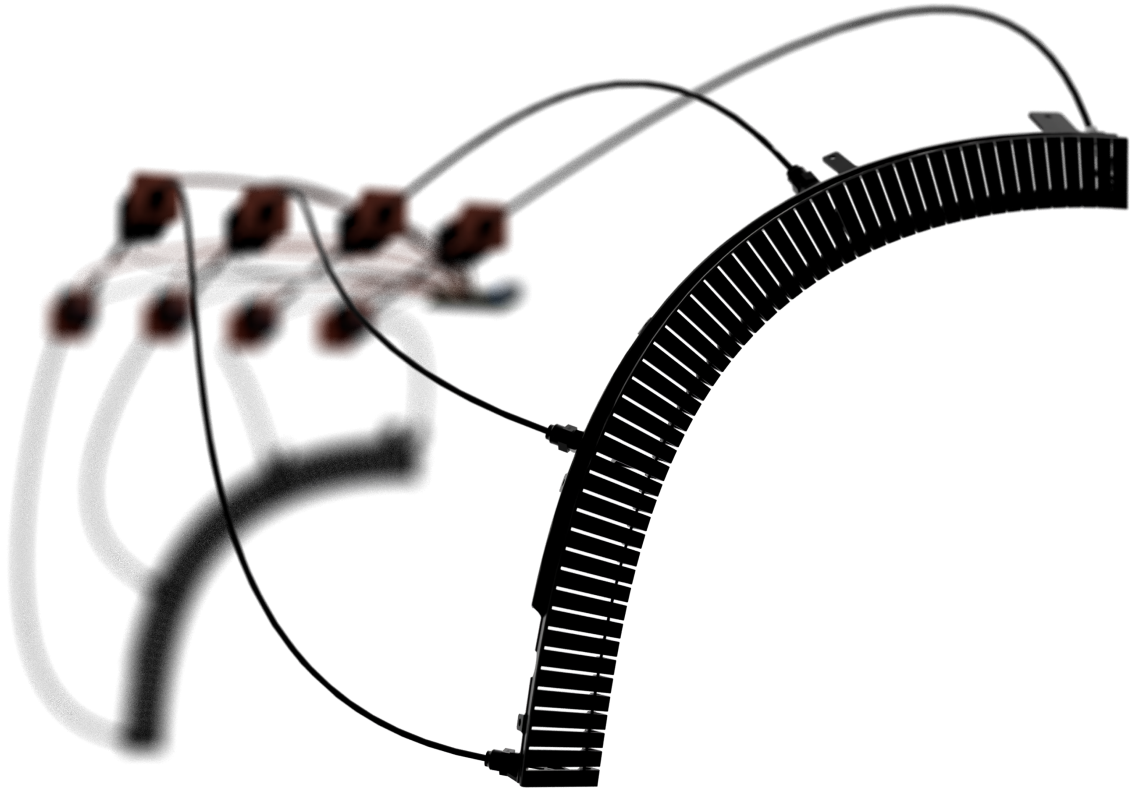




CHALMERS



Closing the gap: Advanced design of finger-gap reducers for vehicle wheel housings

Stänga gapet: Avancerad design av finger-gap reducers för fordonshjulhus

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Teknisk Design

Malin Aronsson, Daniel Babić, Edvard Ekvall,
Alexander Johansson, Sigvard Lindell & Ida Olofsson

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

**Closing the gap:
Advanced design of finger-gap
reducers for vehicle wheel housings**

MALIN ARONSSON
DANIEL BABIĆ
EDVARD EKVALL
ALEXANDER JOHANSSON
SIGVARD LINDELL
IDA OLOFSSON



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

Closing the gap: Advanced design of finger-gap reducers for vehicle wheel housings

MALIN ARONSSON
DANIEL BABIĆ
EDVARD EKVALL
ALEXANDER JOHANSSON
SIGVARD LINDELL
IDA OLOFSSON

© MALIN ARONSSON, DANIEL BABIĆ, EDVARD EKVALL, ALEXANDER JOHANSSON, SIGVARD LINDELL & IDA OLOFSSON 2025.

Handledare: Erik Josefsson, Magnus Urquhart, Jens Petrusson, Kristoffer Andersson
Examinator: Simone Sebben, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2025

Abstract

The automotive industry faces significant challenges regarding performance and range in today's vehicles. Aerodynamics plays a crucial role, as a substantial portion of energy losses in vehicles is due to aerodynamic drag. One specific area identified as a major source of such losses is the wheelhouse region. Therefore, this project, conducted in collaboration with Volvo Cars, aimed to develop an adaptive finger-gap reducer, a component designed to minimize the gap between the tire and wheelhouse, optimizing vehicle aerodynamics. The project employed iterative design methodologies, CAD modeling, polypropylene prototype manufacturing, and visualizations to develop and test the concept. A prototype featuring four pressure points, working collectively to achieve the desired surface shape, was designed using CAD and then 3D-printed in polypropylene. Each pressure point actively adjusts the geometry via stepper motors connected by spring steel cables. This prototype allows extensive aerodynamic testing in wind tunnels with varying shapes, eliminating manual adjustments between tests. The developed concept could not only reduce aerodynamic drag and extend vehicle range but also significantly save time during aerodynamic testing. Films and visualizations have been created to illustrate the functionality and potential for further development. This concept may be further refined in the future for integration into production vehicles.

Keywords: Aerodynamics, finger-gap reducer, passenger car, adaptive, wheel house, wind tunnel, stepper motor, efficiency improvement, prototype, drag.

Sammandrag

Fordonsindustrin står inför stora utmaningar kopplade till prestanda och räckvidd hos dagens fordon. En viktig faktor i detta sammanhang är aerodynamiken, då en betydande del av energiförlusterna i fordon orsakas av luftmotstånd. Ett område på bilen som har identifierats som en viktig källa till dessa förluster är hjulhusen. Detta arbete, som genomförts i samarbete med Volvo Cars, syftade därför till att utveckla en adaptiv finger-gap reducer. En komponent som minskar avståndet mellan däck och hjulhus för att optimera aerodynamiken. Arbetet har använt sig av iterativa designmetoder, CAD-modellering, prototypuskrift i polypropylen och visualiseringar för att utveckla och testa konceptet. En prototyp med fyra tryckpunkter som tillsammans verkar för att uppnå önskad utformning på ytan konstruerades med hjälp av CAD och 3D-printning i polypropylen. Varje tryckpunkt justerar ytan aktivt med hjälp av stegmotorer via fjäderstålsstänger. Prototypen möjliggör omfattande aerodynamiska tester i vindtunnel med varierande former utan manuella ingrepp mellan testerna. Potentialen för detta koncept är inte bara minskat luftmotstånd och ökad räckvidd, utan också betydande tidsbesparing vid aerodynamisk testning. Filmer och visualiseringar har skapats för att tydliggöra konceptets funktion och utvecklingspotential. Konceptet kan i framtiden vidareutvecklas för integration i produktionsbilar.

Nyckelord: Aerodynamik, finger-gap reducer, personbil, adaptiv, hjulhus, vindtunnel, stegmotor, effektivisering, prototyp, luftmotstånd.

Förord

Att genomföra ett projekt är på många sätt som att färdas i både med- och motvind. Vår resa har kantats av utmaningar och medgångar, och vi har behövt hantera dessa på ett klokt sätt. Vi har haft förmånen att få stöd under vägen, och är ödmjuka inför insikten att vi trots allt bara är en kugge i ett hjul.

Vi vill därför börja med att tacka våra handledare Erik Josefsson, Magnus Urquhart, Jens Petrusson och Kristoffer Andersson som funnits vid vår sida genom hela arbets gång och stöttat oss under processen. Mottagandet vi fått på Volvo Cars har varit avgörande för vår framgång i detta arbete. Vi vill även rikta ett stort tack till vår examinator Simone Sebben för all vägledning.

*The dark days are gone and the bright days are here.
My sunny one shines so sincere.*


Malin Aronsson


Daniel Babić


Edvard Ekvall


Alexander Johansson


Sigvard Lindell


Ida Olofsson

Göteborg, 13 maj 2025

Terminologi

Nedan följer en lista över termer som har använts i denna rapport, sorterade i alfabetisk ordning:

Bowden-kabel	Böjligt hölje i vilket en axiellt rörlig ståltråd eller stång löper.
Braindrawing	Idéutvecklingsmetod där deltagare skissar sina idéer och successivt bygger vidare på varandras skisser i flera rundor.
Brainwriting	Idéutvecklingsmetod där deltagare tyst skriver ner och vidareutvecklar varandras idéer i flera rundor.
Finger-gap reducer	En komponent som minskar avståndet mellan däck och hjulhus.
Fordonsspoiler	Aerodynamisk anordning som styr eller stör luftens strömning kring ett fordon.
Frunk	Bagageutrymme i bilens framdel.
Selektiv lasersintring	En additiv tillverkningsprocess där partiklar från en bädd av plastpulver smälts för att producera delar och enheter.
Mikrokontroller	Komplett dator konstruerad på ett enstaka chip och typiskt avsedd att köra ett visst program.
Stegmotor	En typ av elektrisk motor inom elektrotekniken vars lindningar matas med strömpulser.

Akronymer

Nedan följer en lista över akronymer som har använts i denna rapport, sorterade i alfabetisk ordning:

CAD	Computer aided design.
C_D	Luftmotståndskoefficient .
CAM	Computer aided manufacturing.
CFD	Computational fluid dynamics.
PTFE	Polytetrafluoreten.

Innehåll

Terminologi	xi
Akronymer	xiii
Figurer	xvii
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Mål	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Samhälleliga och etiska aspekter	3
2 Teori & teknisk bakgrund	5
2.1 Bilens aerodynamik	5
2.2 Optimering av vindtunneltester	6
2.3 Aktiva fordonskomponenter	7
3 Metod	9
3.1 Använda metoder	9
3.1.1 Design thinking	9
3.1.2 Litteraturstudier	10
3.1.3 Idégenereringsmetoder	10
3.1.4 Vindtunneltestning	10
3.1.5 3D-skanning	11
3.2 Programvaror	12
3.2.1 CATIA	12
3.2.2 Autodesk Fusion 360	12
3.2.3 Blender	12
3.2.4 DaVinci Resolve	12
3.3 Process	13
4 Resultat	17
4.1 Slutkoncept	17
4.2 Fysisk prototyp och funktionstest	20
4.3 Vindtunneltest och 3D-skanning	22

4.4	Visualisering	22
4.5	Implementering av designspråk	24
5	Analys & diskussion	25
5.1	Tekniska och praktiska utmaningar	25
5.2	Potentialen hos en adaptiv testprototyp	26
5.3	Design- och utvecklingsprocess	27
6	Avslutning	29
6.1	Slutsats	29
6.2	Förslag till vidare forskning	29
	Referenser	31
A	Appendix - Reklamfilm	I

Figurer

1.1	Exempel på hur en finger-gap reducer kan vara utformad, genererad med AI och manipulerad i Photoshop (2025).	2
2.1	Illustration av arbetsflöde i vindtunnel, inspirerad av Oselin (2023).	7
2.2	Patent på ytmodifieringstekniken för en fordonsspoiler (Petrusson, 2023).	8
3.1	Illustration av processtegen inom Design thinking.	9
3.2	Visualisering av testproceduren vid vindtunneltest.	11
3.3	Tidig skiss på konceptet.	14
3.4	Första prototypen där olika fackverk testades.	14
3.5	Den fullskaliga prototypen modifierades till 3 sektioner med olika bredder på fransar.	15
3.6	Baksida av prototypen med indelade sektioner.	15
3.7	Inklädd framsida av prototypen.	16
4.1	Rendering av det slutgiltiga konceptet monterat på en MDF-skiva i frunken.	17
4.2	Styrcentralen fristående från bilen.	18
4.3	Sprängskiss på stegmotorers komponenter.	19
4.4	Nippelkoppling som fäster PTFE-höljet i finger-gap reducer.	19
4.5	Sprängskiss över finger-gap reducerens komponenter. Observera att komponenterna inte har samma skala.	20
4.6	Monterade stegmotorer, styrsystem och elförsörjning.	21
4.7	Monterad finger-gap reducer i rakt läge.	21
4.8	Monterad finger-gap reducer i böjt läge.	22
4.9	Rendering av monterad finger-gap reducer.	23
4.10	Utvinklad finger-gap reducer.	23
4.11	Rendering av finger-gap reducer enligt Volvo Cars designspråk.	24

1

Inledning

Den klimatpåverkan som följer av koldioxidutsläpp från bilar och transportsektorn i EU är stor, av de totala utsläppen från EU:s vägtransporter kommer 61 procent från personbilar (Europaparlamentet, 2019). Dessa utsläpp av koldioxid bidrar till klimatförändringar så som global uppvärmning, då atmosfärens förmåga att värma jordytan förstärks av växthusgaser (Naturvårdsverket, 2024). Lagarna som sätts till följd av detta gör att bilindustrin är i ständig utveckling och undersöker lösningar för att minska utsläppen som bilar bidrar med. Elbilar är därmed en kategori som växer markant på marknaden.

