



CHALMERS



HEROES - en mobil testbänk för heterogena robotutforskningsystem

Återupplivandet av en mobil testbänk

Kandidatarbete inom Maskinteknik och Teknisk fysik.

Herman Hedström
Oskar Hjalmarsson
Isac Olander

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE I MASKINTEKNIK OCH TEKNISK FYSIK

HEROES - en mobil testbänk för heterogena robotutforskningsystem

Återupplivandet av en mobil testbänk

Herman Hedström
Oskar Hjalmarsson
Isac Olander



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknisk och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

HEROES - en mobil testbänk för heterogena robotutforskningsystem
Återupplivandet av en mobil testbänk
Herman Hedström
Oskar Hjalmarsson
Isac Olander

© Herman Hedström, Oskar Hjalmarsson, Isac Olander, 2026.

Handledare: Vivien Lacorre, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Examinator: Krister Wolff, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Bilden visar den mobila testbänken.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2026

HEROES - en mobil testbänk för heterogena robotutforskningsystem
Återupplivandet av en mobil testbänk
Herman Hedström, Oskar Hjalmarsson, Isac Olander
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknisk och autonoma system
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Projektet har vidareutvecklat och reparerat en befintlig mobil testbänk för inspektion av infrastruktur. Testbänken var ett projekt som Chalmers tekniska högskola tillsammans med företaget CPAC utvecklade för över 10 år sedan. Då minimalt med dokumentation fanns att tillgå har projektgruppen metodiskt kartlagt och analyserat systemet för att återskapa den konstruktion som en gång var. Detta har gjorts genom en metodisk arbetsgång där fordonets delsystem har återskapats stegvis. De huvudsakliga delsystemen som behandlats är strömförsörjning, trådlös kommunikation, elektriska motorer, styrning samt datahantering och sensorer.

Projektet omfattade även flertalet uppgraderingar, såsom integration av en kraftfullare mikrokontroller, GPS-modul samt förbättring av det befintliga elsystemet. Den kod som använts tidigare kunde extraheras från den gamla mikrokontrollen men på grund av saknad dokumentation samt föråldrat system behövdes ett helt nytt mjukvarusystem skapas.

Fordonet är utrustat med fyra LiDAR-sensorer vars uppgift är att skanna objekt i dess närområde för att anpassa fordonets förflyttning. I detta projekt implementerades två av de fyra sensorerna för att testa konceptet av autonom körning. Vidare utvecklades ett kartbaserat webbgränssnitt för att projicera insamlad GPS-information, vilket ger operatören en realtidsuppfattning om fordonets position. Resultatet av detta kandidatarbete var en modulär testbänk som kan styras manuellt samt automatiskt undvika objekt längs dess färd. Detta ligger till grund för framtida utveckling av ett helt autonomt system.

Nyckelord: Autonom, LiDAR, GPS, Robotik, Omvänd ingenjörskonst, Testbänk, UDP-kommunikation.

Förord

Denna rapport presenterar resultatet av vårt kandidatarbete som genomfördes vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola under våren 2026.Handledare var Vivien Lacorre och examinator Krister Wolff.

Författarnas tack

Ett stort tack riktas till vår handledare Vivien Lacorre för stort engagemang och stöd under detta kandidatarbete. Vivien har stöttat oss genom hela arbetsprocessen och bidragit med värdefulla insikter och feedback som i allra högsta grad har format det slutliga resultatet. De regelbundna mötena som gruppen haft tillsammans med Vivien har varit en avgörande faktor för projektets stadiga framgång. Vidare vill vi rikta ett varmt tack till vår examinator Krister Wolff för hans expertis och engagemang. Hans smidiga hantering och stöd vid inköp av komponenter har varit en förutsättning för att vi skulle kunna bygga och färdigställa den fysiska prototypen. Vi vill även rikta ett stort tack till Simon Liljeqvist och Jacob Brickner, vars tidigare arbete låg till grund för projektet. Med stöd av tidigare dokumentation och svar på frågor kunde de ge värdefull vägledning under projektets tidiga skede.

Herman Hedström, Oskar Hjalmarsson, Isac Olander, Göteborg, Maj, 2026

Akronymer

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela denna avhandling, listade i alfabetisk ordning:

API	Application Programming Interface
BLDC	BrushLess Direct Current
BMS	Battery Managment System
CAN	Controller Area Network
DC	Direct Current
DoD	Depth of Discharge
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
HAT	Hardware Attached on Top
IMU	Inertial Measurement Unit
I2C	Inter-Integrated Circuit
LiDAR	Light Detection And Ranging
PWM	Pulse Width Modulation
REST	Representational State Transfer
ROS	Robot Operating System
RPI	Raspberry PI (5)
UDP	User Datagram Protocol
VESC	Vedder Electronic Speed Controller
VPN	Virtual Private Network

Innehåll

Akronymer	ix
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Mål	2
1.2.1 Mekanik	2
1.2.2 Elektronik	2
1.2.3 Mjukvara och kommunikation	3
1.2.4 Semiautonom styrning	3
1.3 Avgränsningar	3
2 Teknisk bakgrund	5
2.1 Strömförsörjning	5
2.1.1 Återladdningsbara batterier	6
2.1.2 Likspänningsomvandlare och PWM	8
2.2 Trådlös kommunikation	10
2.2.1 Nätverksstyrning	10
2.2.2 VPN	11
2.2.3 API	12
2.3 Elektriska motorer	13
2.3.1 Motortyp	13
2.3.2 Motorstyrning och CAN-buss kommunikation	14
2.4 Styrning	14
2.4.1 Mekanisk sammanställning	14
2.4.2 Elektrisk sammanställning	16
2.4.3 Inter-Integrated Circuit (I2C)	16
2.4.4 Sabertooth	16
2.5 Datahantering och sensorer	17
2.5.1 Raspberry Pi 5	17
2.5.2 LiDAR	18
2.5.3 GPS	19
3 Metod och genomförande	21

3.1	Design och implementation av elektronik	21
3.1.1	Systemets krav av strömförsörjning	21
3.1.2	Val av batteri och likspänningsomvandlare	22
3.1.3	Implementation och säkerhet	23
3.2	Trådlös kommunikation	23
3.2.1	Trådlös styrning	24
3.2.2	GPS signalering	25
3.3	Motorkonfiguration	26
3.3.1	Test av komponenter och konfigurationer.	26
3.3.2	Implementation av kod	28
3.4	Styrning	29
3.4.1	Test av Sabertooth-modul	29
3.4.2	Test av potentiometer och ADC	30
3.4.3	Lågpasfilter	30
3.4.4	PI-regulator	31
3.4.5	PWM-konvertering	31
3.5	LiDAR implementation	32
3.5.1	LiDAR konfiguration	32
3.5.2	LiDAR och Raspberry Pi integration	34
3.6	Användning av AI	37
4	Resultat	39
4.1	Fordonets uppbyggnad	39
4.2	Elsystem och förbrukning	40
4.3	Trådlös kommunikation	41
4.3.1	Trådlös styrning	41
4.3.2	GPS	42
4.4	Elektriska motorer	43
4.5	Styrning	44
4.6	LiDAR	45
5	Diskussion	47
5.1	Elsystem	47
5.2	Trådlös kommunikation och GPS	48
5.3	Elektriska motorer	48
5.4	Styrning	49
5.5	LiDAR	49
5.6	Etiska och samhällsliga aspekter	50
5.6.1	Säkerhetsperspektiv	50
5.6.2	Människoperspektiv	50
5.6.3	Miljöperspektiv	51
5.6.4	Juridiskt perspektiv	51
5.6.5	Dokumentering och vidareutveckling	51
5.6.6	Integritetsperspektiv	51
5.6.7	Slutsats och reflektion	52
5.7	Vidareutveckling	52

6 Slutsatser	55
Litteraturförteckning	57
A Appendix	I
A.1 Batteriegenskaper	I
A.2 Bilder:	III

Figurer

2.1	Översikt av fordonet vid projektets början.	5
2.2	Figurerna visar beståndsdelarna av en battericell samt olika typer av sammankoppling.	6
2.3	LiFePO ₄ -batteri Powerbrick+ 48V 32Ah.	8
2.4	Visualisering av en PWM-signal med spänningen U på y-axeln och tiden t på x-axeln. Spänningen $U_{in} = 10$ V omvandlas ner till $U_{ut} = 4$ V med pulskvoten $t_1/T = 0,4$	9
2.5	Likspänningsomvandlare av typ MEAN WELL SD-350C-24.	10
2.6	Illustration av VPN tunnel, genererad med Google gemini pro 3.1.	11
2.7	REST API flöde.	12
2.8	UDP kommunikation.	13
2.9	Två figurer bestående av BLDC motorer varav (a) sitter på fordonet och (b) är ett exempel på hur konfigurationen ser ut inuti.	14
2.10	Figur över Ackermann-styrning sedd ovanifrån [34].	15
2.11	Två bilder på fordonets styrgeometri vid centrerings och vänstersväng.	15
2.12	Analog till digital konverterare. Återgiven från [37] under CC BY-SA 4.0.	16
2.13	Bild på Sabertooth-modulen.	17
2.14	Bilden visar RPI med Powerhat monterad ovanpå. Notera raden med kontakter i bakkant som är GPIO anslutningar.	17
2.15	Heroes LiDAR-konfiguration.	18
2.16	L76K GPS HAT för RPI av Waveshare.	19
3.1	Knapparna på en PlayStation 4-handkontroll. Bildkälla: "Dualshock 4 Layout" av Tokyoship, licensierad under CC BY 3.0.	25
3.2	Grafiska gränssnittet med fordonets position illustrerat med en röd prick.	26
3.3	Konfigurationen av VESC ID.	27
3.4	Flödesschema som visar hur motorstyrningssystemet är uppbyggt.	28
3.5	Flödesdiagram på det återkopplade styrsystemet.	29
3.6	Flödesdiagram över PI-regulatorn.	32
3.7	LiDAR konfiguration för den högra LiDAR:n. Blåa linjerna representerar avståndet från LiDAR-sensorns synfält.	33
3.8	Flödesdiagram över den autonoma styrningen.	36

4.1	Figuren visar en övergripande bild över systemet, inkluderat signaler och strömförsörjning.	39
4.2	Figuren visar en övergripande bild över elsystemet, inkluderat de olika spänningsnivåerna 48, 24 respektive 5,1 V.	40
4.3	GPS mätning under ca 10 minuter där 10641 datapunkter samlades in då bilen var i stillastående läge.	43
4.4	GPS signal under en registrerad körsträcka.	43
4.5	Figur som visar data uthämtad från VESC-modul ID:0 under två test av acceleration från uppstart.	44
4.6	Figur som visar hur reglersystemet reagerar på börvärdesändringar.	45
4.7	Figuren visar händelseförloppet då fordonet framförs mot en person och väjer till höger.	46
A.1	Campusmiljö omringad av höga byggnader.	III

Tabeller

2.1	Jämförelse av data för batterier sammansatta av bly (Lead Acid), nickelmetallhydrid (NiMH), Litiumkoboltoxid (Li-ion(Co)), litiummanganoxid (Li-ion(Mn)) och litiumjärnfosfat (Li-ion(Ph)).	7
2.2	Översatt tabell med batteriegenskaper för Powerbrick+.	8
3.1	Effekt/strömförbrukning hos respektive artikel. Notera strömmar med beteckning I^{48V} vid 48 V spänning.	22
3.2	Sammanställning av handkontrollens funktioner för fjärrstyrning av fordonet.	25
3.3	Relevanta inställningar för en BLDC motor.	27
3.4	Tabell som visar vilken konfiguration som används.	30
3.5	Tabell som visar potentiometerns värde vid olika styrutslag.	30
3.6	Tabell med värden för styrning.	31
3.7	IP-inställningar för de främre LiDAR sensorerna.	34
3.8	Förklaring av datasegmenten i LiDAR-sensors data telegram [53].	35
4.1	Uppmätt effekt/strömförbrukning för respektive motor. Spänning U för BLDC-motor hjul motsvarar spänningen på batteriet. Notera strömmar $I^{52,4}$ tar hänsyn till aktuellt spänning.	41
4.2	För- och nackdelar med de kommunikationssystem som utvärderades under projektet.	42
A.1	Jämförelse av data för batterier sammansatta av bly (Lead Acid), nickel-metallhydrid (NiMH), Litiumkoboltoxid (Li-ion(Co)), litiummanganoxid (Li-ion(Mn)) och litiumjärnfosfat (Li-ion(Ph)).	II

1

Inledning

Användningen av robotsystem har ökat och fått ett större inflytande inom många samhällssektorer [1]. Ett av dessa tillämpningsområden är inspektion och övervakning av infrastruktur, där dagens lösningar oftast är begränsade. Det är ett komplext område som ställer höga krav på att utvecklingen av algoritmer, processorer och sensorer sker i takt med varandra för att klara av navigering i farliga, dynamiska eller GPS-fria miljöer. En ytterligare utmaning som har stötts på inom detta område är koordinationen mellan olika typer av farkoster, där det går att dra nytta av olika styrkor beroende på typ av farkost. Ett tydligt exempel på detta är skillnaden i energikapacitet, där markgående fordon generellt har betydligt längre drifttid än luftburna farkoster [2]. En potentiell lösning är därför att låta markfordonen fungera som mobila laddningsstationer för exempelvis drönare. Detta kan även ses som en potentiell resurseffektivisering, då kombinationen av fordon på detta sätt har potential att vara mer effektiv än dagens lösningar. Här ställs även etiska krav där ett fordon av detta slag måste kunna garantera säkerhet för sin omgivning. Fordonet som projektet avser kan tänkas nyttjas som ett första steg för att ersätta mänskliga förare i farliga miljöer, vilket på sikt hade bidragit till ökad säkerhet inom en del arbetssektorer.

För att förbättra dagens lösningar har projektet HEROES (Heterogeneous Robotic Exploration System) tagits fram på Chalmers Tekniska Högskola, som ett framtida alternativ för undersökning av infrastruktur i utmanande miljöer. Projektet går ut på att återskapa funktionaliteten hos den befintliga testbänken och förbereda den för införandet av ett heterogent robotsystem.

Projektet startades för ungefär 10-15 år sedan och var ett samarbete mellan studenter och företaget CPAC [3]. Vid första arbetet skapades den mobila testbänken, men dokumentationen från detta arbete saknas. Senaste gången var år 2017, där man i ett examensarbete fick i uppgift att ta fram reglersystemet för det markgående fordonet [4]. Efter detta arbete har projektet varit vilande, och dokumentationen fram till nu är begränsad.

I dagsläget finns endast den mobila testbänken att tillgå. Informationen om denna är dock bristfällig och dess funktionalitet är osäker. Hur långt man kommit i arbetet och vilka funktioner som är uppfyllda är okänt. Projektet måste därför undersöka dess funktioner och försöka förstå sig på alla dess delsystem för att återskapa funktionaliteten.

1.1 Syfte

Syftet med projektet var att återskapa, säkerställa och dokumentera fordonets konstruktion och funktion som en mobil testbänk. Genom att systematiskt klarlägga grunden för tidigare konstruktions- och funktionsrelaterade beslut skulle testbänken kunna återställas till sin ursprungliga funktion och, i viss mån, vidareutvecklas för att möta nuvarande mål.

1.2 Mål

Projektet har som mål att kartlägga befintlig hårdvara för att sedan driftsätta och integrera moderna styrsystem, i syfte att möjliggöra både trådlös manövrering och semiautonom hinderundvikande körning. För att uppnå detta ska fordonets ursprungliga konstruktion återskapas och uppgraderas. Uppgiftens primära mål var att genomföra en demonstration av fordonet i en verklig miljö för att utvärdera och dokumentera systemets tillförlitlighet.

Arbetet kan delas upp i fyra grundläggande delområden som projektet avser behandla. Dessa är fordonets mekanik, elektronik och mjukvara samt semiautonom styrning.

1.2.1 Mekanik

Det första delområdet fokuserar på att analysera fordonets fysiska integritet och specifika konstruktionslösningar. Eftersom fordonets ursprungliga skick var okänt, är uppgiften att examinera och säkerställa funktionaliteten hos samtliga mekaniska komponenter. Detta innefattar specifikt att driftsätta drivlinans fyra motorer, samt den separata motorn som reglerar fordonets styrmekanism. En specifik målsättning var att testa samt utvärdera systemets mekaniska förmåga att manövrera i olika terränger och lutningar med hjälp av ett fälttest. Vidare behövdes även reglertekniken bakom styrningen optimeras och implementeras. Målet var att bygga upp ett system som ger snabb och kontrollerbar respons utifrån de kommandon som operatören skickar.

1.2.2 Elektronik

Det andra delområdet behandlar fordonets elektronik och kommunikationssystem, som utgör kärnan i konstruktionen. Målet för elsystemet var att uppgradera dess kabelstruktur för att öka systemets överskådlighet men även för att stödja de andra delsystemen med rätt mängd spänning. Att uppgradera elsystemet i form av säker och pålitlig strömförsörjning kommer innefattas i detta mål där långvarig drift kommer vara prioriterat. Vidare var målet att uppgradera och verifiera det interna kommunikationssystemet mellan fordonets styrenhet, sensorer och motorer, där bland annat Controller Area Network (CAN)-buss och Pulse Width Modulation (PWM) används för motorstyrningen [5][6]. Integration av sensormoduler så som Light Detection and Ranging (LiDAR) och Global Positioning System (GPS) ingår

som ett kritiskt delmål för att möjliggöra datainsamling [7][8]. För att säkerställa att dessa delmål uppnåtts har projektgruppen som mål att utföra mätningar och tester av strömförbrukning och kommunikationstillförlitlighet. Detta för verifiering och framtida utveckling av projektet.

1.2.3 Mjukvara och kommunikation

Det tredje delområdet behandlar fordonets mjukvaru implementation kopplat till manövrering samt trådlös kommunikation. Uppgiften innebar att utveckla ett styrsystem som kan tolka sensordata för att med hjälp av denna avgöra rörelsekommandon i realtid. Detta kräver implementering av algoritmer i Python och C++ [9][10]. Mjukvarumålet innefattade även att utveckla och utvärdera ett låglatent system för trådlös dataöverföring där även detta kommer utvärderas med hjälp av fälttester. Målet var att uppnå ett system med snabb, säker och noggrann respons som var optimerad för realtidsstyrning.

1.2.4 Semiautonom styrning

Ett avslutande, framåtblickande mål var att implementera ett semiautonomt styrsystem för kollisionssundvikande. Målet var att utveckla en grundläggande algoritm baserad på sanningstabeller som i realtid tolkar sensordata från dubbla LiDAR-enheter för att automatiskt kunna styra undan från hinder, samt aktivera ett nödstopp vid omedelbar kollisionsrisk. Dessutom skulle systemets förmåga att logga GPS-data utvärderas för att lägga grunden till framtida, helt autonom navigering.

För att säkerställa att uppgiften var avklarad skulle fordonet kunna genomföra en demonstration i verklig miljö där alla dess delsystem var integrerade. Detta syftade till att validera testbänken som en stabil plattform för framtida utveckling där användningsområden kan vara utforskning och kartläggning eller sök- och räddningsuppdrag.

1.3 Avgränsningar

Projektet var komplext och innefattade avancerad styrelektronik, reglerteknik samt elektronik. För att uppnå projektets mål krävdes noggrann eftertanke kring vad som behandlades som mer eller mindre viktigt för att uppnå dessa mål. Nedan följer samtliga avgränsningar för projektet.

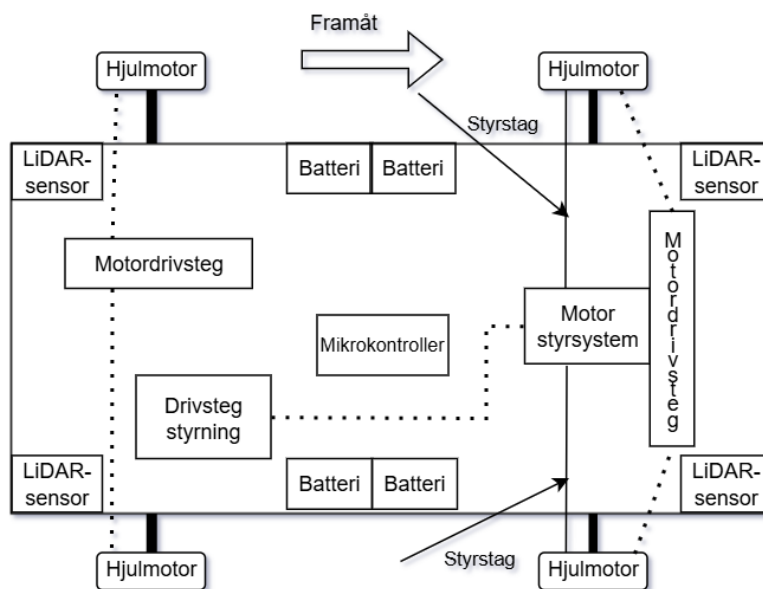
- **I så stor utsträckning som möjligt försöka återskapa fordonets funktion utefter tidigare utformning:** Fokuset låg på att i första hand driftsätta alla komponenter som redan var monterade och utformade för fordonet. Projektet omfattade därmed inte mekanisk nykonstruktion utan elektriska komponenter eller system har enbart bytts ut i de fall det visar sig vara ett för stort hinder eller anses vara nödvändiga förbättringsåtgärder.

