstag kombineras med dem. Detta leder till att trepunktsfästet har begränsat antal funktioner den kan kombineras med och är kompatibel med bultförband, dragstag, förmonterad och friliggande bulthuvuden. Vilket enbart genererar en lösning som även anses öka vikten. Den valdes därför bort.

Inom delfunktionen **överföra laster** bedömdes även klämförband som en mindre lämplig lösning eftersom det i huvudsak bygger på friktion mellan komponenter som hålls samman av en klämkraft. I en flygmotor uppstår betydande vibrationer och laster som kan påverka klämkraften över tid. Detta kan leda till minskad friktion mellan kontaktytorna och därmed risk för relativ rörelse mellan komponenterna. För en strukturell koppling mellan IMC och FEGV är det istället mer önskvärt med en mer definierad och formsluten lastöverföring som bultförband eller flänsförband. Därför bedöms klämförband vara mindre lämplig och alternativet elimineras från den morfologiska matrisen.

Efter dessa analyser sammanställdes resultaten i en uppdaterad morfologisk matris, se figur 4.4.

4. Genomförande

	Lösningalternativ					
Delfunktioner	A	B	C	D	E	F
1 Öveföra laster						
2 Sammanbinda IMC och FEGV						
3 Stabilisera motorn						
4 Fixera IMC mot FEGV						
5 Underlätta slutmontering						
6 Åtkomst för verktyg						

Figur 4.4: Morfologisk matris efter eliminering.

Efter denna drastiska reducering återstår $2^4 = 16$ helhetslösningar eftersom det finns två dellösningar till 4 av delfunktionerna samt en lösning på två delfunktioner. Antalet helhetslösningar är relativt stort, och för att kunna presentera dem på ett överskådligt och tydligt sätt krävs därför en ytterligare reducering. Detta genomförs genom en analys av vilka dellösningar som är motstridiga och därmed inte kan kombineras.

Vid delfunktionen **underlätta slutmontering** finns lösningen en **förmonterad lösning** och under **åtkomst för verktyg** finns **vinklad infästning**. Dessa kan inte kombineras eftersom de kräver motsatta monteringsförutsättningar. Förmontering förutsätter att en färdig enhet kan installeras rakt in med fri åtkomst, medan vinklad infästning används när komponenten måste föras in snett eller stegvis på grund av begränsat utrymme. Därför blir monteringssekvensen och geometrin stridande.

Beräkning av giltiga konceptkombinationer

Det finns 16 möjliga kombinationer utan restriktioner och en olämplig kombination har konstaterats:

- Vinklad infästning + delad komponent

Om ett olämpligt par väljs läses två lösningar och två återstår fria:

$$2^2 = 4$$

ogiltiga kombinationer.

Sammanfattningsvis finns det:

$$16 - 4 = 12$$

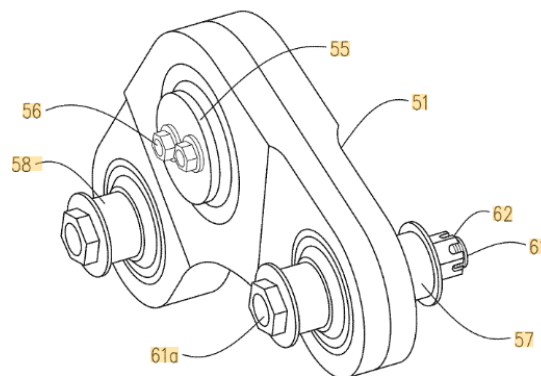
helhetslösningar.

4.3.2 Patentsökning

Efter den morfologiska matrisen genomfördes en patentsökning för att ge mer inspiration inför brainstormingen. Genom patentsökningen identifierades fyra relevanta lösningar som visar etablerade konstruktionsprinciper för motorfästen. Dessa används som inspirationsunderlag i konceptutvecklingen.

Aircraft Engine Mount (US10752370B2)

Patentet beskriver ett motorfäste där flera olika lager används för att styra lastvägar och möjliggöra kontrollerad rörelse mellan motor och struktur. Konstruktionen har separerade lastpunkter för olika lastkomponenter samt en inbyggd säkerhetsfunktion som tar över vid komponentfel. Systemet är utformat för att hantera toleranser och termisk expansion utan att skapa oönskade spänningar.

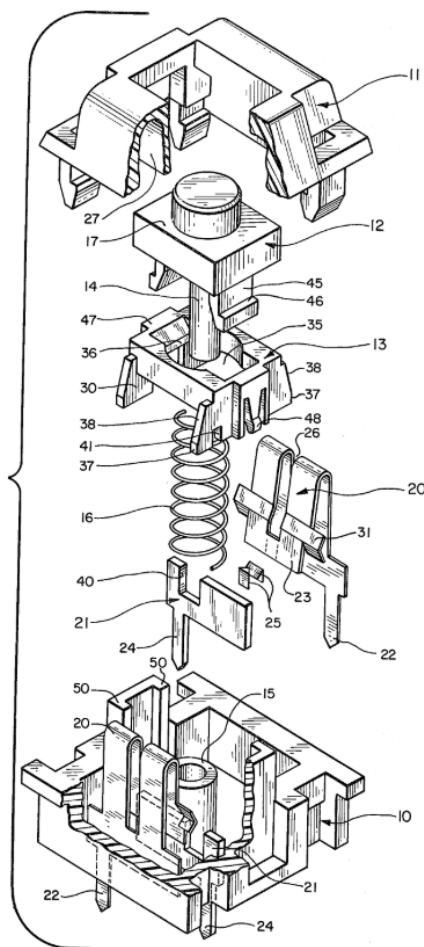


Figur 4.5: Motorfästets konstruktion med separerade lastvägar och inbyggd säkerhetsfunktion, baserat på patentet (US20190352013A1).

Denna lösning är relevant för arbetet eftersom den visar hur lastfördelning, säkerhetsfunktion och olika lagertyper kan kombineras för att skapa ett stabilt och säkert motorfäste, principer som kan vara användbara vid utvecklingen av ett fäste mellan IMC och FEGV [50].

Low profile switch (US4467160A)

Patentet beskriver en mekanisk konstruktion för en knappbrytare, vanligt förekommande i exempelvis tangentbord och andra tryckknappsbaserade system. Konstruktionen består av en tryckknapp som rör sig i ett hölje med hjälp av en spiralfjäder. Konstruktionen använder integrerande armar och styrspår för att styra rörelsen och positionera komponenterna. De integrerande armarna deformeras elastiskt under montering och snäpper därefter tillbaka i ett låsläge, vilket möjliggör en stabil infästning utan behov av separata fästelement [51].

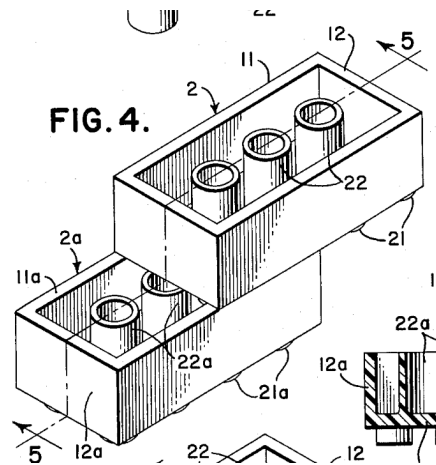


Figur 4.6: Exploderad vy av den mekaniska konstruktionen i patent US4467160A, som visar tryckknapp, fjäder och integrerade snäppfunktioner.

Det intressanta med detta patent och det som gör det relevant för detta arbete, är inte dess användning i en knappbrytare utan de mekaniska principerna bakom infästningen. Funktionen visar hur integrerande snäppfunktioner och geometriska låsningar kan användas för att positionera och fixera komponenter. Denna princip är relevant vid utveckling av ett motorfäste, där klick- eller snäppfäste kan möjliggöra säker infästning och förenklad montering.

Lego (US3005282A)

Patentet beskriver byggklossar som kopplas samman genom cylindriska utskjutande delar på utsidan av klossen och motsvarande cylindriska struktur på insidan. När två klossar trycks ihop uppstår en kläm- och friktionskraft mellan dessa delar, vilket håller klossarna på plats utan behov av separata fästelement. Den specifika placeringen av de inre och yttre cylindriska utskjutande delarna gör att klossarna kan positioneras stabilt i flera olika lägen [52].

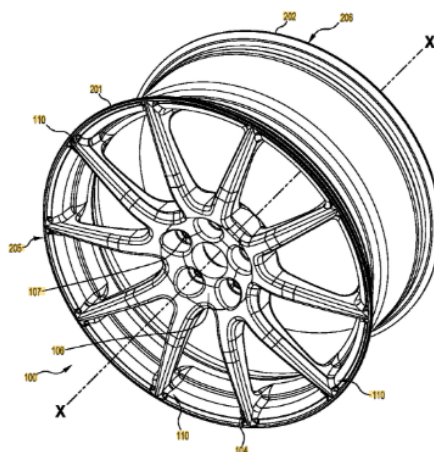


Figur 4.7: Illustration från patent US3005282A som visar hur byggklossar kopplas samman med hjälp av cylindriska utskjutande delar.

Principen bakom denna infästning är intressant för detta arbete eftersom den visar hur komponenter kan positioneras och hållas fast genom geometrisk passning och kontakttryck, istället för traditionella fästelement som skruvar och bultar. En liknande princip skulle kunna användas vid utveckling av ett motorfäste, där liknande former kan användas för att positionera och hålla IMC i rätt position mot FEGV.

Kompositfälg (JP7182613B2)

Detta patent beskriver en fälg tillverkad av kompositmaterial, vilket har utvecklats med en förbättrad fiberarkitektur som förbättrar fälgens hållfasthet, styvhet och livslängd utan att vikten ökar [53], se figur 4.8.



Figur 4.8: Illustration från patent JP7182613B2.

Även om patentet gäller för en komposit-fälg finns det flera konstruktionsprinciper som kan användas som inspiration för att utveckla ett lätt och strukturellt fäste mellan IMC och FEGV. Genom att placera material, ribbor eller förstärkningar lokalt kring själva infästningspunkterna kan detta uppnås, istället för att förstärka hela

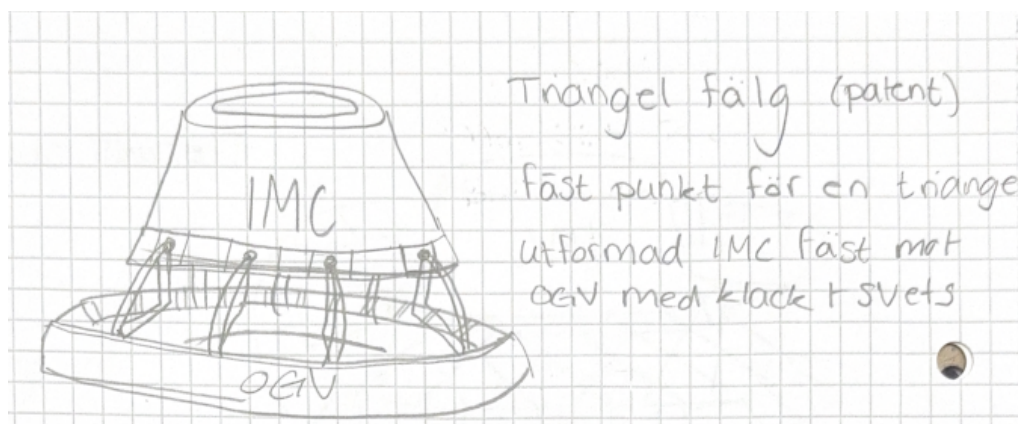
omkretsen. På det viset kan fästet göras både lättare och starkare. Patentet visar också hur strukturer kan designas med riktade lastvägar, där materialets orientering stödjer de viktigaste kraftkomponenterna. Översatt till projektets fäste innebär det att bultförband, styrflänsar och kontaktgeometrier kan placeras för att ta upp exakt de laster som är mest kritiska.