Enligt Mahmud, Mehedi och Ali (2019) utgör aerodynamiska förluster cirka 50 till 60 procent av en bils totala energiförbrukning, där bara området runt hjulen står för ungefär 25 procent av det totala luftmotståndet (Wickern, Zwicker & Pfadenhauer, 1997). Detta gör hjulhuset till ett särskilt relevant fokusområde inom aerodynamik. En ny lösning som används för att förbättra bilars aerodynamik är *finger-gap reduction*, en lösning som minskar avståndet mellan däcken och hjulhusens kanter, se Figur 1.1. Det är känt att om detta avstånd minskas så kommer bilens aerodynamik att förbättras, det är dock inte känt hur olika vinklar på en sådan komponent påverkar vilka aerodynamiska vinster som kan uppnås.

För att undersöka olika vinklar och dess påverkan på aerodynamiken blir en adaptiv komponent viktig, speciellt i tidiga stadier av arbete inom detta område. Detta då olika bilar är olika stora och säljs med olika däck vilket leder till att utrymmet som finns att tillgå varierar i storlek. Detta möjliggör även att testning i vindtunnel kan vara mer heltäckande under kortare tid jämfört med hur det hade varit om en komponent endast kunde testa en vinkel. Genom att optimera luftflödet runt hjulhusen minskar flödesförluster, vilket leder till lägre luftmotstånd och därmed förbättrad räckvidd och prestanda. Området och dess potential har skapat ett intresse hos Volvo Cars att undersöka hur det kan implementeras på deras bilar.



Figur 1.1: Exempel på hur en finger-gap reducer kan vara utformad, genererad med AI och manipulerad i Photoshop (2025).

1.1 Syfte

Arbetets syfte är att konstruera en finger-gap reducer som optimerar luftflödet och minskar turbulens runt hjulhusen på personbilar. Något som i sin tur förbättrar fordonets aerodynamiska prestanda och minskar energiförluster, vilket är särskilt viktigt vid utvecklingen av elbilar och dess räckvidd. Genom att använda Volvo Cars patenterade teknologi för ytmodifiering (Petrusson, 2023) och samtidigt styra prototypen från kontrollrummet möjliggörs mer effektiva vindtunneltester. Detta minskar behovet av manuella ingrepp och optimerar därmed testprocessen. På sikt kan arbetet leda till ett slutkoncept där en aktiv finger-gap reducer placeras på en personbil.

1.2 Mål

Huvudmålet med detta arbete är att ta fram en prototyp av en finger-gap reducer som går att använda under vindtunneltester. Ett delmål är att prototypen ska kunna böjas ut upp till 45 grader från ursprungsläget, samtidigt som prototypen motstår vind i 140 km/h. Ett andra delmål är att möjliggöra modifiering av ytans

vinklar från kontrollrummet, detta för att effektivisera vindtunneltestning. Målet med vindtunneltestet är att hitta den optimala geometrin på finger-gap reducern.

1.3 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att endast beröra form och funktion för finger-gap reducers, med särskilt hänsynstagande till synpunkter från Volvo Cars aerodynamiker. Aspekter som mekanisk integrering med andra fordonsdelar förläggs utanför arbetet. Exempelvis, om befintliga bildelar behöver avlägsnas för att inrymma prototypen kommer detta att tillåtas. Finger-gap reducern utformas enligt Volvos 40-serie och endast denna series proportioner är tagna i beaktning. Slutgiltig montering och vindtunneltest sker på en C40.

Prototypen möjliggör endast mätning av det optimerade luftflödet kring hjulhuset utan intentionen att representera det färdiga slutkonceptet. Detta då mätning av luftmotstånd i vindtunnel ställer särskilda mekaniska krav och denna typ av integrering i en fulländad prototyp är mycket tidskrävande. Prototypen tar därför inte hänsyn till svängradie hos bilen, maxkrompression av fjädring eller möjlighet till däckbyte.

Vidare hanteras den programmering som krävs för att utföra vindtunneltest internt av Volvo Cars, och prototypen avgränsas därmed till att fungera i samspel med deras system för programmering. Volvo Cars sköter även tillverkning och slutlig montering av komponenten, samt har ett övergripande mekatroniskt ansvar då detta står utanför gruppens expertis. För att utvärdera de aerodynamiska aspekterna för finger-gap reducers ligger fokus på tester i vindtunnel i stället för numeriska beräkningar, detta för att öka noggrannheten och möjligheten att testa många olika positioner snabbt. Vindtunneltesterna begränsas till att endast undersöka hastigheter upp till 140 km/h då hållfastheten för prototypen ej dimensionerats för tester i högre hastigheter samt motsvarar de hastigheter som personbilar vanligtvis utsätts för under verkliga körförhållanden.

1.4 Samhälleliga och etiska aspekter

Arbetsgången innefattar testning i vindtunnel vid ett tillfälle, vilket är en aktivitet med betydande energiförbrukning. Vindtunnlar har överlag en mycket hög energiförbrukning under användning. Volvo Cars vindtunnel, den aktuella vindtunneln för arbetets testning, har en fläkt som förbrukar cirka 5 MW om den körs på maximal hastighet (Leman, 2024). Eftersom denna vindtunnel används frekvent under Volvos arbete i stort leder detta till en betydande energikonsumtion och därmed stora koldioxidutsläpp.

Den metod som utvecklats under arbetets gång syftar till att effektivisera testningsprocessen genom att möjliggöra kontinuerliga tester av flera geometrier under ett konstant luftflöde, där manuella justeringar på testobjektet inte är nödvändiga vil-

ket eliminerar behovet av att starta och stoppa vindtunneln mellan varje test. Detta innebär både en markant ökning i produktivitet samt en betydande minskning av energiförbrukning, vilket bidrar till både ekonomiska och miljömässiga besparingar.

Utöver energieffektivisering är arbetets långsiktiga påverkan på fordonsutveckling en central etisk aspekt. Genom att underlätta framtagningen av mer aerodynamiska fordon kan arbetet bidra till fordon med lägre luftmotstånd och därmed lägre bränsle- eller elförbrukning (Volvo Car Sverige AB, 2008). Detta leder till att samhällets transportsektor blir mer hållbar med minskade utsläpp.

Vid tillverkning av prototyper kan materialförbrukningen och energianvändningen bli hög. Detta beror på att flera prototyper kommer att tillverkas och att prototyperna ofta kasseras efter arbetets avslut. Vid utveckling av en mer komplicerad komponent kan det vid implementering leda till en ökad svårighet och kostnad vad gäller reparationer.

2

Teori & teknisk bakgrund

Detta avsnitt avser att ge en relevant teoretisk och teknisk bakgrund för att ge läsaren en ökad förståelse för det fortsatta arbetet. Först behandlas grundläggande principer för bilens aerodynamik, med fokus på hjulhus. Därefter beskrivs metoder för vindtunneltester och hur dessa kan optimeras med avseende på tidsåtgång. Slutligen behandlas aktiva fordonskomponenter med fokus på ett patent som Volvo Cars äger.

2.1 Bilens aerodynamik

Läran om aerodynamik hör till fluidmekaniken, som ämnar att studera fluider i rörelse där aerodynamiken riktar in sig på luftflödet runt olika kroppar. Aerodynamisk motståndskraft kan delas in i friktionsmotstånd som verkar tangentiellt mot ytan och tryckmotstånd som verkar normalt. För en trubbig kropp likt en personbil står luftmotståndet för den största kraftpåverkan vid högre hastigheter och mer än 90 procent av det totala aerodynamiska luftmotståndet kommer från tryckförluster (Berg & Brandt, 2018).

Luftmotståndskoefficienten, C_D är en dimensionslös koefficient som anger hur strömlinjeformat ett objekt är. Genom att mäta motståndskraften, F_D som luftmotståndet ger upphov till kan koefficienten beräknas enligt ekvation (2.1).

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A v^2} \quad (2.1)$$

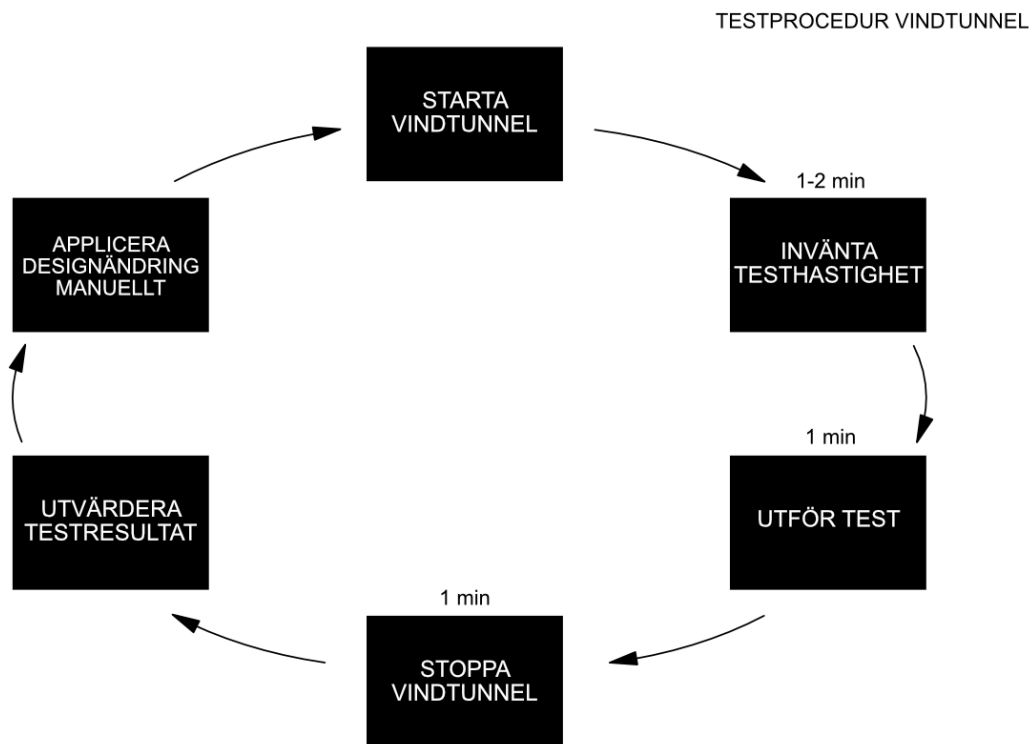
Luftens densitet betecknas av ρ , A är fordonets frontalarea och v är objektets hastighet genom luften. C_D -koefficienten används som mätvärde för vindtunneltester men även för tester med Computational Fluid Dynamics (CFD) som möjliggör digitala analyser av luftflöden, vilket minskar behovet av fysiska tester. Dock har CFD begränsningar när det gäller beräkningstid och noggrannhet. I olika skeden av aerodynamisk utveckling är det svårt för nuvarande CFD-analyser att exakt stämma överens med resultaten från vindtunneltester, särskilt på detaljnivå (Huang *et al.*, 2021). Vidare kan CFD beräkningar vara mycket tidskrävande beroende på testobjektets storlek.

