



CHALMERS

Skalmodell av elvägssystem

Konstruktion och design av skalmodell

Kandidatarbete inom system- och reglerteknik

Ludvig Bengtsson, Rawa Bradosti, Filip Djokic,
Fredrik Johansson, Hanna Karlsson och Clara Rosin

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

Scale model of electric road system

Construction and design of scale model

Abstract

The transition to electric vehicles entails increased demands on electricity distribution and charging infrastructure. One way to enable longer driving ranges is conductive charging via electrified roads, which is explored in this project through the development of a scale model. The scale model, based on a purchased slot car track, was modified and used to collect measurement data, while a simulation model was adapted to replicate the system's behavior. The results show that, depending on how the power supply and vehicles are designed, the expected driving range can increase, highlighting the potential of this technology in future transportation systems.

Skalmodell av elvägssystem

Konstruktion och design av skalmodell

Sammandrag

Omställningen till eldrivna fordon medför ökade krav på eldistribution och laddningsinfrastruktur. Ett sätt att möjliggöra längre körsträckor är konduktiv laddning via elektrifierade vägar, vilket undersöks i detta projekt genom utveckling av en skalmodell. Skalmodellen som baserats utifrån en inköpt bilbana modifierades och användes för att samla in mätdata, samtidigt som en simuleringsmodell anpassades för att efterlikna systemets beteende. Resultaten visar att beroende på hur energiförsörjningen och bilarna utformas kan den förväntade körsträckan öka, vilket belyser potentialen hos denna teknik i framtida transportsystem.

Nomenklatur

BLE - Bluetooth low energy är ett kommunikationsprotokoll som vissa mikrokontroller kan använda sig av.

Centralenhet - En mikrokontroller som kommunicerar med många olika komponenter som sensorer eller andra mikrokontroller.

Dielektriskt material - En elektrisk isolator som kan bli polariserad av ett pålagt elektriskt fält.

Effektdensitet - Ett mått på hur mycket effekt som kan levereras per volymenhet, ofta uttryckt i W/l. Används för att beskriva hur snabbt energi kan upptas och levereras.

Energidensitet - Ett mått på hur mycket energi som kan lagras per volymenhet, ofta uttryckt i Wh/l.

Energilager - Komponent för att lagra elektrisk energi. Används för att möjliggöra drift utan direkt koppling till energikälla.

ESP-NOW - Espressifs egna kommunikationsprotokoll för kommunikation med ESP32-mikrokontroller.

GPIO - General Purpose Input Output, programmerbara stift på en mikrokontroller eller dator som kan användas för att läsa in signaler (input) eller styra enheter (output).

IDE - Integrated Development Environment, Ett program som samlar verktyg för att skriva, testa och felsöka kod på ett och samma ställe.

IR-sensor - En sensor som använder sig av infrarött ljus för att identifiera avstånd till ett objekt.

Kondensator - En passiv elektrisk komponent som kan lagra elektrisk energi i ett elektriskt fält.

Kontaktflätor - Kontakter av flätade metalltrådar som leder ström och används för att överföra elektricitet mellan rörliga eller svåråtkomliga delar, t.ex. på fordonets undersida.

Laddningscykel - Term för att beskriva processen av att fullständigt ladda upp och ur ett energilager.

Laddningstid - Hur lång tid det tar att ladda ett energilager från tomt till full kapacitet.

Livslängd - Antalet laddningscykler ett energilager kan genomgå innan dess kapacitet minskar till en bestämd andel av den ursprungliga kapaciteten.

Lorentz-kraft - Den kraft som verkar på en laddad partikel som rör sig i ett magnetiskt fält.

Lämplig lagringstid - Den tid som ett energilager kan lagra energi utan betydande förlust av energi.

Lämpligt urladdningsdjup - Hur låg energinivå ett energilagrar kan nå utan att bli märkbart skadat.

MAC-adress - Media Access Control adress, ett unikt ID för varje nätverkskort.

Mikrokontroller - En komponent som kan utföra förprogrammerade instruktioner.

NASCAR - National Association for Stock Car Auto Racing, Amerikansk motorsportorganisation.

Peer-to-peer - Ett nätverksprotokoll där varje enhet kan agera både som klient och server, vilket möjliggör direkt kommunikation utan en central server.

Protokoll - En uppsättning regler och format som styr hur data överförs och tolkas mellan enheter i ett nätverk.

Relä - Omkopplare som styr om bilbana ska vara av eller på.

Round trip-verkningsgrad - En verkningsgrad som beskriver hur mycket energi som går förlorad under en laddningscykel.

Specifik effekt - Ett mått på hur mycket effekt som kan levereras per massenhet, ofta uttryckt i W/kg. Används för att beskriva hur snabbt energi kan upptas och levereras.

Specifik Energi - Ett mått på hur mycket energi som kan lagras per massenhet, ofta uttryckt i Wh/kg.

Spänningsdelning - Ett sätt att fördela spänning över resistorer.

Superkondensator - En kondensator som kan lagra både kemisk och elektrisk energi.

TRL - Technology Readiness Levels, indikation på mognadsgraden av en viss teknologi.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Krav för elvägssystemet	2
1.2.1	Elektrifierad laddningssträcka	2
1.2.2	Ladda bilen och köra obegränsat antal varv	2
1.2.3	Fordonsmätningar	2
1.2.4	Simuleringsmodell och matematiska modeller	2
1.3	Avgränsningar	3
2	Teknisk bakgrund och systemöversikt	3
2.1	Bilbanans konstruktion och funktion	3
2.2	Bilarnas mekaniska och elektriska konstruktion	4
2.3	Tekniker för elektrisk energilagring	6
2.3.1	Batteriers funktion och egenskaper	6
2.3.2	Kondensatorers funktion och egenskaper	7
2.3.3	Superkondensatorers funktion och egenskaper	7
2.4	Elvägsystems energibehov och förbrukning	8
2.5	Laddningstatus och laddningsbeteende av energilagring	8
2.5.1	Batterier	8
2.5.2	Kondensatorer	9
2.6	Centralenheten och dess uppgift	10
2.6.1	Fördelar och funktioner hos mikrokontroller från Arduino-familjen	10
2.6.2	Fördelar och funktioner hos mikrokontrollern ESP32	10
2.7	Kommunikation mellan centralenhet och fordon	11
2.7.1	Bluetooth Low Energy (BLE)	11
2.7.2	Peer-to-peer (P2P)	11
2.7.3	ESP-NOW	11
2.8	Sensorers funktionsprinciper	11
2.8.1	IR-Sensor	12
2.8.2	Spänningssensor	12
3	Metod	13
3.1	Konstruktion och modifiering av bilbana	13
3.2	Konstruktion och modifiering av fordon	13
3.3	Implementering av mikrokontroller	15
3.3.1	Centralenhet	15
3.3.2	Fordonsenhet	16
3.4	Simuleringsmodell	17
3.5	Verifiering	18
4	Resultat	18
4.1	Varierad spänning och kondensatorstorlek	18
4.1.1	Banspänning 5 V	19
4.1.2	Banspänning 6 V	21
4.1.3	Banspänning 4 V	22
4.2	Anpassning av simuleringsmodell	23

4.2.1	Banspänning 5 V	24
4.2.2	Banspänning 6 V	25
4.2.3	Banspänning 4 V	26
5	Diskussion	27
5.1	Utvärdering av kravuppfyllelse	27
5.1.1	Elektrifierad laddningssträcka	28
5.1.2	Ladda bilen och köra obegränsat antal varv	28
5.1.3	Fordonsmätningar	28
5.1.4	Simuleringsmodell och matematiska modeller	28
5.2	Faktorer som påverkar hastighet, energiförbrukning och antal körda varv	28
5.2.1	Hastighet	29
5.2.2	Energiförbrukning och antal körda varv	29
5.3	Felkällor och problematik	29
5.3.1	Mätningar	30
5.3.2	Simulering	30
5.3.3	Fordonsdrift	30
5.4	Utvecklingsmöjligheter	31
5.4.1	Förbättrade mätningar och datainsamling	31
5.4.2	Hastighetsreglering och optimerad energianvändning	31
5.4.3	Skalbar kommunikation och fler fordon	31
5.4.4	Hybridlösningar med alternativa energilagrar	32
5.4.5	Integration med smarta elnät	32
5.5	Etiska överväganden och samhällspåverkan	32
5.5.1	Ökad användning och produktion av elbilar	32
5.5.2	Konstruktion och underhåll	33
5.5.3	Potentiella faror, olycksfall och integritet	33
6	Slutsats	34
	Referenser	35
	Appendix	i
A	Kod	i
A.1	Centralenhet	i
A.2	Fordonsenhet	iv
B	Simulering	vi
B.1	Simulink-modell	vi
B.2	Simuleringskod i Matlab	vii

1 Inledning

Antalet elbilar blir allt fler och det ställer större krav på batteriteknik och innovativa lösningar av laddstationer. En av de många utmaningarna med elektriska fordon är deras behov av frekvent laddning samt de långa laddtider som uppstår, speciellt för transporter med tunga lastbilar. Enligt forskare på Lunds Universitet, [1], är dagens elbilar i behov av laddning efter en körsträcka på bara 30-60 mil. Elektrifierade vägar kan därför erbjuda en lösning genom att möjliggöra laddning under körning, vilket då kan minska beroendet av stora och dyra batterier samt reducera tiden som fordon måste tillbringa vid laddstationer.

Trafikverket hade planer på att bygga Sveriges första permanenta elväg på E20 mellan Hallsberg och Örebro. Deras mål med projektet var att minska koldioxidutsläpp från trafiken samt att testa elvägssystemet med exempelvis kringtjänster, betal- och accesssystem samt installera och använda elvägstekniken i en verklig miljö [2]. Projektet pausades 2023 och en analysfas påbörjades. Enligt biträdande chef för Trafikverkets elektrifieringsprogram Kenneth Natanaelsson var detta på grund av ”... att det saknades tillräcklig finansiering för att genomföra projektet så som vi önskat.” [3].

Efterfrågan på elektrifierade transporter har uppstått som en följd av miljömässiga och tekniska utmaningar inom både transportsektorn och fordonsindustrin. För att nå målet om fossilfri mobilitet har både EU och enskilda länder såsom Sverige därför infört strängare krav på minskade koldioxidutsläpp. EU:s beslut att kräva nollutsläpp för alla nya bilar från 2035 har därigenom påskyndat behovet av att utveckla en infrastruktur som kan stödja en helt elektrifierad fordonsflotta, [4]. Elvägssystem kan därmed komma att spela en viktig roll i framtidens fossilfria transportsektor för en hållbar framtid.

Det finns olika sorters elvägssystem, där de tre huvudsakliga teknikerna är luftledning, induktiv laddning och konduktiv laddning via vägskena. Luftledningar används främst för tunga fordon och bygger på en liknande princip som tåg och spårvagnar, där fordonet får ström via en strömväggare. Induktiv laddning innebär att energi överförs trådlöst via magnetfält mellan spolar i vägbanan och mottagare i fordonet, vilket minskar behovet av fysiska kontakter men kan ha lägre verkningsgrad. Konduktiv laddning via vägskena innebär att fordonet får energi genom direktkontakt med en strömförande laddningssträcka i vägbanan. Under detta projektets gång undersöks den sistnämnda sorten av elvägssystem. För att förstå och utvärdera denna teknik i praktiken kan en fysisk skalmodell ge värdefulla insikter om teknikens funktionalitet, energieffektivitet och begränsningar.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att utforma en modell av ett elvägssystem som kan användas för att studera och analysera olika tekniska designval. Detta innefattar både design och konstruktion av en skalmodell, tillhörande fordon som kan laddas under gång och en simuleringsmodell.

1.2 Krav för elvägssystemet

För att få en tydligare bild av projektets utförande definieras olika krav som ska uppfyllas. Kraven syftar till konstruktionen av en skalmodell samt utvecklingen av en simuleringsmodell.

1.2.1 Elektrifierad laddningssträcka

Laddningssträckan som fordonet färdas över för att ladda energilagret är den enda delen av elvägen som ska vara elektrifierad. Laddningssträckan sätts igång då fordonet färdas över den och stängs av när inget fordon befinner sig på den. Längden på laddningssträckan ska kunna varieras men begynnelselängden är 30 % av elvägens totala längd.

1.2.2 Ladda bilen och köra obegränsat antal varv

Fordonet ska kunna laddas medan den färdas över laddningssträckan och ha tillräckligt med energi för att transportera fordonet ett helt varv runt elvägen. Energilagret i fordonet laddas endast när fordonet kommer till laddningssträckan, vid laddning ska energilagrets nivå återställas till samma nivå som vid varvets början för att energilagret inte ska laddas ur. Elvägens resterande del är fränkopplad och tillför inte någon ström till fordonet.

1.2.3 Fordonsmätningar

Mätningar på fordonet utförs och visas på någon form av display som ett typ av gränssnitt. Fordonets hastighet och energilagrets laddningsnivå ska kunna mätas. Energilagrets laddningsnivå uppdateras kontinuerligt och ett gränssnitt ska införas för att tydligt visa dessa mätningar.

1.2.4 Simuleringsmodell och matematiska modeller

En simuleringsmodell ska framtas som ska anpassas till skalmodellen. Simuleringsmodellen ska kunna utnyttjas för att uppskatta skalmodellens beteende vid variationer i relevanta komponenter. Om det åstadkoms en felmarginal under 10 % på samtliga simulerade värden jämfört mot skalmodellen anses kravet uppfyllt.

1.3 Avgränsningar

För att möjliggöra genomförandet inom den givna tidsramen presenteras här de avgränsningar som fastställts för projektet.

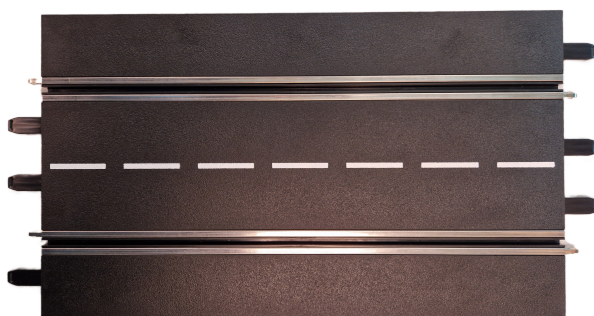
- Skalmodellen byggs inte från grunden, den baseras på en befintlig bilbana och tillhörande bilar som modifieras för att uppfylla projektets krav.
- Skalmodellen kan endast driva ett fordon åt gången.
- Fordonets momentan hastighet mäts inte, istället mäts medelhastigheten mellan förutbestämda punkter.
- Fordonets beteende kan inte regleras under drift.
- Externa faktorer som väder, väglag eller fordonets hjul undersöks ej.
- Den eventuella kostnaden associerad med implementering av en fullskalig elväg analyseras ej.

2 Teknisk bakgrund och systemöversikt

Följande delsektioner ämnar att förklara den teoretiska grund som krävs för att förstå utvecklingsprocessen, implementeringen och utvärderingen av skalmodellen av elvägssystemet. Inledningsvis beskrivs funktionen av den inköpta banan och dess tillhörande bilar. Därefter följer teori angående olika typer av energilager, systemets energiförbrukning samt hur energilager beter sig vid upp och urladdning. Därefter förklaras de typer av sensorer som används för de mätningar som definierats i kraven. Slutligen ges en förklaring över hur mätvärden från bilen i drift ska kunna presenteras.

2.1 Bilbanans konstruktion och funktion

För att skapa en förståelse för vilka modifieringar som är möjliga på bilbanan krävs en grundläggande förståelse över dess befintliga konstruktion och funktion. Den inköpta bilbanan består av plattor, antingen raka eller med kurva, en rak sådan syns i figur 1.



Figur 1: En av de plattor som bilbanan består av.

Spåren som syns består av en större skåra där bilen kan hakas i och ledande metallskenor på varje sida av skåran. Metallskenor hålls separerade så att skenorernas spänning har olika polaritet. Plattorna kan kopplas samman för att skapa olika sorters rutter, när de sammankopplas får metallskenorerna på plattorna kontakt vilket möjliggör för spänningsfallen

att följa skenorna. En sammansatt variation av bilbanan syns i figur 2. De individuella plattorna kan inte förse sig själva med elektricitet och därför måste en specifik platta vara med i alla konstellationer av bilbanan, denna platta kännetecknas med röd vita detaljer.