4.3.3 Brainstorming

Här presenteras de koncept som togs fram under brainstormingsessionen. Vissa av koncepten har utvecklats med inspiration från den genomförda patentsökningen, vilket framgår i rubriken för respektive förslag.

Patent triangelfälg

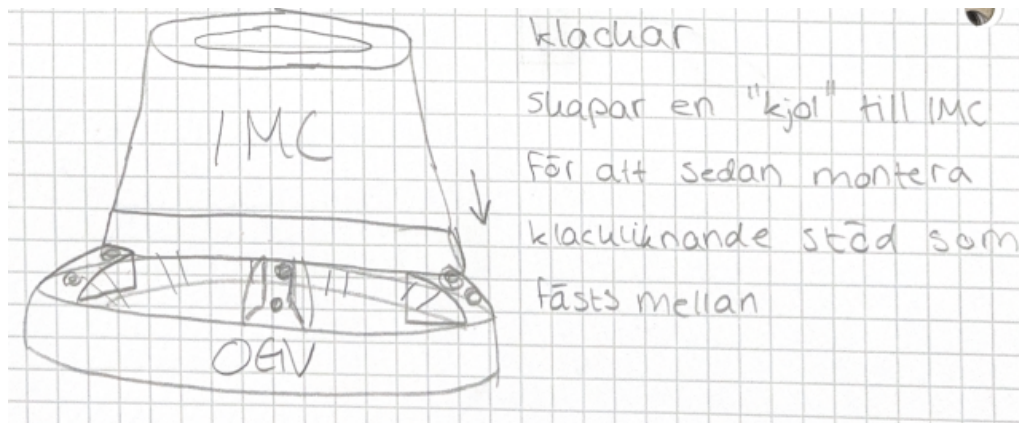
Denna lösning använder flera snedställda stag mellan IMC och FEGV som tillsammans bildar en triangulär struktur med inspiration från fälg patentet. IMC fästs med klackar som svetsas mot stagen, vilket ger en styv lastöverföring, se figur 4.8.



Figur 4.9: Förenklad skiss på patent triangelfälg.

Klackar

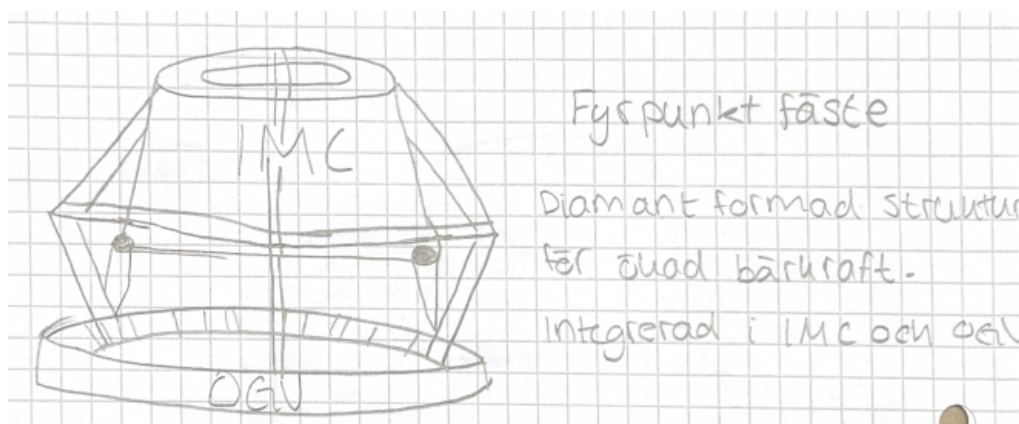
Denna lösning använder klackar som infästningspunkter. Klackarna fungerar som separata fästpunkter som positionerar IMC och möjliggör lastöverföring via flera kontaktpunkter. En slags kjol appliceras på IMC för att få dess position närmare till FEGV vilket leder till att mindre klackar kan användas. Lösningen kan förenkla monteringen och ge en tydligare lastfördelning, se figur 4.10.



Figur 4.10: Förenklad skiss på klackar.

Fyrapunktsfäste

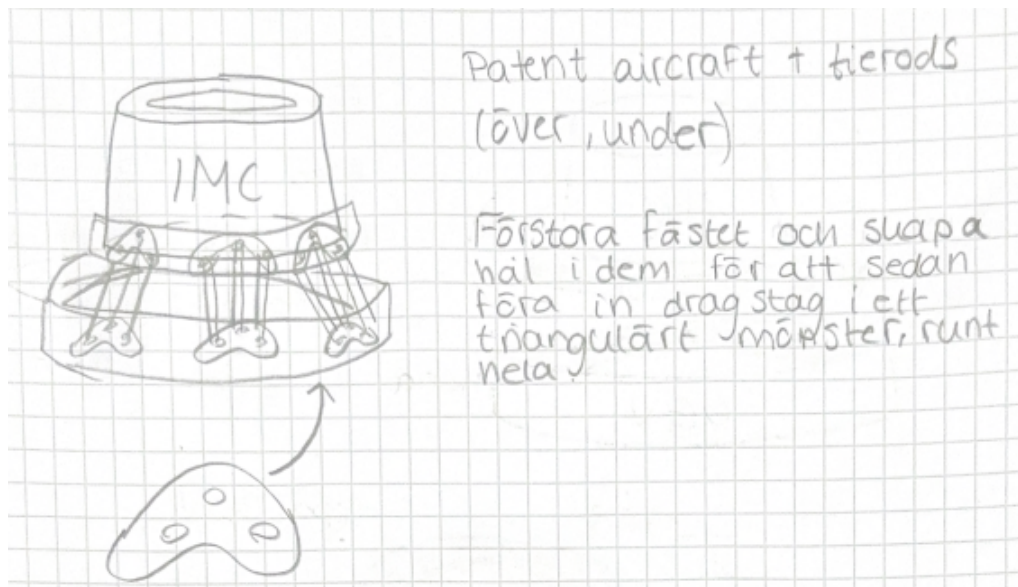
Denna lösning bygger på att fyra infästningspunkter mellan IMC och FEGV förbinder komponenterna med stag och skapar en stabil och symmetrisk lastöverföring. Genom att dela upp lasten på fyra punkter kan krafterna överföras kontrollerat och konstruktionen får ökad styvhet, se figur 4.11.



Figur 4.11: Förenklad skiss på fyrapunktsfästet.

Patent aircraft

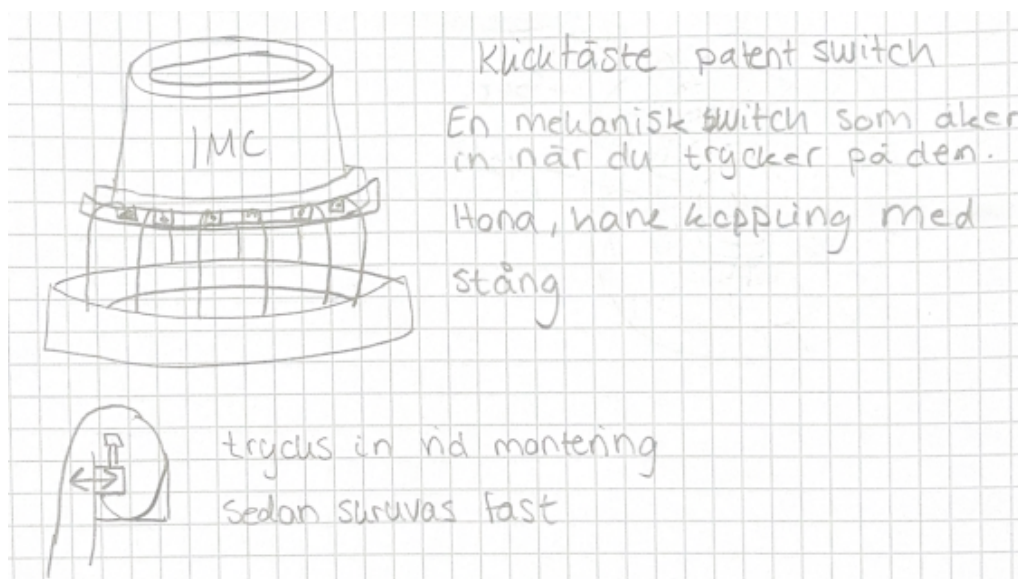
Denna lösning använder separata fästplattor inspirerade av patentröslningen Aircraft engine mount, där IMC kopplas till FEGV via flera individuella fästelement. Montering och utbyte av enskilda delar förenklas, se figur 4.12.



Figur 4.12: Förenklad skiss på patent aircraft.

Patent klickfäste

Denna lösning bygger på ett klickfäste inspirerat av switch patentet Low profile switch, IMC kopplas till FEGV genom en mekanisk snäppfunktion som möjliggör snabb montering och demontering utan separata fästelement, se figur 4.13.



Figur 4.13: Förenklad skiss på patent klickfästet.

Y-format

Denna lösning använder Y-formade stag för att öka den strukturella styvheten samt små brickor som gjutas samman med stagen. De monteras med bult på både IMC

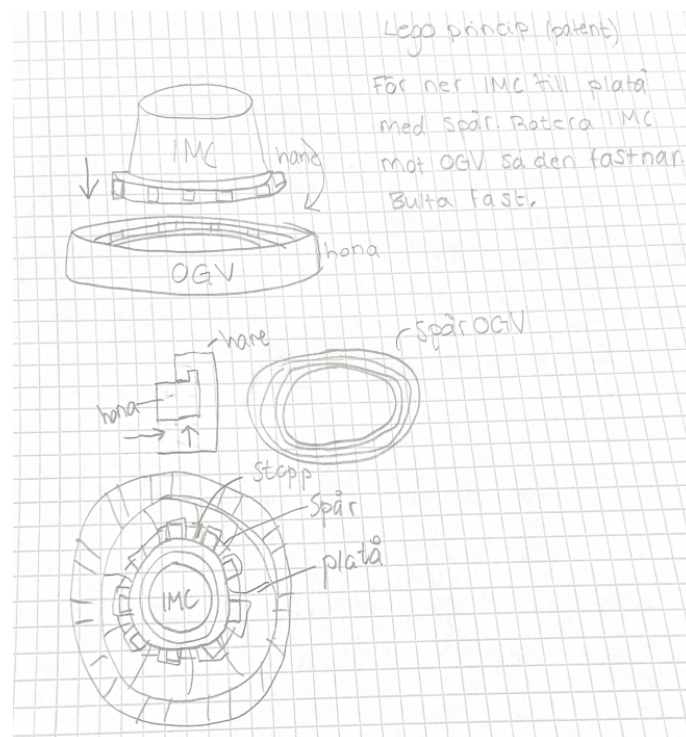
och FEGV. Dessa stag placeras runt om komponenten och bildar ett korsmönster, se figur 4.14.



Figur 4.14: Förenklad skiss på y-formatet.