Som tidigare nämnt är hjulhuset ett område med stor påverkan på luftflödet runt bilen i högre hastigheter. Då ett bildäck inte är strömlinjeformat kommer det att uppstå virvlar i luftflödet. Berg och Brandt (2018) konstaterar i sin mastersuppsats *Investigation of Aerodynamic Wheel House* att mycket små designändringar runt hjul och hjulhus ger en aerodynamisk påverkan när de undersökte utformningen av fälgar. Samtidigt konstaterades att den mest avgörande faktorn vad avser luftmotstånd är täckyta för hjul och hjulhus, där sambandet konstaterades vara linjärt. Även Josefsson (2024) skriver i sin doktorsavhandling *Passenger vehicle tyre aerodynamics* att området är komplext, där även små geometriska detaljer eller ändringar kan resultera i oförutsägbara strömningar i luftflödet.

2.2 Optimering av vindtunneltester

Traditionellt har vindtunneln varit det främsta verktyget för att analysera och optimera fordons aerodynamik. Fördelen med att använda sig av fullskaliga vindtunneltester är att ett realistiskt aerodynamiskt flödesmönster kan uppnås tillsammans med simulering av markförhållanden där fordonets hjul tillåts snurra, allt detta i en kontrollerad testmiljö (Urquhart & Sebben, 2022). Samtidigt har vindtunneltestning sina egna utmaningar. För många vindtunneltester är det av stort intresse att finna en optimal geometri, vilket ofta innebär flertalet justeringar och ändringar av testobjekt. En traditionell arbetsmetod i vindtunneln kräver manuella ingrepp på testfordonet för att åstadkomma detta, vilket även innebär att den fläkt som genererar vind måste stoppas och sedan startas. Det tar dessutom tid innan korrekt testhastighet kan uppnås igen efter stopp (Oselin, 2023). Det nuvarande arbetsflödet i vindtunnlar illustreras i Figur 2.1.

För att öka effektiviteten i vindtunneltestning har olika mekatroniska lösningar utvecklats. Lösningarna gör det möjligt att automatisera delar av arbetsflödet med hjälp av optimeringsmetoder. I sin masteruppsats utvecklade Oselin (2023) en metod för att externt styra rörliga delar inuti vindtunneln under pågående tester. Urquhart och Sebben (2022) genomförde ett liknande arbete, där de använde en optimeringsalgoritm för att identifiera optimala aerodynamiska geometrier för olika förhållanden. Den huvudsakliga skillnaden mellan dessa metoder låg i deras respektive fokusområden. Urquhart och Sebbens arbete fokuserade på algoritmstyrd optimering, medan Oselins metod syftade till att integrera denna typ av optimering för att skapa ett effektivare och mer automatiserat arbetsflöde. Oselins (2023) arbete resulterade i en tidsbesparing på 73,4 % jämfört med konventionella vindtunneltester.

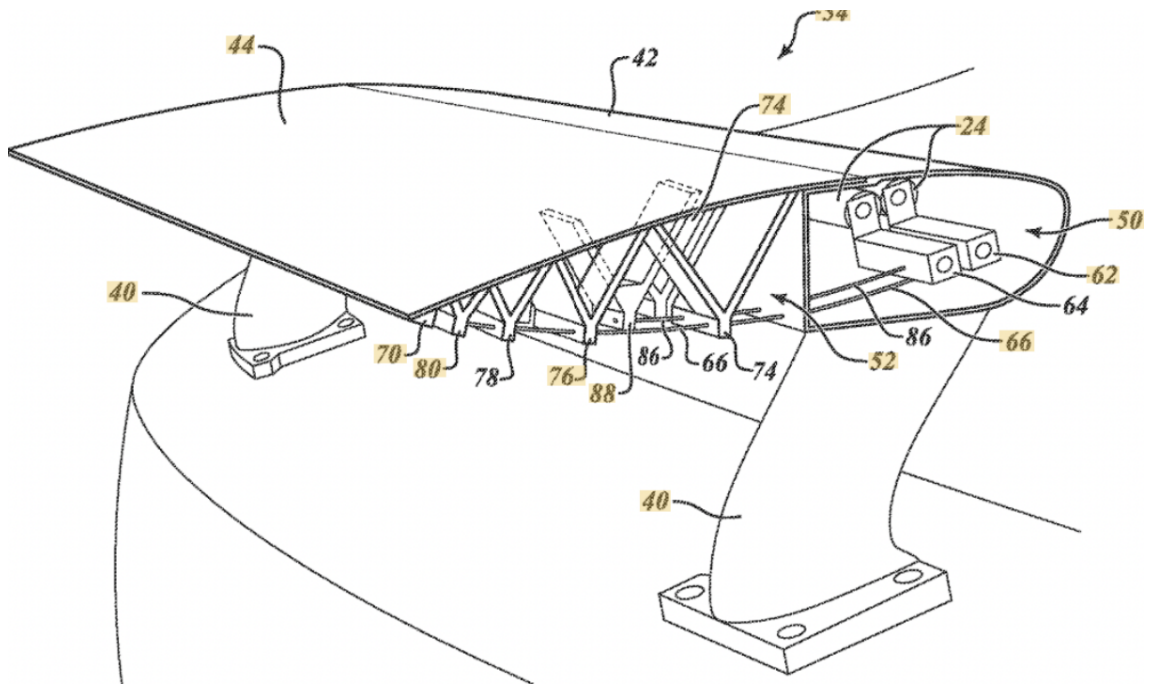


Figur 2.1: Illustration av arbetsflöde i vindtunnel, inspirerad av Oselin (2023).

2.3 Aktiva fordonskomponenter

Volvo Cars sökte 2022 patent på en teknik som gör det möjligt att med hjälp av ett ställdon modifiera ytan på en fordonsspoiler (Petrusson, 2023). Den patenterade tekniken inkluderar flertalet flexibla vingsektioner, drivkablar samt stegmotorer, något som visualiseras i Figur 2.2. En vingsektion utgörs av en flexibel yta och ramverk. Genom att koppla respektive ramverk till en drivkabel kan kraften från respektive stegmotor överföras via drivkablarna i längsgående riktning. Den applicerade kraften möjliggör sedan krökning av den flexibla ytan av vingsektionen. Genom att variera de styrsignaler som sänds till en eller flera stegmotorer i vinganordningen möjliggörs en mängd olika konfigurationer för fordonsspoilern och i sin tur olika typer av rörelsestyrning.

Enligt Petrusson (personlig kommunikation 30 januari 2025) behöver tekniken inte begränsas till spoilers utan kan även användas för att modifiera andra ytor. Detta skapar möjligheten att integrera Petrussons patenterade ytmodifieringsteknik med optimeringsmetoder av vindtunneltester för att effektivt testa olika ytor och dess inverkan på fordons aerodynamik.



Figur 2.2: Patent på ytmodifieringstekniken för en fordonsspoiler (Petrusson, 2023).

3

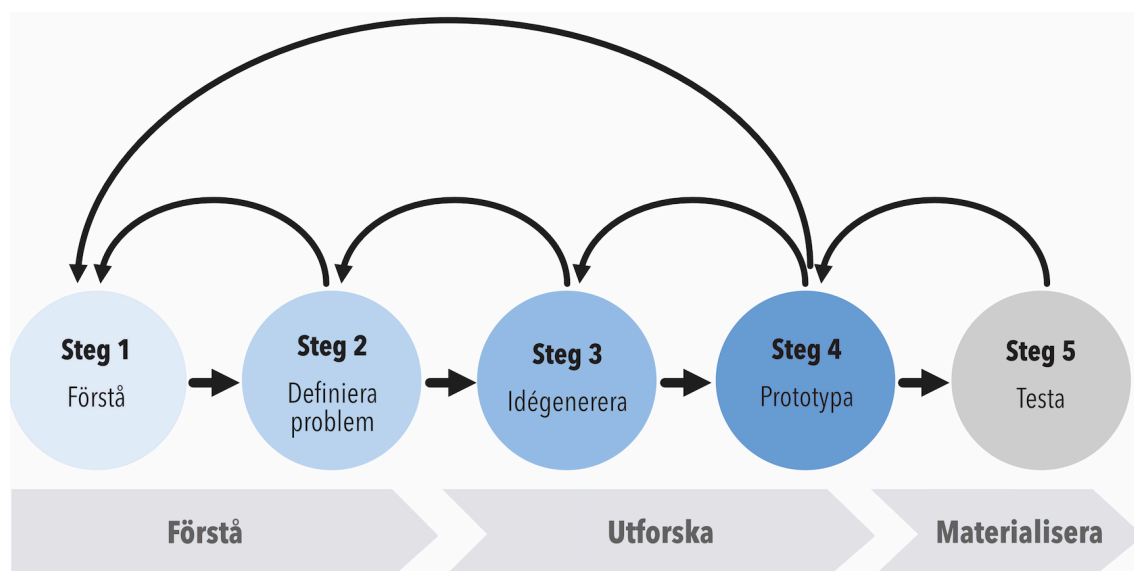
Metod

Detta kapitel beskriver arbetsgången och de metoder som använts. Arbetet utgår ifrån ett arbetssättet *Design thinking* vilket är en iterativ utvecklingsprocess. I kapitlet beskrivs de metoder och programvaror som använts under arbetets gång. Kapitlets sista och huvudsakliga del beskriver processen steg för steg. Syftet med kapitlet är att redogöra för hur arbetet genomförts och varför de valda metoderna bidragit till att uppnå arbetets mål.

3.1 Använda metoder

Detta avsnitt syftar till att teoretiskt beskriva de metoder som använts under arbetets gång.

3.1.1 Design thinking



Figur 3.1: Illustration av processtegen inom Design thinking.

Kandidatarbetet utgick från de fem processtegen i Design thinking: förstå, definiera problem, idegenerera, prototypa och testa. I Figur 3.1 visualiseras hur denna process ser ut. Eftersom processen är iterativ har arbetet kontinuerligt rört sig fram och

tillbaka mellan stegen för att slutligen nå ett välgrundat resultat. Hur detta arbete sett ut mer konkret beskrivs ytterligare i avsnitt 3.3 Process.

3.1.2 Litteraturstudier

Litteraturstudier är en del av processen som genomförs för att nå fördjupad kunskap. För att hitta information som är *peer-reviewed* är sökningar genom databaser tillhandahållna av till exempel bibliotek en bra väg att gå. Ett kritiskt synsätt är viktigt under litteraturstudier, det är också av värde att undersöka källor med olika inställningar till det valda området för att få en intäckande grund för det vidare arbetet (Nilsson *et al.*, 2021).

3.1.3 Idégenereringsmetoder

För att generera idéer av olika slag användes metoderna *brainwriting* och *braindrawing* som båda tar avstamp i *brainstorming*, vilket är en metod som syftar till att ta fram många idéer på kort tid (Nilsson *et al.*, 2021).