- **Implementation av LiDAR-sensorer för att kunna detektera objekt framför fordonet.** Systemet för autonom manövrering har begränsats till ett konceptbevis och stabil grund för framtida utveckling. Detta då prioriteringen i första hand låg på att driftsätta bilens förmåga att manuellt manövreras och för vidare utveckling av övriga delsystem. Därav låg fokuset på att implementera två av de fyra LiDAR-sensorerna för ett konceptbevis. Mer avancerade funktioner och algoritmer för objekt-lokalisering och manövrering exkluderas från detta projekt.
- **Ruttplanering via GPS:** En GPS-modul har integrerats i fordonets system. Modulen används för att logga positionsdata och dess noggrannhet i fält har utvärderats. Detta används för närvarande enbart som konceptbevis och grund för framtida utveckling. Inga signaler eller kommandon kan skickas via dess grafiska webbgränssnitt.
- **Systemsimulering:** Projektet valde på grund av föregående studie att inte genomföra simuleringar på systemet med hjälp av simuleringsprogram. Processen genomfördes istället iterativt och med fälttest grundat på förstudier för tidsbesparing.
- **Heterogent multirobotsystem:** Projektet avsåg inte att implementera funktioner för framtida drönarintegration. Detta har därför inte undersökts eller testats i någon utsträckning. Det lämnas för framtida utveckling av HEROES.

2

Teknisk bakgrund

I detta kapitel presenteras den tekniska teori och systemarkitektur som ligger till grund för projektet. Först förklaras fordonets funktion vid projektets början, för att sedan förklara de komponenter som utgör fordonet idag. fordonet är uppbyggt av flera samverkande delsystem, vars fysiska placering och integration illustreras övergripande i systemskissen nedan, se Figur 2.1. Den tekniska genomgången inleds med systemets strömförsörjning, vilket består av fyra batterier, och diskuteras i avsnitt 2.1. Därefter undersöks fordonets drivlina, som är uppbyggt av fyra oberoende hjulmotorer med tillhörande drivsteg, se avsnitt 2.3. Vidare behandlas styrsystemet, vilket utgörs av en motor och ett drivsteg för att reglera framhjulens styrvinkel, se avsnitt 2.4. Kärnan i konstruktionen är den centrala mikrokontroller som kopplar samman dessa delsystem och hanterar all övergripande databehandling, se avsnitt 2.5.1. Slutligen redogörs fordonets sensorer i form av LiDAR för objekt-detektion, vilket behandlas i avsnitt 2.5.2.



Figur 2.1: Översikt av fordonet vid projektets början.

2.1 Strömförsörjning

Strömförsörjningens krav formuleras utifrån samtliga komponenters maximala effekt P_{max} och uppskattade genomsnittliga effekt P_{avg} , samt tillhörande strömmar I_{max}

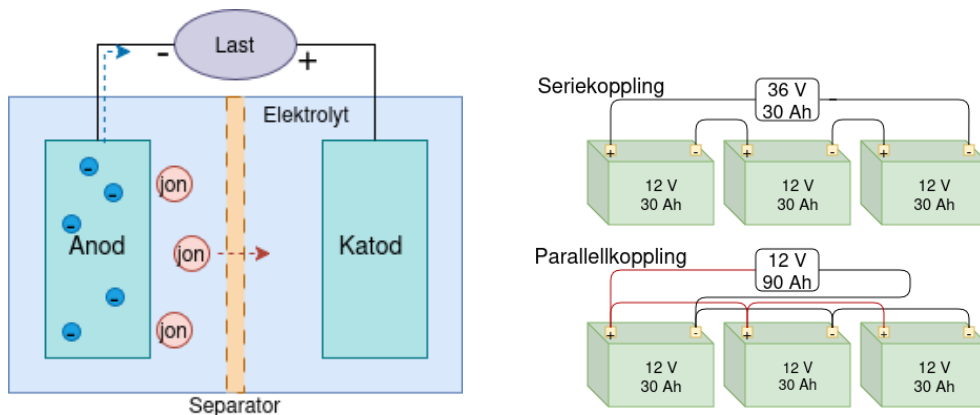
och I_{avg} . Strömmen I är specifik för den spänningsnivå vid vilken en komponent drivs, medan effekten är konstant oberoende av spänning. För Direct Current (DC) ges sambandet av

$$P = U \cdot I, \quad (2.1)$$

vilket innebär att då spänningen sjunker ökar strömmen proportionellt och vice versa.

2.1.1 Återladdningsbara batterier

Ett batteri är i sin enklaste form en enhet som förvarar kemisk energi för att sedan omvandla det till elektrisk energi vid behov [11]. Ett batteri består vanligtvis av flera celler, där en cell består av två elektroder; anod och katod. De är separerade av en elektrolyt som tillåter transport av laddning mellan elektroderna, men enbart joner då en separator stoppar överföringen av elektroner, se Figur 2.2a. En eller flera celler utgör ett batteri, vars spänning avgörs av hur många celler som seriekopplas. Storleken och materialet som elektroderna utgör avgör kapaciteten C [Ah] hos batteriet, vilket kan beskrivas som batteriets uthållighet. Hur de kopplas avgör även ett batteri eller en batteribanks egenskaper, se Figur 2.2b.



(a) De olika delarna av en battericell. Notera de joner som rör sig genom separatorn för att jämna ut laddningen då elektroner rör sig genom lasten.

(b) Visualisering av skillnaden mellan parallell- och seriekoppling, resulterande i olika kapacitet och spänning.

Figur 2.2: Figurerna visar beståndsdelarna av en battericell samt olika typer av sammankoppling.

Batterier kan delas upp i två huvudsakliga typer; primära och sekundära. Primära (engångsbatterier) hänvisar till batterier där elektronerna enbart kan röra sig från anod till katod under urladdning. För sekundära (återladdningsbara batterier) kan elektronerna röra sig i båda riktningar, varav katod till anod under uppladdning.

Batteriets materialsammansättning avgör dess specifika egenskaper. För egenskaper

som motsvarar fordonets behov finns fem relevanta alternativ, se översikt i Tabell 2.1 och fullständig Tabell A.1 i appendix [12].

Tabell 2.1: Jämförelse av data för batterier sammansatta av bly (Lead Acid), nickelmetallhydrid (NiMH), Litiumkoboltoxid (Li-ion(Co)), litiummanganoxid (Li-ion(Mn)) och litiumjärnfosfat (Li-ion(Ph)).

Specifications	Lead Acid	NiMH	Li-ion (Co)	Li-ion (Mn)	Li-ion (Ph)
Specific Energy (Wh/kg)	30–50	60–120	150–190	100–135	90–120
Life Cycle (80% Discharge)	200–300	300–500	500–1000	500–1000	1000–2000
Fast-Charging Time	8–16 h	2–4 h	3–4 h	≤1 h	≤1 h
Overcharge Tolerance	High	Low	Low, Cannot tolerate trickle charge		
Peak Load Current	5·C	5·C	>3	>30·C	>30·C
Maintenance Requirements	3–6 months	60–90 days	Not Required		
Safety Requirements	Thermally Stable	Thermally Stable, Fuse Protection Common	Protection Circuit Mandatory		

Namnet på respektive batteri antyder olika materialsammansättningar som ger olika egenskaper. Specifik energi (Specific Energy) [Wh/kg] är mängden energi per viktenhet, livscykel (Life Cycle) beskriver antalet förväntade cykler tills batteriet har 80 % kvar av dess ursprungliga C och snabb-laddningstid (Fast-Charging Time) beskriver laddningstid. Vidare beskriver överladdningstolerans (Overcharge Tolerance) ett batteris känslighet för överladdning, maximal lastström (Peak Load Current) batteriets förmåga att ge ut höga strömmar relativt C samt underhållskrav (Maintenance Requirements) hur ofta batteriet behöver laddas för att inte degraderas. Till sist beskriver säkerhetskrav (Safety Requirements) vilken följd till säkerhetssystem som batteriet behöver för att kunna fungera effektivt och säkert. Säkerhetssystem (Protection Circuit) hänvisar till Battery Management System (BMS) som säkerställer att alla celler i ett batteri bibehåller samma spänningsnivå. Celler som varierar i spänning bidrar till sämre prestanda och säkerhetsrisker [13].

Litiumjon-batterier uppvisar flera fördelar gentemot både nickelmetallhydrid-batterier och blybatterier, däribland högre energitäthet, längre cykellivslängd samt högre laddnings- och urladdningshastighet [14][15]. Ur ett ekonomiskt perspektiv representerar litiumjon-batterier en större initial kostnad, men tillsammans med den kombinerade effekten av längre cykellivslängd, högre energieffektivitet, lägre underhållskrav samt bättre prestanda skapar det ett högre värde över en längre tid. Blybatterier är mer känsliga för hur djupt batteriet laddas ur, benämnt Depth of discharge (DoD), som kan degradera blybatterier och reducerar antalet livscyklar [16].

Litiumjärnfosfat-batterier kännetecknas för dess höga energidensitet, låga vikt, höga urladdningsförmåga samt stabilitet [17]. Systemet nyttjar ett litiumjärnfosfat-batteri av typen Powerbrick+ 48V 32Ah, se Figur 2.3 samt egenskaper enligt tabell 2.2 [18].



Figur 2.3: LiFePO₄-batteri Powerbrick+ 48V 32Ah.

Tabell 2.2: Översatt tabell med batteriegenskaper för Powerbrick+.

Parameter	Värde
Nominell spänning	51,2 V
Vikt	13,2 kg
Specifik energi	124,2 Wh/kg
Cykler vid 100 % DoD @ 1·C	3 000
Cykler vid 80 % DoD @ 1·C	4 500
Kontinuerlig urladdningsström	65 A (~ 2·C)
Toppström (<30 s)	100 A (~ 3·C)
Momentan toppström (max 100 ms)	270 ± 30 A (~ 8,5·C)
Batteristyrning (BMS)	Inbyggd,
– Övervakning	Celltemperatur, korttemperatur, ström, spänning
– Cellbalansering	Ja
Underhåll	100 % underhållsfritt

Där urladdningsström (Discharge current) beskriver maximal ström som batteriet kan leverera för tre olika tidsintervall (Continuous-, Peak- samt Instant peak-).

Urladdningstid t_{urladd} [h] kan beräknas utifrån uppskattad genomsnittlig strömförbrukning enligt

$$t_{urladd} = \frac{C}{(I_{avg}^{48V})_{tot}}, \quad (2.2)$$

där C betecknar batteriets kapacitet, det vill säga antalet amperetimmar (Ah) för batteriet.

2.1.2 Likspänningsomvandlare och PWM

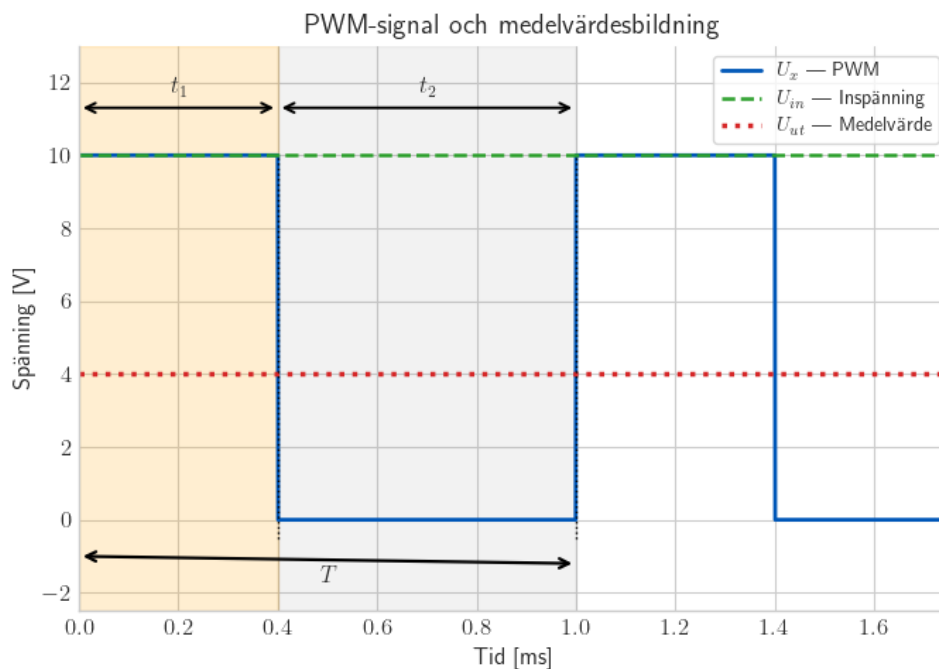
Komponenter i ett fordon eller robot drivs sällan vid en och samma spänning. En komponent är tillverkad för att klara av spänning inom ett visst intervall och då

dessa intervall inte överensstämmer kan man med fördel nyttja en spänningsomvandlare. Spänningsomvandlare, som namnet antyder, har i uppgift att omvandla en viss spänning till en annan [6].

Inom projektets omfattning är likspänningsomvandlare av intresse, då fordonet och dess beståndsdelar enbart drivs av DC. Mer specifikt hanteras nedspänningsomvandlare som omvandlar ned en högre spänning till en lägre. Majoriteten av omvandlare fungerar enligt PWM. I PWM används transistorer som fungerar som mycket snabba strömbrytare för att styra och omvandla elektrisk energi. Transistorerna arbetar i två tydliga lägen: helt påslagna eller helt avstängda. Antag spänningar U_{in} , U_x samt U_{ut} . U_{in} kan beskrivas som spänningen som omvandlaren matas med, U_x som spänningen U_{in} kan ändras till (0 eller U_{in}) och U_{ut} medelvärdet av spänningen U_x under tiden T . Utifrån periodtiden T definieras modulationsfrekvensen $f = 1/T$. Utspänningen U_{ut} kan då tecknas som medelvärdet av U_x under periodtiden T enligt

$$U_{ut} = \frac{1}{T} \int_0^t U_x(t) dt = \frac{t_1}{T} U_x = D \cdot U_x, \quad (2.3)$$

där t_1 beskriver tiden då $U_x = U_{in}$, t_2 då $U_x = 0$ och D pulskvoten (duty cycle). Exempel på händelseförloppet visualiseras i Figur 2.4.



Figur 2.4: Visualisering av en PWM-signal med spänningen U på y-axeln och tiden t på x-axeln. Spänningen $U_{in} = 10$ V omvandlas ner till $U_{ut} = 4$ V med pulskvoten $t_1/T = 0,4$.

I detta fall visualiseras PWM som efterliknar en nedspänningsomvandlare som justerar spänningen från $U_{in} = 10$ V till $U_{ut} = 4$ V. Uppspänningsomvandlare fungerar enligt en liknande princip, men hanteras inte i denna beskrivning utav saknad relevans för projektet.

Till skillnad från linjära kretsar, där styrkomponenterna kan arbeta i mellanlägen för att gradvis reglera ström eller spänning, undviker man här dessa mellanlägen nästan helt. Viss förlust upplevs och dess verkningsgrad betecknas η . För att kompensera ökar den resulterande strömmen på ingångsspänningens sida som ges av

$$I_{in} = \frac{P}{\eta \cdot U_{in}}, \quad (2.4)$$

där U_{in} är ingångsspänningen och η är verkningsgrad. Denna ström är relevant för att kunna uppskatta nödvändiga specifikationer för batteriet samt förutsäga aspekter som urladdningstid t_{urladd} . Utöver effektivitet bidrar likspänningsomvandlare till att hålla nära konstant utspänning. Därav lämpar de sig väl för att strömförsörja komponenter som är känsliga för spänningsvariationer.

Systemet nyttjar två nedspänningsomvandlare. För att omvandla 48 till 24 V nyttjas en 350 W MEAN WELL SD-350C-24, se Figur 2.5 [19]. För att omvandla 24 till 5,1 V nyttjas en Powerhat EKM002, se Figur 2.14 [20].



Figur 2.5: Likspänningsomvandlare av typ MEAN WELL SD-350C-24.

2.2 Trådlös kommunikation

I detta avsnitt kommer teorin bakom den trådlösa kommunikationen presenteras. Trådlös styrning av fordonet kommer att vara ett måste för att skicka information från operatören till den markgående enheten över en längre distans. Exempel på information som skickas trådlöst är koordinater, styrkommandon och hastighetsreglering. Denna dataöverföring behöver ske på ett tillförlitligt sätt.

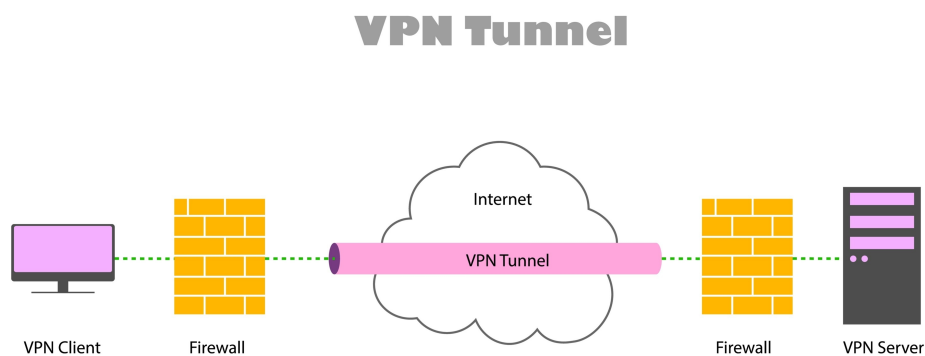
2.2.1 Nätverksstyrning

Ett sätt att skicka information trådlöst från en enhet till en annan är via wifi-kommunikation. Detta har visat sig vara ett effektivt och säkert sätt att överföra data över korta avstånd, förutsatt att båda enheterna befinner sig på samma lokala nätverk [21]. Nätverkets säkerhetsprotokoll möjliggör krypterad kommunikation mellan enheternas tilldelade IP-adresser. Överföringen kan ske i nästintill realtid

eftersom lokala nätverk erbjuder låg fördröjning. Detta är en välbeprövad metod när information ska skickas till stationära enheter inom ett och samma nätverk. För detta projekt kommer dock räckvidden inte att vara tillräcklig.

2.2.2 VPN

För att ta sig runt restriktioner som kan förekomma i nätverk, så som brandväggar, kan en så kallat virtuellt privat nätverk (VPN) appliceras. Detta möjliggör kommunikation över längre distanser med samma kryptering som på lokala nätverk. Detta görs via en krypterad nätverkstunnel som kopplar upp användaren på en annan IP-adress [22]. Figur 2.6 illustrerar hur en enhet kopplar upp sig på en server via en VPN. Detta kan i praktiken användas för att skicka data mellan två enheter som befinner sig på två olika nätverk, men med samma logik som tidigare.



Figur 2.6: Illustration av VPN tunnel, genererad med Google Gemini Pro 3.1.

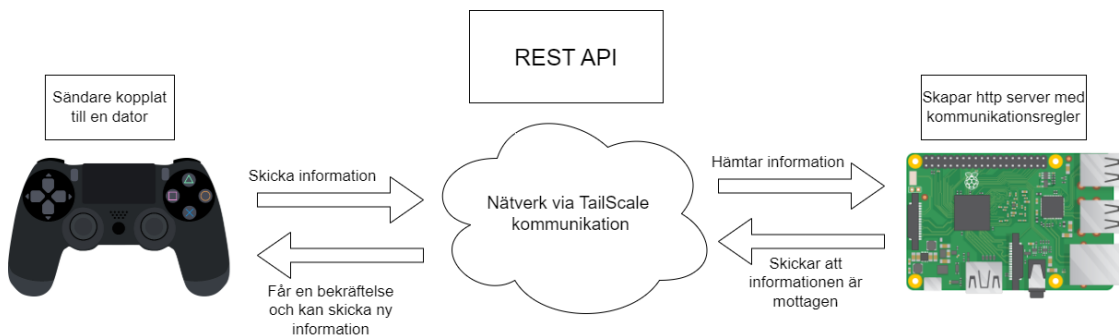
En känd och beprövad VPN leverantör är Tailscale. Tailscale är en nätverkstjänst som gör det möjligt att koppla ihop datorer, servrar och mobila enheter i ett privat, krypterat nätverk över internet. Det fungerar som ett "virtuellt lokalt nätverk" där enheter kan kommunicera säkert med varandra som om de vore anslutna till samma router, utan att man behöver konfigurera komplicerade brandväggsregler [23]. Mjukvaran använder sig av protokollet WireGuard för att kryptera samt skicka data på ett snabbt och säkert sätt [24].

Tailscales klientmjukvara och underliggande protokoll (WireGuard) bygger på öppen källkod (open source). Detta innebär att det är lättare att förstå vad som sker i programkoden och vid behov göra Anpassningar, vilket gör det till ett lämpligt och transparent verktyg för detta projekt.