Figur 2: Övergripande bild på bilbanan

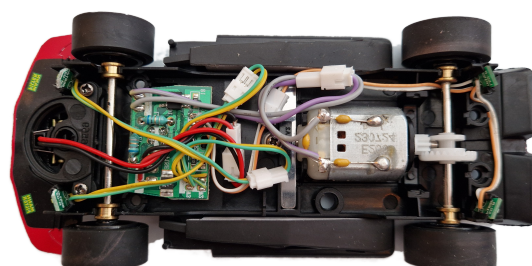
Den elektrifierade plattan har kontakter som kan anslutas via en transformator till ett 230 V vägguttag, spänningen fördelas sedan så att en skena i samtliga spår kan varieras mellan 0 V och 14,8 V genom manuell reglering med medföljande kontroller och den andra skenan kopplas till jord. Kontrollerna fungerar genom att en potentiometer styr en inre resistans i kontrollen som är kopplad till banan och i sin tur reglerar spänningen. När en spänningssatt platta kopplas till plattor utan eltilförsel får spåren samma spänningsfall som metallskenorna i den spänningssatta plattan och banan blir på så sätt spänningssatt. Det är även värt att notera att bilbanan är gjord för att driva två bilar simultant, för projektets syfte krävs dock endast att en bil kan köra.

2.2 Bilarnas mekaniska och elektriska konstruktion

För att kunna anpassa bilarna enligt de krav som specificerades tidigare krävs en grundläggande översikt över bilarnas ursprungliga konstruktion. Bilarna har en kaross som monteras med skruvar, under det finns det en plattform som hjul, kontakter till banan, motor och elektronik är monterade på. I figur 3a och 3b presenteras bilder på bilen med och utan dess kaross.



(a) Den ursprungliga bilen

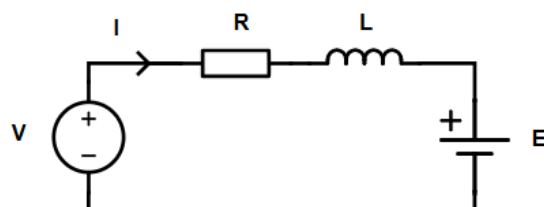


(b) Bilens insida

Figur 3: Den ursprungliga bilens utsida och insida

Kretsen inuti bilen består av två huvudsakliga delar, en DC-motor och ett kretskort som fördelar spänning till motorn och bilens LED-lampor. Kretskortet syns till vänster i figur 3b där de röda och svarta sladdarna förser kretskortet med elektricitet från banan, de gröna, gula, orangea och vita sladdarna spänningssätter LED-lamporna och de lila och grå driver motorn som syns till höger i samma figur.

Motorn som driver bilen är en likströmsmotor, även kallad DC-motor, därav är en grundläggande förståelse för motorns funktion fördelaktig under projektets gång. Det finns olika modeller av likströmsmotorer. Enligt [5] består likströmsmotorer generellt av en stator och rotor. Statorn ansvarar för att skapa ett magnetiskt fält, antingen genom lindade ledare eller permanentmagneter [5]. I rotorn finns det ledare som är anslutna till vridaxeln, och när ström leds genom dem genereras ett vridmoment på grund av Lorentz-kraften, det genereras även en motspänning av motorns rotation, vilken är beroende av rotorns vinkelhastighet [5]. En enkel ekvivalent krets presenteras i figur 4.



Figur 4: Enkel ekvivalent krets för en likströmsmotor.

V är spänning som appliceras över motorn, I är strömmen som leds genom rotorlindningarna, R är rotorlindningarnas resistans och E är den genererade motspänningen. L är den induktans som uppstår av lindningarna i rotorn. Eftersom motorns rotation uppstår från Lorentzkraften som ökar med strömmen kan man i den ekvivalenta kretsen se att högre spänning och lägre resistans ger snabbare rotation. Motspänning E som ingår kan dock begränsa strömtillförseln till motorn.

Bilen förses med elektricitet med hjälp av kontaktflätor på bilens undersida. Kontaktflätorna är tillverkade av tunna metalltrådar som flätas samman till platta och flexibla kontakter vilket syns i figur 5.



(a) Bilens undersida

(b) Bild på kontaktflätor

Figur 5: Den ursprungliga bilens undersida och närbild på kontaktflätor

När bilen hakas i ett spår på banan ligger kontaktflätorna an mot de jordade och spännings-satta skenorna på bilbanan vilket sluter kretsen. Majoriteten av spänningsfallet på skenorna efter förluster i kontakterna hamnar då över motorn vilket leder till att en startström bildas som kan driva bilen.

2.3 Tekniker för elektrisk energilagring

För att säkerställa stabil drift av bilen när den inte har direktkontakt med spänningskällan krävs en komponent som kan lagra elektrisk energi för senare användning, det vill säga ett energilager, där val och storlek av energilager är avgörande för bilens beteende på banan. Den lagrade energin måste räcka till nästa laddningssträcka, kunna avge tillräckligt med effekt för att driva bilen och hinna laddas under den tid då bilen har kontakt med spänningskällan.

På grund av det begränsade utrymmet på bilen är batterier och kondensatorer av stort intresse eftersom det finns många olika modeller med olika egenskaper samt att de är lättillgängliga. I de elbilar som kan komma att drivas av elvägar är batterier och kondensatorer centrala, då projektet önskar efterlikna en potentiell elväg stärker det argumentet för att undersöka batterier och kondensatorer.

Det finns många olika egenskaper hos energilager som beskriver dess beteende. Energidensitet och specifik energi beskriver hur mycket energi som kan lagras i en viss volym respektive massa, effektdensitet och specifik effekt gör det samma för att beskriva hur mycket effekt en komponent kan avge per volymenhet respektive massenhet. För att karaktärisera energilagers effektivitet och livslängd använder man måtten lämpligt urladdningsdjup vilket beskriver hur låg laddningsstatus ett energilager kan nå utan att orsakas skada, livslängd som beskriver hur många laddningscykler ett energilager kan brukas samt round trip-verkningsgrad som även kan benämnas energiverkningsgrad under en upp- och urladdningscykel vilket är ett mått på hur mycket energi som går förlorad under en laddningscykel. Några andra parametrar som är av intresse är laddningstid vilket beskriver hur länge ett energilager behöver ladda för att gå från att vara tomt till att vara fullt och lämplig lagringstid är hur länge ett energilager kan bibehålla sin energinivå utan stora förluster.

2.3.1 Batteriers funktion och egenskaper

Batterier övervägs som energilager till bilen, de lagrar kemisk energi som omvandlas till elektrisk energi vid koppling till en elektrisk krets [6]. Enligt Anglin och Sadoway [6] kan batterier delas in i två huvudsakliga kategorier, primära och sekundära batterier. Primärbatterier förbrukas när all den kemiska energin har omvandlats till elektrisk energi och måste ersättas, sekundärbatterier kan dock återställas efter att den lagrade energin förbrukats genom att driva batteriet med en ström i motsatt riktning från urladdningens strömriktning vilket i princip återupprättar batteriets ursprungliga kapacitet [6].

För projektets ändamål är sekundärbatterier att föredra framför primärbatterier tack vare att de kan erbjuda bättre långsiktig funktionalitet än primärbatterier. Enligt Elio m.fl. [7] har batterier generellt bra specifik energi och energidensitet men inte lika stark specifik effekt och effektdensitet. Batteriers lämpliga urladdningsdjup är 20 %, livslängden

landar på några tusen laddningscykler och round trip-verkningsgraden är runt 90 - 95 % [7]. Generellt är laddningstiden några timmar och den lämpliga lagringstiden är inom intervallet minuter till månader beroende på vilken sorts batteri man använder [7]. Sammanfattningsvis kan man notera att batterier passar bra till applikationer där man behöver lagra mycket energi under en längre tid eller om man vet att det inte kommer ske många laddningscykler.

2.3.2 Kondensatorers funktion och egenskaper

Kondensatorer lagrar potentiell elektrisk energi genom att separera elektriska laddningar [8]. Kondensatorer består vanligtvis av två parallella ledande plattor separerade av ett dielektriskt material vilket hindrar laddningar att passera. Laddningarna samlas istället på kondensatorns plattor vilket ger upphov till ett elektriskt fält mellan dem. Förekomsten av ett elektriskt fält innebär även att det finns ett spänningsfall vilket bestäms enligt

$$V = Q/C, \quad (1)$$

där V är spänningen i volt, Q är laddningen som samlats på plattorna i coulomb och C är kondensatorns kapacitans i farad.

När en kondensator kopplas till en likströmskälla laddas den upp likt ett batteri och kan behålla laddningen när spänningskällan kopplas bort men laddningen avtar gradvis då spänningskällan avlägsnas. Om spänningen över en kondensator blir väldigt stor kan det dielektriska materialet brytas ner vilket tillåter elektriska laddningar att korsa gapet mellan plattorna och leder till att kondensatorn kortsluts [9].

2.3.3 Superkondensatorers funktion och egenskaper

Superkondensatorer lagrar både elektrisk och kemisk energi [10], och kan enligt Deshpande [11] ses som en kombination av batterier och kondensatorer där de kombinerar batteriers höga energidensitet med kondensatorers höga effektdensitet. Superkondensatorer kan därför lagra mer energi än vanliga kondensatorer och laddas upp och ur snabbare än batterier, dessutom påverkas de inte lika mycket som batterier av många upp- och urladdningscykler [11].

Som tidigare nämnts är det användbart att undersöka olika beskrivande parametrar för att skapa en förståelse för ett energilagars beteende. Enligt Elio m.fl. [12] har superkondensatorer generellt stor effektdensitet och specifik effekt men lägre energidensitet och specifik energi. Round trip-verkningsgraden är 90 - 95 %, urladdningsdjupet är 100 % vilket innebär att ingen märkbar skada sker vid komplett urladdning och livslängden är mellan 100.000 och 1.000.000 cykler [12]. Laddningstiden är 1 - 10 sekunder och den lämpliga lagringstiden är högst några timmar [12].

2.4 Elvägsystems energibehov och förbrukning

Energiförbrukningen inom transportsektorn påverkas av flera faktorer som motorns effektivitet, rullmotstånd, aerodynamisk motstånd och elektriska förluster i systemet. Elvägar har potential att minska behovet av stora batterier i fordon och därmed sänka den totala energiförbrukningen. Enligt företaget Power Circle AB [13] kan elvägar, genom att ladda fordon under färd, bidra till att batteribehovet minskar med upp till 50–80 procent.

Elvägstekniken finns idag i flera varianter med olika grad av teknisk mognad. Konduktiv laddning via vägskena och luftledning är två av de mest utvecklade alternativen och har nått högst TRL nivå. Två företag som kommit långt i utvecklingen är Elonroad och Evias. Elonroad består av en mekanisk strömupptagare, eller så kallad avtagare, samt ett ombordladdningssystem som bestämmer hur mycket effekt som ska tas upp från elvägen, upp till 300 kW idag. Evias kan överföra en effekt på 200 kW vid en spänning på 800 V AC, men har potential att leverera upp till 800 kW om systemet körs på DC. Både Elonroad och Evias använder sig utav konduktiv laddning via vägskena.

Införandet av elvägar kan leda till ökade energibehov i elnätet. Power Circle skriver om hur en elväg mellan Stockholm, Göteborg och Malmö beräknas generera en topp effekt på 1,5 GW, vilket motsvarar en ökning av Sveriges effektbehov under topplasttimmen med 4 % och en ökning av det årliga elbehovet med 6 TWh [13]. Vidare skriver de att ifall elvägar byggs ut på samtliga nationella och europavägar beräknas elbehovet öka med 18 TWh per år och effektbehovet under topplasttimmen med 11 %. För att hantera dessa effekttoppar ser teknikleverantörer möjligheter att prioritera laddning mellan olika fordon och anpassa effekten efter elnätets kapacitet. Utöver det diskuteras möjligheten att begränsa tillgången till el från elvägssystemet vid behov.

Det är svårt att uppnå en verklighetstrogen modell som exakt speglar hur ett elvägssystem skulle fungera i praktiken. För det modellerade elvägssystem är det svårt att avgöra hur skalenlig energiförbrukningen är med verkliga förhållanden. Tester kommer dock utföras på själva bilbanan och resultat samt diskussion kring detta ämnet kommer publiceras senare i denna rapport.

2.5 Laddningstatus och laddningsbeteende av energilagrar

För att kunna bedöma fordonets energiförbrukning under ett varv och hur mycket energilagret laddas upp på laddningssträckan, är det av stor vikt att kunna beräkna energilagrets laddningsnivå vid olika tidpunkter. För batterier beskrivs laddningsnivån med SOC (state of charge), som är andelen mellan batteriets kvarstående kapacitet och dess märkkapacitet [13], medan laddningsnivån i kondensatorer beskrivs utifrån hur mycket potentiell energi kondensatorn har lagrat.

2.5.1 Batterier

Det finns flera metoder för att estimerar ett batteris laddningsnivå, men enligt Liu m.fl. [14] är Coloumb counting metoden den vanligaste. Coloumb counting metoden, förklarar Zhu m.fl. [13], uppskattar SOC genom att integrera strömmen som flödar in eller ut ur batteriet, och beskrivs traditionellt som

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_0^t I(\tau) d\tau, \quad (2)$$

där SOC_0 är det initiala SOC värdet på batteriet, C_N är märkkapacitet, I är strömmen och t är tiden som batteriet laddar upp eller ur. Dock har den tydlig brister, som Liu m.fl [14] förklarar, då den kräver precisa mätningar av strömmen och en exakt uppskattning av batteriets initiala SOC värde för att ge ett korrekt SOC värde vid upp- och urladdning.

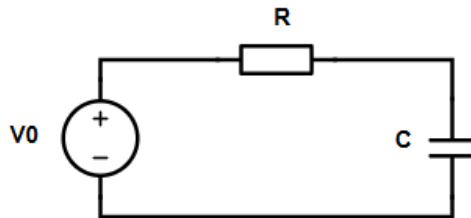
2.5.2 Kondensatorer

Kondensatorer lagrar energi genom elektriska fält, där det arbete som krävs för att separera de positiva och negativa laddningar lagras som potentiell energi [15]. Den potentiella energin kan beräknas med formeln:

$$U = \frac{1}{2} CV^2, \quad (3)$$

där U är potentiell energi, C är kapacitansen och V är spänningen över kondensatorn [15].

V är riktad motsatt spänningskällans spänning och motverkar laddningsflödet, vilket innebär att kondensatorn laddas inte upp omedelbart. Detta, förklarar Beiser [15], leder till att uppladdning sker gradvis över tid. I en krets där en resistor är seriekopplad med en kondensator, som i figur 6, bestäms uppladdningshastigheten av kretsens resistivitet, R och kondensatorns kapacitans, C .



Figur 6: RC krets

Beiser beskriver förloppet med följande uttryck:

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-t/T}), \quad (4)$$

där Q_0 är den maximala laddningen kondensatorn kan uppnå, t är tiden i sekunder och T är kretsens tidskonstant, definierad som $T = RC$.

På motsvarande sätt förändras spänningen över kondensatorn och kondensatorns upplagrade energin som funktion av tiden. Med hjälp av ekvation 1 och ekvation 4 spänningens tidsberoende ges av

$$V(t) = V_0(1 - e^{-t/RC}), \quad (5)$$

där V_0 är den maximala spänningen över kondensatorn. För att sedan beräkna hur mycket potentiell energin som lagrats upp i kondensatorn kan ekvation 5, med hjälp av ekvation 3, omformuleras till följande

$$U(t) = \frac{1}{2}CV_0^2(1 - e^{-t/RC})^2 = \frac{1}{2}CV_0^2(1 - 2e^{-t/RC} + e^{-2t/RC}). \quad (6)$$

Precis som för uppladdningen av en kondensator är urladdning tidsberoende. Detta tidsberoende beskrivs enligt Beiser [15] som

$$Q(t) = Q_0e^{-t/T} \quad (7)$$

vilket ger motsvarande uttryck för spänningen:

$$V(t) = V_0e^{-t/RC}. \quad (8)$$

För att sedan beräkna hur mycket energi som extraherats från kondensatorn kan ekvation 8 kombineras med ekvation 3 till följande

$$U(t) = \frac{1}{2}CV_0^2e^{-2t/RC}. \quad (9)$$

2.6 Centralenheten och dess uppgift

En centralenhet är systemets hjärna och består av en mikrokontroller, som fungerar som dess beräknings- och styrenhet [16]. Enligt Hashemi-Pour [16] är mikrokontrollern en integrerad krets som hanterar databehandling och styr centralenhetens funktioner genom att exekvera programmerade instruktioner. Den tar emot information från resten av systemet via sensorer, inmatningsenheter och kommunikationsgränssnitt och bearbetar dessa data för att utföra olika instruktioner [16]. Mikrokontroller kan programmeras och på så sätt anpassas till olika tillämpningar, vilket gör den central i många inbyggda system.