Brainwriting som metod används på så sätt att varje person som deltar under en utsatt tid skriver ner idéer som sedan skickas vidare så att en annan person får bygga vidare på dessa idéer, även då under en begränsad tid. Detta för att hela gruppen ska bidra och hjälpas åt att maximera varandras ursprungsidéer så att de slutligen blir gemensamma (Nilsson *et al.*, 2021).

Braindrawing kan liknas vid brainwriting men genomförs med hjälp av skisser istället för enbart genom text. Detta är en viktig del inom idégenerering för att upptäcka nya perspektiv när flera personer jobbar på samma skisser och utvecklar idéer tillsammans. Likt brainwriting så har man en utsatt tid där man skissar egna idéer och efter denna tid byter man skissblock inom gruppen och jobbar vidare på andras idéer likaså under utsatt tid (Nilsson *et al.*, 2021).

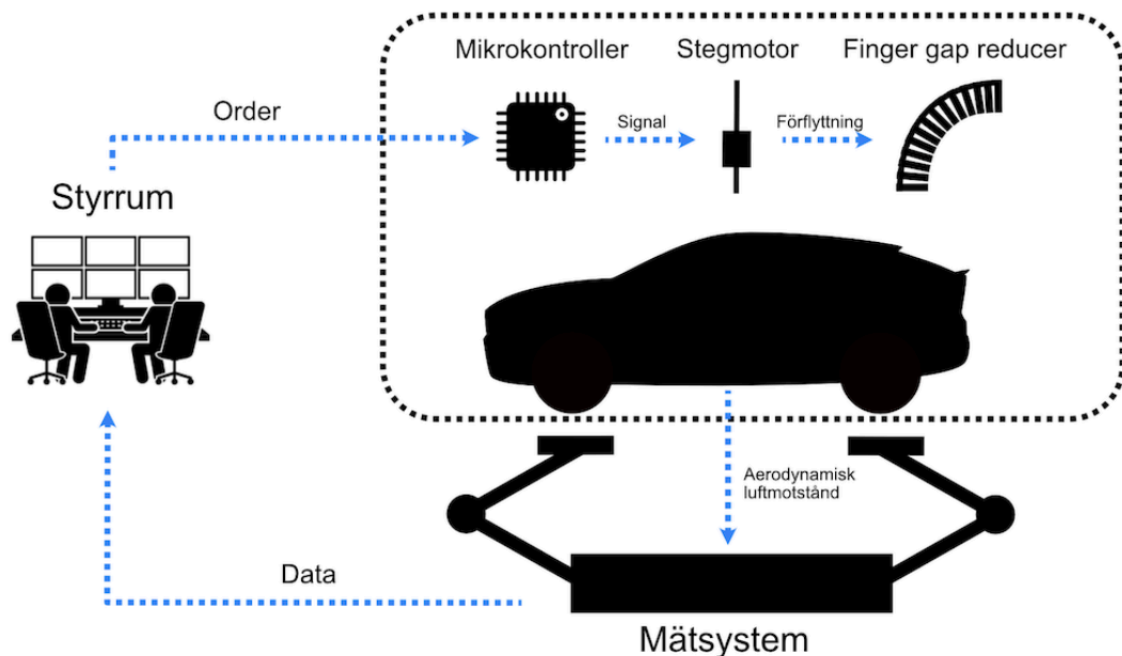
3.1.4 Vindtunneltestning

Den aktuella metoden för vindtunneltestning ingår i ett större system där all styrning sker från ett styrrum utanför tunneln och har framarbetats av Volvo Cars. Testprocessen, som illustreras i Figur 3.2, fungerar enligt följande:

- Datorn i kontrollrummet skickar en order om hur finger-gap reducerns geometri ska justeras.
- Mikrokontrollern tar emot ordern och aktiverar stegmotorer som ändrar finger-gap reducerns geometri.

- Testbilen står på styltor i vindtunneln, kopplade till ett mätsystem som registrerar de aerodynamiska krafterna.
- Utifrån dessa mätvärden beräknas bilens luftmotstånd och resultaten skickas tillbaka till datorn i styrrummet.

Varje mätcykel tar ungefär en minut (M. Urquhart, personlig kommunikation, 6 maj 2025), framför allt för att luftflödet ska stabilisera sig före mätningen. Styrningen kan ske både manuellt från styrrummet och helt automatiskt med en optimeringsalgoritm. Slutligen kan C_D -koefficienten för den optimerade geometrin jämföras med den befintliga C_D -koefficienten för C40-modellen för att empiriskt säkerställa den aerodynamiska vinsten.



Figur 3.2: Visualisering av testproceduren vid vindtunneltest.

3.1.5 3D-skanning

Efter vindtunneltesterna erhålls endast information om vilken kombination av stegmotorpositioner som ger den optimala geometrin för minimalt luftmotstånd. För att detta resultat ska kunna implementeras i den vidare designprocessen behöver det översättas till en konkret 3D-geometri. Det görs enklast genom att 3D-skanna objektet när stegmotorerna är inställda i det optimala läget. Vid en 3D-skanning återskapas objektets form digitalt genom att samla in data om dess yta, exempelvis med hjälp av fotogrammetri, laser eller strukturerat ljus. Objektet registreras från flera vinklar och insamlade data bearbetas därefter i mjukvara som genererar en komplett 3D-modell, vilken sedan kan exporteras för vidare användning i till exempel CAD-program eller 3D-utskrift.

3.2 Programvaror

Under arbetets gång har flertalet programvaror och digitala verktyg använts, i detta kapitel följer beskrivningar av respektive programvara. Programvarorna har valts utefter funktion och i samråd med Volvo Cars.

3.2.1 CATIA

CATIA (Computer Aided Threedimensional Interactive Application) är ett program från Dassault Systemes som används för CAD (Computer Aided Design). Det är en programvara som är industristandard för många branscher, inklusive fordonsindustrin (Dassault Systems, 2025). Många företag använder CATIA för produktdesign och modellering, däribland Volvo Cars. Större delen av arbetets CAD-modellering har utförts i CATIA, eftersom det underlättar samarbetet med Volvo Cars då Concept Center använder programvaran.

3.2.2 Autodesk Fusion 360

Fusion 360 är en plattform från Autodesk som kombinerar parametrisk 3D-modellering, friformsytter, simulering, generativ design och CAM i en och samma miljö (Autodesk, 2025). I det här arbetet användes Fusion 360 för konceptutveckling och prototypframtagning av mindre komponenter och konstruktioner, som stegmotor-konstruktionen.

3.2.3 Blender

Blender är en programvara som primärt används för 3D-modellering, skulptering och animering. Programvaran används vanligtvis av konstnärer och animatörer eftersom programvaran är mångsidig (Blender Foundation, u.å.). Till skillnad från CATIA och andra CAD-programvaror är Blender inte lämpat för konstruktion eftersom det inte erbjuder möjligheten att skapa lika precisa geometrier. Användningsområdet för detta arbete har framförallt varit animationer, renderingar av dessa animationer och framtagning av bilder.

3.2.4 DaVinci Resolve

DaVinci Resolve är ett professionellt videoredigeringsprogram utvecklat av Blackmagic Design. Det kombinerar videoredigering, färgkorrigering, visuella effekter, rörlig grafik och ljudredigering i en och samma plattform. Programmet används ofta inom film- och tv-industrin då det erbjuder verktyg för att skapa och klippa rörligt material (Blackmagic Design Pty. Ltd., u.å.). I detta arbete används programvaran för att skapa en reklamvideo där slutkonceptet visualiseras i rörelse.

3.3 Process

Primärt skedde arbetet på uppdrag av Volvo Cars och för att säkerställa en omfattande behovsanalys och att önskade områden täcktes in, genomfördes regelbundna fysiska och digitala möten. Detta kompletterades med kontinuerlig kommunikation med handledare på Volvo Cars.

I ett tidigt stadie av arbetet genomfördes platsbesök hos Volvo Cars för att ge fördjupad förståelse för verksamheten och deras befintliga processer för biltestning samt för att få en inblick i vilka resurser som fanns att tillgå. Parallellt genomfördes en omfattande litteraturstudie som inleddes med ett brett perspektiv, där information samlades in från vetenskapliga artiklar, YouTube-videor och patent.

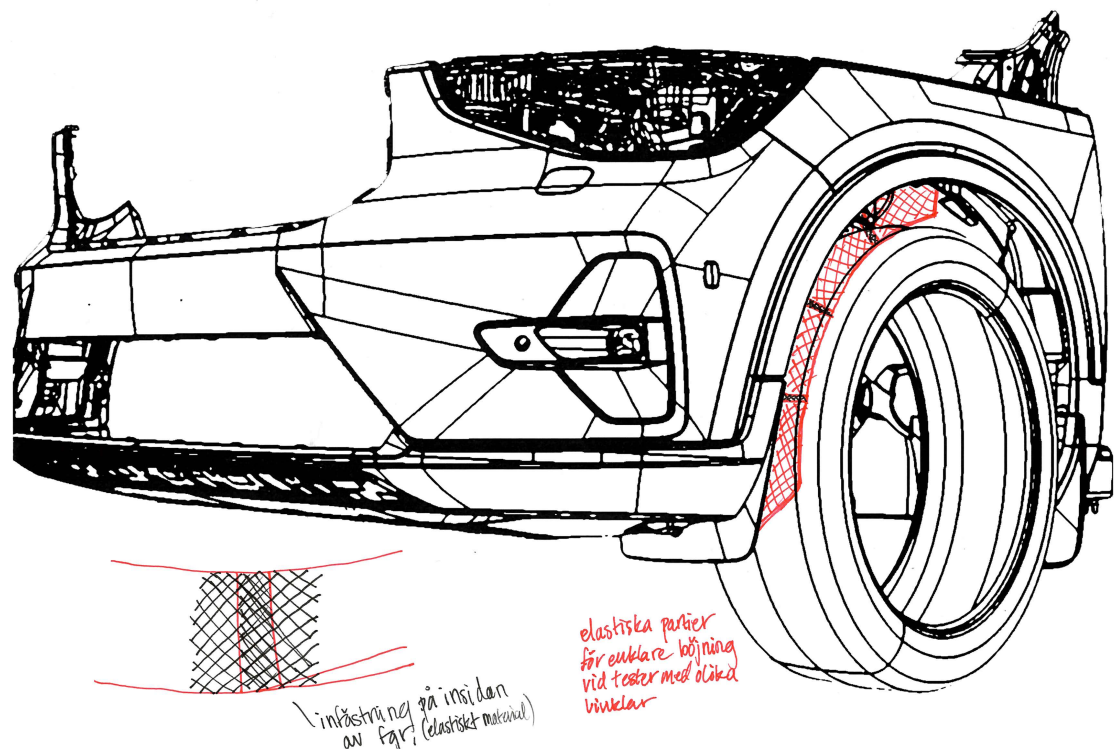
Under arbetets andra fas låg fokus på att definiera problem. Med utgångspunkt i insamlad data och de tidigt gjorda litteraturstudierna presenterades olika fall för handledare på Volvo Cars. Därefter valdes tillsammans med dessa handledare finger-gap reducer som område att jobba vidare med, vilket blev utgångspunkten för fördjupade litteraturstudier. Litteraturstudierna genomfördes för att skapa en teoretisk förståelse för arbetsområdet samt för att få bättre koll på vad det finns för lösningar idag, både hos Volvo Cars internt och hos konkurrenter. I första hand prioriterades vetenskapliga artiklar och granskade källor som hittades genom sökning i Chalmers databaser. I de fall icke-vetenskapliga källor användes har en noggrann bedömning gjorts avseende relevans och tillförlitlighet.