2.2.3 API

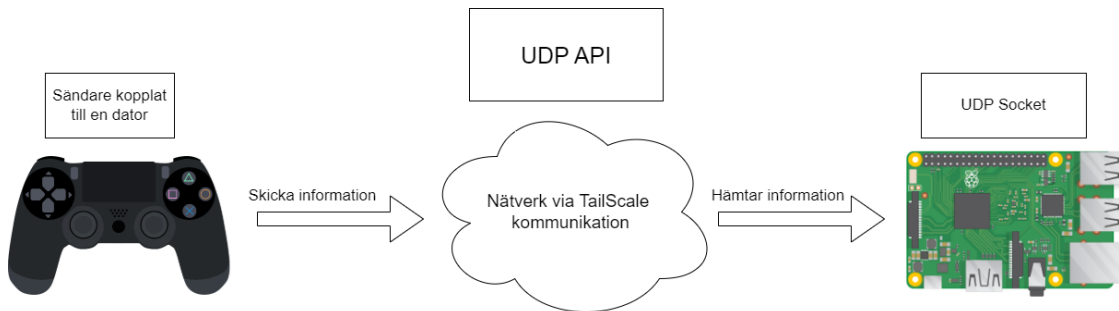
Ett Application Programming Interface, (API) fungerar som en mjukvarubrygga som gör det möjligt för två olika program eller system att kommunicera med varandra. I ett system definierar API en specifik uppsättning regler och protokoll för hur data ska begäras (request) och hur systemet ska svara (response). Genom att använda ett API behöver det anslutande programmet inte ha kunskap om hur det andra systemets underliggande kod fungerar, utan kan effektivt utbyta information genom standardiserade anrop. Ett API bestämmer hur kommunikationen mellan två enheter ska ske [25].

Det finns en mängd olika sätt att skicka informationen via en API från en IP-adress till en annan. Det absolut vanligaste är att använda Representational State Transfer (REST) API där tydliga regler upprättas mellan sändaren och mottagaren via en http server. Detta sätt att skicka data är standard i dagens nätverkskommunikation där man prioriterar säkerhet och universala lösningar. I utbyte mot dessa regler som upprättas förlorar man hastighet då en mängd olika protokoll måste uppfyllas innan informationen kan överföras [26]. Datan skickas först till en server via nätverket som kontrollerar ifall informationen som skickats är av rätt typ, oftast JSON format med korrekt information. Denna data kan i sin tur hämtas av mottagaren. Mottagaren skickar sedan tillbaka att informationen är hämtad och att ny information kan skickas. Figur 2.7 illustrerar detta exempel på hur informationen flödar när man använder REST API.



Figur 2.7: REST API flöde.

Ett annat alternativ för informationsöverföringen är att använda kommunikation enligt User Datagram Protocol (UDP). Denna typ av överföring är mer användbar då informationshastigheten har en avgörande roll [27]. Detta då informationen enbart skickas in till API-serven och inget svar från mottagaren krävs. Denna typ av kommunikation illustreras i Figur 2.8 och är den som nyttjas för detta projekt.



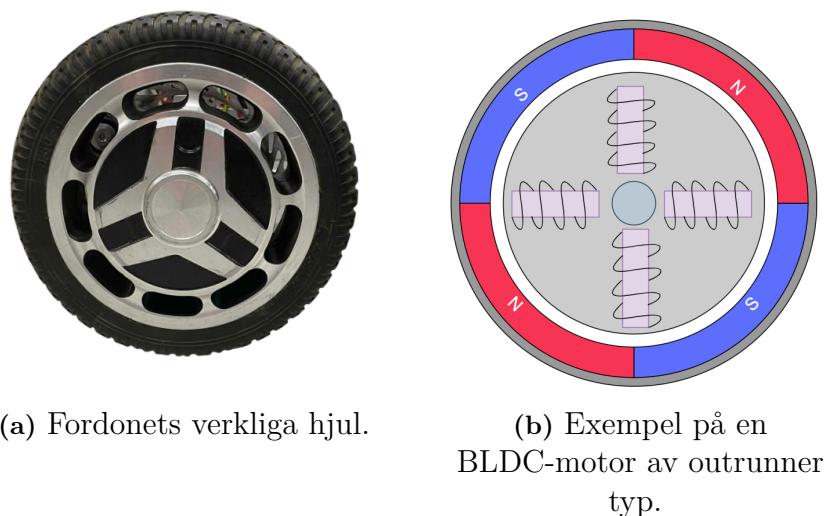
Figur 2.8: UDP kommunikation.

2.3 Elektriska motorer

Delavsnittet behandlar fordonets uppsättning av elektriska motorer, drivsteg och hur kommunikationen mellan drivstegen sker. Motorerna är vitala för manövrering av fordonet och en funktionell konfiguration av drivstegen krävs för att kontrollera samtliga motorer.

2.3.1 Motortyp

Fordonets drivlina består av fyra motorer av typ 350 W BrushLess Direct Current (BLDC). De är av outrunner-typ och styrs av varsin motormodul, se Figur 2.9a. En BLDC-motor innehåller en centralt placerad stator bestående av spolar som, när försörjda ges en varierande spänning genererar ett roterande magnetfält. Motors rotor omsluter statorn och är försedd med permanentmagneter, se Figur 2.9b. Dessa strävar efter att linjera sig med ett roterande magnetfält, vilket skapar ett vridmoment och får rotorn att rotera. Rotationshastigheten regleras därmed genom att modulera spänningspulsernas fas och amplitud [28]. Till skillnad från en konventionell likströmsmotor saknar BLDC-motorn borstar för kommutering. Hall-sensorer används för att kontinuerligt registrera rotorns position och hastighet genom att detektera när permanentmagneterna passerar kan motorns rotationshastighet beräknas [29].



Figur 2.9: Två figurer bestående av BLDC motorer varav (a) sitter på fordonet och (b) är ett exempel på hur konfigurationen ser ut inuti.

2.3.2 Motorstyrning och CAN-buss kommunikation

För att styra motorerna används motorstyrningar av typen Vedder Electronic Speed Controller (VESC), vilka bygger på ett svenskt open source projekt med rötter på Chalmers tekniska högskola [30]. Styrenheterna konfigureras via programvaran VESC Tool, där en mängd inställningar kan justeras utefter ändamål. Exempel på inställningar kan vara maximal strömstryka och rotationsriktning. VESC-arkitekturen gör det möjligt att sammankoppla flera moduler via CAN-busskommunikation för att synkronisera styrningen av flera motorer [31]. I detta nätverk utgör varje VESC-modul en egen nod med ett unikt ID. Systemet konfigureras vanligtvis enligt en master/slav-arkitektur, där en huvudnod (master) styr de övriga noderna (slavar). CAN-bussen använder ett tvåtrådsgränssnitt (CANH och CANL) för differentiell signalöverföring. Spänningsdifferensen mellan dessa ledningar representerar den data som slavnoderna mottar och agerar utifrån. Fördelarna med CAN-kommunikation är en hög överföringshastighet och en mycket god tolerans mot elektromagnetiska störningar (brus), vilket minimerar risken för dataförlust [32].

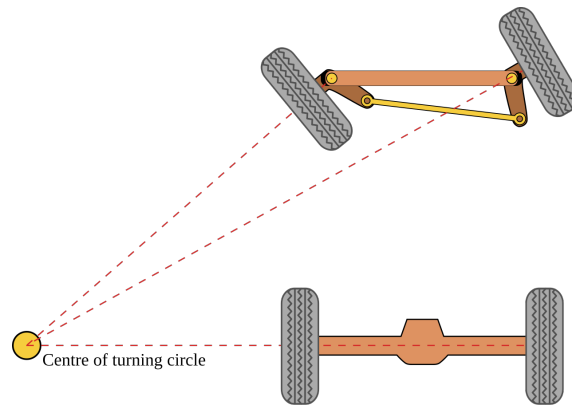
2.4 Styrning

Delavsnittet behandlar bland annat fordonets mekaniska styrsystem, sammansättning och motordrivsteg. Likt de elektriska motorerna är även styrningen viktig för fordonet, där god styrförmåga medför ökad navigeringsmöjlighet och kontroll av fordonet.

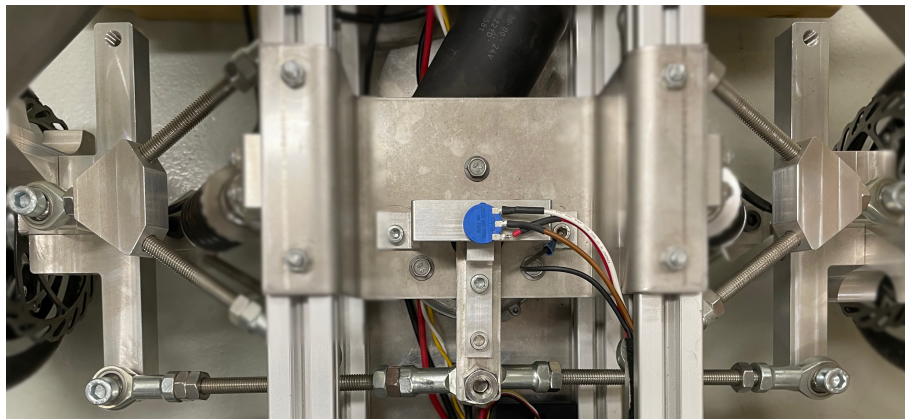
2.4.1 Mekanisk sammanställning

Styrsystemet bygger på en Ackermann-konfiguration, se Figur 2.10. Denna styrgeometri innebär att fordonets hjul roterar kring en gemensam skärningspunkt (ett

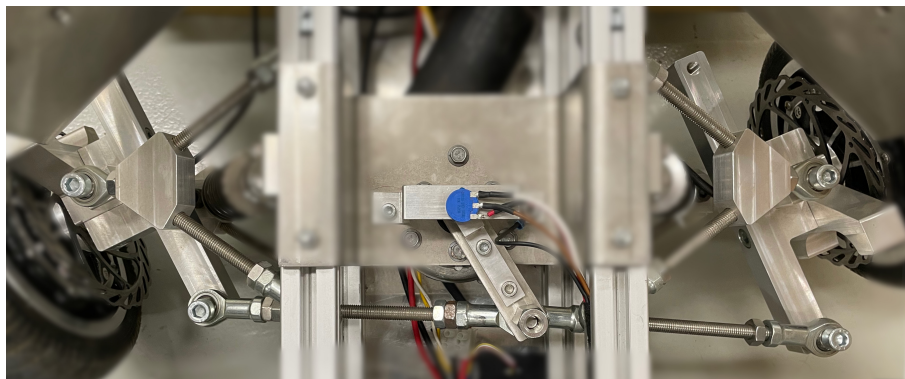
momentancentrum) på förlängningen av bakaxeln vid kurvtagning, se Figur 2.11. Detta medför att det inre hjulet roterar kring en mindre radie än det yttre hjulet och därmed måste svänga med en snävare vinkel. Fördelen med Ackermann-styrning är att hjulen inte slirar i sidled, vilket bevarar väggreppet och minimerar däckslitaget [33].



Figur 2.10: Figur över Ackermann-styrning sedd ovanifrån [34].



(a) Fordonets verkliga styrgeometri.



(b) Fordonet vid en vänstersväng.

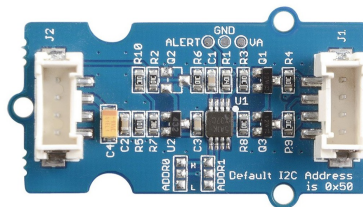
Figur 2.11: Två bilder på fordonets styrgeometri vid centring och vänstersväng.

2.4.2 Elektrisk sammanställning

För att mekaniskt reglera styrvinkeln används en lägesstyrd servomekanism [35]. Styrningen drivs av en DC-motor som i sin tur strömmatas av ett motordrivsteg av modellen Sabertooth 2x32 [36]. Som återkoppling används en potentiometer fäst på styraxeln, se blå baksida i Figur 2.11. Den genererar en analog spänningssignal som representerar styrningens aktuella fysiska position. Denna analoga signal konverteras via en Analog-to-Digital (ADC) modul till ett digitalt värde som läses av systemet [37]. ADC:n är av modell 'Grove- I2C ADC' och är en 12 bitars noggrann ADC modul, se Figur 2.12. Den medger möjligheten att extrahera analog sensordata till en digital signal som en mikrokontroller kan uppfatta.

2.4.3 Inter-Integrated Circuit (I2C)

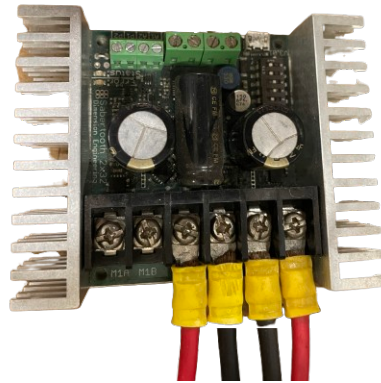
För att en mikrokontroller ska kunna läsa av signalen används kommunikation enligt Inter-Integrated Circuit (I2C)-buss som likt CAN-buss konstruktionen använder ett tvåtrådsgränssnitt, Serial Data Line (SDA) och Serial Clock Line (SCL). SDA hanterar potentiometerns värde medan SCL etablerar en seriell klocka för att säkerställa synkroniserad dataöverföring mellan enheter [38]. För att reducera mätbrus i den återkopplade signalen filtreras den inkommande datan genom ett lågpasfilter.



Figur 2.12: Analog till digital konverterare. Återgiven från [37] under CC BY-SA 4.0.

2.4.4 Sabertooth

Sabertooth-modulen är ett motordrivsteg för upp till två separata motorer, kapabelt att hantera upp till 32 ampere per kanal [36]. Modulen stödjer flera inmatningsmetoder, däribland radiostyrning, USB och analog styrning. Med hjälp av en serie inbyggda konfigurationsbrytare (DIP-switchar) kan enheten anpassas för olika styrbehov. I detta projekt används radiostyrnings-konfigurationen, vilket innebär att modulen tar emot PWM-signaler. Pulsernas längd avgör motorns hastighet och rotationsriktning: 1500 μs innebär att motorn står stilla, 1000 μs ger maximal hastighet baklänges och 2000 μs ger maximal hastighet framåt [36]. Utöver de fysiska brytarna har Sabertooth en tillhörande programvara, DEScribe, där mjukvaruinställningar såsom strömbegränsning, batteriskydd och insamling av data kan konfigureras.



Figur 2.13: Bild på Sabertooth-modulen.

2.5 Datahantering och sensorer

Delavsnittet behandlar hårdvaran och principen bakom fordonets styrsystem samt sensorer. De nyttjas för fordonets förmåga att orientera sig och tolka data i sin omgivning.

2.5.1 Raspberry Pi 5

Effektiv kommunikation mellan delsystem är viktigt för att erhålla god funktion. För att styra samtliga delsystem nyttjas en Raspberry Pi 5 (RPI), se Figur 2.14. RPI är en kompakt dator med alla nödvändiga funktioner som en dator vanligtvis har [39]. Tidigare nyttjades en mikrokontroller med motsvarande funktion, men denna var daterad och passade inte syftet. RPI:n används för att styra samtliga delsystem på fordonet och kommunikation med övriga delsystem sker via USB eller direkt anslutning till General Purpose Input/Output (GPIO). GPIO är en kontakt med 40 in-/utgångar som kan programmeras för att exempelvis läsa sensorer eller styra motorer.



Figur 2.14: Bilden visar RPI med Powerhat monterad ovanpå. Notera raden med kontakter i bakkant som är GPIO anslutningar.

Till RPI kan expansionskort tillföras i form av Hardware Attached on Top (HAT) för att utöka dess funktionalitet [40]. Två olika HAT nyttjas till fordonet, mer om dessa

och dess specifika egenskaper i respektive avsnitt 2.1.2 samt 2.5.3. HAT av olika typer följer en standard för att förenkla användning och säkerställa kompatibilitet mellan hårdvara och system. RPI:n kan automatiskt känna igen vilket expansionskort som är anslutet och kräver därmed minimal konfiguration. Att nyttja eventuella funktioner kopplade till en HAT kräver dock konfiguration i vanlig ordning.

2.5.2 LiDAR

LiDAR är en teknik som använder ljus för att upptäcka objekt inom ett visst område. En LiDAR-sensor består i huvudsak av tre delar: lasersändare, mottagare och ett tidsmätningssystem [41]. Lasersändaren skickar ut ljussignaler som sedan reflekteras tillbaka till mottagaren. Samtidigt som detta sker används tidsmätningssystemet för att mäta tiden det tar från det att ljuset emitteras tills att det fångas upp igen. Alla dessa tre delsystem måste ha en hög noggrannhet för att ge ett tillförlitligt system med hög precision. Denna typ av teknik kan användas inom en mängd olika områden, såsom satelliter, fordon och flygplan, där hög noggrannhet är ett måste [7]. Detta gör att denna typ av sensor är ett bra val för detta projekt.

Den specifika modulen som används på fordonet är av märket SICK med beteckning LMS111-10100, se Figur 2.15b [42]. Denna sensormodul är en 2D-LiDAR, vilket innebär att den kontinuerligt läser in sin omgivning i ett enskilt plan, till skillnad från en 3D-LiDAR som bygger upp en tredimensionell bild av omgivningen. Sensorn använder sig av infraröd laser med en våglängd på 905 nm och har ett synfält på 270 grader samt en räckvidd på 20 m [43]. För att komplettera dess synfält och få information om bilens hela omgivning sitter det fyra sensorer av samma modell placerade i bilens yttre kanter, se Figur 2.15a. I detta arbete nyttjas enbart de två främre sensorerna för att skapa en bild av omgivningen framför fordonet. Detta för att skapa en grund för framtida utveckling och användas som konceptbevis.



(a) Sick LiDAR-sensor LMS111-10100.

(b) Fordonet med dess fyra LiDAR-sensorer.

Figur 2.15: Heroes LiDAR-konfiguration.

2.5.3 GPS

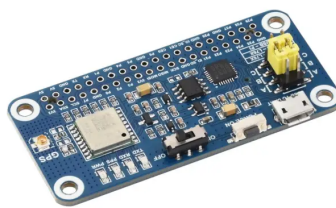
GPS är ett navigationssystem som möjliggör positionsbestämning med hjälp av satelliter. En GPS-mottagare beräknar sin exakta position genom att ta emot signaler från flertalet satelliter och mäta tidsfördröjningen från det att signalen skickades till att den mottogs [8].

För att beräkna kortaste avståndet mellan två GPS-positioner kan Haversine-formeln användas. Denna formel är en förenkling av verkligheten då den förutsätter att jorden är perfekt sfärisk. Trots detta används den oftast inom navigering och avståndsuppskattning på grund av sin enkelhet och ger hög noggrannhet över kortare distanser [44]. Formeln följer

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)}, \quad (2.5)$$

där r är radien på den valda sfären, i detta fall jorden. θ och λ är latituden respektive longituden.

Inom system som använder mikrokontrollers måste en extern hårdvara användas för GPS-positionering. För RPI kan utbyggnadskort nyttjas i form av en HAT som placeras ovanpå modulen. Ett exempel på ett sådant utbyggnadskort är L76K GPS HAT av Waveshare, se Figur 2.16. Denna GPS HAT har en positioneringsnoggrannhet på ca 2 m och är direkt kompatibel med RPI med en uppdateringsfrekvens på upp till 5 Hz [45]. Då den gav relativt hög noggrannhet till ett lågt pris nyttjas denna i projektet.



Figur 2.16: L76K GPS HAT för RPI av Waveshare.

3

Metod och genomförande

I detta kapitel presenteras de metoder som nyttjades inom ramarna för projektet. Även genomförande för att urskilja rätt metodik beskrivs.

3.1 Design och implementation av elektronik

Det befintliga elsystem som fanns i fordonet var föråldrat och anpassat efter 4 stycken seriekopplade batterier. Beslutet togs att förnya systemet och designa om elschemat för att justera för ändringarna samt simplificera så mycket som möjligt. Kvar stod utmaningar som att systemet matas vid tre olika spänningar; 48 V, 24 V och 5,1 V. För att göra detta möjligt måste kraftelektronik i form av likspänningsomvandlare nyttjas för att konvertera spänningar till lämpliga värden. Nedan presenteras metoden för val av batterikälla samt likspänningsomvandlare, tillsammans med nödvändig karaktäristik för dessa.

3.1.1 Systemets krav av strömförsörjning

Relevant för val av batteri och likspänningsomvandlare är systemets krav för strömförsörjning. De system som kräver strömförsörjning är enligt följande.

- **48 V system**
 - 4 st 48 V BLDC-motor hjul
- **24 V system**
 - 1 st 24 V DC-motor styrning
 - 2 st LiDAR-sensor
- **5,1 V system**
 - 1 st Raspberry Pi 5

listan ovan inkluderar inte omvandlare i form av likspänningsomvandlare, VESC eller motordrivsteg. Med verkningsgrad $\eta < 1$ påverkar de strömförbrukningen, men tas inte i hänsyn i beräkningarna nedan. Marginalen för strömförbrukningen bör bestämmas utifrån faktumet att η inte är känd. Utifrån listan av komponenter kan en tabell formuleras för att specificera varje komponents behov, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Effekt/strömförbrukning hos respektive artikel. Notera strömmar med beteckning I^{48V} vid 48 V spänning.