2.6.1 Fördelar och funktioner hos mikrokontroller från Arduino-familjen

Arduino är en familj av mikrokontroller som är användarvänliga, väldokumenterade och flexibla [17]. De har en enkel utvecklingsmiljö (Arduino IDE) och stöder programmering i C/C++. Arduino har ett stort utbud av expansionsmoduler (shields) och bibliotek, vilket gör det enkelt att ansluta sensorer, motorer och kommunikationsmoduler [17]. Arduino och dess moduler har även en låg kostnad.

2.6.2 Fördelar och funktioner hos mikrokontrollern ESP32

ESP32 är en kraftfull och mångsidig mikrokontroller med inbyggt Wi-Fi och Bluetooth [18], vilket gör den lämplig för att agera som en centralenhet. Den har en dubbelkärnig processor, låg strömförbrukning, flera input-output-portar och stöd för olika kommunikationsprotokoll och ESP32 har ett lågt pris [18].

2.7 Kommunikation mellan centralenhet och fordon

Centralenheten hanterar information och mätdata som skickas från fordonet under gång, därför krävs bra kommunikation mellan fordon och centralenhet. Olika mikrokontroller har olika sätt att kommunicera med varandra, Arduino kommunicerar via Bluetooth och ESP32 använder ESP-NOW protokollet [19]. ESP-NOW protokollet är ett kommunikationsprotokoll som fungerar som ett peer-to-peer (P2P) protokoll, [19]. Detta innebär att ingen extra modul behövs för kommunikation när en ESP32 används.

2.7.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Enheter som inte har ett inbyggt kommunikationsprotokoll kan använda en Bluetooth modul för att kommunicera trådlöst. Bluetooth Low Energy (BLE) är en modul som kan användas för att få två enheter att dela information på kort avstånd. Till skillnad från den klassiska Bluetooth modulen kräver BLE mindre energi för att underhålla kommunikation, vilket gör den mer lämpad för system som är ute efter lång batteritid. BLE arbetar i 2.4 GHz bandet vilket många andra enheter använder, därför kan andra enheter som använder samma band störa och påverka BLE:s räckvidd [20].

2.7.2 Peer-to-peer (P2P)

P2P-protokollet är ett sorts nätverksarkitektur som inte kräver en centralenhet som data skickas till, utan detta protokoll tillåter direkt kommunikation mellan två deltagare. Varje deltagare agerar som både klient och server för att enkelt och snabbt kunna utbyta information [21], detta kan ske via envägs-kommunikation eller tvåvägs-kommunikation. Om bara en enhet behöver skicka information är tvåvägs-kommunikation överflödigt, då passar envägskommunikationen bättre [19].

2.7.3 ESP-NOW

ESP-NOW:s protokollstack erbjuder snabba responstider, mindre fördröjning och mindre paketförluster då den centrala servern har svårare att bli överbelastad. ESP-NOW protokollet använder sig inte av en så kallad handshake som är vanligt bland andra kommunikationsprotokoll. En handshake är till för att etablera en uppkoppling mellan klient och server innan nödvändig data överförs [22], denna process behövs inte med ESP-NOW vilket betyder att dataöverföring mellan två enheter som använder ESP-NOW sker direkt utan någon handshake.

2.8 Sensorers funktionsprinciper

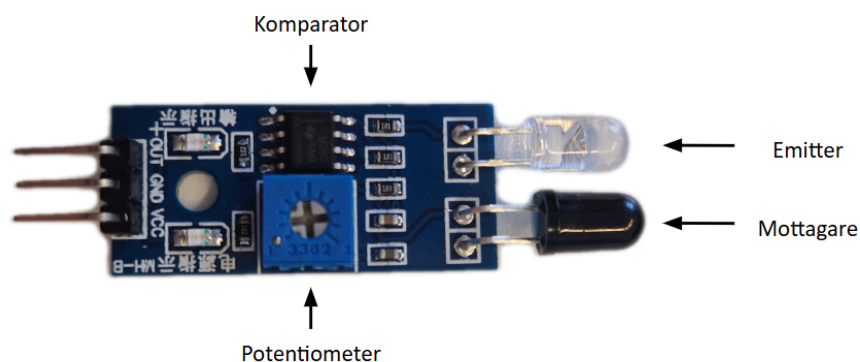
För att kunna mäta bilens position, hastighet och status på energilagrar används sensorer. IR-sensorer (Infra-Red Sensor) kan användas för att identifiera fordonets position längs bilbanan samt beräkna hastighet, medan spänningsmätare tillsammans med mikrokontrollern kan uppskatta energilagrets status. Spänningsmätaren agerar som spänningsdelare och mikrokontrollern läser av denna delade spänning.

2.8.1 IR-Sensor

IR-sensorn använder sig av infrarött ljus för att detektera objekt och består av följande fyra komponenter [23]:

- IR-emitter: IR LED (Light Emitting Diode)
- IR-mottagare: Fotodiod
- Komparator: Operationsförstärkare
- Potentiometer

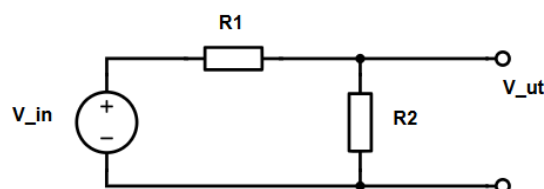
För att detektera objekt sänder IR-emitter ut infrarött ljus, vilket reflekteras tillbaka mot IR-mottagaren. Mottagaren omvandlar det reflekterade ljuset till en elektrisk signal, som sedan skickas vidare till en komparator. Komparatorn konverterar den analoga signalen till en digital signal. För att justera IR-mottagarens känslighet för det reflekterade ljuset kan motståndet på potentiometern ändras. I figur 7 visas sensorns viktigaste komponenter.



Figur 7: IR-sensor

2.8.2 Spänningssensor

Utifall spänningen över energilagret överstiger den nivå som mikrokontrollen kan mäta används en spänningsdelarmodul för att reducera spänningen. Två resistorer seriekopplas med den spänning som önskas mätas, det värde som sedan skickas vidare är spänningen över en av resistorerna, [24]. Ett ekvivalent kretsschema kan ses i figur 8.



Figur 8: Kretsmodell för spänningssensor

V_{in} är spänningen över energilagret som ska mätas och V_{ut} är den reducerade spänningen som skickas till mikrokontrollern. Utspänningen kan beräknas genom följande formel:

$$V_{ut} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

3 Metod

Denna del beskriver den metodik som används i projektet för att implementera och uppnå de mål och krav som satts och i detta avsnitt presenteras hur de tekniska lösningarna har tillämpats. Dessa områden är konstruktion av bilbanan, konstruktion av fordonet och dess energilagrar, samt hur centralenheten och dess kommunikation med fordonet implementerades. Tillsammans bygger de upp projektet och implementerades för att uppnå målen.

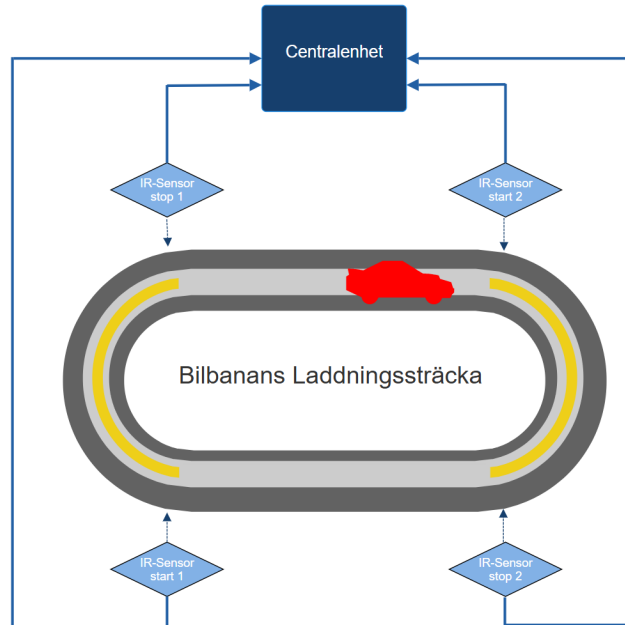
3.1 Konstruktion och modifiering av bilbana

En bilbana har köpts in och modifierats. Den valda bilbanan är "Carrera Bilbana - NASCAR Darlington Showdown", en elektrisk bilbana på 530 centimeter. Denna bilbana har modifierats modulärt enligt de avsedda uppdelningarna och en oval form på 367 cm har byggts. För att skapa en laddningssträcka så har 70 % av banan tejpats med vit eltejp för att förhindra all konduktiv laddning, denna längd valdes baserat på de uppsatta kraven. De elektrifierade och otejpade delarna befinner sig i de två kurvorna på den ovala bilbanan enligt figur 9. Att elektrifiera kurvorna valdes eftersom det efter testkörningar klagjordes att bilen körde långsammare och med mer motstånd när den svänger. Detta möjliggjorde då en längre laddningstid även med en konstant hastighet, samt mindre förbrukning av kondensatorn.

För att använda laddningssträckan som parameter samt inte orsaka mer motstånd på banan behövdes en annan lösning än eltejp. Vi valde att använda IR-sensorer med hjälp utav ett relä för att styra elektrifieringen av banan. IR-sensorerna tejpades fast på de fyra platserna där banan byter från att vara strömgivande till isolerad från bilens strömupptagare. På detta sätt kommer elektrifieringen av bilbanan kunna styras endast via centralenheten istället för att använda eltejp. Centralenheten, vilket är en Arduino Nano ESP32, har placerats i en kopplingsplatta som tejpats fast vid sidan av Carrera Bilbanan. IR-sensorerna har kopplats med elkabel till de olika portarna på centralenheten. Dessa styr i sin tur ett relä som låter spänningen passera till bilbanan när bilen passerar IR-sensorn. Dessa IR-sensorer placerades så att den nya elektrifierade längden av banan blev 134,5 centimeter, alltså 36,6 %. Figur 9 visar en översiktlig bild på hur bilbanan konstrueras samt placering av sensorerna.

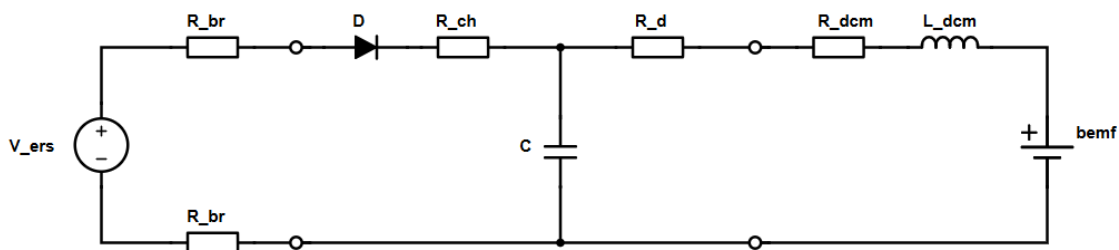
3.2 Konstruktion och modifiering av fordon

Det tillkom två NASCAR Motorsports-bilar i paketet med bilbanan som köptes in. Dessa fordon är i skalan 1:32 med deras verkliga fullskaliga motorfordon. En av bilarna har demonterats så att samtliga inre komponenter är synliga. Ett kretskort som styrde två led lampor kopplades bort så det enda som kvarstod var en kabel som gick från strömupptagaren under bilen till DC-motorn.



Figur 9: Översikt av bilbanan och sensorer

En kopplingsplatta monterades för att kunna koppla komponenter som till exempel resistorer och kondensatorn. Bilen kör utan tak då det lättare går att modifiera och mäta spänning över komponenter. En diod, en kondensator och kablar har dragits enligt figur 10. Dioden behövs då den begränsar att ström flödar i motsatt riktning och laddar ur energikällan över bilbanans spår.



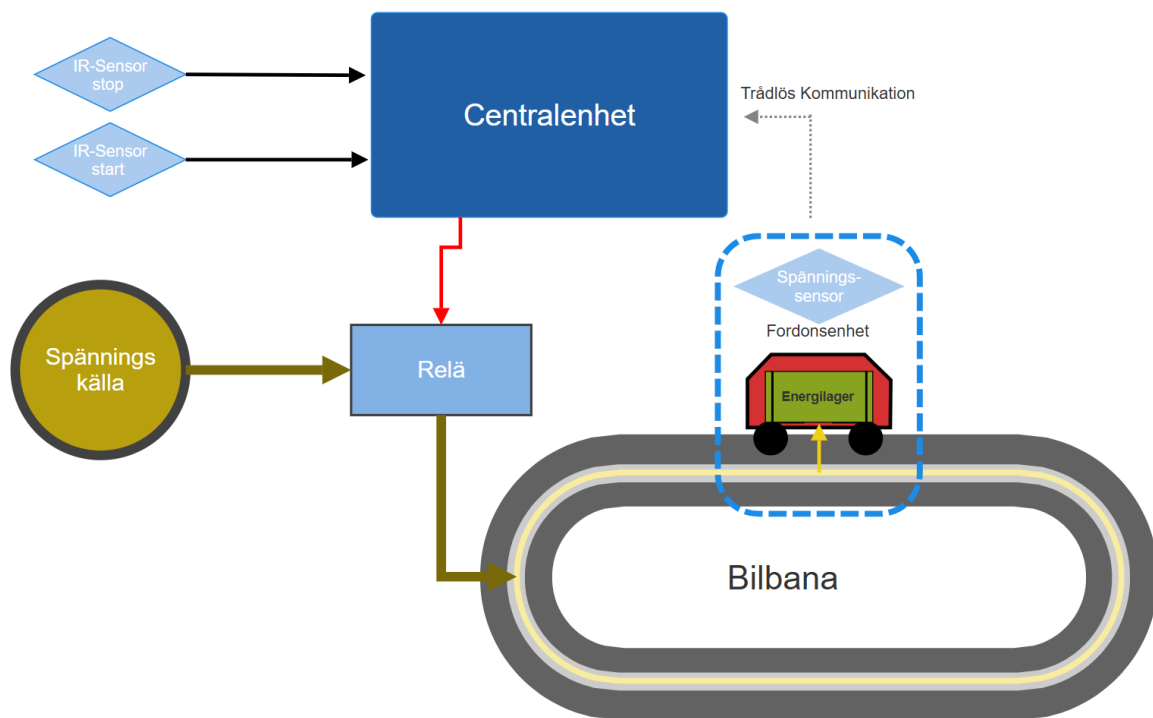
Figur 10: Ekvivalent kretsschema

För att ge en överblick över den modifierade NASCAR-bilen skapades ett kretsschema enligt figur 10. I schemat syns hur strömkällan V_{ers} , en diod D , en kondensator C , DC-motorn $bemf$ samt de olika resistorerna är kopplade tillsammans. Resistorerna som användes i systemet var en charge resistor R_{ch} och en drive resistor R_d som påverkar hur snabbt kondensatorn kan laddas upp och laddas ur. R_{br} är brush resistansen, alltså resistansen i de kontaktflätor som sitter på undersidan av bilen och har kontakt med bilbanan. R_{dcm} och L_{dcm} är resistansen och induktansen för DC-motorn.

En mer permanent bräda har lösts så att kablar och komponenter sitter med mindre ledningsresistans och utan glapp, fortfarande enligt figur 10. Utöver detta har den ena Arduino ESP32 mikrokontrollen monterats på fordonet så att den kan kommunicera med centralenheten. En spänningsmätare har kopplats till mikrokontrollen på bilen för att mikrokontrollen ska kunna mäta spänning över kondensatorn i realtid.