Den tredje fasen innefattade idégenerering. Det var viktigt att generera många koncept och att arbeta tillsammans för att utveckla nya lösningar. En kontinuerlig dialog med Volvo Cars var avgörande för att säkerställa relevanta och värdeskapande idéer. Det skissades idéer på dels hur finger-gap reducern skulle se ut men framförallt på olika lösningar gällande hur ytan kunde modifieras. Nedan i Figur 3.3 visas en av de tidiga skisserna.

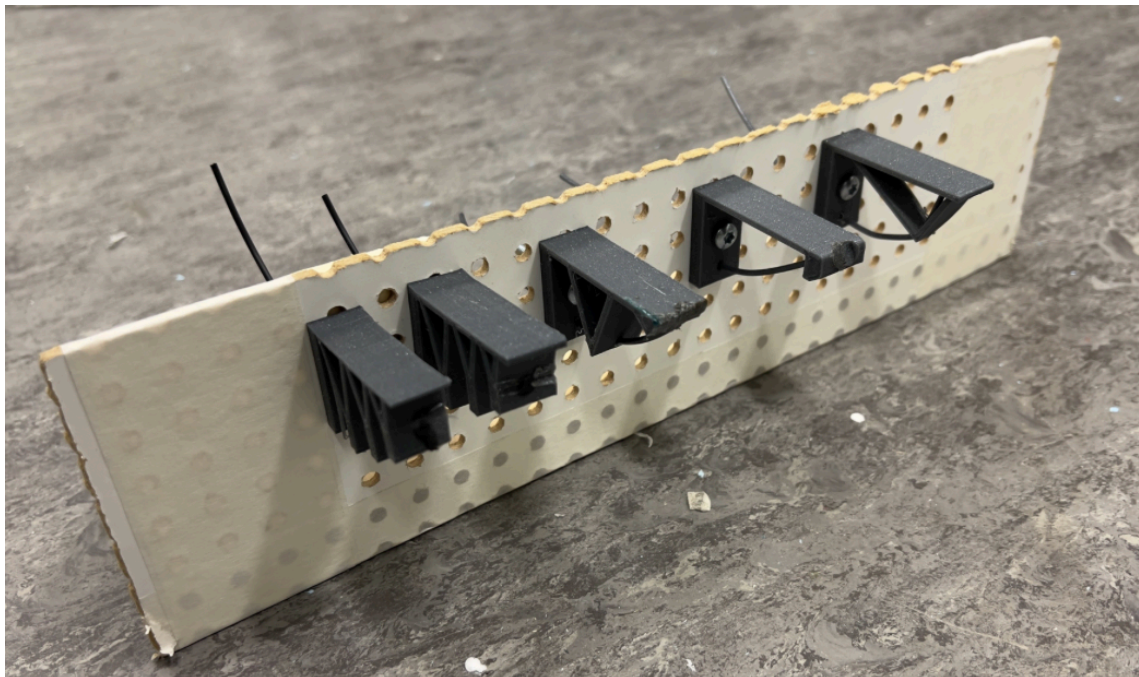
En idé som vidareutvecklades var att böja ytan med hjälp av fackverk och styrande stänger som trycker på dessa, inspirerat av Volvo Cars patent (Petrusson, 2023). Tanken var att finger-gap reducern skulle bestå av fyra fackverk, där varje fackverk innehåller en stång som trycker i ytterändan för att åstadkomma böjning med hjälp av en stegmotor.

I nästa fas, prototypfasen visualiserades koncepten genom fysiska och digitala modeller med varierande detaljgrad. Arbetet sträckte sig från enkla skissmodeller till 3D-modellering i CAD-programmet CATIA. I den första prototypen utvärderades olika typer av fackverk för att se vilken böjning som kunde uppnås och samtidigt hur stora krafter fackverken kunde hantera, se Figur 3.4.

Mer avancerade prototyper skapades tillsammans med Volvo Cars Concept Center genom selektiv lasersintring, en 3D-printningsmetod där ett lager pulver fördelas över en plattform. En laser skannar därefter pulvret som smälter ihop till en solid



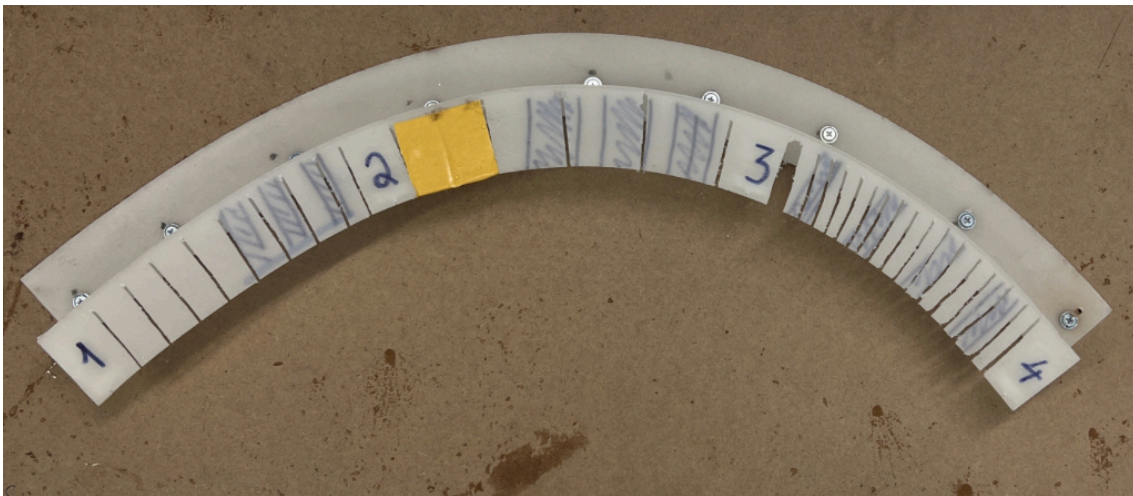
Figur 3.3: Tidig skiss på konceptet.



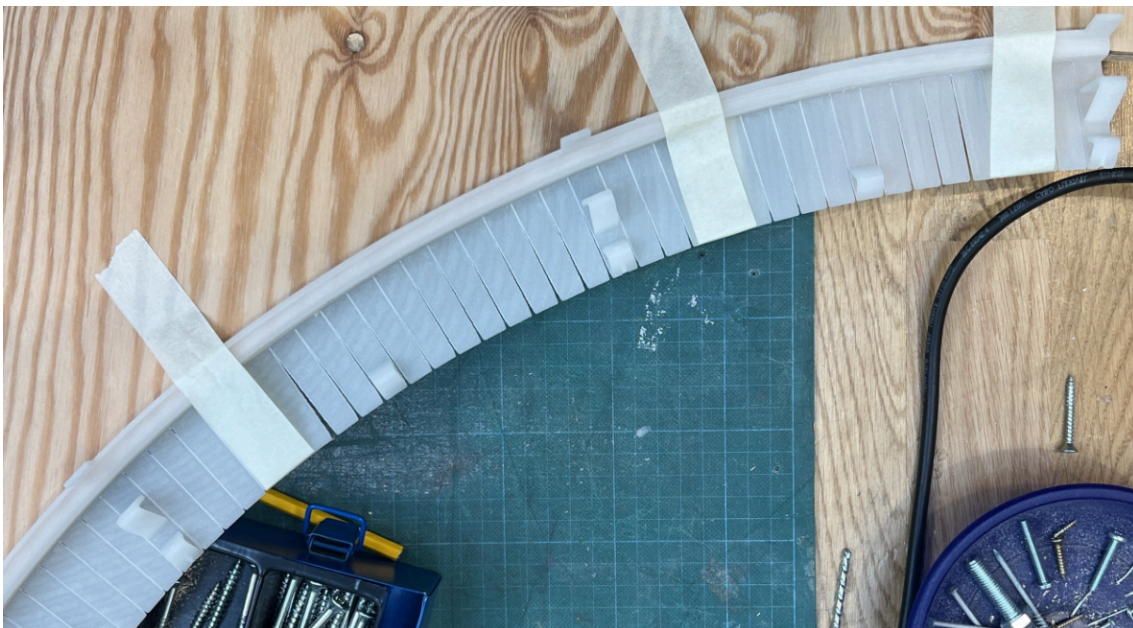
Figur 3.4: Första prototypen där olika fackverk testades.

form. Denna process upprepas lager för lager tills formen är färdig (RISE, u.å.). Polypropylen-pulver användes i arbetet eftersom det är ett mjukare material som har flexibla egenskaper.

Nästa prototyp printades i fullskalig storlek för att se hur formen påverkar materialets böjningsförmåga och fackverkens funktion. Från den fullskaliga prototypen kom insikten att en sammanhängande yta på finger-gap reducern gör prototypen för styv och därav behövdes ytan delas upp i mindre sektioner. Olika bredder på sektionerna sågades ut manuellt och utvärderades för att hitta den optimala avvägningen mellan flexibilitet och styvhet, se Figur 3.5.



Figur 3.5: Den fullskaliga prototypen modifierades till 3 sektioner med olika bredder på fransar.



Figur 3.6: Baksida av prototypen med indelade sektioner.

Storleken på fransarna valdes till 10 mm. En ny prototyp tillverkades för att utvärdera hur väl dessa fransar böjdes samt hur följsam ytan blev. Utöver detta kläddes prototypen in i ett tyg eftersom slutkonceptet inte ska släppa in luft mellan fransarna när de trycks ut, se Figur 3.6 och Figur 3.7.



Figur 3.7: Inklädd framsida av prototypen.

Den slutliga prototypen kom att innehålla rörliga delar baserade på en förenklad version av Volvo Cars patent (Petrusson, 2023) med integrerade mekaniska och elektriska komponenter. Monteringsaspekter togs i beaktning under modelleringen då slutprototypen skulle fästas på en fullskalig bil. Slutprototypen kläddes i vävpolyuretan-127 för att få en jämn yta på finger-gap reducern. Under testfasen utvärderades prototyperna för att säkerställa att de fungerade i sin tänkta kontext.

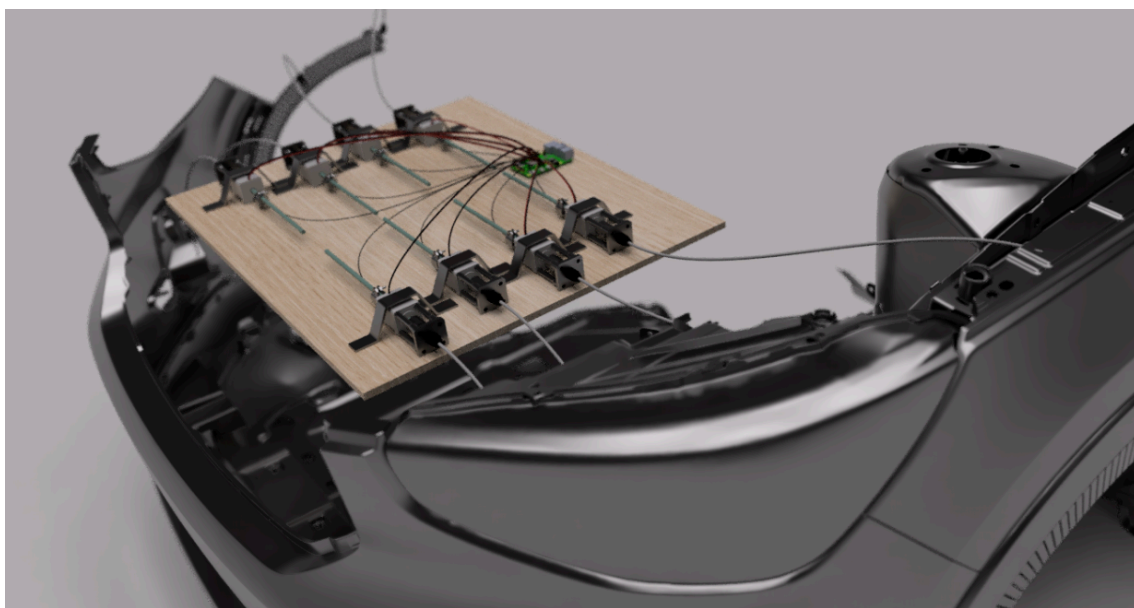
Slutligen visualiserades resultatet med hjälp av programvarorna Blender och DaVinci Resolve, där rörliga animationer samt bilder av den fysiska prototypen togs fram. Detta för att ge en tydlig representation av konceptets prestanda och design. Exempel på dessa följer i kommande resultatavsnitt.