Komponent	U [V]	$\frac{P_{avg}}{\text{enhet}}$ [W]	$\frac{P_{max}}{\text{enhet}}$ [W]	Antal [st]	P_{avg} [W]	P_{max} [W]	I^{48V}_{avg} [A]	I^{48V}_{max} [A]
BLDC-motor hjul	48	144 *	350	4	576	1400	12	29,2
DC-motor styrning	24	48 *	120 *	1	48	120	1	2,5
LiDAR-sensor [42]	24	24	43	2	48	86	1	1,8
Raspberry Pi 5 (inkl. GPS-Hat) [39]	5,1	12	27	1	12	27	0,3	0,6
Totalt	–	–	–	–	684	1633	14,3	34,1

* Avsaknad av eller ofullständiga specifikationer innebar att dessa värden uppskattades utifrån liknande motorer och dess prestanda.

Summerad effekt och ström skapar en uppfattning om kravspecifikationerna för reserande delar av systemet. Den momentant maximala strömmen (I^{48V}_{max})_{sum} är den ström som batteriet förväntas kunna hantera under en kortare tid, medan den genomsnittliga strömmen (I^{48V}_{avg})_{sum} beskriver den genomsnittliga strömmen batteriet förväntas leverera över en längre tid.

3.1.2 Val av batteri och likspänningsomvandlare

Systemets behov sträcker sig längre än (I^{48V}_{max})_{sum} och (I^{48V}_{avg})_{sum}. Faktorer som spänning, kapacitet, effektivitet samt vikt tillika volym måste tas i hänsyn. Batteriet strömförsörjer samtliga delar av systemet, men enbart 48 V utan omvandling. Att nyttja ett 48 V system är fördelaktigt då hjulmotorerna förväntas förbruka mest effekt då dessa är klassade för 350 W vid 48 V, se Tabell 3.1. Att istället nyttja exempelvis 24 V och sedan konvertera detta till 48 V hade krävt en omvandlare med hög effekt-klassning och dess verkningsgrad η hade medfört lägre effektivitet. Högre effektklassning ställer även högre krav på likspänningsomvandlare, som i sin tur leder till högre pris.

Vikt och volym påverkar fordonets karaktäristik. Blybatteriers tendens att degraderas av höga DoD implicerar att högre kapacitet C krävs för att kompensera. Detta medför i sin tur att ett större eller flera mindre batterier av denna typ behöver nyttjas för att motsvara ett litiumjonbatteri. Fordonet har begränsat med plats och minimal vikt är att eftersträva för lägre förbrukning. Att nyttja ett större batteri, med alla celler integrerade i en förpackning, väger mindre och kan enkelt placeras i mitten av fordonet för god viktfordelning.

Fordonet har tidigare drivits med fyra seriekopplade 12 V litiumjärn-batterier med 20 Ah kapacitet. Tillsammans bildade de ett 48 V batteri med 20 Ah, där 24 V extraherades från två batterier. Både 48 V samt 24 V systemet delade då en gemensam jord. Att extrahera 24 V ur två av fyra batteriet orsakar obalans mellan de i avseendet seriekopplade celler som nyttjas, vilket i sin tur kan orsaka större problem. För att undgå detta valdes en likspänningsomvandlare för att omvandla ner spänningen från 48 till 24 V. Effektklassningen på likspänningsomvandlaren valdes

utefter värden i Tabell 3.1 enligt

$$P_{max}^{24V} = 684 - (\dots) = 233 \text{ W} \Rightarrow P_{min}^{omvandlare} \geq 233 \cdot k \geq 350 \text{ W}, \quad (3.1)$$

där faktor k representerar marginal för vidare utökning av system samt uppskattningarnas osäkerhet. Notera att RPI även strömförjs av 24 V, då dess likspänningsomvandlare är avsedd för omvandling av 24 V (6-36 V) till 5,1 V. Syftet med att nyttja en specifik likspänningsomvandlare till detta handlar om att minimera risken för skador på RPI:n, då kretskort av denna typ är relativt känsliga för spänningsvariationer. Då DC-motorn för styrning körs inom samma system kan dess induktiva belastning ge upphov till störningar och snabba variationer i spänning. Dessa fenomen kan ske då motorn kräver momentant höga strömmar, exempelvis vid början av varje styrningsmanöver. Att nyttja en specifik likspänningsomvandlare för RPI:n ger mer marginal för att separera den från sådana typer av belastningar samt simplifierar upplägget med minimal konfiguration och färre kablar.

3.1.3 Implementation och säkerhet

Implementation uppmärksammade begränsningar i form av kabeldimension och typ [46]. Det maximala kabeltvärsnittet som var möjligt att använda och samtidigt bibehålla tidigare nyttjade kopplingar och artiklar var 6 mm². Detta begränsade den maximala kontinuerliga strömstyrkan till 36 A. En 30 A säkring valdes därav som säkring för systemet, i syfte att skydda både batteri och system från kortslutning samt kontinuerlig överbelastning som riskerar att smälta isoleringen på kablagen [47]. Utöver säkringen har 48 till 24 V likspänningsomvandlaren skydd mot överbelastning, överspänning samt höga temperaturer [19]. Den agerar därmed som en säkring för 24 V systemet, utöver 30 A säkringen för hela systemet. För att kunna leda bort eventuella överströmmar är likspänningsomvandlaren ansluten till chassijord.

Utöver att säkra systemet från belastning krävs även strömbrytare och nödstopp. Dessa var redan integrerade i den tidigare designen och nyttjades på samma vis. Strömbrytaren följer direkt efter säkringen från batteriet och är positionerad på sidan av fordonet. Seriekopplad med strömbrytaren är det mobila nödstoppet. Nödstoppet är fysiskt ansluten till fordonet, men har en 1,5 m lång kabel vilket möjliggör att en person kan gå bredvid fordonet och samtidigt hålla fast i nödstoppet.

3.2 Trådlös kommunikation

Detta avsnitt beskriver i detalj implementeringen av den trådlösa kommunikationen. Initialt testades ett Flask-API system. Detta gav inte de tänkta resultatet och byttes därför till UDP-kommunikation som gav bättre resultat. Detta kommunikationsprotokoll implementerades både för manuell styrning av fordonet och GPS signalering.

3.2.1 Trådlös styrning

Den initiala strategin för den trådlösa styrningen av bilen innebar att ansluta mikrokontrollern och en extern dator till samma nätverk. Avsikten var att upprätta lokal kommunikation mellan dessa två IP-adresser via nätverket Eduroam. Det framkom dock tidigt att denna metod var problematisk, eftersom nätverkets brandväggar blockerade den aktuella typen av nätverkstrafik. Lösningen på detta problem blev att implementera VPN-tjänsten Tailscale för att upprätta en VPN-tunnel mellan enheterna. Detta tillät enheterna att kommunicera oberoende av nätverksägarens lokala restriktioner. En ytterligare fördel med denna lösning var att den möjliggjorde kommunikation över längre avstånd, eftersom enheterna inte längre behövde vara anslutna till samma nätverk. En grundläggande förutsättning för en fungerande konfiguration är installationen av Tailscale på respektive enhet och användning av samma konto.

När VPN-tunneln väl var etablerad utvecklades den mjukvara som krävdes för att hantera signalöverföringen mellan sändare och mottagare. Två program skrevs i Python, vars grundstruktur togs fram med hjälp av Google Gemini 3.1 Pro [48]. Mjukvarans primära syfte var att överföra data gällande bilens önskade hastighet och styrning. I det första utkastet realiserades denna funktion genom att en JSON-fil skickades till en HTTP-server via ett Flask-API. Inmatningen av styrdatan skedde med hjälp av en Playstation-handkontroll som var ansluten via Bluetooth till den sändande kontrollenheten, i detta fall en dator. Denna data lästes därefter av lokalt i bilens programvara, vilket gjorde det möjligt för systemet att styra bilen utifrån de mottagna instruktionerna. Denna lösning var tvungen att justeras efter att första fälttestet genomförts då de upptäcktes att responstiden var för hög. För framtida projekt på HEROES kommer detta inte vara några problem då koordinater istället kommer att skickas via API:n och styrningen samt hastighetsreglering kommer ske lokalt på mikrokontrollen. Men för manuell styrning är responstiden från det att man skicka signalen till det att bilen reagerar vital. För att uppgradera responstiden och säkerställa bättre manöverkontroll byttes kommunikations sättet till UDP-kommunikation. Detta innebär att ingen respons från fordonet skickas när den mottagit informationen, vilket i detta fall inte behövs.

Programmet som ansvarar för att sända information till bilen skickar en så kallad python-dictionary. Datan är strukturerad enligt följande där namnet (key) följs av värdet (value):

$$\{"rpm" : xx, "steer" : xx\}$$

Då man inte kan skicka python-dictionary direkt via UDP konverteras detta till JSON format vilket är en ren textfil med binär data. Denna data avkrypteras sedan när den mottagits och respektive signal, hastighet och styrning, kan sedan avläsas och reglera bilens börvärde.

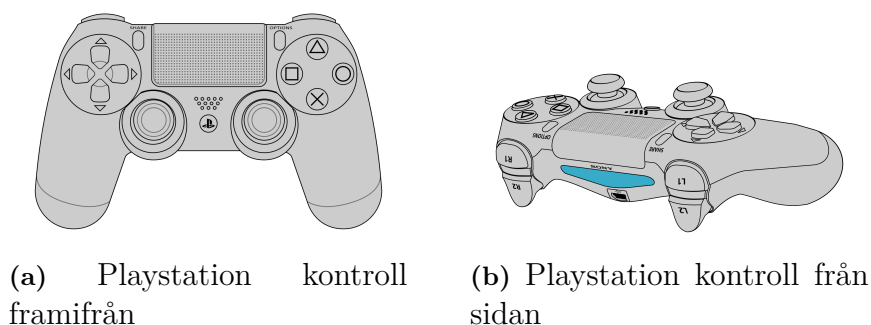
Som nämnt tidigare används en handkontroll för att skicka information till sändaren som i detta fall är en dator. Denna kopplas direkt till datorn via bluetooth och handkontrollens funktioner för styrning av fordonet beskrivs i Tabell 3.2. För

att underlätta styrningen så har inspiration tagits från klassiska bilspel på konsol.

Tabell 3.2: Sammanställning av handkontrollens funktioner för fjärrstyrning av fordonet.

Knapp / Reglage	Primär funktion	Teknisk beskrivning
Höger avtryckare (R2)	Gas framåt	Reglerar hastigheten framåt (RPM).
Vänster avtryckare (L2)	Gas bakåt	Reglerar hastighet bakåt.
Vänster styrspak (X-axel)	Styrning	Kontrollerar styrservons vinkel (börvärde).
Cirkel (O)	Nödstopp / Avbryt	Stänger UDP-strömmen och avbryter styrningen.
Fyrkant (□)	Autonomt läge *	Växlar systemet till autonom styrning.

* Se avsnitt 3.5.



Figur 3.1: Knapparna på en PlayStation 4-handkontroll. Bildkälla: "Dualshock 4 Layout" av Tokyoship, licensierad under CC BY 3.0.

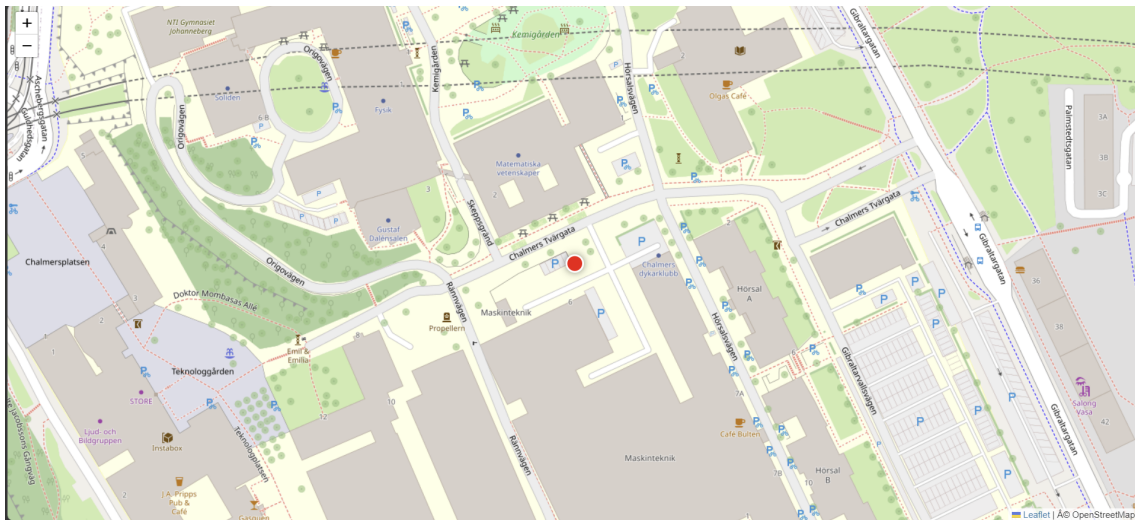
3.2.2 GPS signalering

Som tidigare nämnts skickar det etablerade UDP-flödet för styrning endast data i en riktning, från den sändande datorn till det mottagande fordonet. Att använda UDP hindrar dock inte systemet från att hantera flera oberoende dataströmmar. För att överföra information om bilens GPS-position upprättas därför en parallell kommunikationskanal enligt samma princip som beskrivs under avsnitt 3.2.1. Skillnaden i detta fall är att rollerna är omvända: bilens mikrocontroller agerar nu sändare och den externa datorn konfigureras som mottagare. Detta ger återigen snabb och effektiv kommunikation där man kan läsa av bilens position i realtid. Denna information skickas på samma sätt som tidigare men python-dictionaryn ser nu ut på följande sätt:

$$\{"Lat" : xx, "Long" : xx\}$$

När dessa signaler mottagits sparas de i en lokal JSON-fil, `gps_data.json`, som skrivs över varje gång en ny signal anländer. För att inte överbelasta detta system har en fördröjning på 0,5 sekunder (2 Hz) använts.

För att visualisera koordinaterna har ett grafiskt gränssnitt utvecklats. Systemet baseras på OpenStreetMap, en karttjänst i likhet med Google Maps, men som bygger på öppen källkod och är fri att använda under en öppen licens [49]. Detta gör det möjligt att sätta upp en lokal server på datorn där programmet kontinuerligt läser in de mottagna koordinaterna för realtidsvisualisering. Den lokala servern startas med hjälp av Pythons inbyggda modul (`http.server`) och konfigureras via port 8000. Syftet uppnås genom en HTML-fil (`index.html`) som genererar den grafiska miljö som illustreras i Figur 3.2. Denna HTML-fil som skapats har en del inbyggda funktioner så som att visualisera bilen med en röd markör samt följa bilens rörelse under dess färd. Eftersom JSON-filen skrivs över med ny data sparas inte informationen om vart bilen befunnit sig. Det finns möjlighet att skapa en till JSON-fil med namn `gps_logg.json` som kan logga körningen under tid.



Figur 3.2: Grafiska gränssnittet med fordonets position illustrerat med en röd prick.

3.3 Motorkonfiguration

Avsnittet motorkonfiguration beskriver metodiken som tillämpats för att implementera motorstyrningen, från komponentverifiering och parameterinställningar till integration i ett bibliotek för simultan kontroll.

3.3.1 Test av komponenter och konfigurationer.

Konfigurationen av BLDC-motorerna började med att isolera och strömförsörja en VESC-modul med hjälp av ett spänningsaggregat för att säkerställa dess funktion. Modulen kopplades till en dator med VESC Tool 3.00 via USB. Eftersom modulen

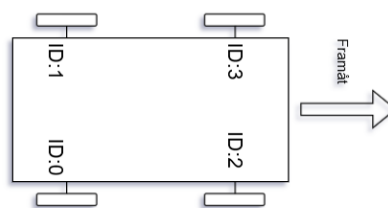
inte använts de senaste åren uppdaterades mjukvaran från 2.16 till den senaste versionen (6.02) för ökad kompatibilitet med VESC Tool, vilket istället resulterade i att hårdvaran var för gammal. Slutligen valdes version 5.02 som optimal konfiguration mellan mjuk- och hårdvara och inställningar i VESC Tool utfördes.

Första inställningen som gjordes var att välja vilken typ av motor som används samt köra en inbyggd konfiguration av intern resistans och analys av dess Hall-sensorer. Sedan valdes rotationsriktning där fordonets vänstra motorer roterar motsols och högra roterar medsols för att säkerställa att alla motorer roterar åt rätt riktning vid gaspådrag. Andra vitala inställningar gjordes för att säkerställa god funktion och minimera risken för överbelastning, se Tabell 3.3. Avstängning av regenerativ bromsning var ett krav när spänningsaggregatet användes eftersom den inte kunde hantera motströmmen som bildas vid inbromsning. Processen repeterades för alla motorer individuellt men att endast tre av fyra motorer kunde aktivera sina Hall-sensorer vilket innebar att höger framhjul konfigurerades som sensorlös istället.

Tabell 3.3: Relevanta inställningar för en BLDC motor.

Inställning	Värde
Maximal strömstyrka	15 A
Regenerativ bromsning	5 A
Minsta lägsta spänning	42 V
Största lägsta spänning	40 V
Initial startstyrka	0.7 %
Maximal effekt	350 W

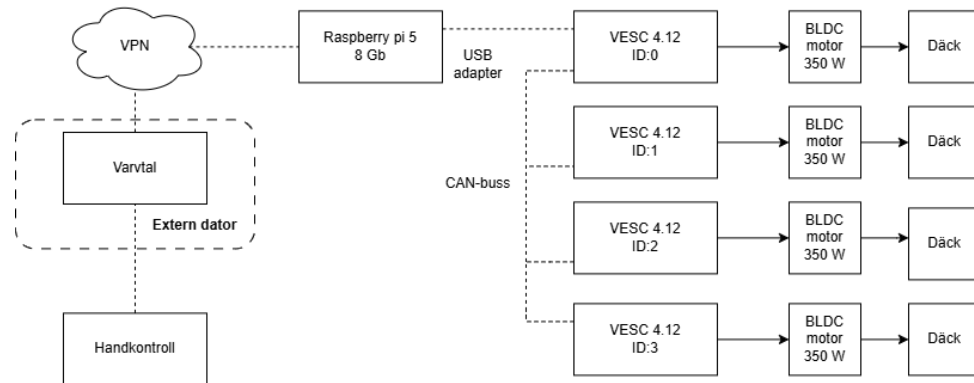
För att undersöka om kommunikationen via CAN-buss fungerade strömsattes de bakre VESC-modulerna och kablarna för CAN monterades. Detta möjliggjorde konfiguration och ett simpelt test av motorn som ej var sammankopplad via USB utan endast kommunicerade via CAN-buss. Därefter sammankopplades alla motorerna via CAN-buss och gavs ett ID från 0 till 3 där höger bak agerar mästare och fick ID 0, se Figur 3.3. Ett problem som stöttes på var att det endast gick att köra en motor i taget från VESC Tool vilket innebar att första testet av körning för två motorer simultant skedde via programmering i C++ och Python.



Figur 3.3: Konfigurationen av VESC ID.

3.3.2 Implementation av kod

Strukturen för koden bygger på att skicka ett varvtal till en VESC-modul med ett visst ID via ett paket som modulen kan konvertera och få motorn att rotera. RPI:n använder en USB port för att kommunicera med VESC ID:0 och därmed låta kablarna för CAN-buss föra vidare signalen till resterande moduler, se Figur 3.4. Paketstrukturen är genererad av Google Gemini Pro [48] för att uppfylla kraven som VESC-modulen ställer och bygger på följande struktur.



Figur 3.4: Flödesschema som visar hur motorstyrningssystemet är uppbyggt.

RPI-servern tar emot ett paket som innehåller det givna varvtalet som handkontrollen angett och konverterar det till ett hexadecimalt format. VESC-modulen vill ha varvtalet som ett 32-bitars tal så det delas upp i 4 bytes. Strukturen kräver även ett start och slut byte för att säkerställa att modulen vet när ett meddelande börjar och slutar. Det krävs även ett extra byte som beskriver att det är en förändring i varvtal som ska göras samt två bytes som kontrollerar att ingen data har blivit förstörd på vägen. Detta ger det slutgiltiga paketet som funktionen `buildDirectRPM` skickar vid exempelvis 1000 RPM till VESC ID:0:

$$[\underbrace{02}_{\text{Start Byte}}, \underbrace{05}_{\text{Längd av data}}, \underbrace{08}_{\text{Data (RPM)}}, \underbrace{00,00,03,E8}_{\text{Data (1000)}}, \underbrace{AB,CD}_{\text{Kontroll av data}}, \underbrace{03}_{\text{Slut Byte}}]$$

Funktionen `buildCANForwardRPM` bygger på samma logik men med ett byte som informerar att datan ska skickas vidare via CAN-buss (CAN-Forward) samt ett byte med det ID som datan ska skickas till. Detta ökar antalet data-bytes till sju vilket ger följande paket vid 1000 RPM skickat till VESC ID:1.