Patent lego-princip

Lego-principen bygger på lego patentet och har hane fästningar som är monterade runt om IMC. FEGV har en plåt där ett spår är utformat med flera stopp. Principen går ut på att IMC placeras rakt ner på FEGV och sedan roterar IMC tills den når stoppet där det är en hona. Sättet hur lego placeras med hjälp av friktion och delar som passar ihop är applicerat här, se figur 4.15.



Figur 4.15: Förenklad skiss på patent lego-principen.

4.4 Gruppering av koncept

Totalt sett med idéer från den morfologiska matrisen (12 st) och brainstormingen (7 st) fanns det totalt 19 hellösningar. För att kunna få en övergripande bild på hur alla 19 lösningar ser ut gjordes en gruppering baserat på dess huvudfunktion. Uppdelningen gjordes som följande från den morfologiska matrisen (se tidigare figur 4.4):

- 2B - Dragstag ger en definierad lastväg.
- 2C - FEGV med inbyggda infästningsfunktioner ger en integrerad struktur.
- 4A - Flänsförband + bult ger en styv koppling.
- 4C - Styrfläns + grepppassning ger definierad lastväg.

För att sedan få in de lösningar som tagits fram från brainstorming kontrollerades den övergripande strukturen samt hur kopplingen överför laster. Genom att dela upp dem kan det avgöras vilken typ av fäste som är mindre lämplig jämfört med de andra.

Grupp A - Styv koppling med dragstag (2B+4A)

Denna grupps princip går ut på att IMC och FEGV kopplas styvt via flänsstruktur med dragstag. Från den morfologiska matrisen omfattar detta:

1. 1C-2B-3D-4A-5A-6A
2. 1C-2B-3D-4A-5A-6B
3. 1C-2B-3D-4A-5B-6B

I denna grupp räknas även fyrpunktsfäste lösningen med från brainstormingen eftersom denna bidrar till ökad styvhet som passar med de andra förslagen. I verkligheten används dessa ofta inom flygindustrin och säkerställer hög styvhet och robusthet. Alla dessa lösningar skapar en direkt mekanisk låsning mellan komponenterna vilket är fördelaktigt inom flygindustrin.

Grupp B - Styvt integrerad (2C+4A)

Denna grupps princip går ut på att FEGV-strukturen designas för att bära IMC direkt, det vill säga styv flänskoppling där FEGV har inbyggda infästningsfunktioner. Från matrisen ingår:

1. 1C-2C-3D-4A-5A-6A
2. 1C-2C-3D-4A-5A-6B
3. 1C-2C-3D-4A-5B-6B

Här ingår även lösningen lego-princip och triangelfälg från brainstormingen eftersom dessa är integrerade i både FEGV och IMC. Fördelen med dessa är optimerad vikt och ökad integration.

Grupp C - Definierad lastväg via dragstag (2B+4C)

Lasten styrs via dragstag och styrfläns + grepppassning, vilket ger en tydligt definierad lastväg. Från den morfologiska matrisen omfattar detta:

1. 1C-2B-3D-4C-5A-6A

2. 1C-2B-3D-4C-5A-6B
3. 1C-2B-3D-4C-5B-6B

I denna grupp räknas även Y-format lösningen samt patent aircraft lösningen med från brainstormingen eftersom den anses ha starkt definierade lastvägar som passar in med de andra lösningarna. Fördelen med dessa är låg vikt samt definierade lastvägar.

Grupp D - Integrerad struktur med definierad lastväg (2C+4C)

FEGV-strukturen är integrerad med inbyggda infästningsfunktioner och styrfläns + grepppassning, vilket både integrerar strukturen och definierar lastvägen. I matrisen tillhör:

1. 1C-2C-3D-4C-5A-6A
2. 1C-2C-3D-4C-5A-6B
3. 1C-2C-3D-4C-5B-6B

Från de resterande lösningarna från brainstormingen ingår även lösningen patent klickfäste och klackar eftersom dessa har inbyggda infästningsfunktioner. Detta leder till integrerad struktur och definierad lastväg.

4.5 Jämförande av grupper

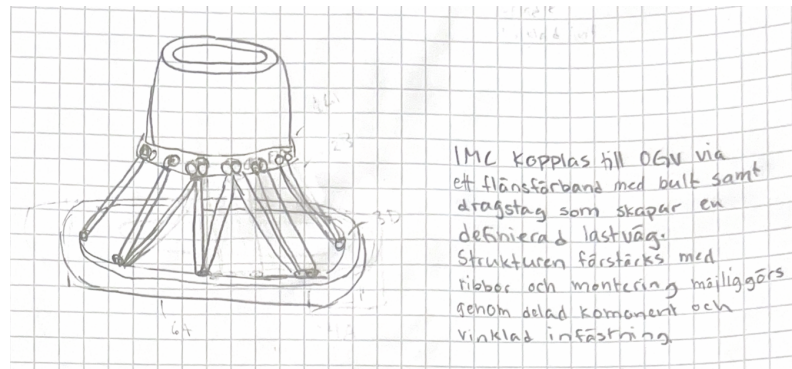
Grupp D behandlar en integrerad struktur med hjälp av styrfläns + grepppassning. Grupp B har ett liknande koncept fast den integrerade strukturen bygger på flänkopplingar. Ur ett jetmotor perspektiv är en fläns mer användbar och applicerbar än grepppassning med en styrfläns. Även om grupp D har intressanta lösningar är den avsevärt sämre än grupp B som kan utföra samma lösning men på ett säkrare och mer beprövat sätt. Definierad lastväg kvarstår som ett viktigt krav enligt kravspecifikationen och bör fortfarande inkluderas. Sedan finns det brister i klickfäste och klackar lösningen som också bidrar till att denna grupp är svagare än de andra. Klickfästet kräver snäva toleranser och klackar kan öka vikten avsevärt. Därför elimineras grupp D. Trots att grupp D exkluderades som självständig lösningsprincip betraktas dess egenskaper fortsatt som tvärgående designkrav som ska uppfyllas av de återstående koncepten. Genom att exkludera grupp D från den fortsatta jämförelsen reduceras antalet relevanta koncept till de som direkt ger styva kopplingar, vilket möjliggör en mer rättvis och teknisk meningsfull utvärdering mellan kvarvarande alternativ.

4.6 Konceptkatalog

Efter elimineringen av grupp D kvarstår 14 koncept. Dessa presenteras nedan i form av en katalog, där varje koncept kort beskrivs med avseende funktion och vilken grupp de tillhör samt illustreras med en bild.

A1 (1C-2B-3D-4A-5A-6A)

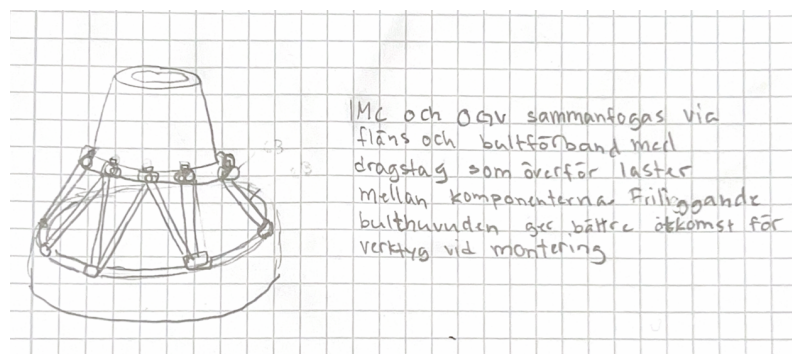
IMC kopplas till FEGV via ett flänsförband med bultar. Ihåliga dragstag mellan komponenterna skapar en triangulerad struktur som ger en definierad lastväg och hög styvhet, se figur 4.16.



Figur 4.16: A1 från morfologisk matris

A2 (1C-2B-3D-4A-5A-6B)

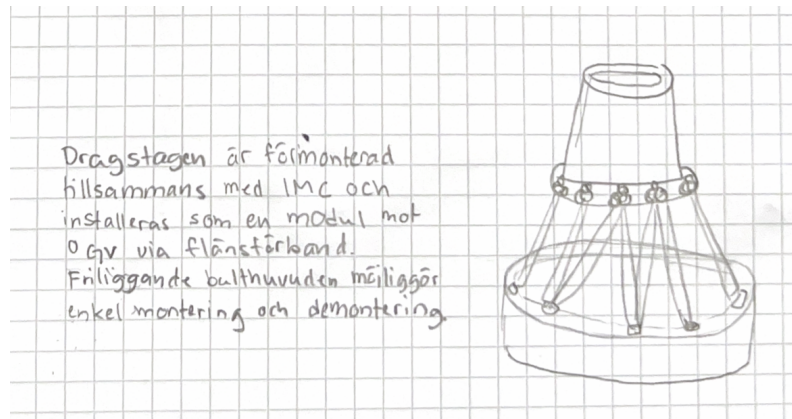
Konceptet bygger på samma princip som A1 där ihåliga dragstag överför laster mellan IMC och FEGV via ett flänsförband. Friliggande bulthuvuden möjliggör bättre åtkomst för verktyg vid montering, se figur 4.17.



Figur 4.17: A2 från morfologisk matris

A3 (1C-2B-3D-4A-5B-6B)

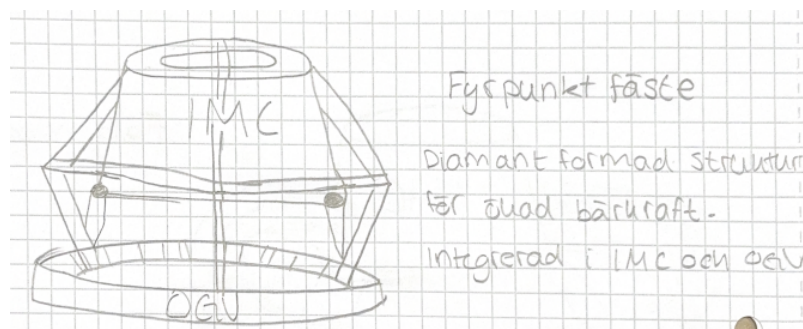
I detta koncept är de ihåliga dragstagen förmonterade tillsammans med IMC och installeras som en enhet mot FEGV via flänsförbandet. Friliggande bulthuvuden möjliggör bättre åtkomst för verktyg vid montering, se figur 5.4.



Figur 4.18: A3 från morfologisk matris

A4: Fyrapunktsfäste

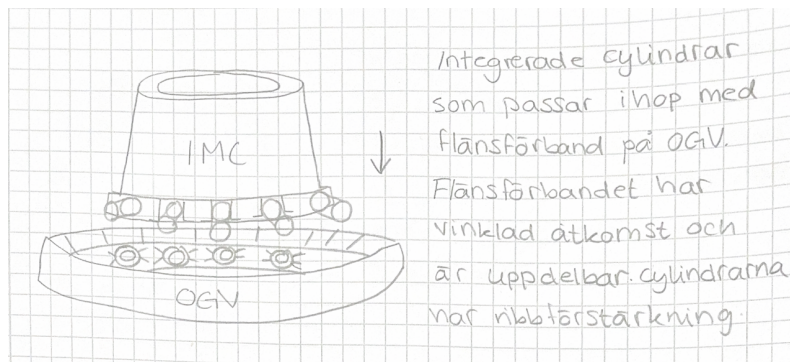
Denna lösning har fyra infästningspunkter mellan IMC och FEGV där ihåliga stag förbinder komponenterna och skapar en stabil och symmetrisk lastöverföring, se figur 4.19.