3.3 Implementering av mikrokontroller

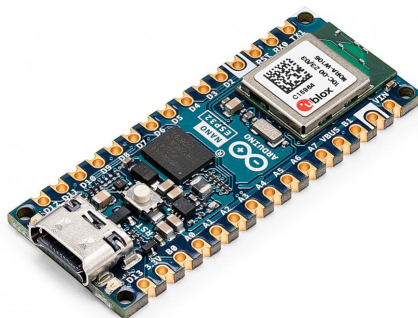
För att kunna utföra tester och få fram resultat behövde fordonet kunna överföra information till centralenheten som sedan presenterade fordonets data. Olika hastigheter, storlekar på kondensatorer och andra faktorer som kan ha påverkat fordonets prestation undersöktes och för att jämföra resultat användes två ESP32 mikrokontroller för att hantera dataöverföringen. En ESP32-enhet agerade som centralenhet och en annan satt fast på fordonet. Figur 11 visar en översiktlig bild över hur centralenhet och fordonsenheten interagerar i systemet.



Figur 11: Block Diagram över elvägssystemets uppbyggnad

3.3.1 Centralenhet

Centralenhetens huvudsakliga uppgift var att ta emot information från fordonsenheten och sensorerna runt om bilbanan, för att sedan presentera informationen från fordonet och sensorerna. Mikrokontrollern ESP32 användes som centralenhet, dess inbyggda WiFi-enhet skötte kommunikation och stödjer som tidigare nämnts även ESP-NOW protokollet. Fordonets hastighet samt kondensatorns status samlades in och presenterades sedan på användarens enhet.



Figur 12: Arduino Nano ESP32 - Mikrokontroller

Figur 12 visar en ESP32 och dess olika GPIO-portar på sidorna. GPIO står för General Purpose Input Output och det är till dessa portar som sensorerna kopplades. En komponent som kopplas till mikrokontrollern kopplas till en egen GPIO-port, programmet som laddats upp till mikrokontrollern behandlar varje GPIO-port för sig. En variabel användes för att initiera porten och tilldela den som antingen input eller output, därefter lästes porten av i en loop som aktiverar sensorn. Med hjälp av avbrottsrutiner kunde sensorerna informera centralenheten när fordonet har passerat. Detta användes sedan för att beräkna fordonets medelhastighet runt banan.

3.3.2 Fordonsenhet

På fordonet monterades en ESP32 mikrokontroller för att etablera kommunikation mellan fordonet och centralenheten. Denna kommunikation implementerades med hjälp av ESP-NOW protokollet som mikrokontrollern ESP32 använder sig av.

För att implementera ESP-NOW krävs mottagarens MAC-adress, mottagaren är i detta fall centralenheten. Detta gjordes genom att skriva ut MAC-adressen till Serial Monitor vilket agerar som Arduino IDE:s egna terminal där alla utskrifter presenterades. Framtagandet av adressen gjordes med följande kod:

```
#include <WiFi.h>

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);
  String macAddress = WiFi.macAddress();
  Serial.println("MAC-adress för ESP32:");
  Serial.println(macAddress);
}
```

Därefter måste kommunikation mellan fordonsenheten och centralenheten upprättas. Initieringen delades upp i två delar, en för avsändare och en för mottagare. Eftersom ESP-NOW protokollet är asynkront och händelsedrivet implementerades två så kallade Callback-funktioner. Funktionerna svarar på händelser för att visa för användaren att en kommunikation mellan två enheter har upprättats. Det gör koden reaktiv eftersom data inte skickas regelbundet, det är baserat på sensorernas avläsning. Fordonsenheten paketerade sedan datan för att via ESP-NOW överföra den till centralenheten som sedan

paketerade upp den och skriver ut den till en Serial Monitor. Med denna metod kunde datan avläsas från centralenheten och för att sedan utföra de nödvändiga testerna.

3.4 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen baserades på kretsen i figur 10 och bestod av ett flertal parametrar som användes för beräkningar av olika fysikaliska storheter i systemet. Värdena på de olika parametrarna hämtades från mätningar och tester på den fysiska banan och var konstanta, med undantag för V_{ers} och kondensatorns kapacitans, C , som istället varierades inom ett fördefinierat intervall mellan olika simuleringar.

För att analysera energiflödet i systemet beräknades strömmen från banan, strömmen till motorn samt spänningen över kondensatorn. Strömmen som gick genom bilbanan in i fordonet, i_{ers} , beräknades genom Ohms lag,

$$i_{ers} = \frac{V_{ers} - V_d - V_C}{2 \cdot R_{br} + R_{ch}}, \quad (11)$$

där V_C är spänningen över kondensatorn. V_C beräknades genom att integrera strömmen:

$$V_C = \int \frac{i_{ers} - i_{dcm}}{C} dt, \quad (12)$$

där i_{dcm} är strömmen in till likströmsmotorn. Det nya värdet på spänningen användes i sin tur för att beräkna ett nytt värde på i_{dcm} genom att integrera

$$\frac{di_{dcm}}{dt} = \frac{1}{L_{dcm}} (V_C - i_{dcm}(R_d + R_{dcm}) - \omega \Psi_{dcm}). \quad (13)$$

där ω är motorns vinkelhastighet. Vinkelhastigheten bestämdes genom att dividera GR , utväxlingsförhållande mellan motorns och hjulens hastighet, med r_w , hjulradien, och multiplicera med bilens hastighet.

Därefter beräknades motorns kraft och friktionskraften som sedan användes för att bestämma fordonets position och hastighet. För att beräkna motorns kraft användes följande

$$F_{dcm} = i_{dcm} \Psi_{dcm}, \quad (14)$$

där Ψ_{dcm} är flödeslänkningen i motorn. Friktionskraften, F_f , bestämdes av fordonets position och hade olika värden beroende på om fordonet befann sig på en raksträcka eller kurva. De olika värdena på friktionskraften mättes på den fysiska banan. Sedan beräknades hastigheten genom att integrera Newtons andra lag,

$$F_{dcm} - F_f = ma, \quad (15)$$

och dividerades med m , som är fordonets massa. Positionen bestämdes sedan genom att integrera hastigheten. En bild på hur dessa matematiska modeller är uppbyggda i simuleringen syns i Simulinkmodellen i Appendix B.1.

3.5 Verifiering

För att granska om skalmodellen uppfyller projektets syfte genomfördes tester för att undersöka hur hastigheten och energiförbrukningen kan variera och bero på modellens olika parametrar. De olika parametrar som varierades var spänningen på banan och kapacitansen på kondensator. Spänningen varierades mellan 4-6 V och kondensatorn mellan 1-10 F.

Innan några tester gjordes mättes ett flertal parametrar på den fysiska banan som användes vid simulering och teoretiska beräkningar. Resistansen i kontakterna mellan fordonet och bilbanan mättes med multimeter och R_{br} samt motorns inre resistans, R_{dcn} togs fram ur dess datablad [25]. Längden på laddningssträckan och bilbanans kurvor och raksträckor, samt radien av fordonets hjul, mättes med måttband eller linjal. Bilen vägdes för att bestämma dess massa.

För att kunna anpassa simuleringsmodellen till skalmodellen behövdes friktionskraften mellan banan och bilen estimeras. Detta görs genom att utföra tester på bilbanan och sedan anpassa friktionskraften i simuleringsparametrarna tills att simuleringsresultaten stämmer överens med de verkliga resultaten.

Bilens hastighet mättes under varvets gång upp mellan två av IR-sensorerna placerade längs banan, som illustrerat i figur 9. Avståndet mellan sensorerna, l , var uppmätta innan testerna börjat. Tiden det tog för bilen att färdas mellan de två sensorerna, t , mättes med hjälp av IR-sensorerna där den första sensorn startade en timer och den andra sensorn avsluta timern. Mikrokontrollern beräknade sedan hastigheten enligt:

$$v = \frac{l}{t}. \quad (16)$$

Energiförbrukningen testades genom att mäta spänningen över kondensatorn med hjälp av spänningssensorn. Det uppmätta värdet skickades sedan in till mikrokontrollern på bilen, som med hjälp av ekvation 10 beräknade den faktiska spänningen baserat på den reducerade signalen från spänningsdelaren. Därefter beräknades energin lagrad i kondensatorn med ekvation 3 och plottades i en energi-distans graf.

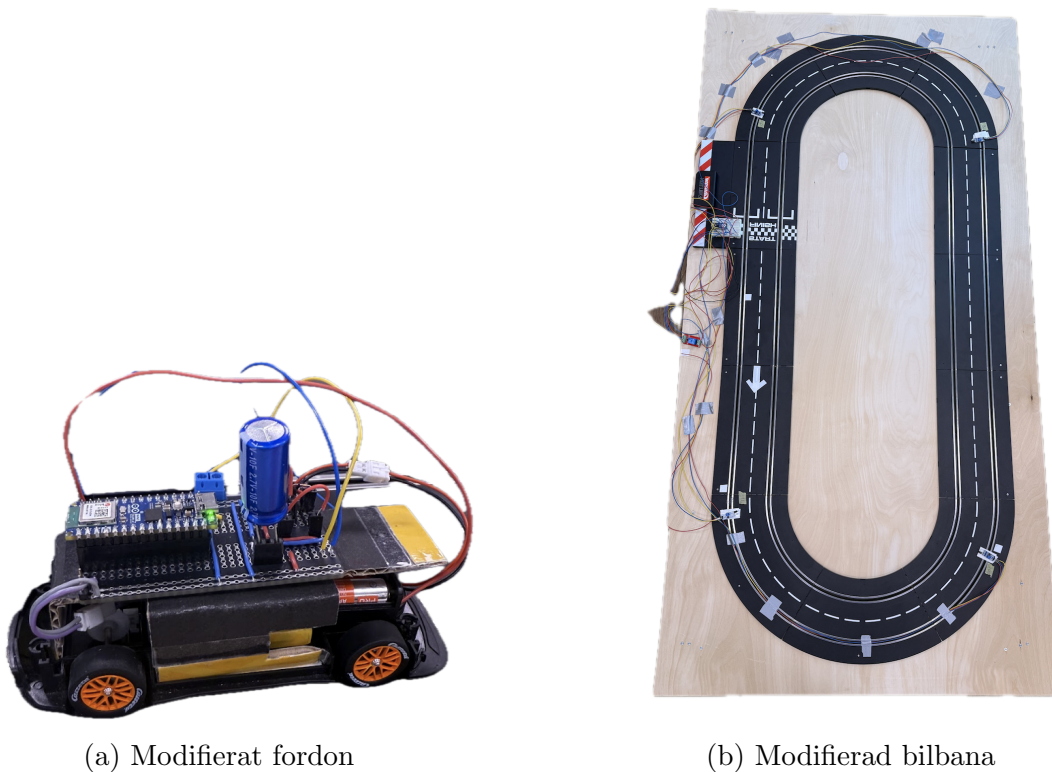
4 Resultat

Resultaten har strukturerats utifrån projektets huvudsakliga delmoment för att ge en tydlig och ordnad överblick över de tester som utförts för att verifiera att kraven har uppfyllts. Inledningsvis presenteras de mätningar som genomförts på den modifierade bilen och bilbanan och sedan anpassningen av simuleringsmodellen.

4.1 Varierad spänning och kondensatorstorlek

För att kunna undersöka skalmodellens beteende utfördes tester genom att variera spänningen på bilbanan samt variera storlek på bilens kondensator. Bilbanans spänning varierades mellan 4 V, 5 V och 6 V, kondensatorerna varierades mellan 10 F, 4,7 F och 1 F, där testerna började med 5 V för att sedan jämföra med högre och lägre spänning. Däremot ansågs de resultat från tester med 1 F kondensatorn vara otillräckliga då den lagrade energin i kondensatorn inte räckte till nästa laddningssträcka oberoende av elvägens

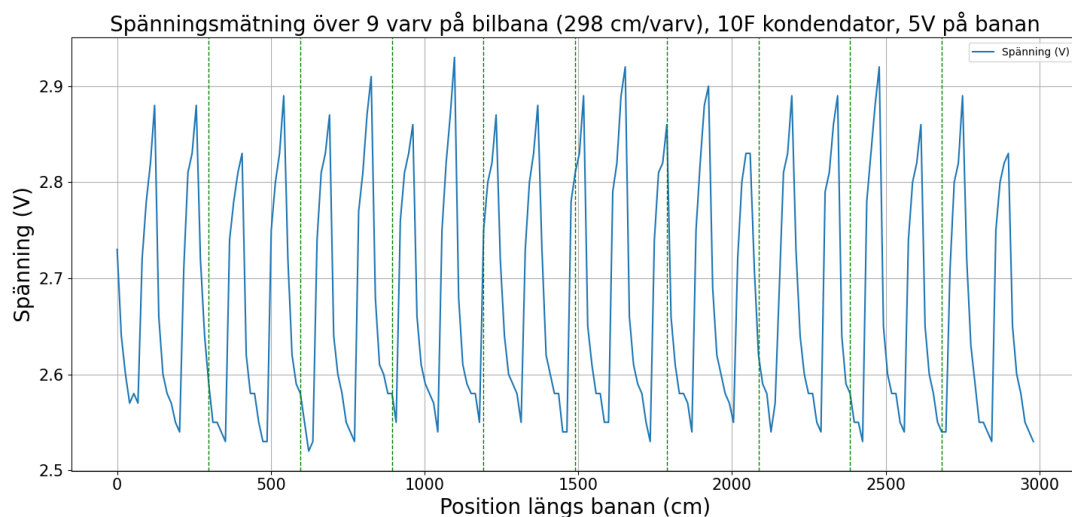
spänning. Därför testades 1 F kondensatorn enbart en gång på en bana med spänningen 5 V, samtidigt som resterande kondensatorstorlekar testades på samtliga banspänningar. För samtliga tester laddades fordonets kondensator upp till 2,7 V, vilket är kondensatorernas märkspänning. Fordonet släpptes därefter iväg för att samla in data, den rullade på bra så länge energilagret inte blev mindre än 2,1 V, då blev motståndet i kurvorna för högt eftersom friktionen var betydligt högre i kurvor än på raksträckor. Alla tester är baserade på 9 varv runt banan med enbart kurvorna som laddningssträcka, vilket motsvarar cirka 38% av bilbanan, då det ansågs vara tillräckligt för att samla data för testerna. För att testet ska anses vara godkänt krävs det att graferna visar en jämn eller positiv trend under de 9 varven, alltså att laddningen över tid inte sjunker. Testerna utfördes med hjälp av den modifierade bilen och bilbanan som visas i figur 13.



Figur 13: Färdigmodifierad bil och bilbana

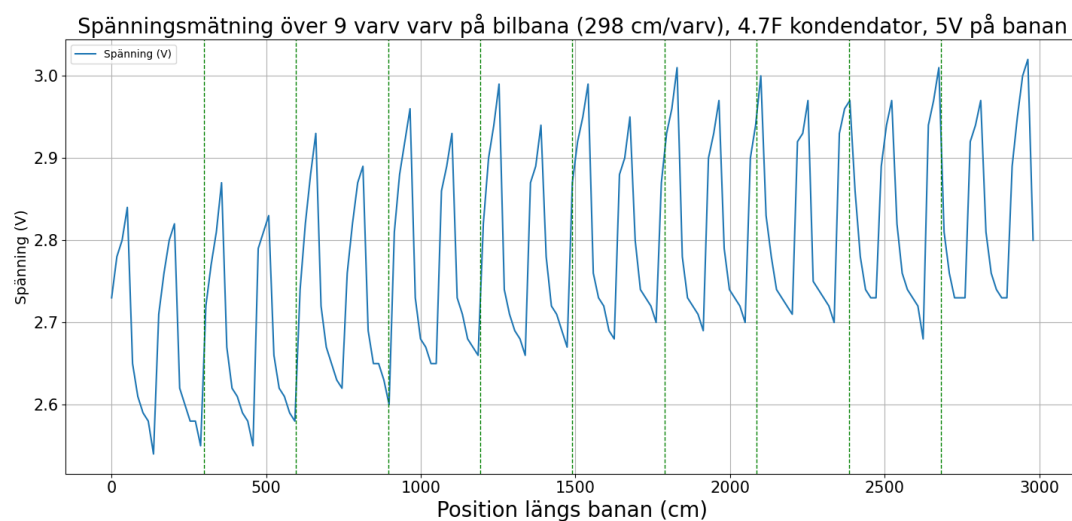
4.1.1 Banspänning 5 V

Första testet som utfördes var med en banspänning på 5 V, där testades de olika kondensatorerna med storlek 10 F, 4,7 F och 1 F för att undersöka hur fordonet betedde sig under omständigheterna. Resultaten presenterades direkt i Arduino IDE:s terminal där de sedan illustrerades grafiskt för att undersöka fordonets beteende beroende på de olika parametrarna. Första kondensatorn som testades hade kapacitansen 10 F, den visade en jämn uppladdning och urladdning vilket tyder på att fordonet med denna uppsättning inte hade några problem att köra runt banan. Figur 14 visar hur uppladdning och urladdning håller en konsekvent trend med 10 F kondensator och en banspänning på 5 V. Dessutom höll fordonet en jämn medelhastighet på 0,75 m/s.