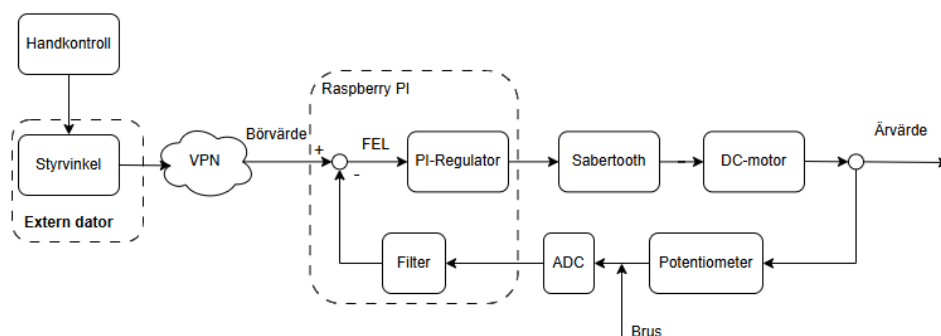
$$[\underbrace{02}_{\text{Start Byte}}, \underbrace{07}_{\text{Längd av data}}, \underbrace{22}_{\text{CAN-Forward}}, \underbrace{01}_{\text{VESC ID}}, \underbrace{08}_{\text{Data (RPM)}}, \underbrace{00,00,03,E8}_{\text{Data (1000)}}, \underbrace{AB,CD}_{\text{Kontroll av data}}, \underbrace{03}_{\text{Slut Byte}}]$$

Programmet har även flertalet nödstopp inbyggda där det skickas en avstängnings-signal om kontakten skulle tappas eller programmet skulle krascha, för att säkerställa att motorerna inte fortsätter snurra. Paketerna och koden läggs i ett bibliotek som sedan importeras till huvudprogrammet där servern körs och skapar kopplingen mellan handkontrollen och motorstyrningen.

Fyrhjulsdrift valdes eftersom det ger bra köregenskaper vid ojämn terräng och är mindre beräkningskraftigt eftersom man kan skicka samma signal till alla olika ID:n [50]. Det upptäcktes att BLDC motorerna var svårstartade vid belastning, vilket fyrhjulsdrift motverkar genom att alla motorer arbetar simultant. Varvtalet styrs av en handkontroll där de noterbara funktionerna är vänster och höger avtryckare, som ger möjligheten till varierbart gaspådrag åt båda hållen och därmed ökar manövreringsförmågan, se Tabell 3.2. Funktionen testades först i luften för att minimera risken för olyckor, vilket ett maximalt varvtal på 3000 RPM valdes för att säkerställa att motorerna inte konsumerade för mycket ström samt att hastigheten ansågs passande för användningsområdet.

3.4 Styrning

Styrsystemet är uppbyggt enligt Figur 3.5. Det består av en RPI som tar emot en styrvinkel från handkontrollen samt det återkopplade värdet från potentiometern för att genom en PI-regulator skicka en PWM signal till Sabertooth-modulen som styr DC-motorn. Avsnittet behandlar metodiken kring tester av komponenter, implementering av regulatorn samt strukturen för programmeringskoden.



Figur 3.5: Flödesdiagram på det återkopplade styrsystemet.

3.4.1 Test av Sabertooth-modul

Styrningen testades genom att först strömförsörja Sabertooth-modulen och ansluta en dator med DEDscribe via USB för att undersöka om modulen fungerade. Därefter konfigurerades DIP-switcharna genom verktyget 'USB Sabertooth DIP switch wizard', där ett antal frågor kunde besvaras utifrån vilket användningsområde drivsteget skulle nyttjas, se Tabell 3.4 [51]. Eftersom en RPI skulle användas till kontroll av motorerna underlättade det att implementera styrningen i samma program, vilket innebar att radiostyrning var bäst lämpat. Linjär styrning valdes också eftersom PI-regulatorn annars hade påverkats negativt samt att ett lågspänningskydd implementerades som stänger av modulen om batteriets spänning skulle bli för låg.

Tabell 3.4: Tabell som visar vilken konfiguration som används.

DIP Switch	1	2	2	4	5	6
Värde	Off	On	Off	Off	On	On

3.4.2 Test av potentiometer och ADC

För att veta vilken position styrvinkeln befinner sig i behövdes först ett test av potentiometern för att verifiera funktionaliteten. Detta gjordes genom en koppling av plus, minus, SDA och SCL kablarna mellan GPIO pinnarna på RPI:n och ADC:n som därefter var kopplad till potentiometern på styraxeln. För att praktiskt implementera kommunikationen på RPI:n användes Python-biblioteket `smbus2`. Detta möjliggör interaktion med I2C-bussen som adresserades som I2C-buss 1 med hexadecimala nätverksadressen `0x50`. För att kontinuerligt övervaka potentiometerens utslag, och därmed hjulens styrvinkel, skapades funktionen `read_adc` som tar emot datan med en frekvens på 40 Hz.

Eftersom ADC:n har en noggrannhet på 12 bitar överskrider mätvärdet kapaciteten för en enskild databyte (8 bitar). Därför behöver systemet två på varandra följande bytes från modulen via den inbyggda funktionen `i2c_msg.read` i `smbus2` biblioteket. Eftersom RPI:n behöver tolka datan som ett enda heltal rekonstrueras värdet i mjukvaran med hjälp av bitvis vänsterskiftning samt en eller-operation (`data[0] << 8 | data[1]`). Genom att manuellt svänga hjulen kunde de maximala värdena för vänster- och högersväng identifieras och presenteras i Tabell 3.5.

Tabell 3.5: Tabell som visar potentiometerens värde vid olika styrutslag.

Riktning	Värde
Vänster	1100
Höger	430
Centrerad	702

3.4.3 Lågpassfilter

Eftersom potentiometern riskerar att utsättas för mätbrus implementerades ett lågpassfilter för att motverka att brusets påverkade PI-regulatorn. Lågpassfiltret är av typen exponentiell utjämning, enligt

$$\text{current_adc} = \alpha \cdot \text{raw_adc} + (1 - \alpha) \cdot \text{old_adc}, \quad (3.2)$$

där det nya uppmätta värdet (`raw_adc`) viktas mot de förgående (`old_adc`) för att minska eventuellt brus, men försämrar förmågan att reagera på stora skillnader. Ett dödband implementerades också som godkänd tolerans av felet för att undvika konstant reglering och därmed minska ansträngningen på DC-motorn.

Tabell 3.6: Tabell med värden för styrning.

Variabel	Värde
α	0,33
Dödband	20

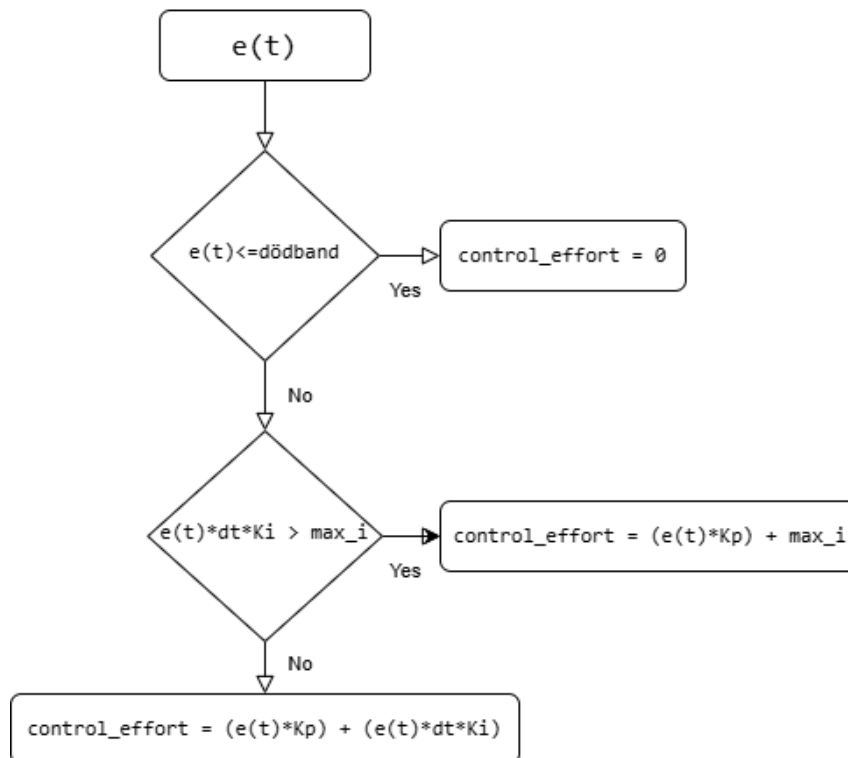
3.4.4 PI-regulator

PI-regulatorn implementerades i koden för att skicka en lämplig signal till motor-drivsteget, oberoende av var styrningen befinner sig eller vilket värde styrningen ska uppnå, se Figur 3.6. I varje iteration av loopen beräknas reglerfelet $e(t)$, som differensen mellan det inkommande börvärdet (`target_adc`) och det filtrerade ärvärdet från potentiometern (`current_adc`). Precis som motorstyrningen bestämmer handkontrollen vilket börvärde styrningen ska ha, men genom förändring av vänster styrspek istället, se Tabell 3.2. Spaken har möjlighet att styra insignalen mellan styrningens maximala och minimala värde samt när styrspeken släpps återgår styrningen till mitten i samband med att spaken automatiskt centrerar sig själv. Den proportionella delen av styrsignalen (`control_effort`) beräknas genom multiplikation mellan den proportionella konstanten $K_p = 0.010$ och $e(t)$. Detta utgör grunden i regleringen och ger en styrsignal som är direkt proportionell mot felet.

Reglersystemets integrerande del behandlar det kvarstående stationära felet som uppkommer när felet närmar sig noll och styrsignalen blir för svag för att övervinna den statiska friktionen, som uppkommer i mekaniska system vid små förändringar. Den integrerande konstanten $K_i = 0.4$ introducerades samt ett maximalt värde $max_i = 30\%$ som den integrerande delen kan påverka systemet. Integratorn ackumulerar felet över tid ($e(t) \cdot \Delta t$) och bygger successivt upp kraft för att övervinna friktionen och förändra styrningen. För att förhindra 'Integral Windup', där integratorn bygger upp ett ohållbart högt värde som skulle få systemet att överskjuta används max_i som begränsar den integrerande verkan samt att det ackumulerande felet nollställs när felet befinner sig inom dödbandet.

3.4.5 PWM-konvertering

Den slutgiltiga signalen från regulatorn normaliseras i ett intervall mellan $[-1.0, 1.0]$ och för att Sabertooth-drivsteget ska kunna tolka värdet måste det konverteras till en PWM signal med pulslängder mellan $1000 \mu s$ och $2000 \mu s$. Genom att konfigurera modulationsfrekvensen till 333 Hz skapas en periodtid på ca $3000 \mu s$ som sedan mappas till en pulskvot mellan 35 % och 65 % genom funktionen `control_to_pwm`. Detta innebär att ett värde på 0 motsvarar en pulskvot på 50 % ($1500 \mu s$), medan 35 % och 65 % ger $1050 \mu s$ och $1950 \mu s$ som utgör maximal styrning. Detta sammankopplar regulatorns digitala beräkningar med exakta pulslängder som hårdvaran kan agera på.



Figur 3.6: Flödesdiagram över PI-regulatorn.

3.5 LiDAR implementation

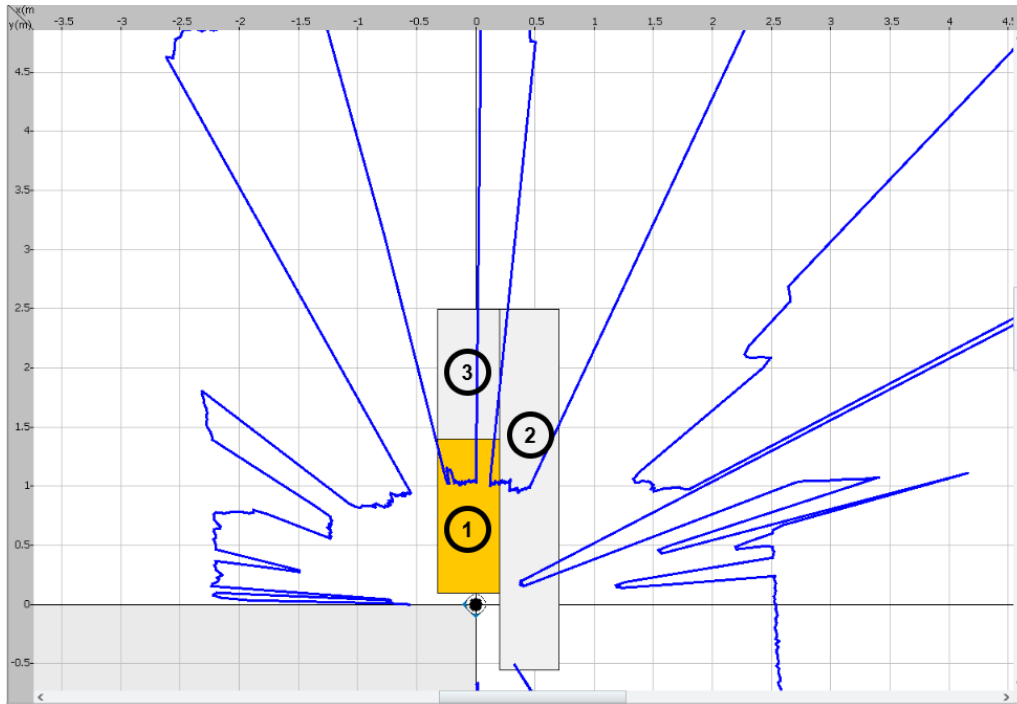
För detta kandidatarbete valde gruppen att avgränsa systemet genom att använda två av de fyra tillgängliga LiDAR-sensorerna. Huvudfokus låg på att implementera och utvärdera sensorernas förmåga att undvika objekt när bilen manövreras i autonomt läge. Autonomt läge inom ramarna för detta projekt innebär att operatören fortfarande har kontroll över hastighet och styrning men skulle oförutsägbara objekt dyka upp väjer bilen för dessa. Följande avsnitt beskriver tillvägagångssättet och implementationen av detta system.

3.5.1 LiDAR konfiguration

För att konfigurera sensorerna för deras avsedda ändamål anslöts de till en extern dator med SICK:s egenutvecklade programvara SOPAS Engineering Tool (SOPAS ET) [52]. Kommunikationen upprättades via en Ethernet-till-USB-adapter, eftersom LiDAR-sensorerna skickar och tar emot data över Ethernet. Programvaran identifierar automatiskt vilken typ av sensor som är ansluten och anpassar gränssnittet därefter.

För att RPI:n effektivt ska kunna tolka LiDAR-datan skapades fördefinierade gränser direkt i sensorernas mjukvara, vilka sedan laddades upp till enheterna. Dessa gränser definieras i ett koordinatsystem och består av zoner som konfigureras så

att sensorn skickar en signal när ett objekt befinner sig inom det aktuella området. Eftersom de två LiDAR-sensorerna som användes är placerade fram på bilen, konfigurerades de för att täcka varsin halva av fordonets bredd. För respektive sensor definierades tre rektangulära zoner, se Figur 3.7.



Figur 3.7: LiDAR konfiguration för den högra LiDAR:n. Blåa linjerna representerar avståndet från LiDAR-sensorns synfält.

- Zon 1 (Nödstopp): Övervakar området direkt framför bilen upp till ett avstånd på 1,4 m. Detta område fungerar som ett säkerhetssystem för att nödstoppa fordonet om ett objekt kommer för nära. Avståndet på 1,4 m är baserat på den tid det tar från det att fordonet rullar i maxhastighet tills dess att det har stannat helt.
- Zon 2 (Sidoövervakning): Övervakar områdena till höger och vänster om fordonet. Den vänstra LiDAR-sensorn täcker området till vänster, och den högra täcker området till höger. Denna zon används för att beräkna åt vilket håll fordonet ska väja om ett hinder upptäcks framför bilen. Bredden på denna zon sattes till 0,5 m, vilket optimerades genom fälttester.
- Zon 3 (Undanmanöver): Övervakar området framför Zon 1, upp till ett avstånd på 2,5 m. Denna zon agerar som en tidig varning, om ett objekt detekteras här initierar fordonet en undanmanöver baserat på den fria ytan som registreras i Zon 2.

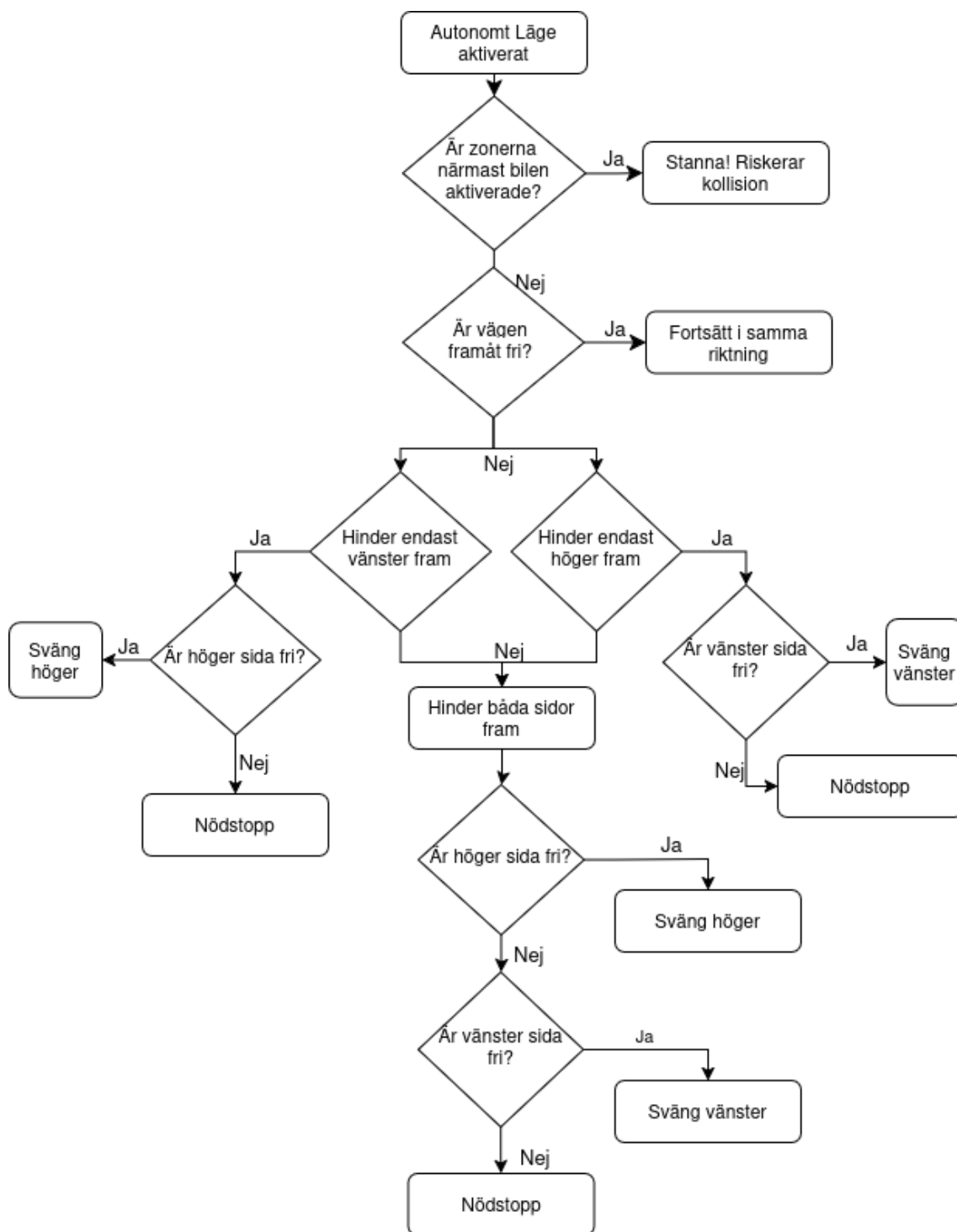
Utöver zonernas geometriska gränser konfigurerades även systemets känslighet i programvaran. Den minsta detekterbara objektstorleken sattes till 30 mm för samtliga

Tabell 3.8: Förklaring av datasegmenten i LiDAR-sensorns data telegram [53].