Figur 4.19: A4: Fyrapunktsfästet från brainstorming

B1 (1C-2C-3D-4A-5A-6A)

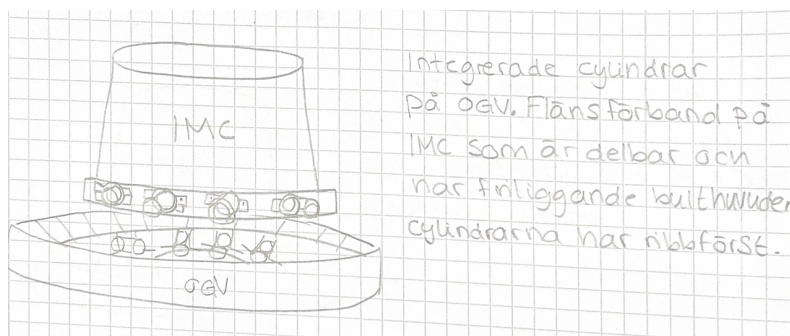
I detta koncept är infästningen integrerad i FEGV genom cylindriska fästen som kopplas samman med IMC via ett flänsförband. Den integrerade strukturen skapar en styv koppling mellan komponenterna samtidigt som ribbförstärkningar bidrar till ökad strukturell stabilitet, se figur 4.20.



Figur 4.20: B1 från morfologisk matris

B2 (1C-2C-3D-4A-5A-6B)

I detta koncept är cylindriska infästningar integrerade i FEGV och kopplas till IMC via en delad fläns med friliggande bulthuvuden, se figur 4.21.



Figur 4.21: B2 från morfologisk matris

B3 (1C-2C-3D-4A-5B-6B)

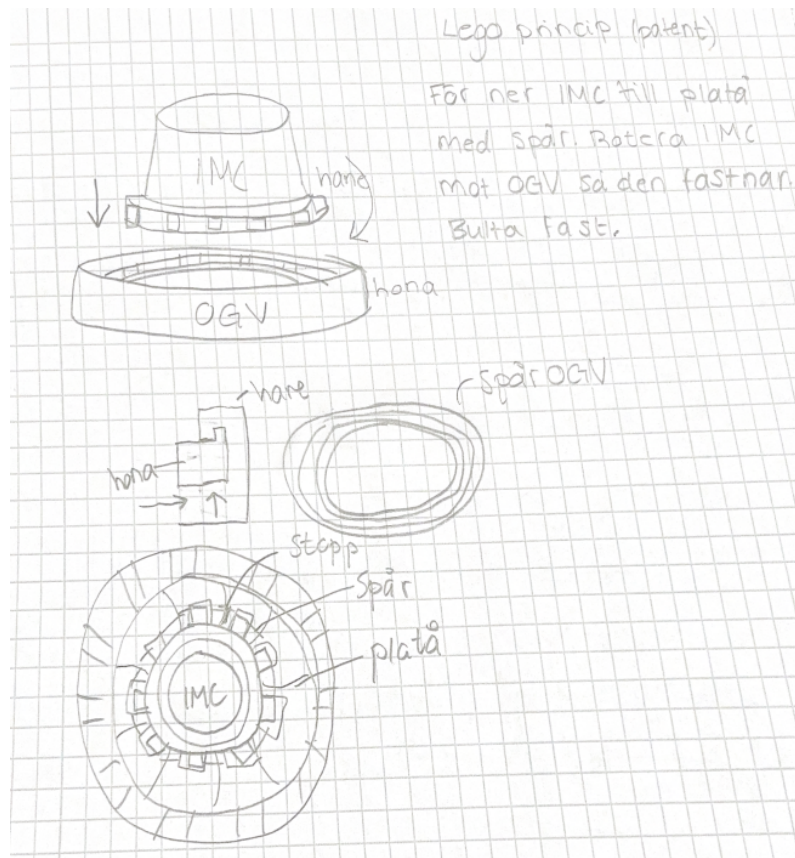
I detta koncept är avlånga flänsförband skapade med cylindrar inuti vilket gör fästet förmonterat. Fästes med en urgröpning i IMC och FEGV med friliggande bultar. Den är även ribbförstärkt runt om, se figur 4.22.



Figur 4.22: B3 från morfologisk matris

B4: Patent lego-princip

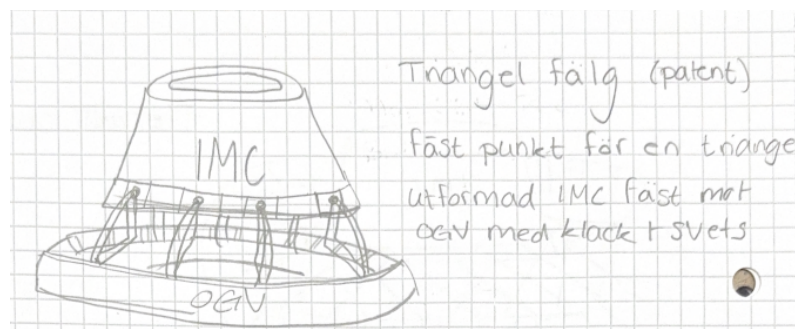
Denna lösning bygger på att en hona-hane koppling skapas på IMC och FEGV för att sedan rotera IMC mot FEGV. FEGV har spår och IMC är helgjuten, se figur 4.23.



Figur 4.23: B4: Lego-princip från brainstorming

B5: Triangel fälg

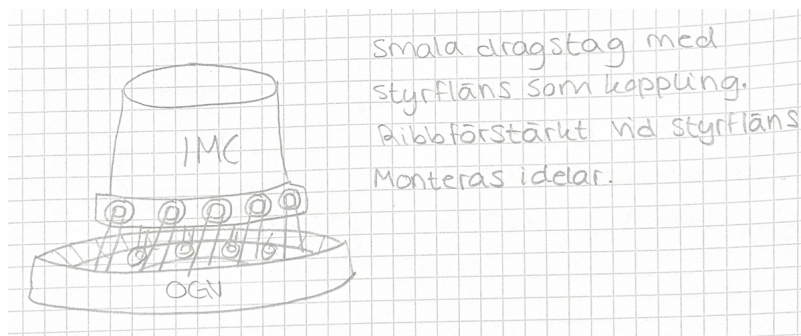
Triangelformande fästen som fästs mot IMC och FEGV med svets, se figur 4.24.



Figur 4.24: B5: Triangelfälg från brainstorming

C1 (1C-2B-3D-4C-5A-6A)

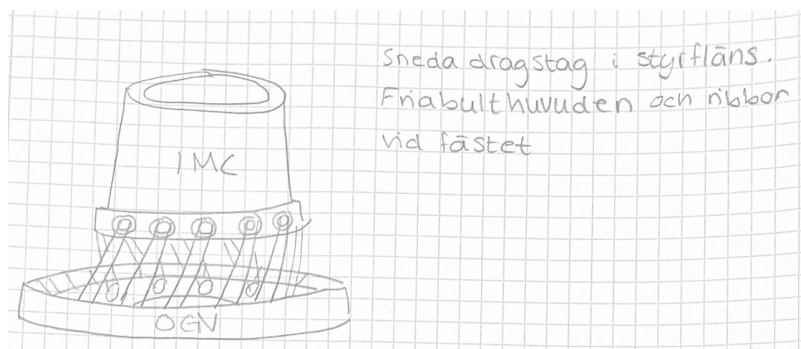
Denna lösning har smala ihåliga dragstag som fästs i en styrfläns. Runtom styrflänsen har ribbor placerats för ökad styvhet, den monteras i delar, se figur 4.25.



Figur 4.25: C1 från morfologisk matris

C2 (1C-2B-3D-4C-5A-6B)

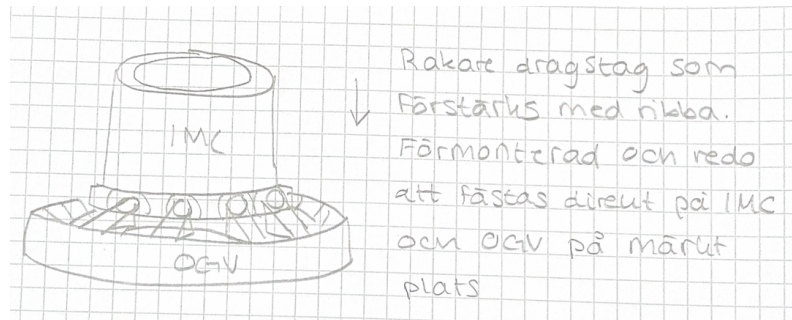
I detta koncept överförs laster mellan IMC och FEGV via snedställda ihåliga dragstag som tillsammans med styrfläns skapar en stabil och definierad lastväg, se figur 4.26.



Figur 4.26: C2 från morfologisk matris

C3 (1C-2B-3D-4C-5B-6B)

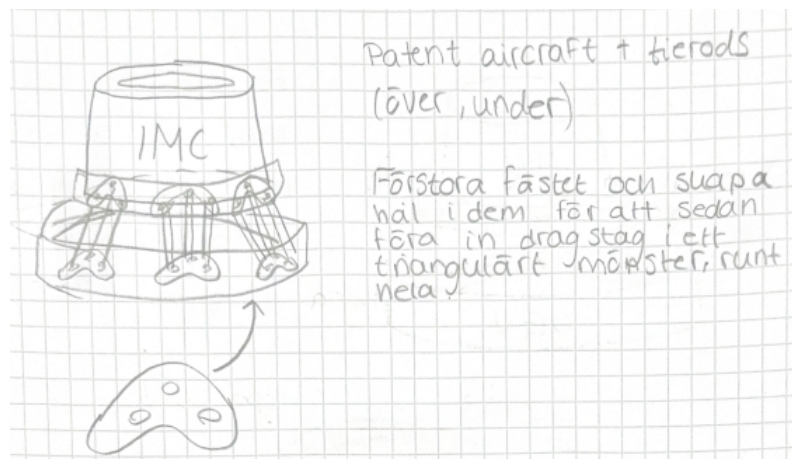
I detta koncept överförs lasterna mellan IMC och FEGV via raka ihåliga dragstag som skapar en tydlig och stabil lastväg mellan komponenterna, se figur 4.27.



Figur 4.27: C3 från morfologisk matris

C4: Patent Aircraft

Denna lösning har fästen som kan hålla upp ihåliga dragstag i tre punkter utplacerade runt om IMC, se figur 4.28.



Figur 4.28: C4: Patent aircraft från brainstorming

C5: Y-format

I detta koncept används Y-formade ihåliga stag som placeras runt om IMC, helgjuten med en fläns runt IMC, se figur 4.29.



Figur 4.29: C5: Y-format från brainstorming

4.7 Eliminering av koncept

Efter framtagningen av totalt 14 lösningskoncept genomfördes ytterligare en process för att eliminera och identifiera de lösningar som inte uppfyller projektets krav eller bedöms vara olämpliga för uppdragsgivarens miljö. För att på ett systematiskt sätt eliminera lösningar användes följande skäl för eliminering:

Storlek

De lösningar som inte uppfyller det grundläggande strukturella kravet gällande storleken och vikten elimineras. De som direkt inte uppfyller dessa krav är A4 eftersom den är för stor och B3 eftersom de avlånga cylindrarna bidrar till ökad last jämfört med de andra koncepten.