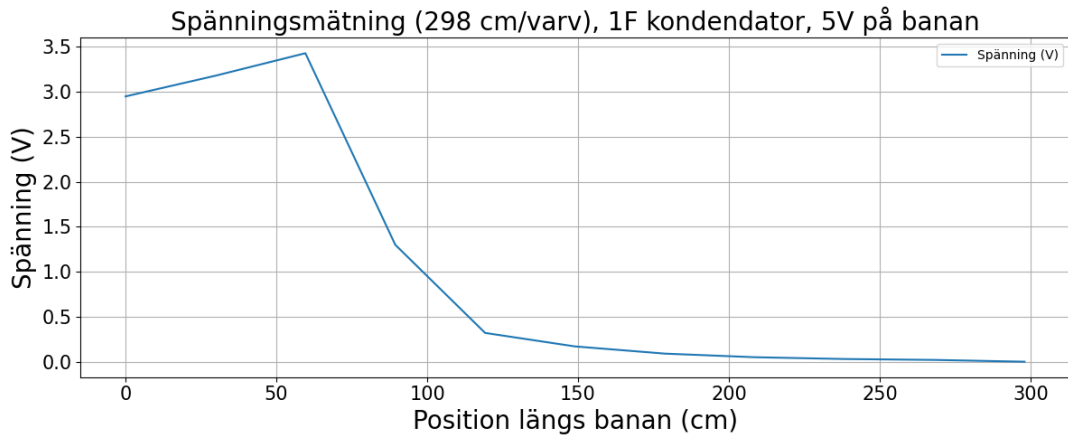
Figur 14: 10 F kondensator, 5 V bilbana

Därefter utfördes tester med en 4,7 F kondensator som erbjuder en snabbare upp- och urladdning enligt ekvation 5 och 8, vilket ledde till att banspänningen på 5 V var något hög då en positiv trend presenterades. Figur 15 visar hur spänningen över kondensatorn med kapacitansen 4,7 F ökar för varje varv som körs, ursprungsladdningen över kondensatorn var 2,7 V men efter 9 varv ligger den högsta uppmätta laddningen på ungefär 3,03 V. Precis som tidigare test med 10 F så höll fordonet en jämn medelhastighet på 0,75 m/s.



Figur 15: 4,7 F kondensator, 5 V bilbana

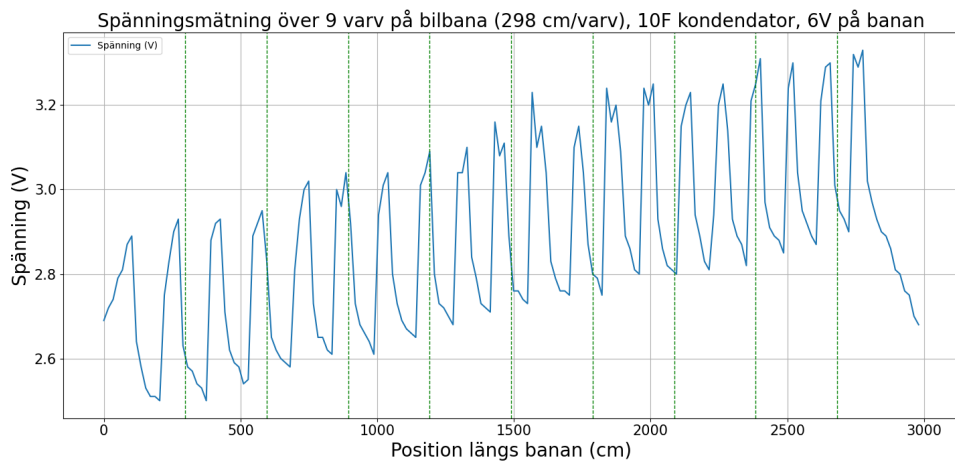
Som tidigare nämnts ansågs testerna med 1 F kondensatorn vara otillräckliga uppladdning sker för snabbt och urladdning lika fort. Detta resulterade i att fordonet stannade av så fort banan inte var elektrifierad. Detta var det enda testet som utfördes med 1 F kondensatorn då en ändring av banans spänning inte hade tillfört några nya resultat värda att analysera. I figur 16 syns det att så fort fordonet släpps iväg och passerar den elektrifierade delen sjunker spänningen nästan omedelbart till 0 V. Energiåtgången var alltför stor för att driva fordonet; eftersom fordonet aldrig passerade en annan IR-sensor kunde ingen medelhastighet bestämmas. En urladdningsresistor lades till för att se om det skulle göra någon skillnad, men resultatet blev detsamma.



Figur 16: 1 F kondensator, 5 V bilbana

4.1.2 Banspänning 6 V

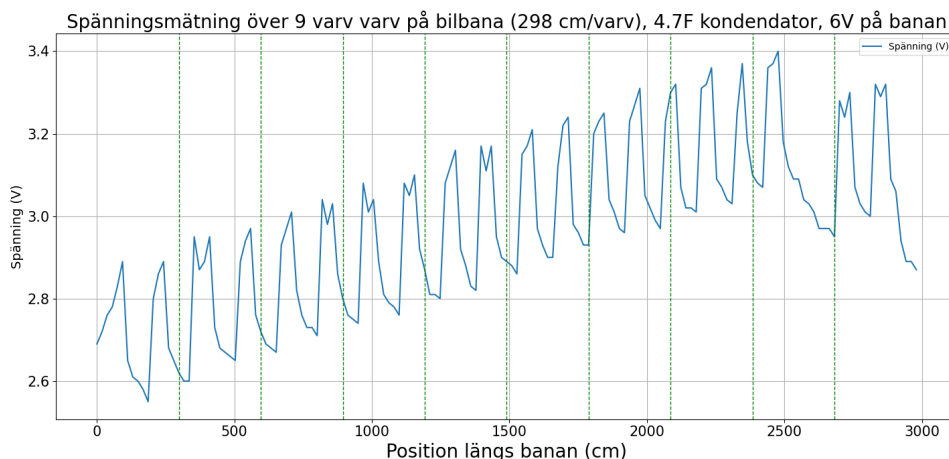
Spänningen på banan ökades och nya tester med 10 F och 4,7 F utfördes. Eftersom 1 F var allt för lite kapacitans så testades inte denna kondensator mer efter det första testet. Först sattes 10 F kondensatorn på fordonet och resultatet illustreras i figur 17.



Figur 17: 10 F kondensator, 6 V bilbana

Vid analys av grafen syns det tydligt att 6 V är en hög spänning för bilbanan då en positiv trend framgår och spänningen över kondensatorn går från 2,7 V vid start och efter 9 varv är den högst uppmätta spänningen 3,3 V. 10 F är ett väldigt stort energilager och en positiv trend visar att 6 V på bilbanan är en för hög spänning då en jämn spänningsnivå vill uppnås, precis som i figur 14. Denna ökning i spänning över kondensatorn medförde också en ökning i medelhastighet från 0,75 m/s till 0,99 m/s.

Som förväntat visar testet med 4,7 F kondensatorn på bilbanan med 6 V också en positiv trend vilket kan ses i figur 18, dock ökar spänningen över kondensatorn snabbare.

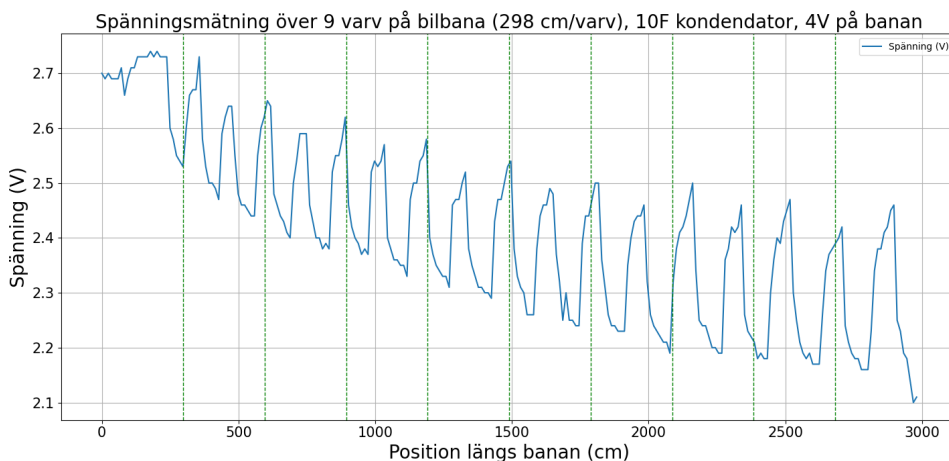


Figur 18: 4,7 F kondensator, 6 V bilbana

Detta var väntat enligt de ekvationer som tidigare nämnts till följd av den högre banspänningen. Medelhastigheten ökade från 0,75 m/s till 0,99 m/s i detta test. I figur 18 uppmärksammas även en oförväntad nedgång av spänningen över kondensatorn, detta beror på att en av sensorerna inte reagerade på fordonet för att aktivera laddningssträckan igen. Detta ansågs inte vara ett problem då helheten av testet framgår tydligt i grafen och inget nytt test behövde utföras.

4.1.3 Banspänning 4 V

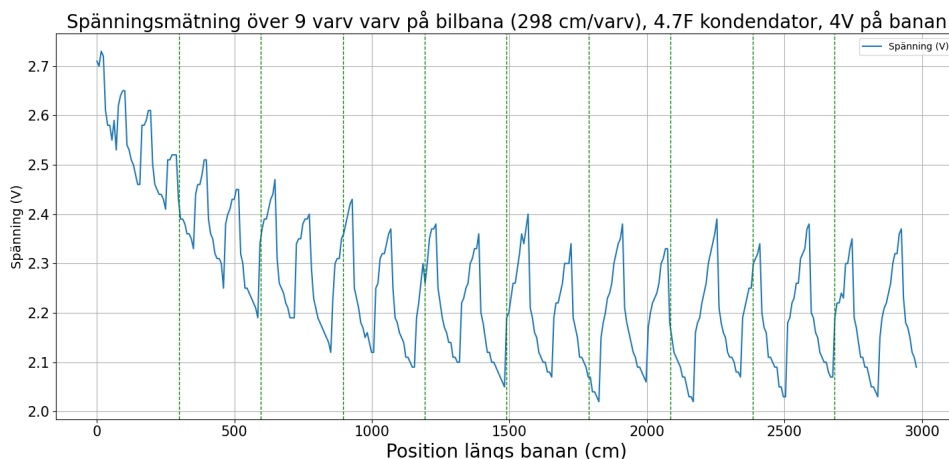
Det näst sista testet som utfördes var med en banspänning på 4 V och samma storlek på kondensatorerna som i de tidigare testerna. I testet med 10 F kondensator framgick det att fordonet med lägre spänning på banan inte hinner ladda upp tillräckligt för att köra oändligt med varv, detta syns i figur 19.



Figur 19: 10 F kondensator, 4 V bilbana

Efter tre varv gick medelhastigheten från 0,6 m/s till 0,43 m/s vilket är en markant minskning på tre varv. Detta visade på att en spänning på 4 V är för låg för en kondensator på 10 F då den inte hinner ladda upp tillräckligt på laddningssträckan.

För testet med 4,7 F kondensator uppmärksammades samma trend som för 10 F vilket kan ses i figur 20.



Figur 20: 4,7 F kondensator, 4 V bilbana

I figuren framgår det att 4 V är för låg banspänning för att hålla en jämn nivå på fordonets uppladdning och urladdning, samt hastighet. Till skillnad från testet med 10 F där grafen aldrig nådde en jämn nivå utan bara visade en negativ trend, så jämnade denna graf ut sig efter varv 4 vilket syns i figur 20. Medelhastigheten gick från 0,6 m/s till 0,33 m/s men fordonet laddades upp tillräckligt på laddningssträckan för att kunna klara av varv efter varv vilket syns i grafen. Detta är däremot inte hållbart då laddningen i början reduceras markant med 4 V banspänning.

4.2 Anpassning av simuleringsmodell

För att undersöka simuleringsmodellens precision jämt emot skalmodellen har simuleringsparametrar uppdaterats med hjälp utav resultaten på den fysiska bilbanan. De parametrar, samt deras nygivna värden, som anpassats till modellen i simuleringen är:

- $R_{br} = 0,55$, resistansen i borstarna under bilen
- $R_{ch} = 2$, resistansen i uppladdningen
- $R_d = 2$, resistansen i urladdningen
- $m_v = 0,1459$, bilens vikt
- $r_w = 0,011$, bilens hjulradie
- $GR = 3$, utväxlingsförhållande motor/hjul
- $F_{curve} = 0,6$, friktionskraften i kurvorna
- $F_{straight} = 0,5$, friktionskraften i raksträckorna

- $V_d = 0,7$, skyddsdiodes spänningsfall
- $R_{dcm} = 2$, motorns interna resistans
- $\Psi = 1,5 \cdot 10^{-2}$, motorns flödeskoppling
- $L_{dcm} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, motorns induktans
- $V_{ers} = \text{Designparameter}$, spänningen över bilbanan
- $C = \text{Designparameter}$, kondensatorns kapacitans

Spänningen över bilbanan, V_{ers} samt kondensatorns kapacitans, C bestämt vid varje simulering och är de huvudpunktliga parametrar som undersöks för systemets prestanda. De ovannämnda parametrarna ligger i en matlab fil vars kod ligger i Appendix B.2. Denna kod körs för att ladda parametrarna och diverse variabler med värden samt simulera en Simulink fil via följande kod:

```
sim('ScalextricModel_new.slx')
```

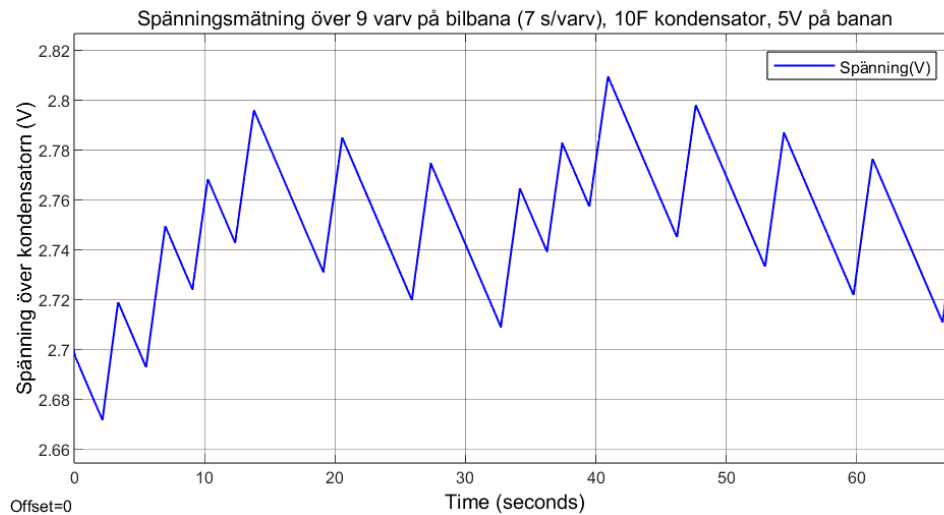
Simulinkmodellen finns i Appendix B.1.