4

Resultat

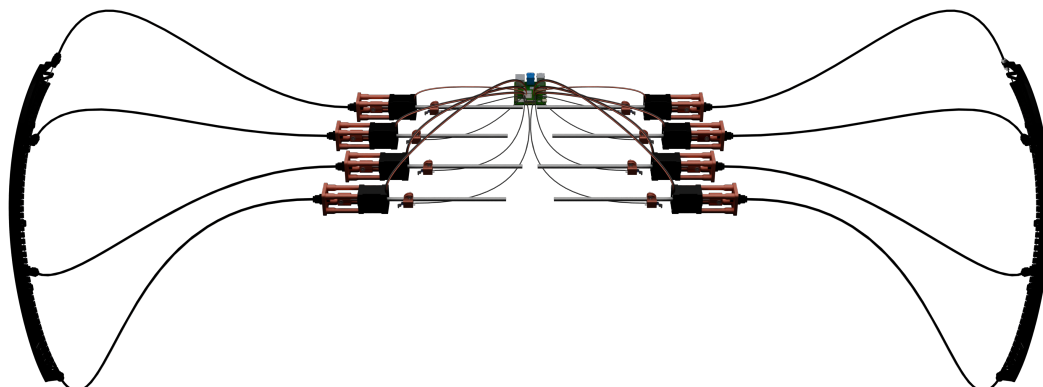
I detta kapitel presenteras resultaten från utvecklingen och finger-gap reducern. En stor del av arbetet har bestått av att konstruera och 3D-modellera ett fungerande slutkoncept i CATIA. Även visualiseringar av hur konceptet hade kunnat vidareutvecklas och sett ut på en produktionsbil presenteras.

4.1 Slutkoncept



Figur 4.1: Rendering av det slutgiltiga konceptet monterat på en MDF-skiva i frunken.

Det slutgiltiga konceptet som visas i Figur 4.1 består huvudsakligen av en styrcentral, stänger för kraftöverföring samt finger-gap reducern. Styrcentralen som är placerad i *frunken*, ett främre bagageutrymme, består av en mikrocontroller samt åtta stycken stegmotorer och deras drivenheter. Mikrocontrollerns huvudsakliga funktion är att erhålla lägesparametrar för finger-gap-reducern från ett externt styrsystem som kan justeras manuellt eller via en optimeringsalgoritm för att därefter reglera stegmotorernas positioner och på så sätt realisera önskade förändringar på finger-gap reducern. Styrcentralens uppbyggnad och anslutningar redovisas i Figur 4.2.

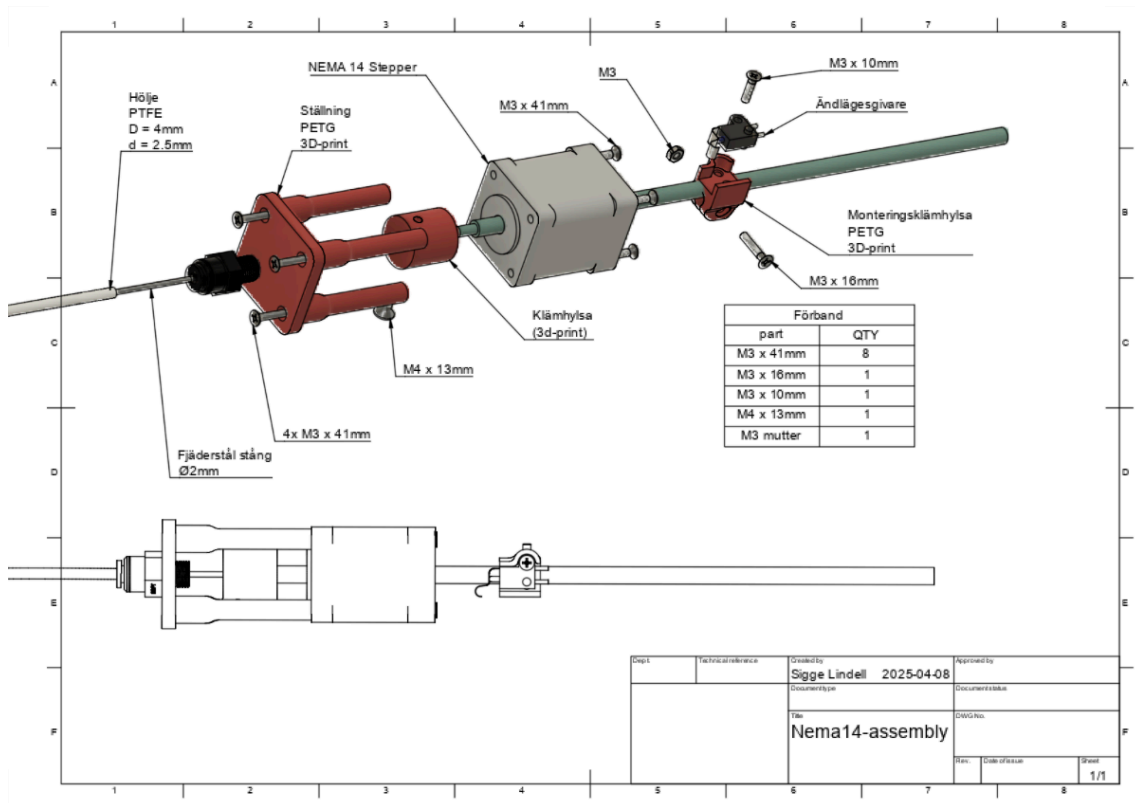


Figur 4.2: Styrcentralen fristående från bilen.

Stegmotorn är monterad i en flerkomponentskonstruktion som framgår av sprängskissen nedan i Figur 4.3. I konstruktionen ingår bland annat en ändlägesgivare som gör det möjligt för mikrokontrollern att kalibrera och fastställa stegmotorns utgångsläge. Stegmotorn skjuter stängen fram och tillbaka i en linjär rörelse. För att överföra den linjära rörelsen från motorn till fackverken på finger-gap reducern används en stång tillverkad av fjäderstål. Stängen är fäst i änden av stegmotorstängens och leds vidare genom ett flexibelt hölje av PTFE, polytetrafluoreten, fram till finger-gap reducern. Denna lösning, ofta benämnd som en *bowden-kabel*, möjliggör effektiv kraftöverföring även över långa och geometriskt komplexa sträckor, utan att stängen riskerar att böjas eller fastna.

Slutkonceptet är 3D-printat i polypropylenpulver. Konstruktionen består av 10 mm breda fransar som sträcker sig över hela ytan vilket ska minska gapet i hjulhuset. På baksidan av varje frans finns en ögla, genom vilken en fjäderstålsstång träs för att säkerställa bättre formföljning. När en frans trycks uppåt bidrar stängen till att de andra fransarna följer med. Ytan är klädd i vävpolyuretan-127, vilket både hjälper till att skapa en jämn yta och förhindrar att luft passerar mellan fransarna. Fyra av fransarna har ett fackverk på baksidan som är kopplade till stegmotorer via stänger. När stegmotorerna aktiveras trycker stängerna i ytterändan för att skapa en kontrollerad vinkling av ytan. Stängerna är fästa med vajerstopp i separata öglor. Finger-gap reducern är fäst i bilens hjulhus med hjälp av fem infästningsytor som innehåller frigångshål. I dessa hål finns skruvar som fästs med hjälp av en mutter på baksidan. På insidan av konstruktionen finns klackar som fäster andra änden av PTFE-höljet med hjälp av gängad nippelkoppling med mutter, Figur 4.4 visar detta.

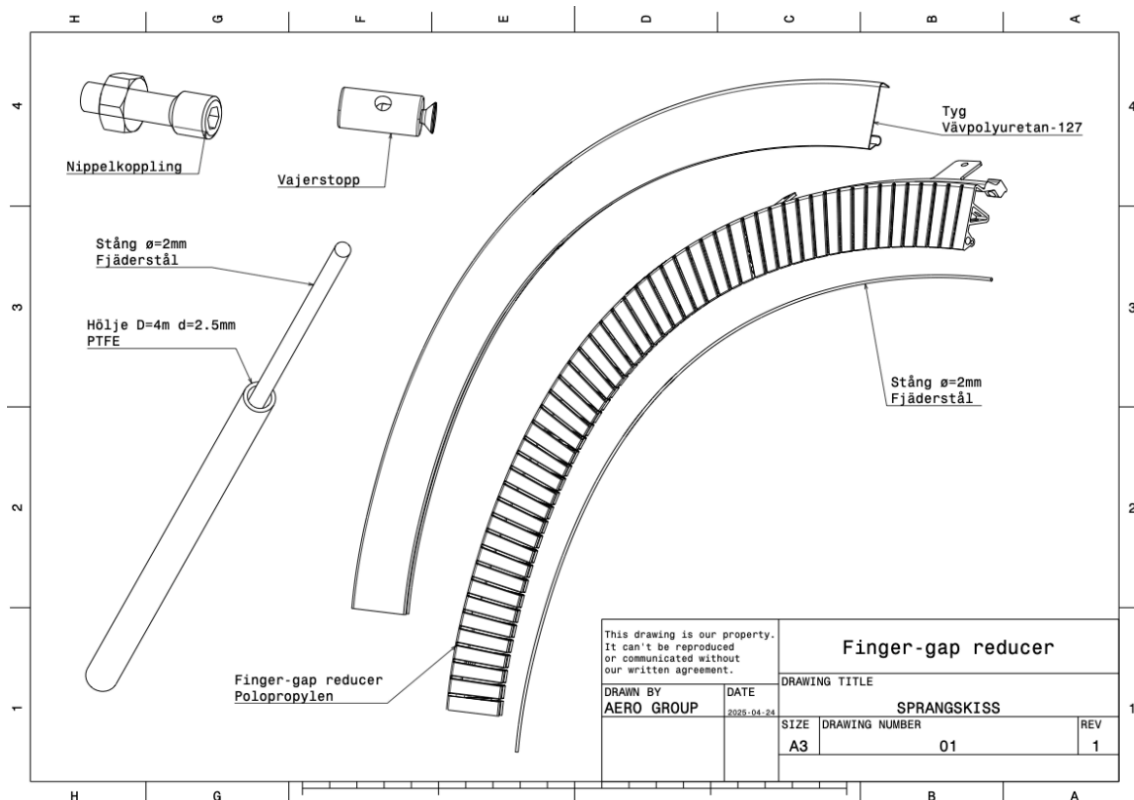
Figur 4.5 visar en sprängskiss på finger-gap reducerns komponenter som beskrivits ovanför.



Figur 4.3: Sprängkiss på stegmotorns komponenter.



Figur 4.4: Nippelkoppling som fäster PTFE-höljet i finger-gap reducer.