Tillverkningsbarhet

Konceptet går bort om det kräver tillverkningsmetoder som uppdragsgivaren inte har. Om konceptet har komplexa former och ger hög materialförbrukning som kan leda till drastisk ökad kostnad. Utifrån dessa krav elimineras B1 och B2, eftersom de tjocka cylindrarna som ska monteras på antingen IMC eller FEGV kräver individuell svetsning eller måste gjutas/fräsas direkt i komponenten redan vid tillverkningen, vilket kan leda till ökad vikt samt högre produktionskostnader. Detta leder till en stor omställning i produktionen vilket därmed kan leda till minskad kostnadseffektivitet. C3 och B5 går också bort eftersom geometrin på båda lösningarna kolliderar med plåtbiten och inte bidrar till någon bättre funktion än de andra koncepten.

Underhåll och användbarhet

Ett annat krav är att monteringen i motorn inte ska överskrida 4 steg. A1, A2, C1 och C2 försvinner eftersom dessa överskrider detta krav. C4 anses också vara bristfällig eftersom utformningen på fästena måste vara tydligt markerat mot IMC och FEGV, det finns även en risk för att fästet tar för mycket plats.

Dessa ytterligare krav översattes sedan till en elimineringsmatris med följande rubriker: uppfyller alla krav, realiserbar i projektet, passar uppdragsgivaren och tillräcklig information. I tabellen används (+), (-) och (?) för att visa positiv uppfyllelse, negativ uppfyllelse respektive osäker eller otillräcklig bedömning. Kolumnen "Tillräcklig information" gäller om konceptet kan analyseras på ett meningsfullt sätt baserat på det informationsunderlag som existerar i dagsläget, se figur 4.30 för den övergripande beslutstagningen.

Lösning	Uppfyller alla krav	Realiserbar i projektet	Passar uppdragsgivaren	Tillräcklig information	Beslut
A1	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
A2	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
A3	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
A4	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)
B1	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)
B2	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)
B3	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)
B4	(+)	(+)	(+)	(?)	(+)
B5	(?)	(+)	(+)	(-)	(-)
C1	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
C2	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
C3	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)
C4	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
C5	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

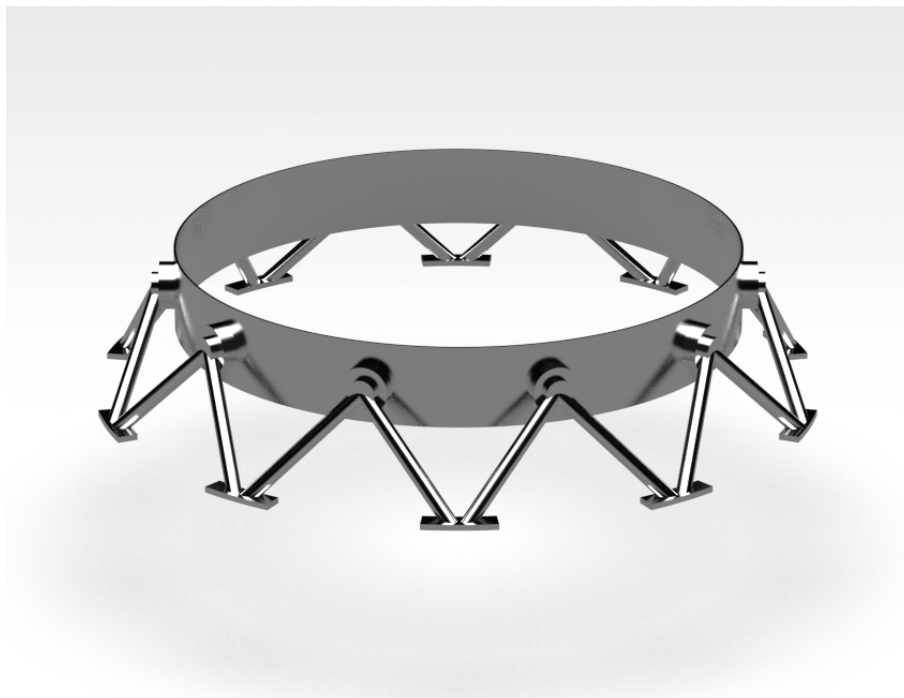
Figur 4.30: Elimineringssmatris.

Nu kvarstår koncept A3, B4 och C5. Som figur 4.30 visar har B4 ett frågetecken vid kolumnen tillräcklig information, detta beror på att konceptet är mer nytänkande och därmed inte har lika mycket underlag som de övriga lösningarna. Trots den begränsade informationen bedöms konceptet vara tillräckligt lovande och innovativt för att gå vidare till fortsatt utveckling. De tre återstående lösningarna uppfyllde samtliga krav och bedömdes vara tekniskt genomförbara. För att möjliggöra en rättvis jämförelse mellan de tre koncepten skapades därför tredimensionella CAD-modeller (Computer-Aided Design) av respektive koncept. I figur 4.31 syns hur helheten för koncept A3 skulle se ut med de V-formade stagen.



Figur 4.31: Koncept A3: Förmonterade dragstag och friliggande bulhuvuden.

I figur 4.32 syns en mer detaljerad bild på koncept A3:s fäste.



Figur 4.32: Koncept A3: Detaljerad bild av fästet.

I figur 4.33 syns hur helheten för koncept B4 ser ut.



Figur 4.33: Koncept B4: Lego-princip som är helgjuten.

I figur 4.34 syns en mer detaljerad bild på hur brickorna är placerade på koncept B4:s fäste.



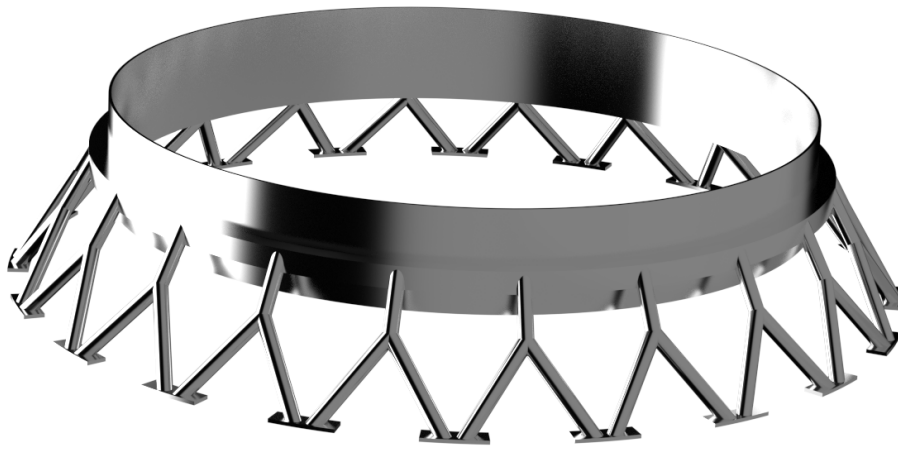
Figur 4.34: Koncept B4: Detaljerad bild av fästet.

I figur 4.35 syns en helhets bild på hur koncept C5 ser ut med de y-formade stagen.



Figur 4.35: Koncept C5: Y-formade stag placerade runt IMC.

I figur 4.36 syns en mer detaljerad bild på hur fästeanordningen för koncept C5 ser ut.



Figur 4.36: Koncept C5: Detaljerad bild på fästet.

Dessa tre koncept gick sedan vidare till verifierings-fasen som leder till ett slutgiltigt resultat.

5

Resultat

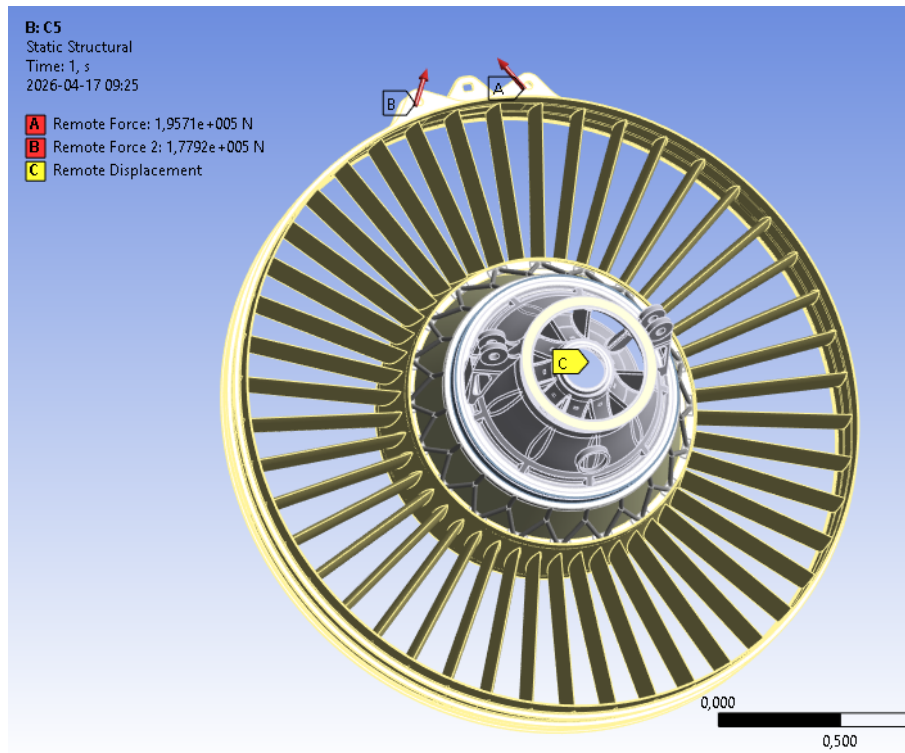
I följande kapitel presenteras resultaten från de beräkningar som genomfördes i ANSYS för de tre kvarvarande koncepten. Vidare redovisas en slutgiltig analys av koncepten där resultaten jämförs och utvärderas. De koncept som elimineras motiveras grundligt och kapitlet avslutas med en motivering av det slutliga konceptet.

5.1 Verifiering

För den strukturella verifieringen av fästena användes representativa laster framtagna av företaget. Lastpåläggningsen applicerades via FEGV-luggarna, vilket innebär att analysen enbart omfattar dragkrafter och inga moment. I analysmodellen låstes bakåtinterfacet på IMC i samtliga sex frihetsgrader, se figur 5.1. Detta möjliggjorde en korrekt lastöverföring genom fästet, varpå spänningsfördelningen i konstruktionen kunde analyseras. Totalt analyserades tio olika lastkombinationer (lastfall), vars krafter redovisas i tabell 5.1. Krafterna applicerades med en vinkel för att representera de stag som är monterade i luggarna. Eftersom tio oberoende lastfall studerades användes en Maximum Over Time-plot. Denna metod redovisar den maximala uppkomna spänningen, över samtliga lastfall, för varje nod i modellen. När ett område med förhöjda spänningsnivåer identifierades förfinades meshen lokalt, och en ny analys genomfördes enbart för det lastfall som gav upphov till den maximala spänningen i området. Samma modelldefinition och analysmetodik tillämpades för samtliga tre koncept, vilket möjliggör en direkt och rättvis jämförelse av deras strukturella prestanda.