De kommande figurerna visar simulering av systemet med 5 V, 6 V respektive 4 V på bilbanan. Samtliga spänningar simulerades med både en 10 F kondensator samt en 4,7 F kondensator. Dessa simuleringvärden valdes då bilen kördes med dessa olika värden vid verkliga tester, på så sätt kan det verifieras hur verklighetstrogen simuleringen är. En startspänning på 2,7 V över kondensatorn valdes för simuleringen då detta var när bilen började rulla i de verkliga resultaten.

Eftersom Simulink endast visar tid på x-axeln, har graferna skalats till motsvarande mängd varv för att möjliggöra jämförelse. Ett varv på bilbanan tog simuleringen cirka 7 sekunder. Graferna visar spänningen över 70 sekunder, alltså 10 varv, för att efterlikna de verkliga testerna. Detta för att lättare kunna jämföra resultat.

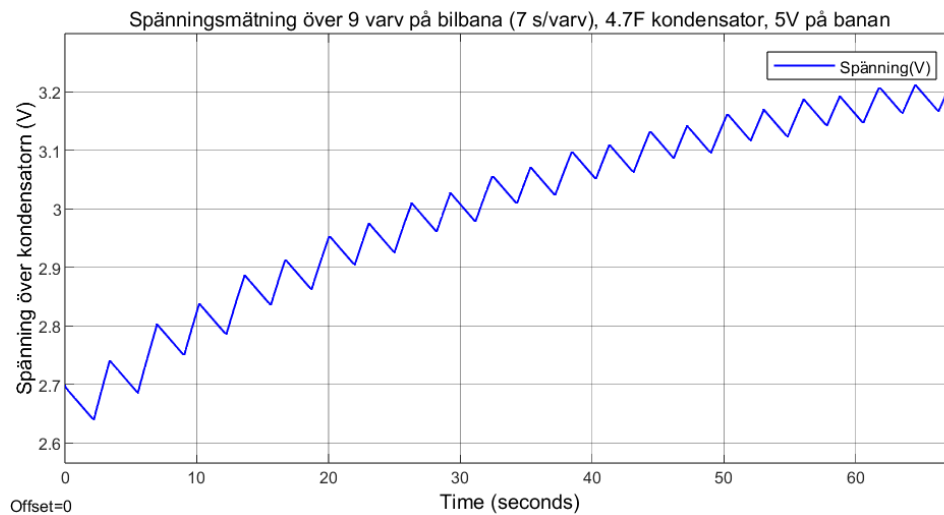
4.2.1 Banspänning 5 V

Resultaten i figur 21 simulerades med en kondensator på 10 F. Figuren visar en relativt stabil spänning över kondensatorn där värdet svävar kring startspänningen på 2,7 V. En kondensator på 10 F laddas upp långsammare än en mindre kondensator vilket leder till att uppladdningen och urladdningen i princip tar ut varandra, därav den relativt plana spänningen över tid.



Figur 21: Simulering med $C=10$ F kondensator och $V_{ers} = 5$ V.

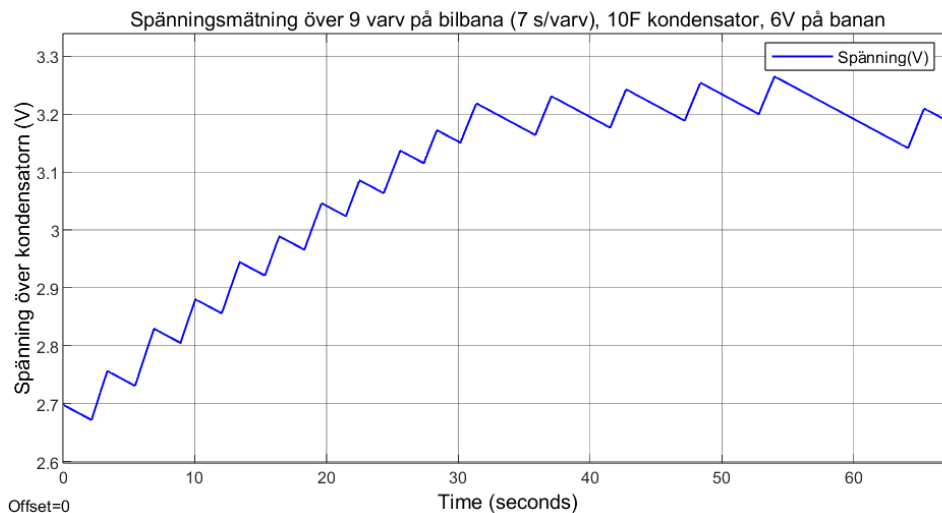
Figur 22 simulerades med samma spänning fast med en kondensator på 4,7 F. Spänningen över kondensatorn ökar logaritmiskt från startspänningen på 2,7 V för att sedan plana ut mot 3,2 V. Detta går att jämföra med de verkliga resultaten i figur 15 och se ett ganska tydligt samband, dock med ett lägre spänningsmaximum i verkligheten.



Figur 22: Simulering med $C=4,7$ F kondensator och $V_{ers} = 5$ V.

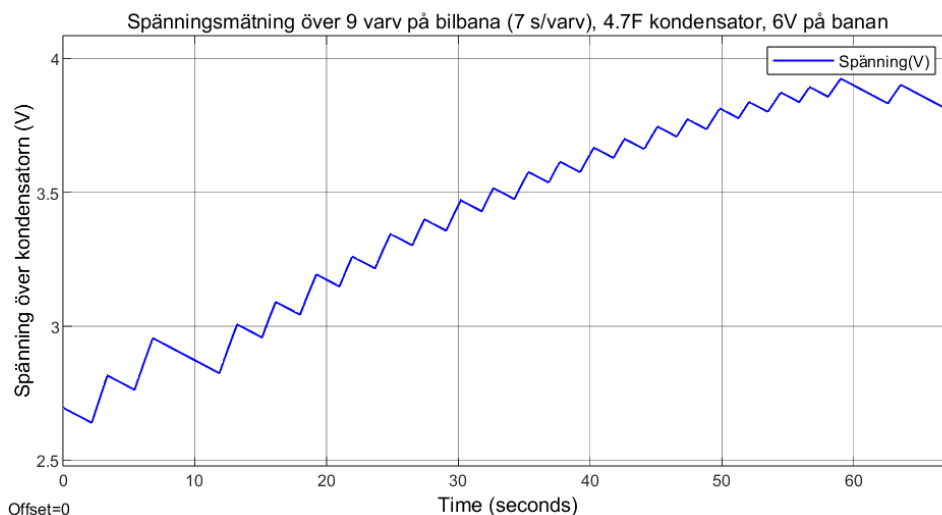
4.2.2 Banspänning 6 V

Figur 23 simulerades med en ökad spänning på nu 6 V. Denna graf har mer av ett linjärt utseende, särskilt i början, än 22 vilket också gick att se på det verkliga resultatet i figur 17.



Figur 23: Simulering med $C=10$ F kondensator och $V_{ers} = 6$ V.

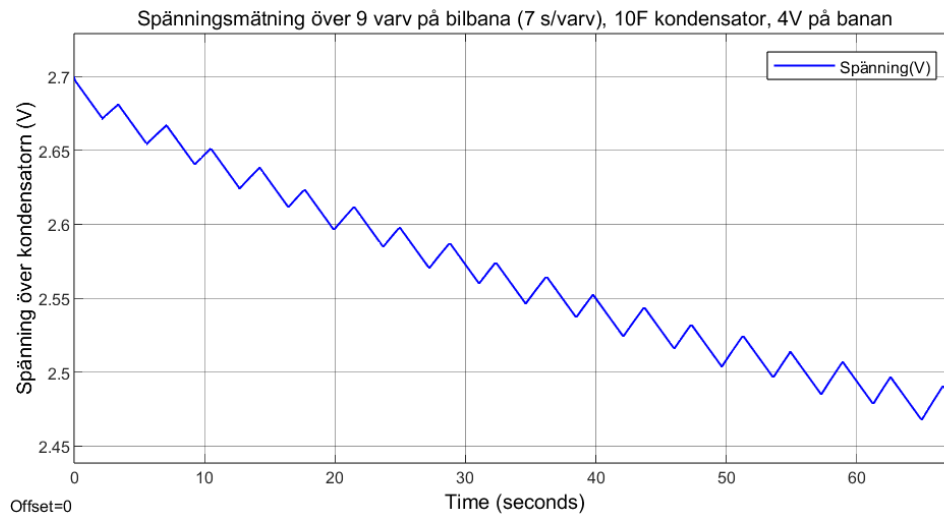
I figur 24 behövs spänningen i bilbanan densamma men kondensatorn sänktes till 4,7 F. I denna graf är det också ett mer linjärt samband än vad vi sett i figur 22. Denna simulering går att jämföra med figur 18 och ett tydligt samband går att urskilja.



Figur 24: Simulering med $C=4,7$ F kondensator och $V_{ers} = 6$ V.

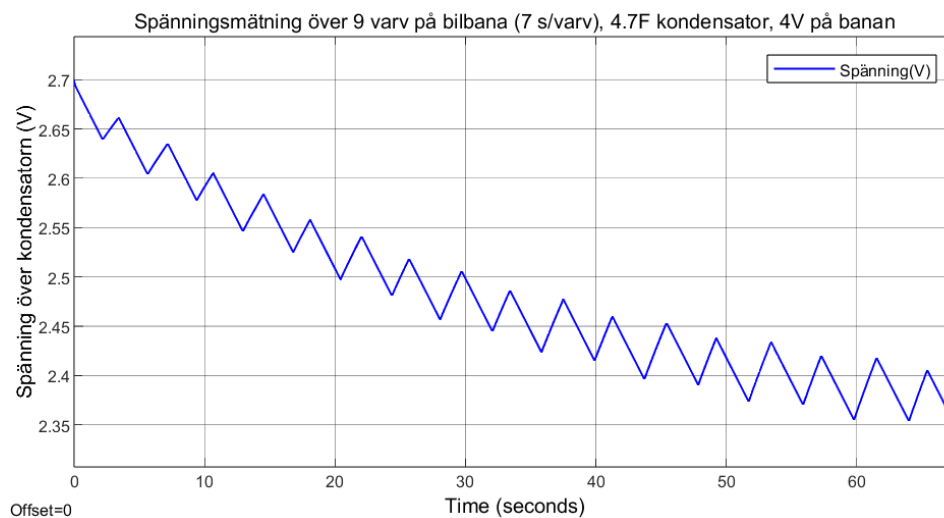
4.2.3 Banspänning 4 V

I sista testet sänktes spänningen på bilbanan till 4 V och systemet har simulerats med en 10 F kondensator och en 4,7 F. Med en spänning så pass låg kan vi urskilja ett exponentiellt avtagande samband. Figur 25 visar att spänningen över kondensatorn går ner från 2,7 V till ungefär 2,5 V efter 70 sekunder, alltså 10 varv. De båda nästkommande graferna går att jämföra med de verkliga resultaten i figur 19 respektive figur 20 och ett tydligt samband går att urskilja.



Figur 25: Simulering med $C=10$ F kondensator och $V_{ers} = 4$ V.

Figur 26 visar att spänningen över kondensatorn går ner från 2,7 V till ungefär 2,35 V efter 70 sekunder, alltså 10 varv. En behållen spänning men en mindre kondensator har alltså inte kunnat hålla den initiala laddning på 2,7 V lika bra under drift som i figur 25.



Figur 26: Simulering med $C=4,7$ F kondensator och $V_{ers} = 4$ V.

5 Diskussion

I denna del diskuteras och analyseras arbetets gång och framtida förbättringar som kan utveckla detta projekt. Dessutom kommer felkällor och problem som stötts på under projektet att tas upp, samt de etiska aspekterna som berör detta projekt ifall elvägssystem skulle sättas i arbete på verkliga bilvägar.

5.1 Utvärdering av kravuppfyllelse

I detta avsnitt utvärderas de fyra krav som formulerades vid projektets början. Kraven utvärderas med avseende på huruvida de har uppfyllts, samt om och i vilken utsträckning eventuella justeringar har genomförts.

5.1.1 Elektrifierad laddningssträcka

Kravet att elektrifiera 30% av bilbanan, samt möjligheten att sätta på och stänga av laddningssträckan, uppfylldes. Den ursprungliga lösningen var att placera hela laddningssträckan på en av banans raksträckor, men vid implementering på den fysiska bilbanan visade sig dock denna placering vara bristfällig. Friktionen i kurvorna var avsevärt mycket högre än på raksträckorna, vilket ledde till att energin i kondensatorn inte var tillräcklig för att driva fordonet genom kurvan. För att återgärda detta delades laddningssträckan upp i två sektioner och placerades i bilbanans kurvor. Denna lösning gjorde att fordonet kunde köra genom kurvorna utan att stanna, tack vare den extra energitillförseln under de mest krävande delarna av banan. Detta visar att inte enbart den totala längden av laddningssträckan är avgörande för systemets funktion, utan även dess placering. Dock blev laddningssträckan 38% av banans totala längd under testningen då det var svårt att anpassa de två laddningssträckorna till kravet men systemet har möjlighet att uppnå kravet vid behov.

5.1.2 Ladda bilen och köra obegränsat antal varv

Uppladdningen av kondensatorn fungerade som avsett och beroende på banans matnings-spänning, kondensatorns kapacitans, resistansen i uppladdnings- och urladdningsresistorerna samt längden på laddningssträckan, kunde fordonet i vissa fall köras ett obegränsat antal varv utan att energinivån sjönk. Som redovisas i avsnitt 4.2.1, uppnåddes dock inte alltid samma laddningsnivå efter varje varv utan den både sjönk och ökade beroende på systemets dimensioner.

5.1.3 Fordonsmätningar

Systemet har implementerats så att fordonets medelhastighet uppdateras vid varje varv, medan energilagrets laddningsnivå uppdateras kontinuerligt under drift. Den beräknade medelhastigheten omfattade dock inte hela varvet, eftersom mikrokontrollerns tidtagning aktiverades och avaktiverades av två separata sensorer. Som följd av detta baserades medelhastighetsberäkningen på data från båda raksträckorna samt en av kurvorna. Mätningen av kondensatorns laddningsnivå fungerade däremot enligt förväntan och återgavs som den aktuella spänningen över kondensatorn. Samtliga mätvärden visualiserades på en dator ansluten till systemets centralenhet.

5.1.4 Simuleringsmodell och matematiska modeller

En simuleringsmodell anpassad till den fysiska elvägen har utvecklats. Jämförelse mellan simulerade och uppmätta värden visar att avvikelserna ligger inom den felmarginal som fastställts i kravspecifikationen. Modellen kan därmed användas för att på ett tillförlitligt sätt uppskatta skalmodellens beteende under olika driftförhållanden, kravet anses därmed vara uppfyllt.

5.2 Faktorer som påverkar hastighet, energiförbrukning och antal körda varv

I detta avsnitt presenteras slutsatser som dragits från testerna på den fysiska banan, samt från simuleringen. Slutsatserna kopplas till hur olika parametrar påverkade fordonets hastighet, energiförbrukning och antalet varv fordonet kunde köra.

5.2.1 Hastighet

Testerna från den fysiska banan och simuleringen, visar tydligt att fordonets hastighet är starkt beroende av spänningen över kondensatorn. Hastigheten ökar vid högre banspänning samt vid minskad kapacitans, då detta leder till en ökad spänning över kondensatorn. Att spänningen över kondensatorn påverkar hastigheten kan förklaras med ekvation 8, som visar att spänningen över kondensatorn är en exponentiellt avtagande funktion. Med andra ord minskar spänningen som mest när spänningen är som störst. Det innebär att mest energi överförs från kondensatorn till motorn under denna period, vilket i sin tur medför större drivkraft och följaktligen högre hastighet.

Hastigheten påverkas inte enbart av spänningen över kondensatorn, även storleken på urladdningsresistorn har stor inverkan. När dess resistans är större minskar strömmen till motorn, vilket i sin tur leder till att hastigheten blir lägre.