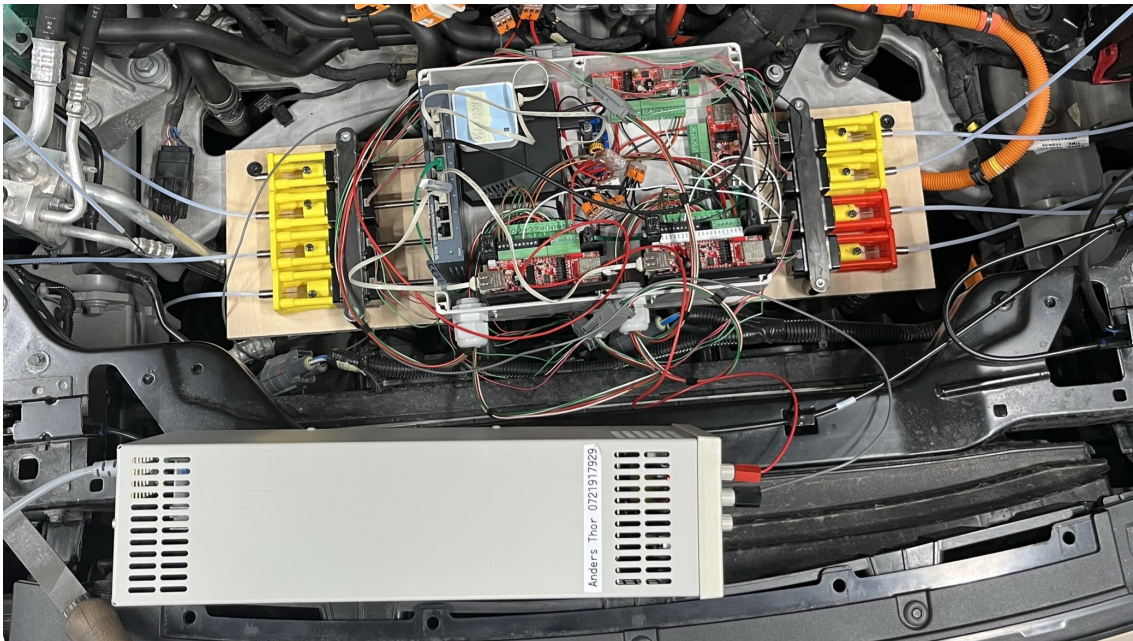
Figur 4.5: Sprängskiss över finger-gap reducerns komponenter. Observera att komponenterna inte har samma skala.

4.2 Fysisk prototyp och funktionstest

En fysisk prototyp av det slutliga konceptet från kapitel 4.1 tillverkades och testades vid Volvo Cars Concept Center. Tillsammans med en mekaniker monterades den 3D-printade prototypen i hjulhuset på en Volvo C40. När styrprogrammet för stegmotorerna hade färdigställts testades hur väl styrningen för varje motor fungerade. I Figur 4.6 ses elektroniken och styrcentralen för prototypen.

Därefter bestämdes ändlägena för motorns rörelse för att förhindra att stängerna kolliderade med närliggande komponenter när de rör sig fram och tillbaka. Prototypens infällda läge kan ses i Figur 4.7. Även bowden-kabelns funktion testades, med syftet att undersöka kraft och friktion mellan slang och stång. Stegmotorerna kördes till sina respektive ändlägen för att verifiera hållfastheten hos både kopplingar och 3D-printade komponenter.

Efter att ha säkerställt att konstruktionen var funktionsduglig mättes den maximala vinkeln som kunde uppnås i utfällt läge. Med hänsyn till komponenternas hållfasthet uppnåddes en vinkel på cirka 30 grader. I Figur 4.8 visas den fysiska prototypen i detta läge.



Figur 4.6: Montrade stegmotorer, styrsystem och elförsörjning.



Figur 4.7: Montrad finger-gap reducer i rakt läge.



Figur 4.8: Monterad finger-gap reducer i böjt läge.

4.3 Vindtunneltest och 3D-skanning

Till följd av högt testtryck i Volvo Cars vindtunnel är vindtunneltestet planerat att utföras i slutet av maj och resultatet kommer därför inte kunna inkluderas i denna rapport. Därmed har även den 3D-skanning som skulle genomförts i anslutning till vindtunneltestet uteblivit.

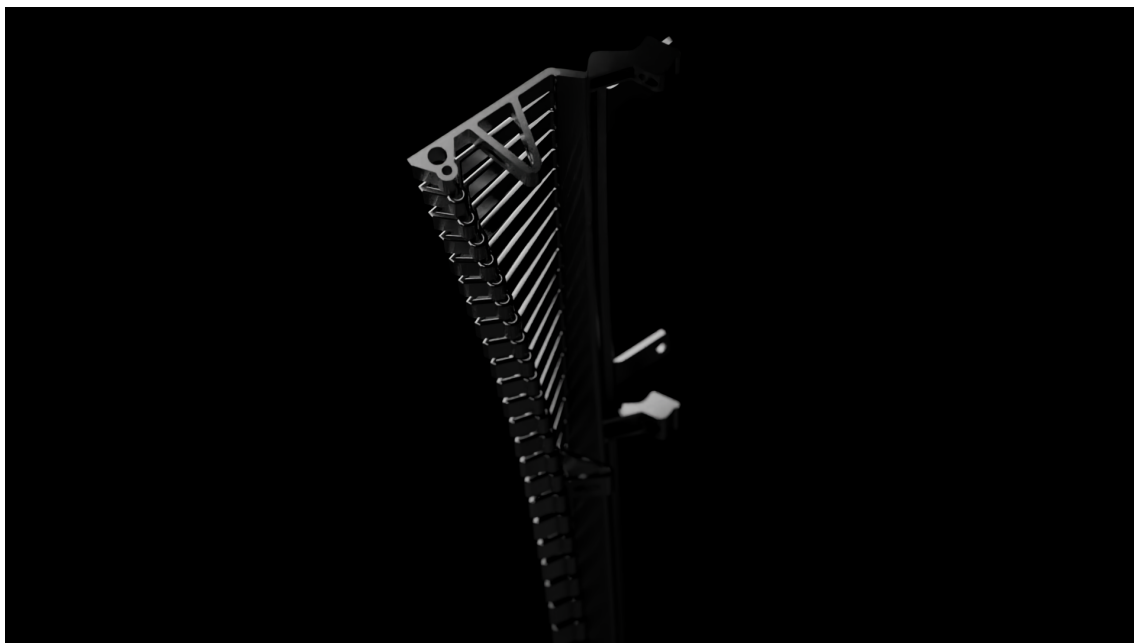
4.4 Visualisering

Utöver dokumentation och bilder på den fysiska prototypen kommuniceras slutkonceptet genom 3D-visualiseringar. Den visualiserade finger-gap reducern har monterats på Volvo Cars XC40, denna gång i programvaran Blender. Bilen har därefter animerats i varierande miljöer för att skapa en reklamfilm som förmedlar konceptets syfte och funktion i en trovärdig och inspirerande kontext.

De animerade sekvenserna har först utformats och renderats i Blender, med fokus på realistisk ljussättning och dynamiska kamerarörelser för att lyfta fram både bilen och den monterade finger-gap reducern. Det renderade materialet har därefter förts in i DaVinci Resolve, där det klippts samman och efterbearbetats. Här har färgkorrigering, klippning, ljudläggning och textanimationer utförts, allt i linje med Volvo Cars visuella identitet. Detta för att skapa en sammanhängande och visuellt stark reklamfilm. Denna fungerar som en central del i presentationen då det fysiska konceptet inte kan testas i faktisk trafikmiljö. Filmen ger en tydlig och tilltalande helhetsbild av arbetet och gör det möjligt att kommunicera idé och funktion även till personer utan teknisk bakgrund eller förkunskap om arbetet.



Figur 4.9: Rendering av monterad finger-gap reducer.



Figur 4.10: Utvinklad finger-gap reducer.

Genom denna reklamfilm nås en bredare målgrupp samtidigt som den säkerställer att slutkonceptet förmedlas på ett engagerande sätt. Stillbilder från videon används även i presentationsmaterial och rapport, där finger-gap reducern framhävs visuellt för att stärka konceptets identitet. Länk till reklamfilmen återfinns i appendix A. I Figur 4.9 och Figur 4.10 visas ett urval av renderade bilder på finger-gap reducern.

4.5 Implementering av designspråk

Finger-gap reducern som tagits fram under arbetet är menad att användas som en adaptiv testkomponent i vindtunneln. För att få en bild av hur en mer realistisk slutkomponent hade kunnat se ut togs ett mer förfinat koncept fram, som presenteras i Figur 4.11. Detta koncept är till skillnad från testkomponenten inte aktivt utan har en permanent geometri. Komponenterna är också mindre då en kompromiss troligen hade behövt göras mellan aerodynamisk prestanda och estetiska krav, då designspråk har ett betydande inflytande över utformningen av komponenter som ska integreras i produktionsbilar.

Det förfinade konceptet har designats för att följa Volvo Cars designspråk. Konceptet är endast ett förslag och en vision för hur en integrering av en finger-gap reducer på en personbil hade kunnat se ut.



Figur 4.11: Rendering av finger-gap reducer enligt Volvo Cars designspråk.

5

Analys & diskussion

Arbetet har resulterat i en prototyp av en finger-gap reducer, med syftet att användas under vindtunneltester. Prototypen tillåter aktiv styrning och kan vinklas genom fyra olika styrpunkter, något som möjliggör en gradvis torsion av den flexibla ytan. Detta för att genom små formförändringar finna den optimala geometri som leder till störst vinst med avseende på aerodynamisk prestanda. Vidare har prototypen visualiserats genom renderingar där den satts i sitt tänkta slutsammanhang, det vill säga på en personbil.

5.1 Tekniska och praktiska utmaningar

Den tillverkade prototypen använder huvudsakligen det styrkoncept som presenteras i Volvo Cars patent, med flexibla vingsektioner där varje sektion består av en fackverkskonstruktion. Styrningen sker genom kraftöverföring från motor till fackverk via en drivkabel. Den patenterade tekniken kräver två raka och styva stänger för att böja en yta, vilket gör att den ej går att applicera på dubbelkrökta former som hjulhuset. Därför togs ett nytt omarbetat koncept fram som använder fyra kontrollpunkter och kan uppnå en mängd geometrier. Volvo Cars teknik kan däremot kontrollera både vinkel och kurvatur, till skillnad från arbetets lösning som enbart styr böjvinkeln. Eftersom ytan är relativt liten bedömdes kurvaturens inverkan på aerodynamiken vara försumbar. Sammanfattningsvis kan den adaptiva komponent som tagits fram appliceras på krökta ytor och uppnå en större bredd av geometrier, med kompromissen att kurvaturen ej kan kontrolleras. Samtidigt tillåter prototypen kraftöverföring över en längre sträcka jämfört med Volvo Cars patent då bowdenkabler skapar flexibilitet vid montering.

Den mjukvara som möjliggör styrning och i förlängningen test i vindtunnel utgörs inte av den optimeringsmetod som Oselin (2023) utarbetat utan istället av en mjukvara som tagits fram internt på Volvo Cars. Detta medför att de olika testlägena manuellt behöver anges i mjukvaran till skillnad från Oselins metod där alla testlägen är beräknade av en algoritm. En konsekvens av den valda mjukvaran är att det kommer att ta längre tid att hitta den optimala geometrin vid vindtunneltester.