Datasegment	Värde i exemplet	Beskrivning
Kommando	sRA	Står för Read Answer. Berättar att detta är ett svar från sensorn på en förfrågan.
Variabelnamn	LIDoutputstate	Namnet på den specifika variabel som läses av (i detta fall status för konfigurerade zoner).
Enhetsstatus	1 30B562BD	Hexadecimala och decimala värden som beskriver sensorns interna tillstånd (används ej för styrningen).
Zon-status (Utgångar)	1 0 eller 0 0	Binära värden som indikerar om ett objekt har detekterats i en specifik zon. Första värdet berättar om den detekterat något (1 = detektion, 0 = fritt) och andra värdet, i detta fall 0, berättar hur många gånger zonen varit aktiv. 2 0 indikerar att det är en utgång som inte är konfigurerad

De värden i telegrammet som är av intresse för att avgöra om bilen ska väja är värdena i textordningen 5, 7 och 9. Dessa utgör de ut signaler som indikerar huruvida ett objekt befinner sig inom något av de respektive områden som konfigurerats, där utgång 5 representerar zon 1, 7 zon 2 och 9 zon 3. Värdet 0 betyder att området är fritt och att inga åtgärder behöver vidtas. Om värdet istället är 1 innebär det att zonen är aktiv och att ett föremål befinner sig inom dess gränser.

För att systemet ska kunna agera utifrån det mottagna telegrammet implementerades en serie logiska villkorssatser i programmet. Dessa har som uppgift att kontinuerligt utvärdera zonernas status för att avgöra när bilen ska svänga, åt vilket håll samt den nya styrvinkeln. Logiken bakom dessa logiska villkorssatser illustreras i Figur 3.8.



Figur 3.8: Flödesdiagram över den autonoma styrningen.

Programmet skrevs så att operatören har full kontroll över manövreringen av fordonet tills dess att ett objekt befinner sig inom sensorernas räckvidd. Skulle de logiska villkorsatserna aktiveras överskrivs UDP-kommunikationen och styrvinkeln uppdateras till ett förprogrammerat värde som kommer att undvika kollision. Efter att objektet är utom kollisionsrisk kommer bilen att återgå till sitt centrumvärde och UDP-kommunikationen från operatören upprättas på nytt. Skulle fordonet befinna

sig i en situation där nödstopp aktiveras kommer fordonet inte kunna manövreras i det autonoma läget av säkerhetsskäl. Detta tills dess att objektet flyttats eller autonomt läge inaktiverats.

3.6 Användning av AI

I detta kandidatarbete har AI-verktyget Google Gemini Pro använts som stöd för kodgenerering och informationshämtning rörande specifika komponenter och delsystem. Den genererade koden har använts som en grund för vidareutveckling och har systematiskt integrerats i fordonets mjukvara. I arbetet med att få de olika delsystemen att kommunicera med varandra har verktyget fungerat som ett stöd för att lösa dessa utmaningar.

All kod som genererats har granskats, testats samt i vissa fall modifierats av projektgruppen för att säkerställa att det fungerar för ändamålet. För att öka gruppens förståelse för komplexa kodstycken har verktyget även använts för att generera förklarande kommentarer, vilka därefter har anpassats av gruppen.

Utöver kodutveckling har Google Gemini Pro, i kombination med teknisk dokumentation, använts för felsökning och konfiguration i programvaror såsom VESC Tool och SOPAS.

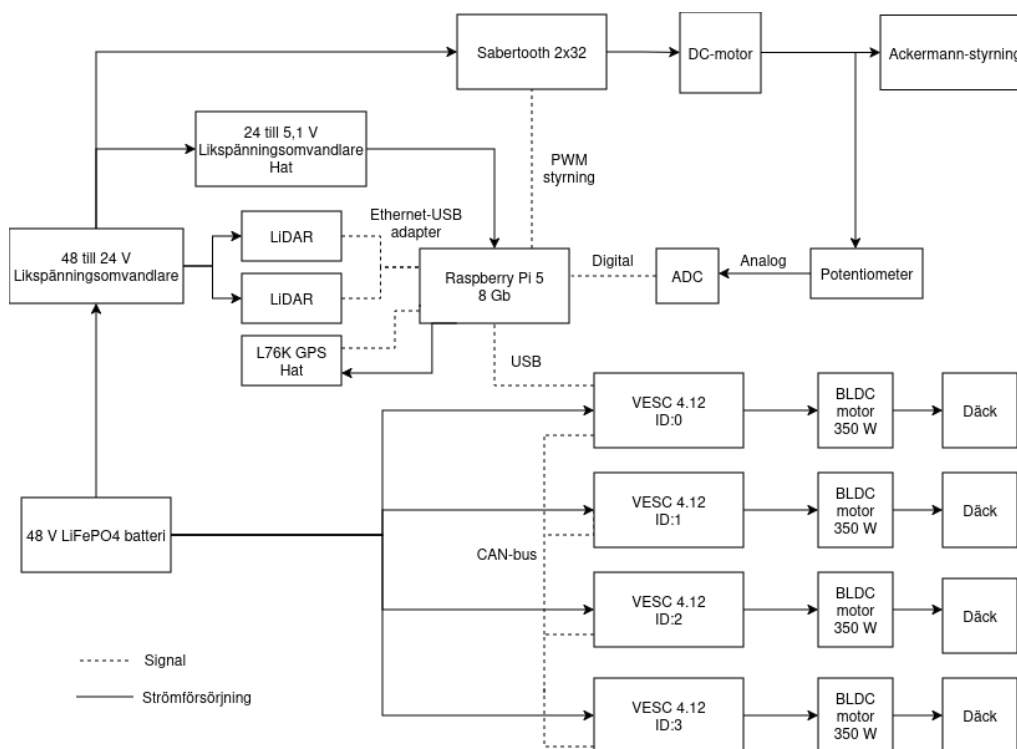
4

Resultat

Det slutgiltiga resultatet av projektet är en fungerande fordonsprototyp som kan manövreras trådlöst över UDP, kombinerat med ett semiautonmt system för kollisionundvikande. Nedan redovisas resultaten för varje enskilt delsystem kopplat till metod och genomförande.

4.1 Fordonets uppbyggnad

En överblick över det resulterande systemet ses i Figur 4.2.



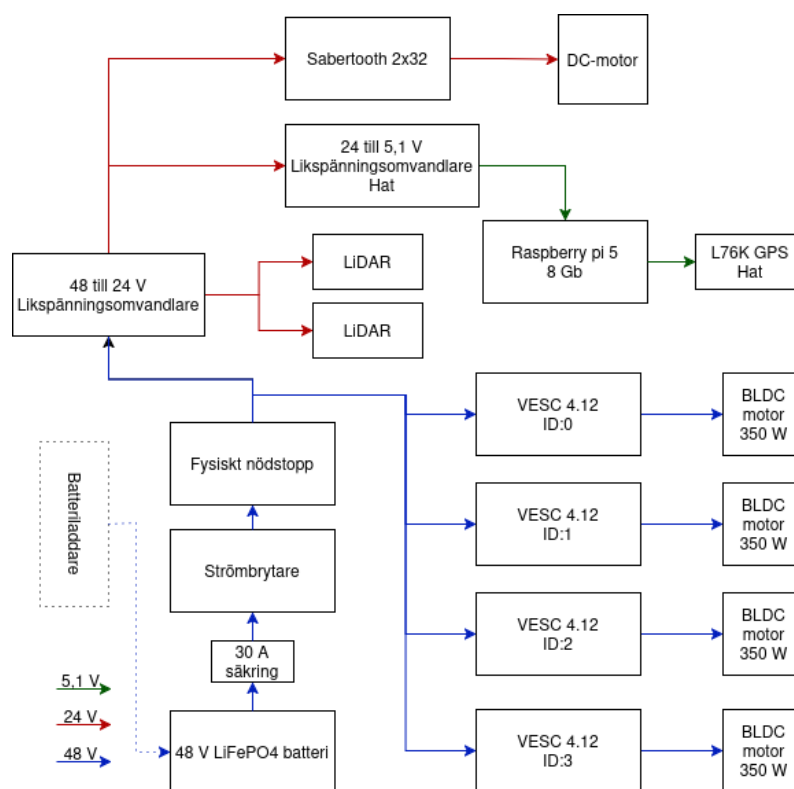
Figur 4.1: Figuren visar en övergripande bild över systemet, inkluderat signaler och strömförsörjning.

Följande sammanfattning följer från förklaringar ur kapitel 2 samt 3, se enskilda avsnitt för detaljer. Systemet kontrolleras via en RPI. Drivlinan består av fyra BLDC motorer av outrunner-typ som styrs av varsin VESC. VESC med ID:0 erhåller styrsignaler som i sin tur vidarebefordrar dessa till de övriga tre via CAN-busskommunikation. Fordonet ändrar riktning med en DC-motor som styrs via

PWM från en Sabertooth-modul. Då DC-motorn ger utslag ändras styrvinkeln och en potentiometer mäter detta som en spänning. Spänningen omvandlas till en digital signal via en ADC som RPI:n kan tolka som ett värde för styrvinkeln. Identifiering av hinder i färdvägen, som i sin tur kan påverka eller avbryta signaler till drivlinan, sker med hjälp av två LiDAR-sensorer. Fordonets position bestäms med en GPS-modul. Strömförsörjningen sker vid tre olika spänningsnivåer, där basen utgörs av ett 48 V LiFePO₄-batteri. En likspänningsomvandlare (MEAN WELL) reducerar spänningen till 24 V, och en likspänningsomvandlare (PowerHat) vidare till från 24 till 5,1 V för RPI:n.

4.2 Elsystem och förbrukning

Den slutgiltiga implementationen av elsystemet ses i Figur 4.2.



Figur 4.2: Figuren visar en övergripande bild över elsystemet, inkluderat de olika spänningsnivåerna 48, 24 respektive 5,1 V.

Ström-/effektförbrukningen mättes för motorerna, se värden enligt Tabell 4.1. För BLDC-motorer mättes förbrukningen för en motor i VESC Tool under 10 s. Fordonet positionerades på plan mark och accelererade från stillastående till maximal hastighet och bibehöll hastigheten under hela händelseförloppet.

Tabell 4.1: Uppmätt effekt/strömförbrukning för respektive motor. Spänning U för BLDC-motor hjul motsvarar spänningen på batteriet. Notera strömmar $I^{52,4}$ tar hänsyn till aktuellt spänning.

Komponent	U [V]	$\frac{P_{avg}}{enhet}$ [W]	$\frac{P_{max}}{enhet}$ [W]	Antal [st]	P_{avg} [W]	P_{max} [W]	$I_{avg}^{52,4V}$ [A]	$I_{max}^{52,4V}$ [A]
BLDC-motor hjul	52,4	21	59,7	4	84	238,8	1,6	4,6
DC-motor styrning	24,2	51,4	228,4	1	51,4	228,4	1	4,4
Totalt	–	–	–	–	135,4	467,2	2,6	9

Styrningens förbrukning uppmättes från Sabertooth-modulen under ett 140 s långt intervall. Under händelseförloppet genomförde bilen sju större svängar motsvarande 90° svängar. Utöver detta genomfördes mindre korrigeringar under tiden fordonet körde rakt fram.

Utifrån den uppmätta totala genomsnittliga strömmen $(I_{avg}^{52,4V})_{sum}$ summerad med I_{avg}^{48V} för LiDAR-sensorer samt RPI från Tabell 3.1 fås urladdningstiden $t_{urladd} = 8,2$ h.

4.3 Trådlös kommunikation

Den trådlösa kommunikationen resulterade i ett system som snabbt kan överföra data över längre avstånd med hjälp av en VPN-uppkoppling. Kravet för att kommunikationen ska fungera är att fordonet och den styrande enheten båda är uppkopplade mot ett nätverk samt att Tailscale är konfigurerat på respektive enhet. Genom att starta bilen samt programmet `PC_controller.py` på den styrande enheten upprättas två parallella UDP-strömmar mellan enheterna: en för styrning och en annan för överföring av GPS-data.

4.3.1 Trådlös styrning

Iterering av den trådlösa styrningen gjordes för att fastställa optimal funktion. De tre metoder som testades var ett Flask-API med styrning via handkontroll, ett Flask-API med ett interaktivt webbgränssnitt, samt UDP-kommunikation via handkontroll. Samtliga metoder prövades genom fälttester och utvärderades utifrån följande kriterier:

- Kommunikations hastighet
- Säkerhet
- Användarvänlighet

Det som vägde tyngst vid utvärderingen var kommunikationshastigheten, då låg fördröjning är ett strikt krav för att kunna manövrera bilen manuellt på ett säkert sätt och ökar användarvänligheten. Tabell 4.2 sammanfattar för- och nackdelarna med de testade systemen.

Tabell 4.2: För- och nackdelar med de kommunikationssystem som utvärderades under projektet.

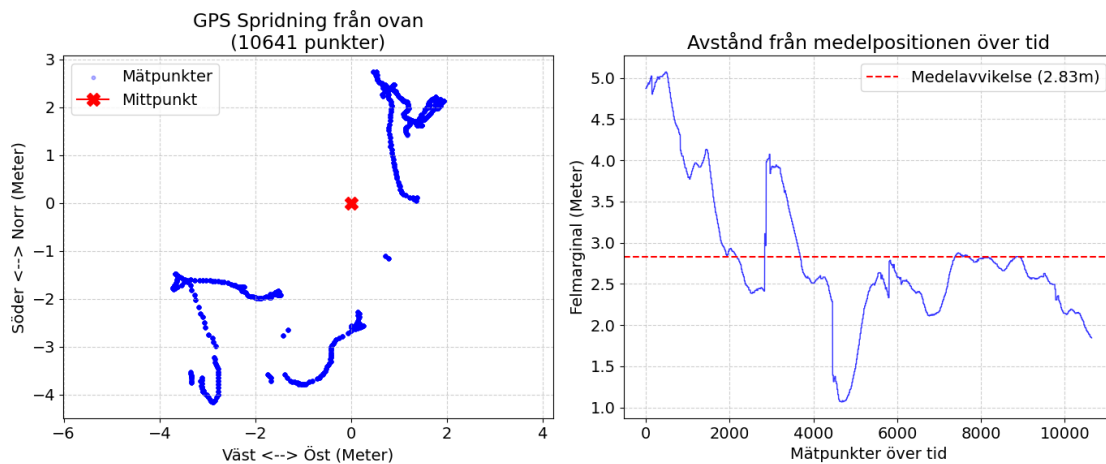
Testat system	Fördelar	Nackdelar
Flask-API med handkontroll	Enkelt att implementera och felsöka. Använder välbeprövade principer för dataöverföring. Får respons från bilen vilket ökar säkerheten då garanti på leverans fastställs.	Hög fördröjning på grund av data bekräftelse. Blockerade handkontrollens signaler i väntan på svar. Resulterade i märkbar fördröjning.
Flask-API med webbgränssnitt	Webb-baserad vilket innebär att fordonet kunde styras från valfri smartphone eller dator utan extra mjukvara. Lätt att implementera flertalet funktioner.	Avsaknaden av fysisk feedback vilket försämrade körupplevelsen. Risk att webbläsaren överbelastade servern vid snabba och många rörelser. Hög fördröjning då systemet bygger på FLASK-API.
UDP-kommunikation med handkontroll	Minimal fördröjning tack vare att informationen enbart flödar åt ena hållet. Väl optimerat för realtidsstyrning med fysiska spakar. Liten fördröjning och fysisk feedback då handkontroll används.	Saknar inbyggd leveransgaranti vilket försämrar säkerheten något. Protokollet är i grunden okrypterat men med hjälp av VPN blir datan krypterad.

Den slutgiltiga lösningen av kommunikationssystemet baserades på praktiska fälttester. Dessa visade att den valda UDP-lösningen erbjöd den stabilitet och omedelbara respons som behövs för manuell manövrering.

4.3.2 GPS

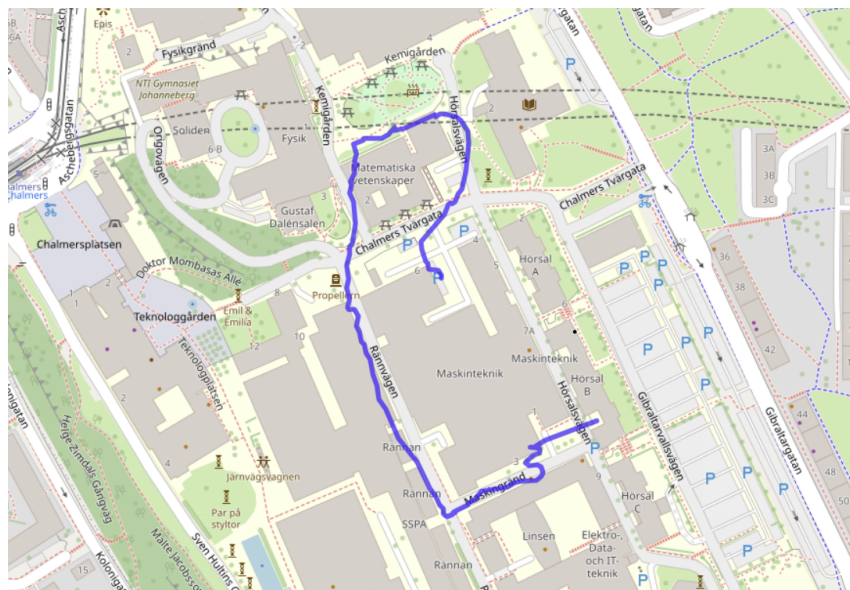
Det implementerade GPS-systemet använder UDP-kommunikation för att överföra positionsdata från fordonet till den styrande enheten. Beslutet att tillämpa UDP baserades på den utvärdering av kommunikationssätt som presenteras i avsnitt 4.3.1, där UDP-kommunikationens låga fördröjning var ett måste för kontrollerad körning. Integrationen av data direkt mot OpenStreetMap gav en tydlig visuell representation av bilens position.

Systemets noggrannhet utvärderades fysiskt genom ett fälttest. Fordonet placerades stillastående utomhus, varpå GPS-modulens mätvärden loggades kontinuerligt under 10 minuter. När testet genomfördes var det optimala värdeförhållanden, vilket innebär klarblå himmel. Detta gav i teorin fler satellituppkopplingar och bättre noggrannhet för det genomförda testet. För att utvärdera noggrannheten prövande förhållanden placerades fordonet på en öppen yta omringad av höga byggnader i campusmiljö. Detta för att testa GPS-modulens noggrannhet i stadsmiljö nära byggnader, se Figur A.1 i appendix. Som illustreras i Figur 4.3 gav detta upphov till en lista av mätpunkter, där den maximala avvikelsen från mittpunkten uppmättes till 5,07 m och den genomsnittliga avvikelsen till 2,83 m. Mittpunkten i detta test är den genomsnittliga positionen av de 10641 insamlade data punkterna. Dessa beräkningar gjordes med hjälp av Haversine-formeln som är presenterad i avsnitt 2.5.3 ekvation 2.5.



Figur 4.3: GPS mätning under ca 10 minuter där 10641 datapunkter samlades in då bilen var i stillastående läge.

Ytterligare ett test som var aktuellt för detta projekt var att registrera körningen under en längre sträcka, se Figur 4.4. Vid detta test blev det tydligt att ju närmre byggnader bilen befann sig desto sämre blev mätnoggrannheten.



Figur 4.4: GPS signal under en registrerad körsträcka.

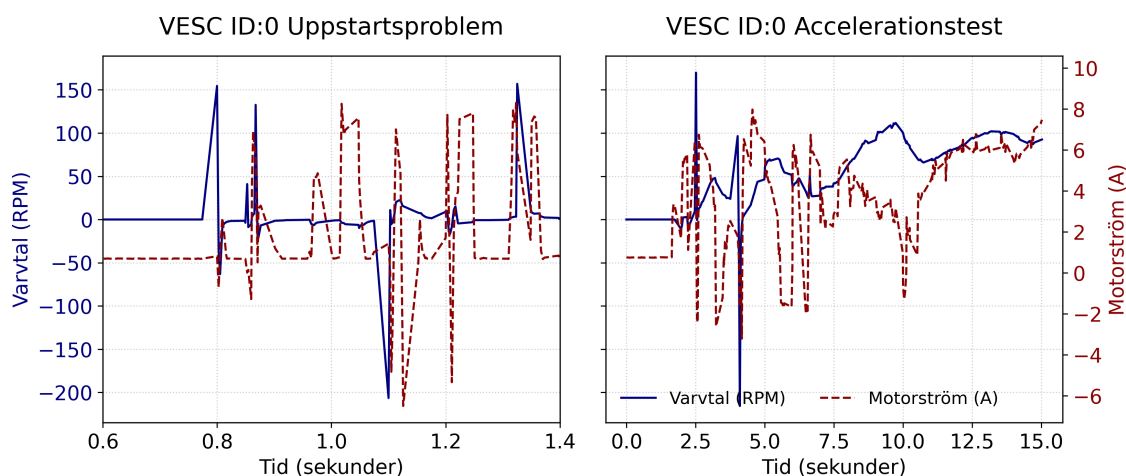
4.4 Elektriska motorer

Tester av drivlinan visade att fordonet framgångsrikt kunde manövreras både framåt och bakåt via handkontrollen. Systemet uppvisade en låg fördröjning upplevt till 0,2 sekunder från insignal till motorrespons och reagerade konsekvent på snabba signalförändringar. Vidare bekräftades att CAN-buskommunikationen fungerade genom att samtliga fyra hjul roterade synkront trots att endast VESC-modul ID:0

var fysiskt kopplad till RPI:n.