5.2.2 Energiförbrukning och antal körda varv

För att fordonet ska kunna köra flera varv krävs att kondensatorn laddas upp lika snabbt som, eller snabbare än, den laddas ur under körning. Eftersom laddningstiden är omvänt proportionell mot kondensatorns kapacitans är uppladdningen som snabbast vid låg kapacitans. Det kan därför vara fördelaktigt att använda en kondensator med mindre kapacitans, under förutsättning att den fortfarande kan lagra tillräckligt med energi för att driva fordonet till nästa laddningssträcka. Denna princip bekräftas av testerna med banspänningarna 5 V och 6 V. Vid båda spänningarna ökade laddningsnivån hos 4,7F-kondensatorn mellan varven, medan för 10 F-kondensatorn var spänningen oförändrad mellan varven vid 5 V, och ökade först vid 6 V.

En nackdel med lägre kapacitans är dock att kondensatorn inte bara laddas upp snabbare, utan även laddas ur snabbare. Detta kan delvis kompenseras genom justering av resistansen i uppladdnings- och urladdningskretsarna. Högre motstånd minskar strömmens storlek och förlänger därmed både laddnings- och urladdningstiden. Ytterligare en begränsning med mindre kondensatorer är att de kräver högre banspänning för att uppnå tillräcklig energinivå under laddningssträckan. Detta framgår tydligt i testet med 4 V banspänning: båda kondensatorerna, 4,7 F och 10 F, visade minskad spänning efter ett varv, men fordonet med 10 F-kondensator hade både högre hastighet och högre kvarvarande spänning. Detta är förväntat, eftersom den större kondensatorn både laddas ur långsammare och har högre total energilagringkapacitet.

5.3 Felkällor och problematik

Under projektets gång har ett antal osäkerheter och potentiella felkällor identifierats som kan påverka både mätresultat och tolkning av simuleringsdata, dessa presenteras nedan.

5.3.1 Mätningar

En problematik uppstod vid mätning av spänningen över kondensatorn. Eftersom denna spänning varierar över tid är det svårt att verifiera mätvärdena mot någon stabil referens. Spänningsmätaren har visat sig fungera väl vid mätning av konstanta spänningar, men tillförlitligheten vid snabbt varierande spänningar är mindre säker. Detta påverkar noggrannheten i analysen av kondensatorns beteende i systemet. På grund av effektutveckling i systemet, som leder till hög värme, kan inte uppladdning och urladdningsresistorer implementeras då resistorer som har hög nog värmeterans inte kunde införskaffas under projektets gång. Detta leder till att dessa parametrar antas vara noll. Ytterligare en begränsning i experimentuppställningen var avsaknaden av strömmätning. Utan möjlighet att mäta strömmen genom motorn går det inte att göra en fullständig jämförelse mellan simulering och verklighet. Detta påverkar särskilt bedömningen av förluster och den elektriska effektiviteten i systemet.

5.3.2 Simulering

Dessa felkällor som presenteras påverkade främst simuleringsmodellen. En felkälla är att motorns elektriska resistans sannolikt varierar med temperaturen. Vid längre drift eller hög belastning kan temperaturen stiga, vilket påverkar motorns beteende och gör simuleringar baserade på en konstant resistans mindre tillförlitliga. Ytterligare felkälla var att friktionskoefficienten approximeras i simuleringsmodellen genom att variera den tills att simuleringen överensstämmer med resultaten på bilbanan. De andra parametrarna är kända från datablad och mätningar men eventuella fel i parametrarna kan fortplanta sig i friktionskoefficienten.

Scope-blocket i Simulinkmodellen kan endast visa tid på x-axeln. För att bättre efterlikna de verkliga resultaten hade en x-axel med avstånd i centimeter varit önskvärd. Detta hade krävt att exportera rådata och plotta i exempelvis Matlab eller Python. Modellen visar dock antal varv istället för totalt avstånd, vilket påverkade spänningskurvan vid ändring, på grund av hur Simulinkmodellen är uppbyggd. På grund av tidsbrist kunde modellen inte byggas om från noll. X-axeln visar alltså tid men skalad till den tid det tog att köra 10 varv, vilket ändå liknar de verkliga graferna.

Sista felkällan som anmärktes angående simuleringsmodellen var att vid låga kapacitanser, runt 1 F, skilde sig simuleringen från testerna utförda på bilbanan så pass mycket att det försvårar verifieringen av dessa försök. Det var alltså inte av intresse att simulera en graf med 1 F så som vi gjorde i de verkliga testerna. Felkällan beror på att Simulinkmodellen inte fullt ut tar hänsyn till de egenskaper som uppstår hos små kondensatorer, alltså vid lägre kapacitanser. Detta kan förklara avvikelserna mellan simulering och mätdata vid låga kapacitanser.

5.3.3 Fordonsdrift

Systemet hade svårt att driva fordonet med spänningar under 2,2 V över kondensatorn. Detta indikerar att det finns en kritisk spänningsnivå under vilken motorn inte längre kan övervinna det mekaniska motståndet. Detta är viktigt att ta hänsyn till i både praktisk tillämpning och teoretisk modellering då simuleringen inte delar den begränsningen.

5.4 Utvecklingsmöjligheter

Elvägssystemet som utvecklats i projektet är en skalmodell som demonstrerar grundprinciperna för konduktiv laddning under färd. Projektets resultat öppnar samtidigt upp för en rad möjliga förbättringar och vidareutvecklingar. Detta avsnitt redogör för potentiella framtida utvecklingssteg som kan göra elvägssystemet mer avancerat och realistiskt som gör det användbart för test av nya idéer inom elektrifierad vägtrafik.

5.4.1 Förbättrade mätningar och datainsamling

I dagsläget mäts enbart spänningen över kondensatorn samt bilens medelhastighet över ett varv. För att möjliggöra en mer detaljerad förståelse av fordonets dynamik kan framtida modeller därför inkludera realtidsmätningar av ström, hastighet och temperatur. Detta kräver fler sensorer och insamling av data. Den insamlade datan skulle kunna användas för att få en mer detaljerad förståelse av systemet samt möjliggöra realtidsanalys av systemets effektivitet. Det skulle även kunna förbättra kalibreringen mellan den fysiska modellen och simuleringsmodellen.

5.4.2 Hastighetsreglering och optimerad energianvändning

Genom att implementera styrning av bilens hastighet under drift så kan energiförbrukningen påverkas för att till exempel spara på kondensatorns laddning. Detta skulle då kunna möjliggöra olika körstrategier beroende av fordonets position, exempelvis:

- Minskad hastighet före laddningssträckor som då ger längre laddtid
- Energibesparande körning i kurvor där friktionen är högre
- Ökad hastighet efter laddning för att nyttja hög energinivå

Denna hastighetsreglering skulle därför kunna öppna upp för undersökning av energieffektiv körstrategi samt algoritmstyrd drift för att efterlikna verkliga scenarion där optimerad energianvändning är avgörande för effektiv drift.

5.4.3 Skalbar kommunikation och fler fordon

I nuläget testas systemet endast med ett fordon i taget. Däremot skulle ett framtida mål kunna vara att stödja flera fordon som både kör och laddar samtidigt. Men för att det ska fungera så krävs det robustare kommunikation via exempelvis MAC-adresser mellan fordon och centralenhet. Kommunikation kan dessutom ske genom både fordon-till-fordon (V2V) och fordon-till-infrastruktur (V2I), vilket då möjliggör tester av avancerad trafikstyrning och systembelastning. Genom att utveckla systemet för att kunna hantera flera fordon samtidigt så möjliggörs även undersökningar kring laddprioritering, belastningsdelning och kommunikationsprotokoll vid trafik i båda riktningar. Dessutom skulle det med fler fordon även gå att undersöka skalbarheten för ett elvägssystem.

5.4.4 Hybridlösningar med alternativa energilagrar

Framtida versioner av modellen skulle kunna testa olika kombinationer av energilagringstekniker för att efterlikna verkliga elbilars uppbyggnad. Detta skulle exempelvis vara att använda superkondensatorer i kombination med litiumjonbatterier för att på så sätt dra nytta av både snabbbladning och långvarig energilagring. En sådan hybridlösning skulle då kunna ge en bättre förståelse för energiflöde, laddningsbeteende och systemets respons vid olika driftfall. Dessutom möjliggör detta även studier av degradering, effektivitet och prestanda över längre driftperioder.

5.4.5 Integration med smarta elnät

För att undvika överbelastning av elnätet så behöver laddningen i ett verkligt elvägssystem anpassas till elnätets kapacitet. Därför skulle ett framtida utvecklingssteg vara att inkludera ett "virtuellt elnät" i modellen med målet att fordonens laddning då styrs beroende på tänkt belastning i elnätet. Detta kan då implementeras som en mjukvarumodul vars uppgift är att begränsa den tillgängliga effekten beroende på tidpunkt, antal fordon och andra parametrar. Resultatet av att simulera denna typ av dynamisk lastbalansering skulle därför kunna ge insikt i hur elvägssystem kan samexistera i ett befintligt elnät.

5.5 Etiska överväganden och samhällspåverkan

Implementering av ny teknik kan ha oförutsedda konsekvenser, och i förebyggande syfte bör ett resonemang föras om vilka olika potentiella problem och konsekvenser för både samhället och dess invånare elektrifierade elvägar kan orsaka. Under en produkts utveckling är det lockande att främst se de fördelar en ny teknik har, men utan en ordentlig analys av dess påverkan i samhället kan stora eventuella nackdelar missas, vilket kan leda till oanade konsekvenser.

5.5.1 Ökad användning och produktion av elbilar

Elektrifierade bilvägar kan ha stor påverkan över hur elbilar används och därmed minska tröskeln som finns mellan att byta från en bil med förbränningsmotor till en elbil. Elbilar ses generellt som ett mer miljövänligt alternativ till bilar med förbränningsmotorer, förutsatt att elbilen drivs av förnybar energi [26]. Att implementera elvägar skulle innebära en ökad räckvidd vilket är en av elbilars stora begränsningar [27], och göra dem till ett mer attraktivt val för de som varit tveksamma. Förutsatt att de potentiella elvägarna drivs av förnybar el skulle detta kunna leda till minskade koldioxidutsläpp, och enligt Svenska kraftnät [28] är Sveriges elmix ett hållbart alternativ. Elvägar skulle därmed kunna leda till att fler använder elbilar och att koldioxidutsläppen minskar då behovet av fossila bränslen sjunker.

Samtidigt leder denna teknologi till användning av mindre batterier eftersom fordon avses laddas under färd. Denna lösning kan ha ett bredare inflytande på utvecklingen av andra teknologier som syftar till att minska miljöpåverkan från produktionen. Genom att göra nya tekniska framsteg och innovationer kan det bli möjligt att ytterligare optimera energieffektiviteten och minska behovet av sällsynta och miljöskadliga material, vilket bidrar till en mer hållbar utveckling inom transportsektorn.

5.5.2 Konstruktion och underhåll

Det är även viktigt att undersöka olika kostnaderna för att bygga om och installera elvägsinfrastruktur. De sträckor där en elväg hade varit mest fördelaktig är där många fordon färdas, dock är dessa vägar redan etablerade och en satsning på elvägar skulle innebära att mycket av den existerande infrastrukturen skulle behöva ersättas. Det skulle leda till stora konstruktionskostnader ur ett ekonomiskt, hållbarhets- och resursorienterat perspektiv. Ekonomiskt och resursmässigt kan konstruktionen av elvägar skapa kostnader då det krävs arbetskraft, material och koordination för att installera och underhålla elvägarna. För hållbarhetsperspektivet måste man överväga de material som används under konstruktionen, speciellt då tillverkningen av elektriska komponenter ofta kräver sällsynta jordartsmetaller [29].

För utvinning av sådana sällsynta jordartsmetaller är det två huvudsakliga områden där det uppstår problematik. Utvinningen av jordartsmetaller kan orsaka att stora mängder miljöskadliga ämnen sprids i närliggande natur [29], vilket är skadligt för växter, djur och människor i närheten [29]. De arbetare som utviner metallerna har ofta även undermåliga arbetsvillkor i form av otillräcklig skyddsutrustning, dåligt betalt och många har inget annat val än att arbeta under dessa omständigheter [30].

5.5.3 Potentiella faror, olycksfall och integritet

För att ladda elbilar effektivt på en elektrifierad sträcka behövs ett stort effektutbyte [31], i normal drift innebär detta inte fler faror än de associerade med laddning, men om en trafikolycka skulle inträffa kan många nya faror uppstå. Om det skulle ske en olycka på eller i närheten av en elektrifierad sträcka är det inte säkert att infrastrukturen förblir oskadd, detta skulle kunna leda till kortslutningar eller att de spänningssatta delarna exponeras. Exponerade kretskomponenter skulle innebära fara för både de som varit del av olyckan och räddningspersonal som anländer till platsen.

Det är även värt att överväga hur elektrifierade vägar skulle kunna påverka djurlivet. Beror på vilken typ av vägar som elektrifieras är den potentiella faran olika, motorvägar har viltstängsel vilket hindrar djur från att ta sig ut på vägarna, men det skulle även kunna vara aktuellt att installera elvägar på landsvägar där sådana skydd inte är implementerade. Om de ledande delarna av konstruktionen inte är skyddade eller avstängda när spåren är oanvända skulle djur som passerar över vägen kunna utsättas för en dödlig stöt.

Drift och användning av elektrifierade vägar skulle också kunna innebära att förarens integritet behandlas. Om den som färdas på en elektrifierad väg måste betala för den el som används måste det gå att identifiera vilka bilar som laddas. Det innebär att personlig data samlas in om fordons position och rörelse, därför måste den förmedlas på ett säkert sätt så att förarens färdmönster inte ska kunna bevakas av utomstående.

6 Slutsats

Projektet har lyckats demonstrera en skalmodell av ett elvägssystem med konduktiv laddning under fordonets drift. Med viss justering av systemets uppsättning och implementering så uppfylldes de uppsatta kraven genom att kunna ladda under färd, visa mätdata i realtid samt få fram liknande resultat med hjälp av en simuleringsmodell. Tester som utfördes visade att kondensatorns storlek, bilbanans spänning och resistans i former av resistorer och friktion alla påverkar fordonets hastighet och energiförbrukning. Samtidigt identifierades flera felkällor under projektets gång, där osäkerhet i vissa simuleringsparametrar begränsade noggrannheten. Trots viss osäkerhet så kunde simuleringarna verifiera de faktiska testresultaten. Projektet öppnar upp för många framtida utvecklingsmöjligheter. Med förbättrad datainsamling och att kunna hantera flera fordon med bättre infrastruktur hade detta projekt kunnat leda till en mer realistiskt skalmodell för framtida forskning och utveckling.

Referenser

- [1] J. Sellergren, "Elvägen – framtidens väg att ta?," *Lunds universitet*, [Online], Jul. 4, 2022. Tillgänglig: <https://www.lu.se/artikel/elvagen-framtidens-vag-att-ta#:~:text=M%C3%A5nga%20bilar%20som%20rullar%20p%C3%A5,p%C3%A5%20batteriteknik%20och%20smarta%20laddl%C3%B6sningar>. (hämtad: 2025-02-12).
- [2] Trafikverket, Sveriges första permanenta elväg," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-orebro-lan/sveriges-forsta-permanenta-elveg/#:~:text=I%20februari%202025%20fattade%20regeringen,att%20g%C3%A5%20till%20andra%20satsningar>. (hämtad: 2025-02-23).
- [3] Trafikverket, "Årabet med Sveriges första permanenta elväg pausas," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-orebro-lan/sveriges-forsta-permanenta-elveg/nyheter-for-sveriges-forsta-permanenta-elveg/2024/arbetet-med-sveriges-forsta-permanenta-elveg-pausas/#:~:text=permanenta%20elv%C3%A4g%20pausas-,Sveriges%20f%C3%B6rsta%20permanenta%20elv%C3%A4g%20Arbetet%20med%20Sveriges%20f%C3%B6rsta%20permanenta%20elv%C3%A4g,l%C3%B6sningar%20f%C3%B6r%20elektrifiering%20och%20elv%C3%A4gar>. (hämtad: 2025-02-23).
- [4] Europaparlamentet, "EU:s förbud mot försäljning av nya bensin- och dieslbilar från 2035 förklarar," 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.europarl.europa.eu/topics/sv/article/20221019ST044572/eu-s-forbud-mot-forsaljning-av-nya-bensin-och-dieslbilar> (hämtad: 2025-02-23).
- [5] A. R. Hambley, DC Machines," i *Electrical engineering: principles and applications*, 6. uppl., Redaktörens förnamnsinitial/er. Efternamn, Red. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2013, kap. 16, ss. 772-781. Tillgänglig: <https://www.vlebooks.com/Product/Index/436552?page=0&startBookmarkId=-1>, Hämtad: 2025-05-09.
- [6] D. L. Anglin och D. R. Sadoway, Battery," i *Access Science*, McGraw Hill, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.accessscience.com/content/article/a075200>, hämtad: 2025-02-23.
- [7] J. Elio, P. Phelan, R. Villalobos och R. J. Milcarek, "A review of energy storage technologies for demand-side management in industrial facilities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 307, s. 127322, Jul. 2021, doi:10.1016/j.jclepro.2021.127322.
- [8] C. S. Baird, "Capacitance," i *Access Science*, McGraw Hill, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.accessscience.com/content/article/a106600>, hämtad: 2025-02-23.
- [9] C. Platt, "Capacitor," i *Encyclopedia of Electronic Components*, Make Community LLC, 2012, ss. 97-111.
- [10] M. S. Whittingham, "Electrochemical energy storage: Batteries and capacitors," i *Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability*, Cambridge University Press, 2012, kap. 6, ss. 608-623. Tillgänglig: <https://www.cambridge.org/core/books/fundamentals-of-materials-for-energy-and-environmental-sustainability/energy-storage-highpenetration-renewables-and-grid-stabilization/C391032E5B717A9DD4AC15DCCB35B81C>, Hämtad: 2025-04-10.