Tabell 5.1: Krafter på FEGV-fästet

FLA [kN]	FLB [kN]
200	180
-150	-150
160	140
-130	-150
110	100
-100	-100
190	180
-150	-150
140	100
-160	-150

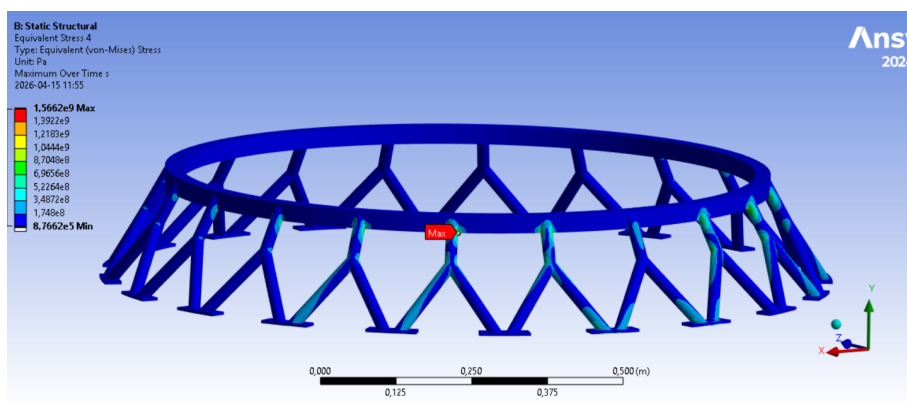


i

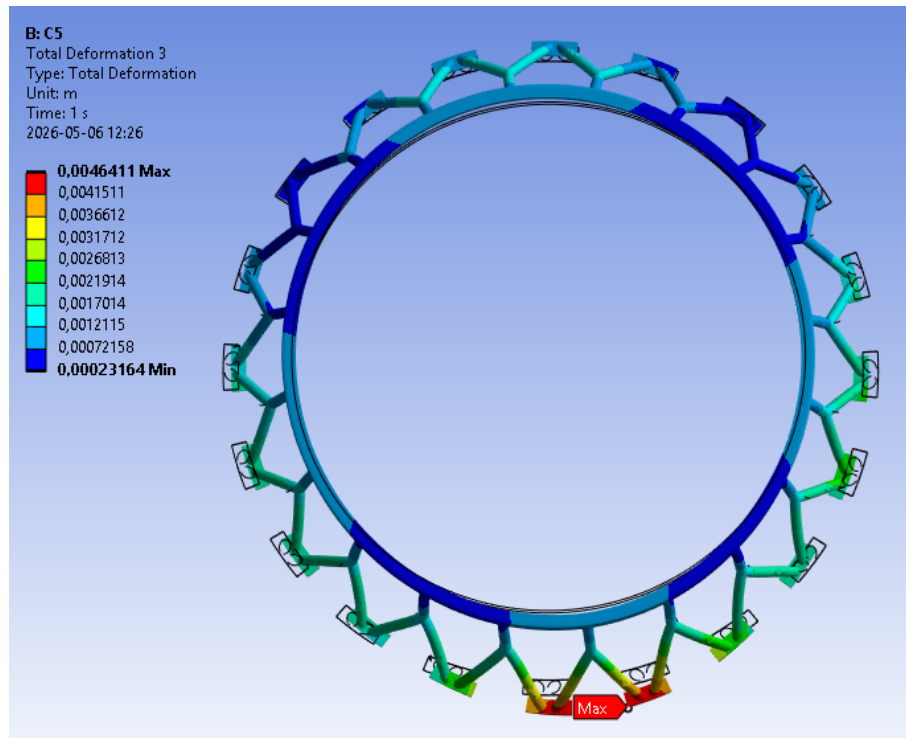
Figur 5.1: Gränsvillkor för respektive modell

5.1.1 Analys av C5

Först analyserades koncept C5 och fästet genererade följande resultat, se figur 5.2 och 5.3.



Figur 5.2: Spänningsfördelning i koncept C5.

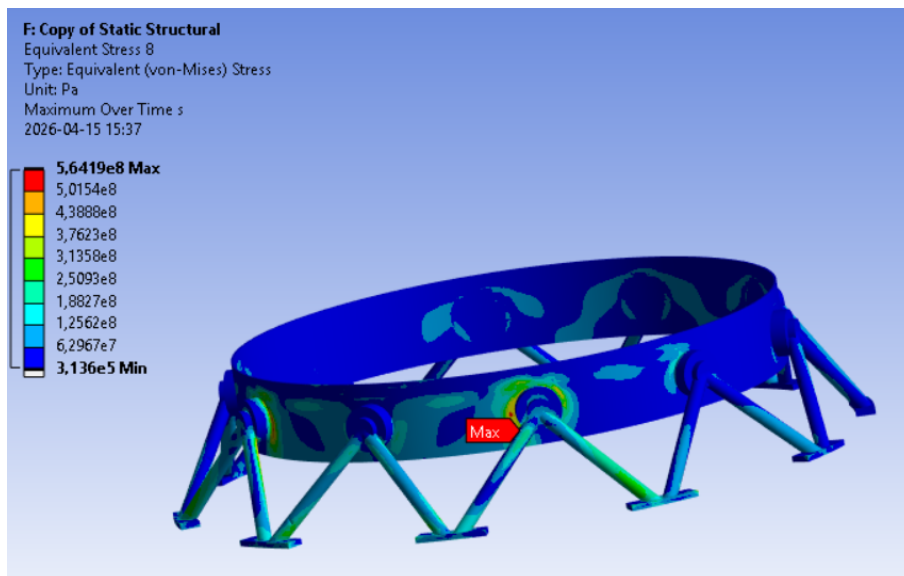


Figur 5.3: Totala deformationen för koncept C5.

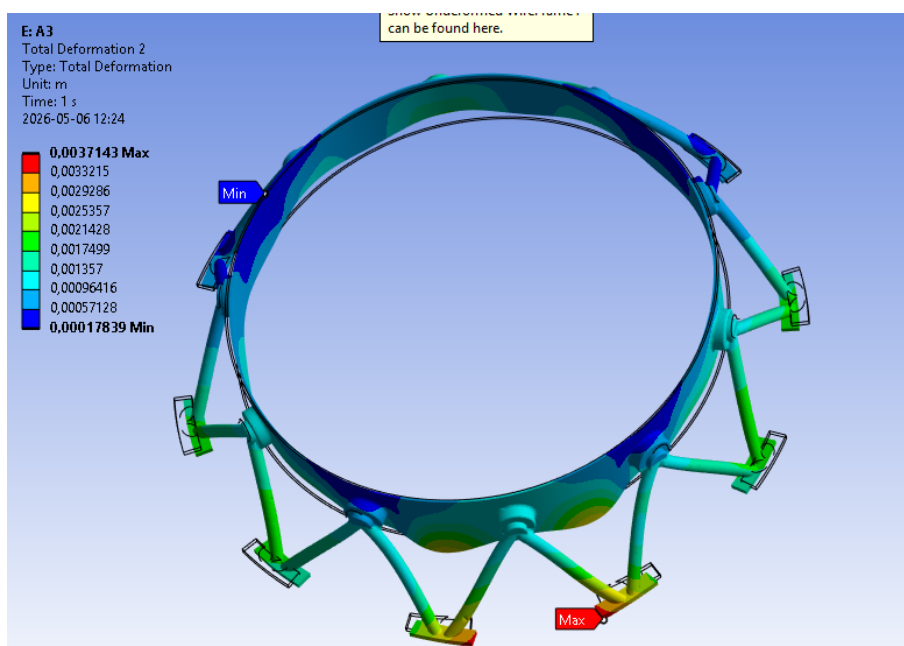
Detta fäste fick en maximal spänning på 1600 MPa och total deformation på 4,6 mm. Här upptäcktes även en spänningskoncentration mellan ringen och fästet som behövde tittas noggrannare på.

5.1.2 Analys av A3

Därefter analyserades konceptet A3 och denna komponent visade följande spänning och deformation, se figur 5.4 och 5.5.



Figur 5.4: Spänningsfördelning i koncept A3.

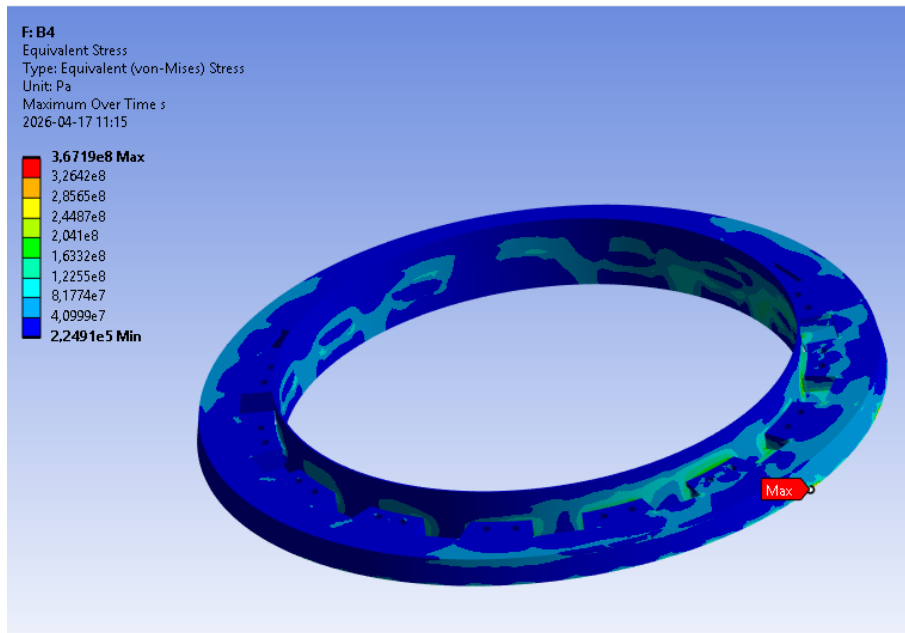


Figur 5.5: Totala deformationen för koncept A3.

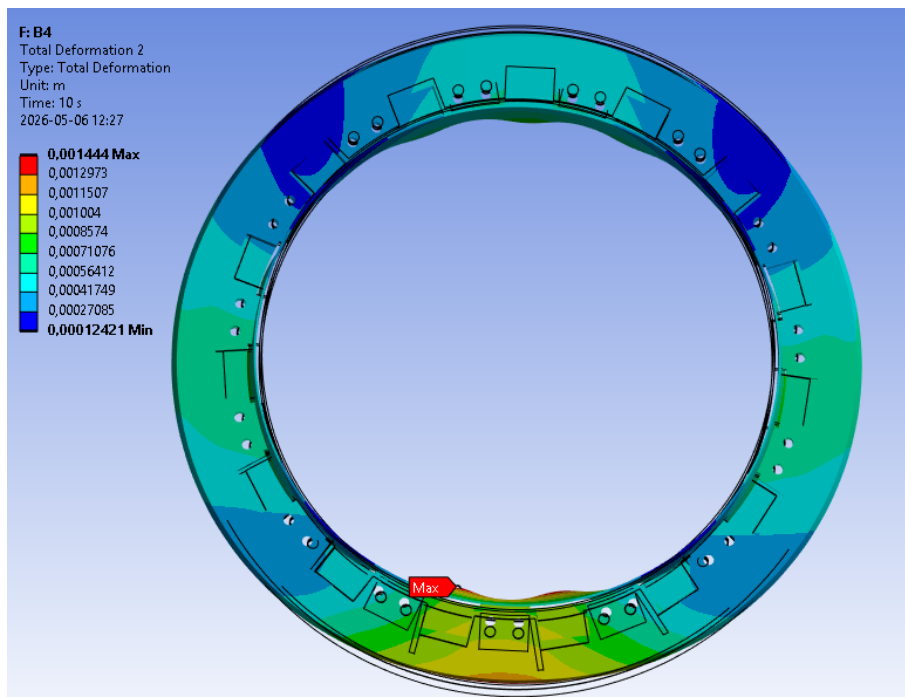
I koncept A3 observerades en spänning på 560 MPa och den totala uppmätta deformationen var 3,7 mm. Detta innebar att både spänningen och deformationen var något mindre jämfört med vad som uppmättes för koncept C5.