Vid start från stillastående uppmättes dock ett avvikande beteende. Motorerna vibrerade stationärt i ca 0,5 sekunder innan framdrivning påbörjades för att sedan rotera stabilt när fordonet är i rullning. Detta fenomen illustreras i Figur 4.5, där mätningarna visar hur strömförbrukningen ökar medan varvtalet förblir lågt, för att därefter stabiliseras när varvtalet har ökat och motorerna övervinner startmotståndet, se Figur 4.5. fordonet maximala hastighet uppmättes till ca 1,2 m/s på plan mark.

I Figur 4.5 redovisas det beräknade mekaniska varvtalet (RPM) jämfört med strömtaget. Då motorns exakta poltal var okänt, konverterades VESC-modulens ursprungliga ERPM-data till RPM genom ett antaget värde på 14 polpar. Konverteringsfaktorn valdes då den resulterade i ett maximalt teoretiskt varvtal som överensstämmer med fordonets fysiskt uppmätta maxhastighet.



Figur 4.5: Figur som visar data uthämtad från VESC-modul ID:0 under två test av acceleration från uppstart.

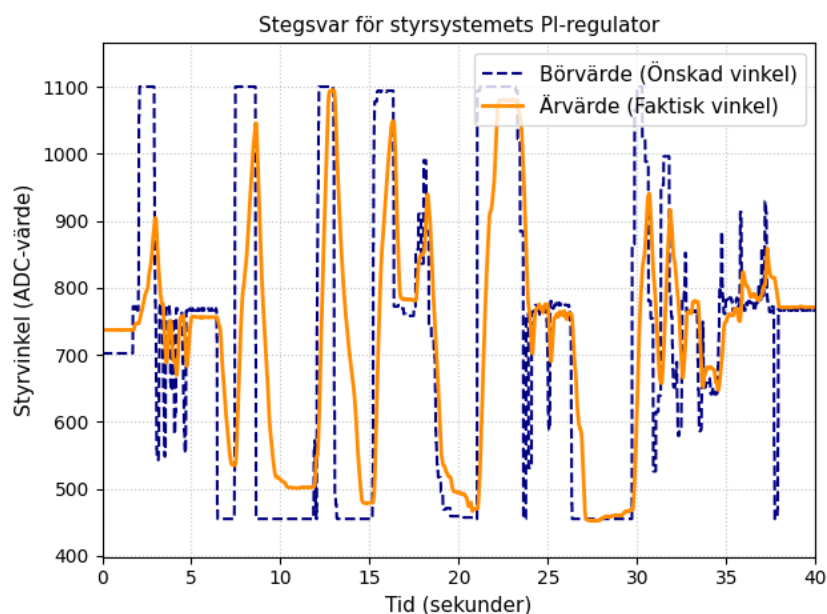
Vid körning i stark lutning dokumenterades ytterligare köregenskaper. Vid start i brant uppförsbacke hade systemet betydande svårigheter att sätta fordonet i rullning från stillastående. I branta nedförsbackar ($\sim 15^\circ$) observerades i stället att motorernas motorbromsning inte var tillräcklig för att stoppa fordonet. fordonet testades även på olika underlag som asfalt, gräs, grus och kullersten. Problem uppstod endast i djupt grus då däcken tappade fäste och behövde bogseras ut.

4.5 Styrning

Tester av de reglerade styrsystemet bekräftade att framhjulen pålitligt kunde styras i båda riktningarna via signaler från handkontrollen. Systemet uppvisade låg fördröjning mellan förändring i börvärde och fysisk respons i styrmekniken samt

att den automatiska centreringsfunktionen, som centrerar styrningen när styrspaken släpps fungerar enligt design. Vid test av maximalt styrutslag, applicerat enligt gränsvärdena i Tabell 3.5, uppmättes fordonets svängradie till cirka 1,85 m åt båda håll.

I Figur 4.6 redovisades styrsystemets reglersystem under en testcykel bestående av flera svängningar där fordonet sakta kör framåt. Mätdata visar att regulatorn styr ärvärdet mot börvärdet och att felet stabiliseras och stannar inom det definierade dödbandet (± 20 enheter) i slutet av svängen. Låg fördröjning innebär en acceptabel stigtid samt att systemet kan hantera svängar åt båda hållen utan besvär.

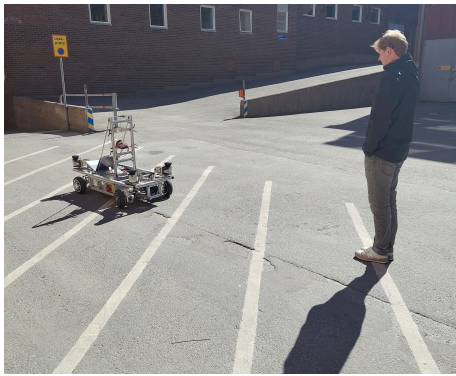


Figur 4.6: Figur som visar hur reglersystemet reagerar på börvärdesändringar.

Vid fälttesterna dokumenterades även en fysisk rörelsebegränsning i styrmekanismen, under test från fullständigt stillastående hade styrsystemet svårigheter att nå ut till extremvärdena. Denna begränsning gällde endast då fordonet är stillastående.

4.6 LiDAR

LiDAR-integrationen i systemet resulterade i ett semiautonomt system som kan undvika objekt under manuell styrning. Programvaran för detta system implementerades med försiktighet då eventuella fel i koden hade resulterat i okontrollerbar körning. Systemet testades under flertalet vanligt förekommande situationer, däribland då en person stod utplacerad på en öppen plats utan övriga hinder. Fordonet kördes mot personen och vände åt höger då objektet registrerades i zon 3 hos den högra LiDAR sensorn. Figur 4.7 redovisar händelseförloppet och Figur 3.7 visar definition av zoner.



(a) Fordonet väjer till höger då objektet registreras i zon 3 hos den högra LiDAR-sensorn.



(b) Fordonet har väjt och passerar med objektet i zon 2.

Figur 4.7: Figuren visar händelseförloppet då fordonet framförs mot en person och väjer till höger.

Motsvarande test genomfördes för den vänstra LiDAR-sensorn med likvärdigt resultat. Flertalet test genomfördes mot varierande typer av objekt såsom ytterväggar, staket och träd med resultatet att fordonet väjde för att undvika hindret.

För att kontrollera funktionen av zon 1, tillika nödstopp-zonen, genomfördes motsvarande test med objektet rakt framför fordonet inom 1,4 m. Samtliga test gav tillfredsställande resultat då fordonet stannade innan objektet och kunde inte fortsätta framföras förrän objektet eller fordonet förflyttats.

Resultaten är återigen ett konceptbevis på att helt autonom körning i framtiden är möjlig.

5

Diskussion

Projektet har uppnått uppsatta mål. Elsystem har genomgått uppgraderingar och omfattande designändringar. Grundläggande funktioner som framdrivning och styrning har återupprättats. Även sensorer som LiDAR och GPS har integrerats och funktionstestat som ett konceptbevis för fullständigt autonom körning i framtiden. Fordonets funktion och processen har dokumenterats i detalj, i syfte att underlätta vidare arbete.

5.1 Elsystem

Elsystemets funktion visade sig fungera väl för fordonet. Motorer, sensorer och styrsystem har god förmåga att vidareutvecklas utifrån elsystemets design. Batteriet är överdimensionerat för det nuvarande systemet och klarar vidareutveckling och förbrukning. Systemet har vissa flaskhalsar gällande utbyggnad, som kabeltvärsnitt, säkring och likspänningsomvandlare (MEAN WELL).

Batterikapaciteten visade sig räcka med god marginal. Med den informationen om genomsnittlig förbrukning som finns tillgänglig så visade sig kapaciteten ge en hög urladdningstid $t_{urladd} = 8,2$ h, vilket i sin tur ger mycket god uthållighet för fordonet. Kapaciteten bedöms vara tillräcklig för vidare utveckling och utbyggnad av fordonet med fler tillhörande system. Batterikapaciteten bör även vara tillräcklig för att kunna agera som ett portabelt batteri för exempelvis en drönare.

En aspekt som fortfarande är något oklar är strömmen som respektive BLDC förbrukar under drift. Genomsnittlig- respektive maximal ström för samtliga motorer uppskattades i tabell 3.1 till 12,0 A respektive 29,2 A, jämfört med uppmätt 1,6 A respektive 4,6 A i tabell 4.1. Mätningen ger en något skev bild av den genomsnittliga förbrukningen, eftersom den enbart mättes för en av de fyra motorerna. Värdet antar därmed att strömförbrukningen är identisk för samtliga motorer, vilket är något idealiserat. Mätningen skedde även under ett mindre tidsintervall, begränsat av VESC Tool. Att mäta ström (effekt) under ett längre tidsintervall i varierande lutningar och miljöer hade gett en ärligare bild över förbrukningen. Vad som däremot kunde urskiljas tydligt var att strömmen var lägre än förväntat och det finns marginal för att höja den, om högre hastigheter vore eftertraktade i framtiden.

I kontrast till BLDC-motorerna förbrukade DC-motorn för styrning mer än förväntat. Genomsnittlig- respektive maximal ström i tabell 3.1 uppskattades till 1,0

A respektive 2, 5 A, jämfört med uppmätt 1 A respektive 4, 4 A i tabell 4.1. Genomsnittlig strömförbrukning stämde väl överens med uppmätt. Då DEScribe inte var en begränsning kunde mätningen fortskrida under en längre tid jämfört med BLDC-motorerna. Den maximala effekten 228, 4 W inget problem relativt likspänningsomvandlarens (MEAN WELL) kapacitet, då 350 W överskrider detta med marginal. Tillsammans med LiDAR-sensorernas maximala förbrukning kan detta dock börja närma sig gränsen av kapaciteten hos likspänningsomvandlaren. Att införa någon typ av mjukstart-funktion för DC-motorn hade kunnat minska denna strömspik och skydda likspänningsomvandlaren från att riskera överbelastning.

5.2 Trådlös kommunikation och GPS

Den trådlösa dataöverföringen från operatör till fordon visade sig fungera mycket väl efter att UDP-kommunikation implementerats. Systemet lämpar sig väl för manuell styrning i stadsmiljö med god nätverkstäckning, där den minimala fördröjningen gör att systemet reagerar snabbt på styrkommandon. Även den parallella dataöverföringen av fordonets GPS-position fungerade på ett tillförlitligt sätt i dessa miljöer.

En begränsning i systemet som ännu inte utvärderats är systemets robusthet vid försämrade internetuppkoppling. Eftersom UDP-protokollet saknar inbyggd leveransgaranti återstår det att testa eventuell paketförlust och hur det påverkar manövreringen vid begränsad nätverksuppkoppling. Vid de fälttester som genomförts under goda nätverksförhållanden har detta dock inte utgjort något märkbart problem. För framtida användningsområden kommer dessutom den manuella styrningen vara av mindre betydelse, då målkoordinater kommer skickas och sedan sköts manövreringen lokalt på fordonets RPI. Detta innebär att kommunikationen inte kommer belastas på samma nivå som under den manuella styrningen.

Gällande det grafiska gränssnittet fungerade detta enligt förväntan och gav operatören en realtidsöverblick över fordonets rörelser med en viss felmarginal. Eftersom det huvudsakliga användningsområdet i dagsläget är manuell manövrering inom synhåll, agerar kartvyn för närvarande främst som ett konceptbevis. Framtida användningsområden för denna implementation är att kunna skicka koordinater via webbgränssnittet och få en återkoppling på var fordonet befinner sig. I vilken utsträckning GPS-modulens felmarginal kommer att påverka fordonets autonoma förmågor återstår dock att utvärdera för fortsatt utveckling.

5.3 Elektriska motorer

Som visades i Figur 4.5 upplevde motorerna kraftiga vibrationer vid uppstart från stillastående, där det går att urskilja hur mängden ström spikar utan någon motsvarande acceleration i varvtal. Detta beteende är karaktäristiskt för sensorlösa BLDC-motorer. Eftersom VESC-modulen saknade Hallsensordata vid 0 RPM kan den inte bestämma rotorns position och tvingas därför blint applicera kommutering vilket resulterar i strömspikar utan förändring i varvtal. Det räckte med att en motor sak-

nade sensorer för att försämra systemets startförmåga. Detta förklaras av däckets friktion mot marken. Då den sensorlösa motorn tvekar och vibrerar fungerar hjulet som en broms och tvingar övriga motorer att övervinna onormalt hög statisk friktion innan fordonet börjar rulla. Figur 4.5 visar hur motorn presterar över en längre tid och ca 2,5 sekunder in syns det hur varvtalet ökar och motorn roterar, något som hade skett direkt med samtliga fungerande Hall-sensorer.

Systemets begränsade initiala vridmoment gjorde backtagning till en betydande utmaning, då den statiska friktionen i kombination med motverkande tyngdkraft krävde ett högre startmoment än vad systemet förmådde leverera. Vid körning i kraftiga nedförsbackar observerades istället att motorernas regenerativa motorbromsning inte orkar stoppa fordonet som då fortsätter rulla. Utmaningar noterades även vid manövrering i djupt grus, där förlust av friktion ledde till hjulspinn som fick fordonet att gräva sig djupare snarare än att förflyttas framåt.

Trots den bristande startförmågan från stillastående visar resultaten sammantaget att den valda konfigurationen för motorstyrningen fungerar. Systemet kan manövrera fordonet utifrån trådlösa signaler med låg latens och god dynamisk respons när fordonet väl är i rörelse, vilket uppfyller projektets övergripande mål.

5.4 Styrning

Att styrsystemet initialt uppvisade svårigheter att nå fulla styrutslag vid stillastående är ett förväntat resultat av däckens höga statiska friktion mot underlaget. Styrsvot maximerade sitt strömuttag via Sabertooth-modulen, men vridmomentet var otillräckligt för att övervinna friktionen i däckens kontaktyta. Fenomenet eliminerades så snart fordonet sattes i rörelse och den statiska friktionen övergick till lägre kinematisk friktion.

Gällande mjukvarans reglertekniska prestanda bekräftar resultaten att PI-regulatorn är väl avvägd. Att det uppmätta felet befann sig inom dödläget bevisar att den integrerande komponenten effektivt eliminerar det stationära fel som uppstår när den proportionella delen inte kan övervinna mekanikens inre motstånd. Införandet av dödbandet var dessutom nödvändigt för att förhindra självsvängning i styrningen, vilket skonar både mekanik och strömförbrukning.

5.5 LiDAR

Det implementerade LiDAR-systemet fungerar väl som ett konceptbevis och utgör en stabil grund för framtida vidareutveckling. Systemet skannar kontinuerligt sin omgivning och agerar utefter de logiska villkor som illustreras i Figur 3.8. Detta system uppfyller de krav projektgruppen satte på delsystemet, vilket var att aktivt undvika objekt under körning. Vidare fungerar funktionen för att kunna växla mellan helt manuell och semiautonom körning via handkontrollens knappats.

För att uppnå ett mer robust system behöver dock samtliga fyra LiDAR-sensorer konfigureras och integreras. Vidare behöver mer avancerade algoritmer integreras som inte bygger på sanningstabeller för att beräkna den optimala färdvägen för varje enskild situation. I det nuvarande systemet svänger fordonet med en fast styrvinkel tills dess att objekten är utom riskzon, varpå den fortsätter köra rakt fram tills nästa objekt upptäcks. Detta är inte det mest optimala sättet att utföra autonom körning, då färdriktningen kommer förändras över tid. För detta system ska fungera för fullständigt autonom körning kommer en Inertial Measurement Unit (IMU) behöva implementeras tillsammans med den integrerade GPS-modulen. Detta krävs för att kontinuerligt beräkna fordonets kurs och säkerställa att det rör sig mot sitt angivna mål.

LiDAR-zonerna som implementerades under sektion 3.5.1 fungerar bra för att undvika objekt med den nuvarande hastighetskonfigurationen. För ett mer robust system behöver fler zoner implementeras för att täcka ett bredare spann av händelser. En potentiell risk med att implementera och övervaka fler zoner är att mikrokontrollen kan komma att överbelastas. Med den nuvarande konfigurationen och belastningen har dock inga sådana prestandaproblem observerats

5.6 Etiska och samhällseliga aspekter

I planeringsfasen av projektet identifierades och diskuterades flera centrala etiska aspekter kopplade till utvecklingen av autonoma system. Primärt behandlades säkerhet och potentialen i att autonoma maskiner ersätter människor i riskfyllda arbetsmiljöer. Även det ekologiska perspektivet berördes där fordonet använder sig av elektriska komponenter istället för fossila drivmedel. Slutligen lyftes det komplexa juridiska perspektivet gällande ansvaret av autonoma eller delvis autonoma fordon i olyckor.

5.6.1 Säkerhetsperspektiv

Säkerhet har varit i fokus från starten av projektet, där det ursprungligen fanns två former av fysiska nödstopp: en nödstoppknapp och en stor strömbrytare. Eftersom den mobila testbänken är en fysisk maskin som ska operera i verkliga miljöer, måste risken för skada på människor, djur och egendom minimeras. I mjukvaran implementerades därför flera nödstopp och säkerhetsfunktioner där motorerna stannar om signalen bryts eller ett maximalt varvtal som håller ner hastigheten. Även i implementationen av LiDAR-sensorerna var säkerheten central, där den första konfigurerade zonen var nödstoppet som ett extra lager skydd. Även batteri valdes med säkerhet i åtanke då litiumjärnfosfat-batterier är stabila och därmed minskar risken för person- och miljöskador [17].

5.6.2 Människoperspektiv

Aspekten gällande minskad arbetsbelastning för människor i riskfyllda miljöer medför både möjligheter och etiska dilemman. Den primära fördelen är att minska an-

talet människor som utsätts för arbete i riskfyllda eller fysiskt påfrestande miljöer. Genom användningen av autonoma inspektionsrobotar kan arbetsuppgifterna skifta till mindre riskfyllda moment som analys och utvärdering av den insamlade datan. Däremot riskerar teknikskiftet att ersätta mänskliga jobb, vilket kan resultera i arbetslöshet och skapa en samhällelig misstro och negativ inställning till automatisering. Projektet har inte möjlighet att djupgående undersöka dilemmat, men har haft det i åtanke under processens gång.

5.6.3 Miljöperspektiv

Ur ett miljöperspektiv är projektet tudelad. Den positiva sidan är att all hårdvara med undantag för de gamla batterierna och vissa kablar kunde återanvändas. Detta minskar materialanvändningen avsevärt samt att den helt elektriska drivlinan eliminerar utsläpp av fossila växthusgaser under drift, förutsatt att fordonet laddas med el från förnybara energikällor. Däremot innebär inköpet av ett nytt batteri en viss miljöpåverkan. Det uppkommer framförallt under tillverkningsfasen då utvinning av sällsynta jordartsmetaller sker, vilket i regel genererar ett högt koldioxidutsläpp och involverar långa globala transportkedjor [54]. Skulle fordonet ingå i en storskalig produktion innebär det miljöpåverkan från materialet som krävs, batteriet samt eventuella utsläpp från produktionen av elen. Detta resulterar i ett dilemma utifrån ett livscykelperspektiv där man får väga de positiva effekterna av fordonet mot kostnaden av miljöpåverkan.

5.6.4 Juridiskt perspektiv

Trots att fordonet har inbyggda nödstopp och väjningsfunktioner kvarstår risken för olyckor vid drift av autonoma fordon. Detta aktualiserar ett komplext juridiskt dilemma gällande ansvarsfördelningen vid en olycka; Är det exempelvis företaget som tillverkar sensorn som är ansvariga, ansvariga utgivare av mjukvaran som väjningsfunktionerna bygger på eller personen som styrde fordonet manuellt sist som är ansvarig. Problemen uppstår i takt med utvecklingen och är en viktig aspekt att ta i beaktande innan fullskalig implementation.

5.6.5 Dokumentering och vidareutveckling

Eftersom projektets mål var att skapa en plattform för framtida projekt att vidareutveckla uppkommer flertalet riktlinjer som bör följas. Främst är hanteringen av dokumentation, då projektet började med avsikten av detta, vilket som försvårade arbetet avsevärt. Rapport och kod kommer därför offentliggöras med uppmaningen att framtida projekt som arbetar på projektet bibehåller standarden. Det minskar överflödigt resursanvändning på 'reverse engineering' om informationen finns tillgänglig och ökar möjligheten för återanvändning.

5.6.6 Integritetsperspektiv

Ett identifierat framtida tillämpningsområde för plattformen är integrationen av en kamera för att spela in och inspektera infrastruktur, vilket medför tydligare in-

spektionsmöjligheter. Däremot innebär det risker kring integritet, då tekniken kan användas för otillåten övervakning av människor eller skyddsobjekt med fotograferingsförbud. Detta bör därför övervägas innan implementering. Risken för avlyssning och obehörig åtkomst bör även betraktas, exempelvis genom att inte strömma videofilmen över ett trådlöst nätverk.