- [11] R. P. Deshpande, "ULTRACAPACITORS: THE FUTURE OF ENERGY STORAGE," i *Capacitors*, New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015, kap. 13. Tillgänglig: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071848565>, Hämtad: 2025-04-10.
- [12] Power circle, "Elvägars möjligheter," 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://www.powercircle.org/elvag.pdf> (hämtad: 2025-02-23).
- [13] Y. Shu m.fl., "An improved coulomb counting method based on non-destructive charge and discharge differentiation for the SOC estimation of NCM lithium-ion battery," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, s. 108917, Dec. 2023, doi:10.1016/j.est.2023.108917.
- [14] M. Liu, N. Cui, S. Liu, C. Wang, C. Zhang och S. Gong, "Adaptive strong tracking unscented Kalman filter based SOC estimation for lithium-ion battery," i *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, Jinan, Kina, 2017, ss. 1437-1441. [Online]. Tillgänglig: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8242993>, Hämtad: 2025-04-10.
- [15] A. Beiser, "Capacitance," i *Schaum's Outline of Applied Physics*, 4. uppl., USA: McGraw-Hill Education, 2009, kap. 26.
- [16] C. Hashemi-Pour, "Åhat is a microcontroller (MCU)?," *TechTarget*, [Online]. Tillgänglig: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller> (hämtad: 2025-02-22).
- [17] A. Armenta, "Introduction to Arduino: History, Hardware, and Software," *Control*, [Online], Sep. 08, 2022. Tillgänglig: <https://control.com/technical-articles/introduction-to-arduino-history-hardware-and-software/> (hämtad: 2025-02-22).
- [18] S. Cording, "Åhat Is the ESP32?," *Elektor magazine*, [Online], Mar. 10, 2022. Tillgänglig: <https://www.elektormagazine.com/articles/what-is-the-esp32> (hämtad: 2025-02-22).
- [19] H. Siebeneicher, "Device to Device Communication with ESP-NOW," *Arduino docs*, [Online], Okt. 24, 2024. Tillgänglig: <https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-esp32/esp-now/> (hämtad: 2025-02-23).
- [20] H. Siebeneicher, "Bluetooth Low Energy," *Arduino docs*, [Online], Sep. 4, 2024. Tillgänglig: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/bluetooth/> (hämtad: 2025-02-23).
- [21] V. Kanade, "Åhat Is Peer-To-Peer? Meaning, Features, Pros, and Cons," *spiceworks*, [Online], Nov. 7, 2023. Tillgänglig: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-peer-to-peer/> (hämtad: 2025-02-23).
- [22] J. Evans, "Handshaking (in Networking)," *Network encyclopedia*, [Online], Jan. 3, 2024. Tillgänglig: <https://networkencyclopedia.com/handshaking/> (hämtad: 2025-02-22).

- [23] ArduinoYard, "Using IR Sensor with Arduino (Proximity Sensor) – Easy Guide," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://arduinoyard.com/ir-sensor-with-arduino/> (hämtad: 2025-02-22).
- [24] Voltage Sensor Module. [Online]. Tillgänglig: <https://osepp.com/electronic-modules/sensor-modules/81-voltage-sensor-module>, Hämtad: 2025-04-03.
- [25] *FC-130RA/SA*, Matsudo, Japan: Mabuchi Motor. [Online]. Tillgänglig: http://www.ds-parts.co.kr/upload/goods/h1322122417_Mabuchi-motor-FC-130.pdf, Hämtad: 2025-05-12.
- [26] R. Kawamoto m.fl., "Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA," *Sustainability*, vol. 11, Maj. 2019, doi:10.3390/su11092690.
- [27] Ernst & Young, "EY Mobility Consumer Index 2022 study," 2022. [Online]. Tillgänglig: https://cdn.asp.events/CLIENT_Climate__D5B566EE_D367_3C7D_242004A582802EEE/sites/Climate-Action/media/libraries/exhibitor-white-papers/782-ey-mobility-consumer-index-2022-study.pdf (hämtad: 2025-05-04).
- [28] Svenska kraftnät, "Elstatistik," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kraftsystemdata/elstatistik/> (hämtad: 2025-05-04).
- [29] L. Depraeter och S. Goutte, "The role and challenges of rare earths in the energy transition," *Resources Policy*, vol. 86, s. 104137, Sep. 2023, doi:10.1016/j.resourpol.2023.104137.
- [30] J. Nayar, TiNot So "Green" Technology: The Complicated Legacy of Rare Earth Mining," *Harvard International Review*, [Online], Aug. 12, 2021. Tillgänglig: <https://hir.harvard.edu/not-so-green-technology-the-complicated-legacy-of-rare-earth-mining/> (hämtad: 2025-05-04).
- [31] U.S. Department of Transportation, "Charger Types and Speeds," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/ev-basics/charging-speeds> (hämtad: 2025-05-04).

Appendix

A Kod

A.1 Centralenhet

```
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

const int relayPin = 2;

const int irSensorPin = 8; // Pin för på
const int irSensorPin3 = 12; //av

const int irSensorPin2 = 11; //på
const int irSensorPin4 = 10; //av

unsigned long start = 0;
unsigned long end = 0;
bool measuring = false;

unsigned long start2 = 0;
unsigned long end2 = 0;
bool measuring2 = false;

typedef struct struct_msg {
    float voltage;
} struct_msg;

struct_msg incomingData;

void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingDataBytes, int len) {
    memcpy(&incomingData, incomingDataBytes, sizeof(incomingData));
    Serial.println(incomingData.voltage, 2);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    pinMode(irSensorPin, INPUT);
    pinMode(irSensorPin2, INPUT);
    pinMode(irSensorPin3, INPUT);
    pinMode(irSensorPin4, INPUT);
    pinMode(relayPin, OUTPUT);
```

```

if (esp_now_init() != ESP_OK) {
  Serial.println("ESP-NOW init fail");
  return;
}

esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
}

void loop() {
  int sensorValue = digitalRead(irSensorPin);
  int sensorValue2 = digitalRead(irSensorPin2);
  int sensorValue3 = digitalRead(irSensorPin3);
  int sensorValue4 = digitalRead(irSensorPin4);

//Kurva 1
//8
if (sensorValue == LOW && measuring2) {
  digitalWrite(relayPin, HIGH); // Activate relay (ON)
  Serial.println("Bil upptäckt { BANA PÅ PIN 8}");
  end2 = millis();
  measuring2 = false;
  unsigned long totTime2 = end2 - start2;
  float seconds = totTime2 / 1000;
  float speed2 = 0.65 / seconds;
  Serial.print("Medelhastighet 11-10: ");
  Serial.println(speed2);
}
//12
if (sensorValue3 == LOW && !measuring) {
  digitalWrite(relayPin, LOW); // Activate relay (ON)
  Serial.println("BANA AV PIN 12");
  start = millis();
  measuring = true;
}

//Kurva 2
// PIN 11 & 10, 11 på 10 AV
//11
if (sensorValue2 == LOW && measuring) {
  digitalWrite(relayPin, HIGH);
  Serial.println("Bil upptäckt - BANA PÅ PIN 11");
  end = millis();
  measuring = false;
  unsigned long totTime = end - start;
  float seconds = totTime / 1000;
  float speed = 0.69 / seconds;
  Serial.print("Medelhastighet 8-12: ");

```

```
    Serial.println(speed);
}

//10
if (sensorValue4 == LOW && !measuring2) { // LOW = object detected
    digitalWrite(relayPin, LOW); // Activate relay (ON)
    Serial.println("BANA AV PIN 10");
    start2 = millis();
    measuring2 = true;
}

delay(100);
}
```

A.2 Fordonsenhet

```
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

const int voltagePin = A2; // A2 motsvarar GPIO 2 på ESP32
const float referenceVoltage = 3.3; // ADC-referensspänning
const int adcResolution = 4095; // 12-bitars ADC

// Om du använder en spänningsdelare
const float ratio = 5.5; // Justera efter dina motstånd

//MAC-adressen för centralenhet
uint8_t cent_unit_MAC [] = {0x3C, 0x84, 0x27, 0xC3, 0x9F, 0x00};

//datastruktur, kommer inte se ut såhär för oss
typedef struct struct_msg {
    float voltage;
} struct_msg;

//skapa struct objekt
struct_msg myData;

//Peer info
esp_now_peer_info_t peer_info;

//Callback funktion som kallas när data skickats
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status){
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status: \t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Success!" : "Failed!");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    //pinMode(7, INPUT);

    if (esp_now_init() != ESP_OK){
        Serial.println("Initialization With ESP-NOW Failed!");
        return;
    }

    //Registrera callback
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    //Registrera peer
```

```

memcpy(peer_info.peer_addr, cent_unit_MAC, 6);
peer_info.channel = 0;
peer_info.encrypt = false;

if(esp_now_add_peer(&peer_info) != ESP_OK){
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}
}

void loop() {
    int adcVoltage = analogRead(voltagePin);
    // Omvandla råvärdet till spänning vid pinnen
    float voltageAtPin = (adcVoltage * referenceVoltage) / adcResolution;
    float capVolt = (voltageAtPin * ratio); // Beräkna faktisk batterispänning
    myData.voltage = capVolt;
    delay(100); // Läs var sekund

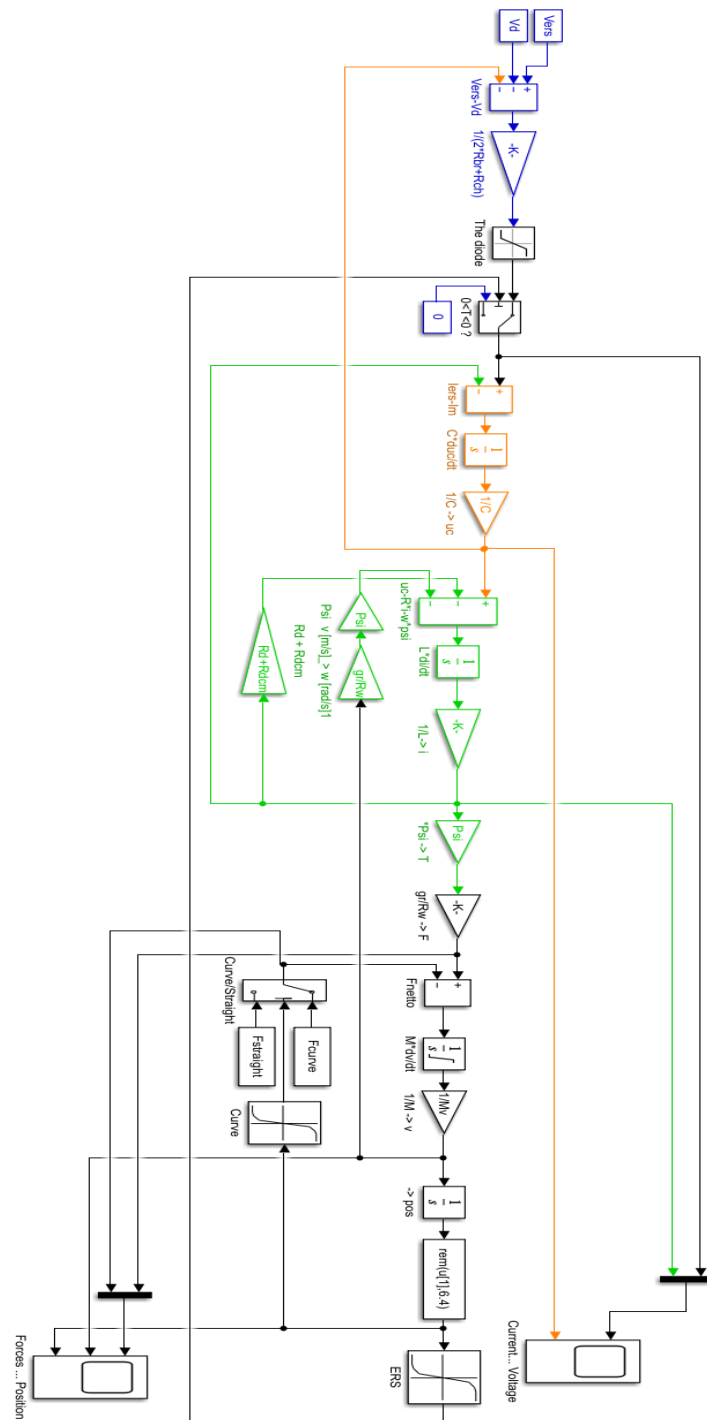
    //Skicka meddelande via esp now
    esp_err_t result = esp_now_send(cent_unit_MAC, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData))

    if(result == ESP_OK){
        Serial.println("Voltage sent");
    }
    else{
        Serial.println("Sending error");
    }
    delay(200);
}

```

B Simulering

B.1 Simulink-modell



B.2 Simuleringskod i Matlab

```
step = 10;           % Steglängd i mm

% Positionsvektor i mm
Pos = (1:step:3670)'; % Längd = 3,67 m

% Segmentlängder i mm
L1 = 695;           % sensor 8 till 12, elektrifierad
L2 = 1160;          % sensor 12 till 11, icke-elektrifierad
L3 = 650;           % sensor 11 till 10, elektrifierad
L4 = 1165;          % sensor 10 till 8, icke-elektrifierad

L1_e = 780;         % kurva
L2_e = 1035;        % raksträcka
L3_e = 780;         % kurva
L4_e = 1035;        % raksträcka

% Start (s) och slut (e) för elektrifierade sektioner
s1 = 1;             % börjar på raksträcka
e1 = floor(L2/step) - 1;

s2 = e1 + 1;
e2 = s2 + floor(L3/step) - 1;

s3 = e2 + 1;
e3 = s3 + floor(L4/step) - 1;

s4 = e3 + 1;
e4 = length(Pos);  % total längd

% Start (s) och slut (e) för kurvor och raksträckor
s1_2 = 1;
e1_2 = floor(L2_e/step);

s2_2 = e1_2 + 1;
e2_2 = s2_2 + floor(L3_e/step) - 1;

s3_2 = e2_2 + 1;
e3_2 = s3_2 + floor(L4_e/step) - 1;

s4_2 = e3_2 + 1;
e4_2 = length(Pos);

% Initiera
Ers = zeros(length(Pos),1);
Kurva = zeros(length(Pos),1);
```

```
% Kurvor och elektrifierade ERS-sträckor
Kurva(s2_2:e2_2) = 1; Ers(s2:e2) = 1; % Segment 1
Kurva(s4_2:e4_2) = 1; Ers(s4:e4) = 1; % Segment 3

% Simulera i Simulink modellen
sim('ScalextricModel_new.slx')
```

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se



CHALMERS