5.1.3 Analys av B4

Till sist analyserades koncept B4 och gav följande resultat, se figur 5.6 och 5.7. Denna lösning gav en maximal spänning på 370 MPa samt en total deformation på 1,4 mm. Dessa värden är lägre än motsvarande resultat för både A3 och C5. För



Figur 5.6: Spänningsfördelning i koncept B4.



Figur 5.7: Total deformation för koncept B4.

att kunna fatta ett välgrundat beslut och eliminera ytterligare koncept krävdes att vikten hos respektive fäste fastställdes, se tabell 5.2.

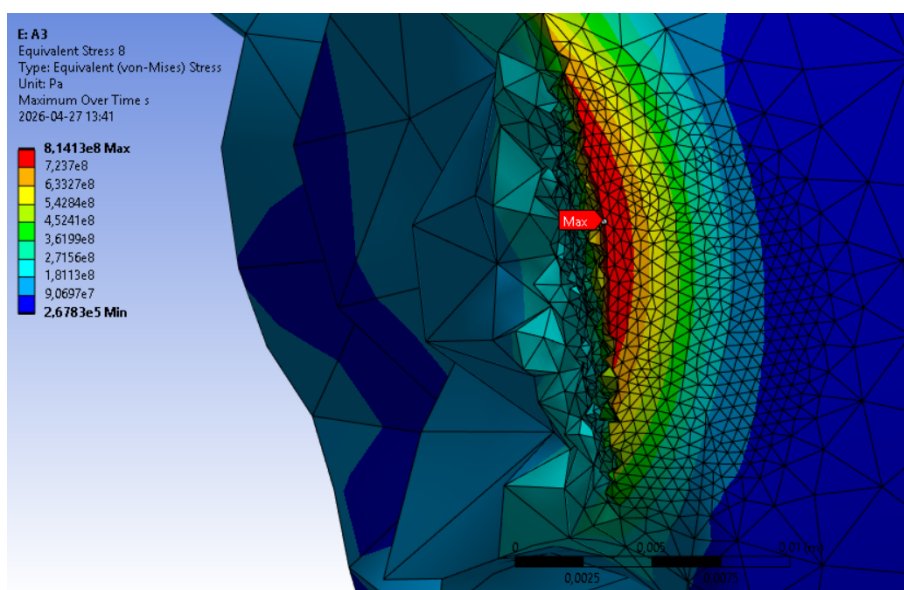
Tabell 5.2: Vikt för respektive konceptfäste.

Koncept	Vikt i kg
A3	31
B4	61
C5	33

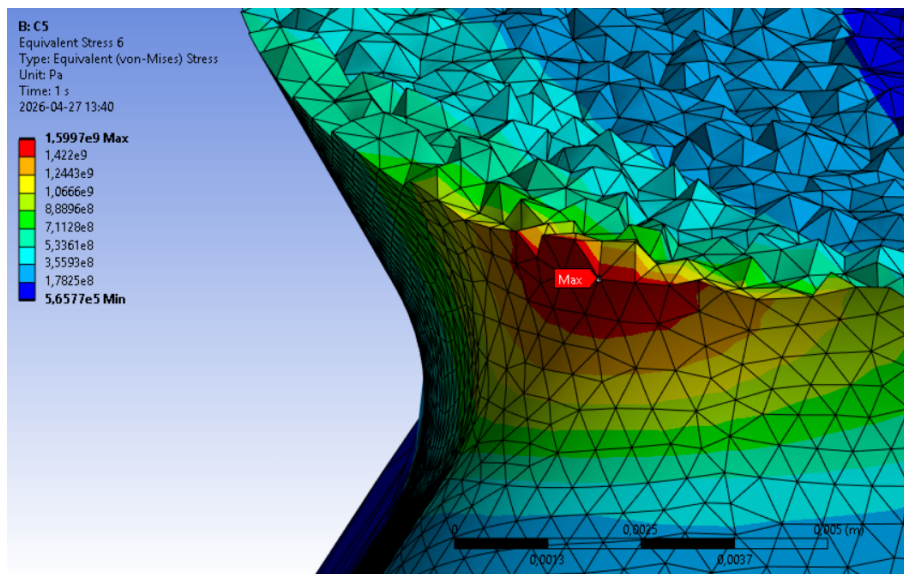
Som det framgår i tabell 5.2 väger koncept B4 mer än fördubblat än de två övriga koncepten. Vid tillverkning av koncept B4 skulle snäva toleranser vara svåra att uppnå, eftersom det kräver en omfattande anläggning för att lyfta IMC samt rotera och fästa den i FEGV. Denna process bedöms vara osannolikt att genomföra på ett säkert och tillförlitligt sätt, jämfört mot de andra två koncepten som kräver minimal omställning. Vidare är fästet i sig alltför tungt för att vara lämpligt i ett flygande system. Av dessa skäl beslutas att koncept B4 elimineras i detta skede.

5.2 Slutgiltigt jämförande

För att möjliggöra en fortsatt jämförelse mellan koncept A3 och C5 genomfördes en ytterligare mesh- och geometri-förfining för båda modellerna, i syfte att undersöka hur resultaten påverkas av ett tätare nät och rundare kanter. Mesh-förfiningen applicerades lokalt i de områden där maximal spänning tidigare hade identifierats, med en elementstorlek på 0,5 mm. Efter förfiningen uppvisade koncept A3 en maximal spänning på 810 MPa, se figur 5.8, medan koncept C5 uppvisade en maximal spänning på 1600 MPa, se figur 5.9.



Figur 5.8: Ny spänning för A3 efter mesh- och geometri-förfining.



Figur 5.9: Ny spänning för C5 efter mesh- och geometri-förfining.

Resultaten från geometri- och meshförfiningen sammanfattas i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Maximal von Mises-spänning före och efter förfining.

Koncept	Före meshförfining	Efter meshförfining
A3	560 MPa	810 MPa
C5	1570 MPa	1570 MPa

Vid jämförelse av resultaten för C5 före förfining med de efterföljande resultaten kan det konstateras att den maximala spänningen ökade minimalt. Spänningsnivån är relativt hög och befinner sig i ett plastiskt tillstånd, eftersom sträckgränsen för titan är 830 MPa. Detta är förväntat eftersom lastfallen utgör ultimata laster. För koncept A3 ökade spänningen också marginellt vid förfining, vilket också är ett förväntat beteende.

Koncept A3 är det alternativ som har lägst vikt. Inom flygindustrin kan även små viktbesparingar ha stor betydelse, vilket gör koncept A3 fördelaktigt ur denna aspekt. Samtidigt har koncept C5 vissa styrkor, exempelvis möjligheten att tillverkas som en helkomponent och fästas med en rund ring kring IMC. Detta bidrar till ett mer effektivt arbetsflöde och minskar antalet tillverkningssteg. För både koncept A3 och C5 finns även möjligheten att additivt tillverka stagen mellan IMC och FEGV, vilket ligger i linje med den utvecklingsriktning som GKN som företag strävar mot. För koncept A3 kan ett alternativt tillverknings sätt vara att ringen runt IMC helgjuts tillsammans med de utstickande flänsarna, varefter ihåliga rör additivt tillverkas från dessa.

Med dessa konstateranden och värden elimineras koncept C5 eftersom det dels väger mer samt har högre deformations- och spänningsvärden under lastfallen. Koncept A3 bedöms därmed vara det mest lämpliga alternativet och utses som det slutgiltiga konceptet, se figur 5.10.



Figur 5.10: Slutgiltigt resultat: A3.

6

Diskussion

I följande kapitel diskuteras projektets resultat i relation till syftet, den teoretiska referensramen samt de insikter som framkommit genom studierna. Särskilt fokus läggs på val av design och koncept, där görbarhet, begränsningar och möjliga förbättringar utvärderas och analyseras.

6.1 Tillförlitlighet och inverkan

Genom att kombinera kravbaserad produktutveckling med numeriska simuleringar säkerställs att resultaten är reproducerbara och tekniskt verifierbara. Metoden skapar spårbarhet från identifierande behov till slutligt koncept, vilket stärker arbetets trovärdighet och relevans.

GTC (Global Teknologi Center) arbetar med utveckling av framtida tekniska lösningar, vilket innebär att de framtagna koncepten och resultaten från projektet är avsedda att fungera som underlag för fortsatt produktutveckling. Utöver detta bidrar projektets resultat till att skapa ett tekniskt beslutsunderlag som kan användas vid fortsatta analyser, optimering och konceptutveckling. Detta innebär att metodernas inverkan inte enbart är kopplad till projektets slutresultat, utan även till det långsiktiga utvecklingsarbetet inom organisationen [54].

Inom ramen för detta arbetssätt låg fokus vid framtagning av slutkoncept på funktionella principer och framtida potential snarare än enbart dagens tekniska begränsningar. Detta innebär att de planerade lösningarna inte nödvändigtvis behöver vara direkt implementerbara med nuvarande teknik, utan är avsedda att fungera som konceptuella riktlinjer för framtida utveckling och tekniska framsteg.

När CAD-modellerna var färdigställda upptäcktes flera konstruktionsfel i samband med beräkningarna i ANSYS, vilket ledde till att analysarbetet tog längre tid än förväntat. Det hade varit önskvärt att vidareutveckla och utvärdera koncept A4 och C5 ytterligare för att undersöka hur resultaten påverkas av olika konstruktionsförändringar, exempelvis variationer i stagens radie eller antal. Sådana parametriska studier hade kunnat ge en djupare förståelse för konceptens beteende och bör därför beaktas i det fortsatta utvecklingsarbetet.

De genomförda analyserna bygger på förenklade lastfall och randvillkor, vilket innebär att resultaten främst bör ses som vägledande i detta skede. I verklig drift kan

andra belastningar uppstå som påverkar konstruktionen. För fortsatt utveckling rekommenderas därför mer detaljerade analyser, exempelvis av utmattning, vibrationer och temperaturpåverkan. Lasterna som applicerades i ANSYS användes för att undersöka hur komponenten reagerar vid ultimata lastfall. Eftersom konceptet befinner sig i ett plasticerande tillstånd finns det risk att en ytterligare lastökning leder till brott i de stag där de högsta spänningarna uppmättes. För att bättre förstå konceptets beteende vid bristningspunkten bör lasterna därför successivt ökas och analyseras vidare. Även beräkningar av konstruktionens redundans, utmattning, resonans samt analyser av hur konstruktionen påverkas vid bortfall av en komponent hade varit intressanta att undersöka. Dessa är dessutom viktiga aspekter att verifiera innan en fysisk prototyp tillverkas. Däremot ligger det utanför omfattningen för denna rapport och rekommenderas därför som fortsatt arbete i nästa steg av utvecklingen.

6.2 Etiska och miljö aspekter

För att kunna uppskatta kostnaden och utsläppen för koncept A3 omvandlas först massan 31 kg till pound, vilket motsvarar 68 lb. Givet ett antaget materialpris på 1500 USD/lb (från kravspecifikationen) erhålls en uppskattad kostnad på

$$68 \times 1500 = 102\,000 \text{ USD},$$

vilket motsvarar 950 000 SEK.