5.6.7 Slutsats och reflektion

Sammanfattningsvis visar analysen av projektets etiska och samhällliga aspekter att en ökad automationsgrad utgör en stark drivkraft för industriell utveckling, men att den oundvikligen medför komplexa risker. Utvecklingen av autonoma system kräver en kontinuerlig avvägning mellan teknisk innovation, miljömässig hållbarhet, oklara juridiska ramverk och den enskilda individens integritet och fysiska säkerhet. En central insikt från projektet är att ett proaktivt och ansvarsfullt ingenjörsperspektiv måste behandlas i utvecklingsprocessens samtliga faser.

5.7 Vidareutveckling

Under projektets gång har flertalet insikter bidragit till en lista av förslag på åtgärder som vidareutveckling bör fokusera på. Det är åtgärder som inte rymdes inom spannet av projektet på grund av tidsbrist eller andra prioriteringar, men kan med relativt lite investerad tid ge stor utdelning.

- **Fjärrstyrt nödstopp**
 - I syfte att öka fordonets säkerhet, speciellt vid framtida autonom körning, bör ett fjärrstyrt nödstopp införas. Nödstoppet bör vara oberoende av övrig utrustning, exempelvis genom en radiostyrd sändare/mottagare. Operatören kan då sköta en handhållen sändare som skickar radiosignaler till en mottagare monterad på fordonet, som i sin tur bryter strömmen till övriga delar av fordonet.
- **Säkringar**
 - I dagsläget nyttjas en säkring vid batterisidan för att huvudsakligen skydda batteriet vid händelse av kortslutning samt kablage från kontinuerliga överströmmar. Då delar av systemet inte kan hantera de maximala 30 A säkringen skyddar för, kan det vara aktuellt att införa säkringar för respektive komponent. Säkring vid respektive komponent kan då skräddarsys efter enskild komponents maximala ström och bryta vid denna, istället för det högre 30 A.
- **ROS-implementation**
 - Ett naturligt steg i vidareutvecklingen av fordonets mjukvaruarkitektur är en övergång till Robot Operating System (ROS 2) [55]. Genom att implementera ROS kan systemarkitekturen istället struktureras i oberoende noder, exempelvis dedikerade noder för LiDAR-skanning, GPS-positionering, motorkontroll och styrning som kan kommunicera via ett standardiserat publish/subscribe-nätverk.
 - Den primära fördelen med en ROS-baserad arkitektur är den ökade skalbarheten och modulariteten. Eftersom plattformen använder standardise-

rade meddelandetyper underlättas integrationen av nya sensorer. Detta öppnar även upp för implementering av avancerade autonoma system, såsom ruttplanering eller kameraintegration, där projektet kan dra nytta av ROS:s omfattande bibliotek av öppen källkod.

- **Optimering av motorer**

- Avsaknaden av Hall-sensorer i en BLDC tvingade fram en kompromiss i drivlinans konfiguration vilket resulterar i begränsad startförmåga. För att mjukvarumässigt mildra detta problem för framtida iterationer hade den initiala startstyrkan kunnat ökas, alternativt hade man kunnat skicka paket bestående av vald strömstyrka till motorerna istället vilket ger direkt kontroll över vridmomentet och är en mer etablerad lösning.
- Ytterligare en potentiell mjukvarulösning vore att implementera en rampfunktion som linjärt trappar upp styrsignalen för att förhindra strömspikar.

- **IMU**

- Fordonet har tidigare nyttjat en Inertial Measuring Unit (IMU) för att mäta acceleration i olika riktningar samt rotation/vinkelhastighet i realtid. I brist på tid har denna inte integrerats i systemet, vilket krävs för att möjliggöra autonom körning.

- **Mekaniska bromsar**

- Mekaniska bromsar bör införas för att minimera risken för frirullning. För att möjliggöra detta behöver ställdon samt styrsystem införas, resten finns redan integrerat på fordonet.

- **Kameraimplementation**

- Ett framtida tillämpningsområde för plattformen är integrationen av en kamera för att spela in och dokumentera infrastrukturen men är inget som undersöktes i projektet.

- **Implementering av resterande LiDAR-sensorer**

- Projektet avgränsades till endast två av fyra LiDAR-sensorer vilket medför vidareutvecklingsmöjligheten att implementera resterande. Det hade möjliggjort ett 360° synfält av LiDAR vilket är positivt för eventuell framtida implementation av autonom körning.

- **Fullskalig autonom körning**

- En vidareutveckling är integrationen av GPS-positionering för dynamisk ruttplanering. I kombination med en mer avancerad databehandling av LiDAR-sensorerna skulle detta lägga den tekniska grunden för fullskalig autonom navigering mellan definierade punkter.

6

Slutsatser

Projektet har visat att återupplivandet av den mobila testbänken HEROES var möjligt. Processen har varit iterativ och har dokumenterats i detalj, i syfte att skapa goda förutsättningar för framtida arbete. Den ursprungliga funktionen har återupprättats, tillsammans med viss vidareutveckling i form av konceptbevis för framtida fullskalig autonom körning.

Integrationen av alla olika komponenter till ett homogent och fungerande system var den största utmaningen. Varje enskild komponent har genomgått en iterativ process, från första test till slutgiltig implementation i färdigt utförande. Utvecklingsområden har identifierats och dokumenterats för framtida förbättringar kring säkerhet och funktion.

Resultatet av projektet är ett fordon som kan nyttjas som mobil testbänk, i syfte att utveckla och implementera nya system. Detta med relativt god användarvänlighet och ett tillförlitligt, robust system.

Litteratur

- [1] International Federation of Robotics. *World Robotics 2023: Executive Summary Service Robots*. [Online]. Frankfurt, Germany: IFR Statistical Department, 2023. URL: <https://ifr.org/wr-industrial-robots/> (hämtad 2026-02-17).
- [2] Isuru Munasinghe, Asanka Perera och Ravinesh C. Deo. “A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges”. I: *Journal of Sensor and Actuator Networks* 13.6 (2024). ISSN: 2224-2708. URL: <https://www.mdpi.com/2224-2708/13/6/81>.
- [3] CPAC SYSTEMS. *CPAC*. [Online]. 2025. URL: <https://cpacsystems.se/> (hämtad 2026-02-18).
- [4] Jacob Brickner och Simon Liljeqvist. “Driveline control for over-actuated electric autonomous ground vehicles”. Master’s Thesis. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2017. URL: <https://hdl.handle.net/20500.12380/253376> (hämtad 2026-01-20).
- [5] Wolfhard Lawrenz, utg. *CAN System Engineering. From Theory to Practical Applications*. 2. utg. London, UK: Springer London, 2013.
- [6] James L.. Kirtley, Christopher H. T.. Lee och Sajjad. Mohammadi. “Electromagnetic Analysis of Electric Machines : First Principles, Modeling, and Design”. I: (2025). URL: <https://openurl.ebsco.com/contentitem/edseeedsee.11271796?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:edseeedsee.11271796&crl=c>.
- [7] Dony Hutabarat m. fl. “Lidar-based obstacle avoidance for the autonomous mobile robot”. I: 2019, s. 197–202. DOI: 10.1109/ICTS.2019.8850952. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073515815&doi=10.1109%2fICTS.2019.8850952&partnerID=40&md5=7e861e80440abd7bd8fe06c44b66253a> (hämtad 2026-02-18).
- [8] Aaradhana A. Deshmukh och S.A. Kulkarni. “GPS signal distribution system”. I: Cited by: 3. 2009, s. 672–674. DOI: 10.1109/ACT.2009.170. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77949295530&doi=10.1109%2fACT.2009.170&partnerID=40&md5=8135b3ed2bc2ac13998948b9fb12533a>.
- [9] Python. *Welcome to Python.org*. [Online]. 2026. URL: <https://www.python.org/> (hämtad 2026-02-18).
- [10] C++. *cplusplus*. [Online]. 2026. URL: <https://cplusplus.com/> (hämtad 2026-02-18).
- [11] Marc A. Rosen och Aida Farsi. “Introduction to battery technology”. I: *Battery Technology* (2023), s. 1–38. DOI: 10.1016/B978-0-443-18862-6.00002-1.

- [12] Fazel Mohammadi och Mehrdad Saif. "A comprehensive overview of electric vehicle batteries market". I: *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 3 (mars 2023), s. 100127. ISSN: 2772-6711. DOI: 10.1016/J.PRIME.2023.100127. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671123000220?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus.
- [13] Ashkan Safari m. fl. "A state-of-the-art review on battery cell balancing strategies". I: *Discover Energy* 5.1 (okt. 2025), s. 1–42. ISSN: 27307719. DOI: 10.1007/S43937-025-00086-4. URL: <https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.1007/s43937-025-00086-4?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.1007/s43937-025-00086-4&crl=c>.
- [14] K. Tamizh Selvi m. fl. "Exploring the electrode materials for high-performance lithium-ion batteries for energy storage application". I: *Journal of Energy Storage* 92 (juli 2024). ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/J.EST.2024.112208.
- [15] Chaoyao Xiang m. fl. "A research on charge and discharge strategy of hybrid batteries based on the electrochemical characteristics". I: vol. 2013-October. Cited by: 4. 2013. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032672995&partnerID=40&md5=f2ed1e3329de712c79e504100ea75e7d>.
- [16] Suwarno, Witantyo och Irawan. "Effect of depth of discharge on morphology and size of sulfate particles in VRLA battery electrodes". I: *AIP Conference Proceedings* 1983 (juli 2018). ISSN: 15517616. DOI: 10.1063/1.5046288.
- [17] Wu Xiaogang m. fl. "Safety Performance Evolutionary Pattern Analysis of Lithium Iron Phosphate Batteries Under High-Temperature Calendar Aging Conditions". I: *Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology* 59.2 (2026), s. 146–154. ISSN: 04932137. DOI: 10.11784/TDXBZ202503027.
- [18] *Lithium Battery 48V-32Ah - 1.64kWh - PowerBrick LiFePO₄ battery*. URL: <https://www.powertechsystems.eu/products/48v-lithium-ion-battery-pack/32ah-48v-lithium-ion-battery-pack-powerbrick/>.
- [19] "350W Single Output DC-DC Converter". I: (mars 2020). URL: <https://www.meanwell.co.uk/assets/pdf/SD-350-spec.pdf?v=1735558976>.
- [20] *EKM002 - Power Supply HAT för Raspberry Pi 5 - Elektrokit Dokumentation*. URL: <https://docs.elektrokit.com/modules/EKM002/index.html>.
- [21] Vaneeta Bhardwaj m. fl. "Implementation and comparative analysis of WiFi module with different FPGA boards". I: vol. 3209. 1. Cited by: 0. 2024. DOI: 10.1063/5.0228727. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85207234304&doi=10.1063%2f5.0228727&partnerID=40&md5=7194854222dc663343b6881b612f814d>.
- [22] Jay Bryan R. Lawas, Allan C. Vivero och Ankit Sharma. "Network performance evaluation of VPN protocols (SSTP and IKEv2)". I: vol. 2016-November. Cited by: 10. 2016. DOI: 10.1109/WOCN.2016.7759880. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006055044&doi=10.1109%2fWOCN.2016.7759880&partnerID=40&md5=20c777b293ac38b06a46d36e0ac24cf6>.
- [23] Tailscale Inc. *What is TaleScale?* [Online]. 2025. URL: <https://tailscale.com/docs/concepts/what-is-tailscale> (hämtad 2026-04-29).

- [24] Jason A. Donenfeld. *WireGuard fast, morden, secure VPN tunnel*. [Online]. 2015-2022. URL: <https://www.wireguard.com/> (hämtad 2026-04-29).
- [25] Isha, Abhinav Sharma och M. Revathi. “Automated API Testing”. I: Cited by: 17. 2018, s. 788–791. DOI: 10.1109/ICICT43934.2018.9034254. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082725226&doi=10.1109%2fICICT43934.2018.9034254&partnerID=40&md5=ccf687e48d52d9d24297f0bbe0817abe>.
- [26] Andrea Arcuri. “Automated Black- And White-Box Testing of RESTful APIs with EvoMaster”. I: *IEEE Software* 38.3 (2021). Cited by: 51, s. 72–78. DOI: 10.1109/MS.2020.3013820. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089370519&doi=10.1109%2fMS.2020.3013820&partnerID=40&md5=bdfc18db6cb4f42cf3106de9b537d2ad>.
- [27] Chunhao Li m.fl. “The Optimal UDP Data Length in Ethernet”. I: *Lecture Notes in Electrical Engineering* 917 LNEE (2023). Cited by: 1, s. 1050–1057. DOI: 10.1007/978-981-19-3387-5_126. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135046101&doi=10.1007%2f978-981-19-3387-5_126&partnerID=40&md5=be91741751825761d81c31949de176e3.
- [28] H. Vidhya m.fl. “A Comparative Study - Performance Analysis of Inrunner and Outrunner BLDC Motor using Ansys Software”. I: Cited by: 0. 2025, s. 423–428. DOI: 10.1109/ICoICI65217.2025.11254121. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105030343117&doi=10.1109%2fICoICI65217.2025.11254121&partnerID=40&md5=a30ed9f03cf8fdd52faa4bfdfffa>.
- [29] Arvind Goswami, Mini Sreejeth och Madhusudan Singh. “Simulation and Analysis of Hall Sensor Misalignment in BLDC Motor Drive”. I: *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*. 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/DELCON54057.2022.9753351.
- [30] VESC Labs. *VESC*. [Online]. 2025. URL: <https://www.vesclabs.com/about-us/> (hämtad 2026-03-28).
- [31] Dongil Choi. “Development of Open-Source Motor Controller Framework for Robotic Applications”. I: *IEEE Access* 8 (2020). Cited by: 18; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access, s. 14134–14145. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965977. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079797032&doi=10.1109%2fACCESS.2020.2965977&partnerID=40&md5=2cf8d642ac1fc33d347271f780958a51>.
- [32] Hitesh M. Maidurkar, Prachi Salodkar och Altaf.Q.H. Badar. “Electric Vehicle Control Protocol for on Board System”. I: Cited by: 0. 2025. DOI: 10.1109/SETCOM64758.2025.10932513. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105002277222&doi=10.1109%2fSETCOM64758.2025.10932513&partnerID=40&md5=e79c88d6485e228a069ba6fa6c85c1df>.
- [33] Donald L. Anglin. “Automotive steering”. I: *AccessScience* (2019). DOI: 10.1036/1097-8542.064500. URL: <https://www.accessscience.com/content/article/a064500>.
- [34] Andy Dingley. *ackermansteering geometry*. [Online]. 2010. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ackermann_turning.svg#file (hämtad 2026-02-18).

- [35] Gerald Weiss. “Servomechanism”. I: *AccessScience* (2026). DOI: 10.1036/1097-8542.616600. URL: <https://www.accessscience.com/content/article/a616600>.
- [36] *Sabertooth 2x32 regenerative dual motor driver*. URL: <https://www.dimensionengineering.com/products/sabertooth2x32>.
- [37] *Grove- I2C ADC | Seeed Studio Wiki*. URL: https://wiki.seeedstudio.com/Grove-I2C_ADC/.
- [38] Prasanna Bagdalkar och Layak Ali. “Interfacing of light sensor with FPGA using I2C bus”. I: *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2020* (mars 2020), s. 843–846. DOI: 10.1109/ICACCS48705.2020.9074372. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85084646099?origin=document-preview-flyout>.
- [39] *Raspberry Pi 5*. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-5/>.
- [40] *Introducing Raspberry Pi HATs - Raspberry Pi*. URL: <https://www.raspberrypi.com/news/introducing-raspberrypi-hats/>.
- [41] Juan Carlos Fernandez Diaz m. fl. “LiDAR Remote Sensing”. I: *Handbook of Satellite Applications* (2017), s. 929–980. DOI: 10.1007/978-3-319-23386-4_44/FIGURES/23. URL: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-319-23386-4_44.
- [42] Sick AG. *LIDAR SENSORS*. [Online]. 2026. URL: <https://www.sick.com/us/en/products/lidar-and-radar-sensors/lidar-sensors/c/g575802> (hämtad 2026-04-24).
- [43] Sick AG. *LMS111-10100*. [Online]. 2026. URL: <https://www.sick.com/us/en/catalog/products/lidar-and-radar-sensors/lidar-sensors/lms1xx/lms111-10100/p/p109842> (hämtad 2026-04-24).
- [44] Hagar Mahmoud och Nadine Akkari. “Shortest Path Calculation: A Comparative Study for Location-Based Recommender System”. I: Cited by: 74. 2016, s. 1–5. DOI: 10.1109/WSCAR.2016.16. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85011096791&doi=10.1109%2fWSCAR.2016.16&partnerID=40&md5=54504d84f8b67e435aae962d13d65cc6>.
- [45] Waveshare Wiki. *L76K GPS Module*. URL: https://www.waveshare.com/wiki/L76K_GPS_Module (hämtad 2026-05-07).
- [46] *La Triveneta Cavi*. URL: https://www.latrivenetacavi.com/en/cavi_categorie.aspx?type=92.
- [47] *SBFW-L (M6) | Slow Blow Fuse | Automotive FusesPEC*. URL: https://www.pecj.co.jp/en/fuse/slow/sbfw-l_m6.html.
- [48] Google. *Gemini 3.1 Pro*. Stor språkmodell (Large Language Model). Använd för kodgenerering och logikstrukturering. Åtkomst: 29 april 2026. 2026. URL: <https://gemini.google.com>.
- [49] OpenStreetMap contributors. *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org>. Åtkomst: 15 april 2026. 2026.
- [50] O I Chudakov m. fl. “Method of torque distribution between the axles and the wheels of the rear axle to improve the manageability of two-axle all-wheel drive vehicles”. I: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 820 (1 april 2020), s. 012008. ISSN: 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/820/

-
- 1/012008. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008%20https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008/meta>.
- [51] DESscribe. *USB Sabertooth DIP switch wizard*. 2026. URL: https://www.dimensionengineering.com/datasheets/USBSabertoothDIPWizard/#normal_rc_battery_indie_linear_tx (hämtad 2026-04-24).
- [52] Sick AG. *SOPAS ET*. [Online]. 2026. URL: <https://www.sick.com/us/en/catalog/products/digital-services-and-software/engineering-tools/sopas-et/c/g584721?tab=overview> (hämtad 2026-04-28).
- [53] SICK AG. *Telegram Listing NAV-LOC: Technical Information*. Dokumentnummer: 8021387/12G4/2019-04-24. SICK AG. Waldkirch, Germany, 2019.
- [54] “Investigating greenhouse gas emissions and environmental impacts from the production of lithium-ion batteries in China”. I: *Journal of Cleaner Production* 372 (okt. 2022), s. 133756. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.133756. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622033339?getft_integrator=scopus&pes=vor&utm_source=scopus.
- [55] ROS. *ROS-Robot operating system*. [Online]. 2026. URL: <https://www.ros.org/> (hämtad 2026-02-18).

A

Appendix

A.1 Batteriegenskaper

Se Figur A.1 för Fullständig tabell över relevanta batterityper studerade under projektets gång [12].

A. Appendix

Specifications	Lead Acid	NiMH	Li-ion (Co)	Li-ion (Mn)	Li-ion (Ph)
Main Components	Metallic Lead, Lead Dioxide, Lead Sulfate, and Sulfuric Acid	Hydrogen, Nickel Hydroxide, and Potassium Hydroxide	Lithium, Iron, Aluminium, Copper, Cobalt	Lithium, Manganese, Graphite	Lithium, Iron, Phosphate, Aluminium, Copper, Organic Electrolyte, Graphite
Specific Energy (Wh/kg)	30–50	60–120	150–190	100–135	90–120
Internal Resistance (m Ω)	<100 12V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V pack	25–75 per cell	25–50 per cell
Life Cycle (80% Discharge)	200–300	300–500	500–1000	500–1000	1000–2000
Fast-Charging Time	8–16 h	2–4 h	3–4 h	≤ 1 h	≤ 1 h
Overcharge Tolerance	High	Low	Low, Cannot tolerate trickle charge		
Self-Discharge/Month (25°C)	5%	30%	<10%		
Cell Voltage (Nominal)	2 V	1.2 V	3.6 V	3.8 V	3.3 V
Charge Cut-Off Voltage (V/cell)	2.40	Full Charge Detection by Voltage Signature	4.20		3.60
Charge Cut-Off Voltage (V/cell, 1C)	1.75	1.00	2.5-3.0		2.80
Peak Load Current	5C	5C	>3C	>30C	>30C
Charge Temperature	-20–50	0–45	0–45	0–45	0–45
Discharge Temperature	-20 to 50°C	-20 to 65°C	-20 to 60°C		
Maintenance Requirements	3–6 months	60–90 days	Not Required		
Safety requirements	Thermally Stable	Thermally Stable, Fuse Protection Common	Protection Circuit Mandatory		

Tabell A.1: Jämförelse av data för batterier sammansatta av bly (Lead Acid), nickel-metallhydrid (NiMH), Litiumkoboltoxid (Li-ion(Co)), litium-manganoxid (Li-ion(Mn)) och litium-järnfosfat (Li-ion(Ph)).

A.2 Bilder:



Figur A.1: Campusmiljö omringad av höga byggnader.

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se



CHALMERS