Rörlighetsgraden hos prototypen uppmättes initialt till cirka 10 grader. Den begränsade rörligheten kunde förklaras av att finger-gap reducerns form är krökt i två riktningar vilket resulterade i en förstyvning av det 3D-printade polypropylenmate-

riale, något som minskade prototypens flexibilitet. En ytterligare bidragande orsak var att samtliga stegmotorer initialt var monterade centralt i mitten av frunken. Denna placering påverkade rörlighetsgraden då bowden-kabelns längd var längre än nödvändigt och placeringen medförde flera snäva böjar med små radier i kabeldragningen. Detta orsakade en återfjädring i stängerna och ökade samtidigt friktionen i PTFE-höljet.

För att åtgärda dessa problem flyttades samtliga stegmotorer till anpassade positioner för att minimera sträckan och förbättra kabeldragningen. Dessutom användes smörjmedel i höljet hos bowden-kablarna för att ytterligare minska friktionen. Utöver detta ökades stegmotorernas slaglängd, det vill säga utrymmet som stängen i stegmotorn färdades. Detta resulterade i att en större kraft kunde överföras i böjningen av finger-gap reducern. För att verkställa dessa ändringar konstruerades och 3D-printades nya ställningar som möjliggjorde den ökade rörelsen.

Rörlighetsgraden för slutprototypen uppskattas till cirka 30 grader, vilket fortfarande är mindre än de 45 grader som initialt avsågs. En påverkande faktor har här varit det begränsade urvalet av stegmotorer som fanns att tillgå. Utöver detta går det att argumentera för att stegmotorns slaglängd hade kunnat ökas ytterligare, vilket bidragit till mer böjning då stängen trycks längre. Å andra sidan hade det ökade avståndet som fjäderstålet går fritt utan stöd iform av ett hölje ökat risken för knäckning. Att systematiskt utvärdera olika slaglängder hade tagit lång tid och har därför inte kunnat utföras inom tidsramen för arbetet.

5.2 Potentialen hos en adaptiv testprototyp

Resultatet och de slutsatser som kan dras av arbetet har begränsats av det förse- nade vindtunneltestet och arbetet har därav landat i ett mer konstruktionsmässigt resultat med fokus på mekatronisk lösning. Det går därför i nuläget inte att säga något om vilken aerodynamisk påverkan finger-gap reducern har eller vilken geome- tri och vinklar som är mest fördelaktiga. Detta innebär även att konstruktionen inte kunnat testas fullt ut, då den utsätts för högre belastning i hastigheter av 140 km/h. Ytterligare en konsekvens av det förse- nade vindtunneltestet är att det i dagsläget inte heller går att dra någon empirisk slutsats huruvida den aktiva prototypen, där designändringar kan appliceras direkt från kontrollrummet utan att avbryta testcy- keln, faktiskt effektiviserar testprocessen. En naturlig följd av detta blir därmed att inte alla delar av arbetets målsättning uppfyllts.

Förhoppningen är att ett vindtunneltest kommer visa att testprocessen optimerats både tids- och resursmässigt genom att använda just en adaptiv prototyp. Utan denna lösning skulle varje ny vinkel kräva en egen 3D-printad prototyp samt manu- ellt byte av prototyp under vindtunneltesterna, vilket både förlänger testfasen och ökar kostnaderna för material och produktionstid. Det mekatroniska slutkonceptet har därför inte bara potential att komma fram till den optimala geometrin, utan att även ge värdefull information om de aerodynamiska egenskaperna hos flertalet

alternativa geometrier, något som är avgörande då slutprodukten ofta är en kompromiss mellan designkrav och aerodynamisk prestanda.

Om det senare blir aktuellt för Volvo att implementera en finger-gap reducer på produktionsbilar kommer konceptet att behöva utvecklas ytterligare. Detta då det nuvarande konceptet gjorts med en bredd på 5 cm som hade varit för stor för faktiskt implementering men som ger tydliga resultat under tester. Under inledningen av arbetet var tanken att utveckla två olika versioner av finger-gap reducern med olika bredd för att få mer heltäckande resultat och för att se vilken påverkan bredden har på aerodynamisk prestanda. Allt eftersom arbetet fortlöpte med modellering och tillverkning av modeller kom insikten att skapa två olika versioner med olika bredd skulle bli för omfattande för den givna tidsramen.

5.3 Design- och utvecklingsprocess

I början av idégenreringsprocessen ställdes frågan om det fanns en fördel med att placera alla stegmotorer tillsammans som en enhet längre bort från hjulhuset för att underlätta montering i produktionsbil. Under arbetets gång undersöktes olika material på stänger för att hitta ett med önskade egenskaper. Fjäderstål, som slutligen valdes som material till stängerna, tycktes till en början vara för stelt för att en sådan lösning skulle fungera. Montering av stegmotorer på åtskilda positioner i hjulhuset närmre punkterna där stängerna trycker på finger-gap reducern undersöktes därför i CAD-modellen och blev utgångspunkten för det vidare arbetet. Vid senare undersökning av testbilen i en verkstad på plats hos Volvo Cars upptäcktes att en placering av stegmotorer i frunken skulle bli möjlig och att fjäderstålet klarade den böjning som krävdes. Detta underlättade arbetet med att hitta en lösning för hur stegmotorerna skulle fästas, då de tidigare undersökta områdena för infästningar i hjulhuset inte var optimala och hade krävt extra arbete med modellering och 3D-printade lösningar för att fungera.

Under arbetet har en kompromiss behövts göras mellan aerodynamik, funktion och design, då en rörlig komponent är komplicerad ur flera aspekter. Det som anses bäst för aerodynamisk prestanda sammanfaller sällan med den föredragna designen ur ett rent visuellt perspektiv. Fokus lades till en början på aerodynamik och övriga viktiga egenskaper hos en finger-gap reducer. Denna kunskap användes sedan för utformning och design av delen för att passa in på bilen utan att sänka det visuella värdet. Under detta designarbete har Volvos Cars designspråk tagits i beaktning samt detaljer förfinats, så som *Volvo corners*. Detta för att få en känsla av samhörighet mellan finger-gap reducern och övriga bilen.

Vid vindtunneltest ger ojämnheter i ytan på bilen en påverkan på resultaten och det har därför varit viktigt att bilen för test är i bra skick. Ett byte av bil har av denna anledning därför skett under arbetets gång där en XC40 först var aktuell för arbetet med implementeringen men senare blev en C40 bilen som kom att användas. Detta berodde på ojämnheter i bilens yta till följd av skada och på att ett batteri

saknades. På en elbil är batteriet en stor del av yttergolvet konstruktion och ett tomrum där hade påverkat ett test och resulterat i felaktiga värden.

6

Avslutning

I detta avslutande kapitel sammanfattas de huvudsakliga slutsatserna av arbetet. Kapitlet introducerar även förslag till framtida forskning och utveckling av finger-gap reducers.

6.1 Slutsats

Det genomförda arbetet har undersökt flera olika lösningar och koncept för hur en finger-gap reducer kan ändra form vid vindtunneltest utan att manuella ingrepp krävs. Arbetet har resulterat i en fungerande prototyp som genom en kombination av mekatronik och konstruktion kan justera sin form via fjärrstyrning från ett kontrollrum. Prototypen kom inte att nå målet på 45 graders utböjning, men den uppskattade vinkeln på cirka 30 grader anses tillräcklig för att uppnå värdefulla mätningar under vindtunneltester. Vidare har konceptet visualiserats och placerats i sin slutliga kontext för att visa på arbetets potential. Arbetet har därmed visat på att det går att skapa aktiva aerodynamiska komponenter som kan monteras på konventionella personbilar.

6.2 Förslag till vidare forskning

Utvecklingspotentialen för arbetet är stor, både vad avser att skapa aktiva varianter av redan befintliga komponenter samt att vidareutveckla det framtagna konceptet. Exempel på ytterligare komponenter som hade kunnat göras aktiva är hjuldeflektorer eller *side skirts*, paneler som monteras under sidodörrarna på personbilar för både skyddande egenskaper och aerodynamiska vinster.

Utformningen av dagens hjulhus på personbilar är som tidigare nämnt en kompromiss mellan ett attraktivt designspråk, funktion samt aerodynamisk prestanda. Utveckling av en aktiv finger-gap reducer hade kunnat åstadkomma en bättre kompromiss, exempelvis hade en rörelse i sidled tillåtit finger-gap reducerna att delvis gömmas under fordonskroppen under stillastående eller låga hastigheter. Detta hade tillåtit ett mer avskalat designspråk och inte heller inkräktat på funktioner som maximal svängradie vid nedfjädring eller däckskifte. Vid högre hastigheter hade istället finger-gap reducerna kunnat göras större för att täcka mer av gapet mellan hjulet och hjulhuset. Detta då det först i dessa hastigheter blir intressant att optimera luftflödet runt fordonet samt att funktioner som att kunna utnyttja maximal

svängradie eller nedfjädring blir mindre relevanta.

Ytterligare utvecklingspotential finns i att utreda möjligheten att kunna vinkla finger-gap reducern beroende på det aktuella luftmotståndet, det vill säga att kunna anpassa graden av torsion beroende på om fordonet utsätts för exempelvis sidovindar eller kastvindar. Denna vidareutveckling kräver mer omfattande vindtunnelstudier och en vidareutvecklad teknik med ökad responsivitet. Slutligen, för att öka realiserbarheten för finger-gap reducers på personbilar, både som en statisk och aktiv detalj hade det varit fördelaktigt att integrera denna detalj med eventuella framhjuldeflektorer, både ur tillverknings- och monteringsynpunkt men även ur ett designperspektiv.

Referenser

- Autodesk. (2025). *Fusion 360 / Product Design and Manufacturing Software* [Retrieved from <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>]. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- Berg, H., & Brandt, A. (2018). *Investigation of Aerodynamic Wheel Design* [Mastersuppsats]. Chalmers University of Technology.
- Blackmagic Design Pty. Ltd. (u.å.). DaVinci Resolve [Accessed: 2025-05-09]. <https://www.blackmagicdesign.com/products/davinciresolve>
- Blender Foundation. (u.å.). About [Accessed: 2025-05-09]. <https://www.blender.org/about/>
- Dassault Systems. (2025). CATIA V5 [Accessed: 10 april 2025].
- Huang, T., Liu, J., & He, X. e. a. (2021). Extended study of full-scale wind tunnel test and simulation analysis based on Drivaer model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, 236*(10-11), 2433–2447. <https://doi.org/10.1177/095440702111053528>
- Josefsson, E. (2024). *Passenger vehicle tyre aerodynamics*.
- Leman, J. (2024). Studier i stormen. *EDIT, 2*. <https://www.volvocars.com/se/edit/artikel/volvo-cars-vindtunnel>
- Nilsson, Å. W., Ericson, Å., & Tyrlind, P. (2021). *Design - process och metod*. Studentlitteratur.
- Oselin, P. (2023). *Mechatronics Optimization Development for Wind Tunnel Tests* [Mastersuppsats]. Chalmers University of Technology.
- Petrusson, J. (2023). Vehicle spoiler arrangement and system and method for operating a vehicle spoiler [Patent No. US20230219639A1, U.S. Patent and Trademark Office]. <https://patents.google.com/patent/US20230219639A1/en>
- Urquhart, M., & Sebben, S. (2022). Optimisation of trailing edge flaps on the base cavity of a vehicle for improved performance at yaw. *Flow, Turbulence and Combustion, 109*(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10494-022-00323-z>
- Volvo Car Sverige AB. (2008 september). Ny vindtunnel i världsklass ger Volvoköparen lägre CO2-utsläpp. Hämtad 7 februari 2025, från <https://www.media.volvocars.com/se/sv-se/media/pressreleases/17008>

A

Appendix - Reklamfilm

Klicka **här** för att se reklamfilmen som nämnts i kapitel 4 avsnitt 4.4.

Annars besök följande länk: <https://tinyurl.com/Volvo-FGR>

Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden
www.chalmers.se



CHALMERS