Det bör noteras att denna kostnad är approximativ, eftersom beräkningen enbart baseras på materialets vikt. Komponenter är i dagsläget inte fullt optimerade, vilket innebär att ytterligare viktminskning är möjlig och vore fördelaktigt. En reducerad vikt skulle i sin tur leda till både lägre materialkostnad och därmed minskad bränsleförbrukning. Detta är därför en aspekt som bör analyseras vidare i det fortsatta arbetet.

Om mer tid hade funnits hade ytterligare en iteration med avseende på geometrioptimering. Detta innebär ett parallellt arbete i ANSYS och CAD, där områden med maximala spänningar identifieras i den numeriska analysen och därefter används som underlag för geometriska modifieringar i CAD-modellen. Därigenom hade både kostnaden och materialåtgången kunnat reduceras, vilket i sin tur även bidrar till minskad bränsleförbrukning. Konceptet uppfyllde även kravet i kravspecifikationen avseende hållfasthet, det vill säga att maximala spänningar skulle understiga brottgränsen för Ti-6Al-4V. Det slutgiltiga konceptet visade sig klara både brottgräns och sträckgräns, vilket bedöms vara ett positivt resultat.

Vidare bedöms konceptet ha potential att tillverkas additivt med hjälp av pulverbäddsfusion, vilket är i linje med uppdragsgivarens långsiktiga mål. Alternativt kan komponenten tillverkas genom exempelvis gjutning av ringen och fästena, följt av sammanfogning med de ihåliga stagen via svetsning. Vilken tillverkningsmetod som är mest kostnadseffektiv kan i nuläget inte fastställas och bör därför undersökas vidare. I detta sammanhang kan även beslut fattas kring antalet monteringssteg vid installation i motorn, vilket var ett av de eftersträfvade målen i kravspecifikationen.

7

Slutsats

I följande kapitel presenteras projektets övergripande slutsatser utifrån genomförande analyser, resultat och utvärderingar. Fokus ligger på de viktigaste insikterna från arbetet, hur väl syftet och frågeställningarna har besvarats samt vilka rekommendationer och framtida utvecklingsmöjligheter som identifierats.

7.1 Övergripande slutsatser

Syftet med examensarbetet var att utveckla och utvärdera olika koncept för ett fäste mellan IMC och FEGV för att möjliggöra en ny lastväg vid flytt av motorfästet. Syftet bedöms ha uppnåtts eftersom flera koncept har tagits fram, analyserats och jämförts utifrån spänningar, deformationer och vikt.

Arbetets frågeställningar har även besvarats genom den genomförda produktutvecklingsprocessen. Studien visade att lösningar med stag var mest lovande. De krav och egenskaper som identifierades omfattade bland annat hållfasthet, låg vikt, monterbarhet, kompatibilitet med befintlig konstruktion samt tillverkningsbarhet.

Efter utvärdering av de mest lovande koncepten bedömdes koncept A3 vara det mest lämpliga alternativet. Konceptet uppvisade god strukturell funktion, acceptabla spänningsnivåer i förhållande till materialets brottgräns samt konkurrenskraftig vikt jämfört med övriga alternativ.

Arbetet visar att en strukturerad produktutvecklingsprocess tillsammans med tekniska analyser fungerade väl vid denna typ av konstruktionsproblem. För fortsatt arbete rekommenderas geometrioptimering, mer avancerade lastfall samt fortsatt analys av livslängd och utmattning. Med fortsatt utveckling kan koncept A3 vara ett intressant alternativ för framtida industriell användning.

Referenser

- [1] Seco Tools, “WHY MAKING AN AEROPLANE PYLON IS A TRUE COLLABORATIVE PROCESS.”
- [2] Rolls-Royce, *The Jet Engine*, 6th ed., 2015.
- [3] A. Lakshya Kumar, “Design and analysis of a high pressure ratio and high mass flow centrifugal compressor,” 8 2018.
- [4] E. Chen, “How does a jet engine work?” *Aerobloggen*, 10 2019.
- [5] GKN Aerospace, “GKN Aerospace’s Intermediate Compressor Case (ICC) of Rolls-Royce UltraFan® engine successfully tested at full power,” 2 2024.
- [6] P. Keane, “GKN Aerospace’s ICC Successfully Tested for Rolls-Royce UltraFan Engine,” 3 2024.
- [7] V. Raja and O. Isaksson, “Generic Functional Decomposition of an Integrated Jet Engine Mechanical Sub System Using a Configurable Component Approach,” Tech. Rep., 2015.
- [8] M. Schnoes, A. Seitz, and A. Rolt, “Aero-mechanical optimization of outlet guide vanes for modern turbofan engines,” Rolls-Royce, Tech. Rep., 2018.
- [9] Zeto.R, “Outlet Guide Vanes Step-by-Step Replacement on CFM56 and explanation of function,” 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EucxwUDS2rc>
- [10] A. Björkman Paudan and H. Mahaveer, “Aerothermal performance of fan outlet guide vanes in modern geared turbofan engines Master’s thesis in Applied Mechanics and Sustainable Energy Systems,” Tech. Rep. [Online]. Available: www.chalmers.se
- [11] NASA, “Load Transfer in Turbofan Engine Front Structures,” Tech. Rep., 2014.
- [12] Metallkompetens, “Titanlegeringar.” [Online]. Available: <https://metallkompetens.se/handbok/gjuterihandboken/gjutna-material/titanlegeringar/>
- [13] GSMetals, “Titanium grade 5 (ti-6al-4v): Den mångsidiga titanlegeringen,” 8 2024, hämtad 2026-02-13. [Online]. Available: <https://gsalloy.com/sv/titanium-grade-5-ti-6al-4v-the-versatile-titanium-alloy/>
- [14] T. Industries, “Titanium 6al-2sn-4zr-2mo | r54620,” 2021, hämtad 2026-02-13. [Online]. Available: <https://titanium.com/alloys/titanium-and-titanium-alloys/ti-6al-2sn-4zr-2mo/>
- [15] S. M. Centres, “Ti 6242 titanium alloy,” 2020, hämtad 2026-02-14. [Online]. Available: <https://www.smithmetal.com/ti-6-2-4-2.htm>
- [16] A. Numelin, “Fakta om vinkelbeslag,” 1 2026.
- [17] Titanium Gateway, “Ett starkt grundämne.”
- [18] Ojanperä, “VINKELBESLAG 50X50X35X2,5MM ROSTFRI A2.”

-
- [19] F. Lilläng, “Utveckling av länkmarmssystem för motordrivna industriportar,” Ph.D. dissertation, Chalmers tekniska högskola, 2013. [Online]. Available: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/8e60ef70-ad3f-4fa6-960b-fc8a3a3b1ca8/content>
- [20] Autodoc, “Länkmarm bak och fram till bil,” hämtad 2026-02-17. [Online]. Available: <https://www.autodoc.se/reservdelar/lankarmar-bararmar-langsgaende-tvarstallda-10671>
- [21] B. Malmqvist, “Skruvförband åtdragningsmoment,” Tech. Rep., 11 2010.
- [22] J. Skogsmo, “Lättviktsförband,” 1.
- [23] Colly Company AB, “Handbok om skruvförband,” Kista, Tech. Rep., 9 1995.
- [24] K. Systems, “Klämförband.” [Online]. Available: <https://www.ktr.com/se/sv/produkter/klamforband/>
- [25] D. Lamise, “All you need to know about spacers,” *LGC Industries*, 6 2025.
- [26] Blogspot, “Gas Turbine Tutorials,” 2013.
- [27] Harichandran R.S, “Chapter 5. Bolted Connection.”
- [28] T. Bartlett Quimby, “Mechanics of Load Transfer,” 2011.
- [29] P. Group, “Technical manual - besista tension rod system,” Peikko Group, Tech. Rep., 11 2024. [Online]. Available: https://media.peikko.com/file/dl/i/7BH9MA/j_xBEMMYQZ_dWZptHkc8YQ/BESISTA_PEIKKO_GROUP_02_Technical_Manual_Web.pdf?fv=8864&_gl=1*5c6efa*_gl_au*MTU0NDc1NDg4NS4xNzcxNDE4MjQ2
- [30] A. Born, “What are bayonet connectors?” [Online]. Available: <https://connectorsupplier.com/what-is-a-bayonet-connector/#:~:text=Bayonet%20connectors%20are%20a%20circular,screw%20and%20push%20fit%20connectors.>
- [31] H. Machine, “What is universal joint? | universal joints & precision u-joints,” 2024. [Online]. Available: <https://www.huadingmachine.com/resources/what-is-universal-joint-universal-joints-amp-precision-u-joints.html>
- [32] Svensk byggtjänst, “Pretec Dragstag,” 1 2026.
- [33] Pretec, “PDS dragstagssystem.”
- [34] Y. Aluminum, “Reinforcing rib in cnc machining,” 2025. [Online]. Available: <https://yajialuminum.com/reinforcing-rib-in-cnc-machining/#:~:text=Reinforcing%20Rib%20in%20CNC%20Machining%20-%20Ya%20Ji%20Aluminum%20%7C%20Extrusion%20Manufacturer.>
- [35] A. International, “How flanges work: Function and purpose,” 2025. [Online]. Available: <https://apiint.com/blog/how-flanges-work-function-and-purpose/#:~:text=The%20Flange%20Connection%20Process,sequence%20to%20create%20even%20pressure.>
- [36] Misumi, “Principles of Positioning.”
- [37] Carr Lane, “Types of Locating Pins & Their Applications: The Comprehensive Guide.”
- [38] P. Wong, “Mastering Interference Fit: The Ultimate Guide,” 9 2025.
- [39] C. Bemis, “Keyseats and Keyways,” 8 2022.
- [40] C. L. M. Co., “Cam clamps.” [Online]. Available: <https://www.carrlane.com/engineering-resources/technical-information/manual-workholding/cam-clamps>

- [41] L. Cope, “How a Split Flange Works and When to Use One,” *Engineer Fix*, 11 2025.
- [42] A. E. GmbH, “Pre-assembly.” [Online]. Available: <https://alders.de/en/alders-explains/pre-assembly/>
- [43] UPS Lakshmi, “Precision Alignment: How Dowel Pins Ensure Accuracy in Manufacturing,” 4 2025.
- [44] ChansMachining, “Typer av hål inom teknik: En omfattande guide,” 12 2024.
- [45] J. Annis, “5 design tips for sheet metal assemblies.” [Online]. Available: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/5-design-tips-for-sheet-metal-assemblies/>
- [46] Montano, “Bult och Sexkantskruv.”
- [47] Engineering Technology, “Holes.”
- [48] Neural Concept, “Stress Concentration Factor: Minimizing Its Effects in Engineering.”
- [49] Tirapid, “Types of bolts,” 2 2026. [Online]. Available: <https://tirapid.com/types-of-bolts/>
- [50] Gerald P., WhitefordKirk W., Olsen Jason, and Gregory James A., “Aircraft engine mount - US10752370B2,” 2016.
- [51] G. Murmann and G. Bauer, “Low profile switch,” 8 1984.
- [52] G. K. Christiansen, “Toy building brick,” 10 1961.
- [53] Ashley James, “Composite wheel rim fiber architecture,” 8 2017.
- [54] GKN Aerospace, “Global technology centres,” 2026.

**INSTITUTIONEN FÖR MECHANICAL ENGINEERING
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS