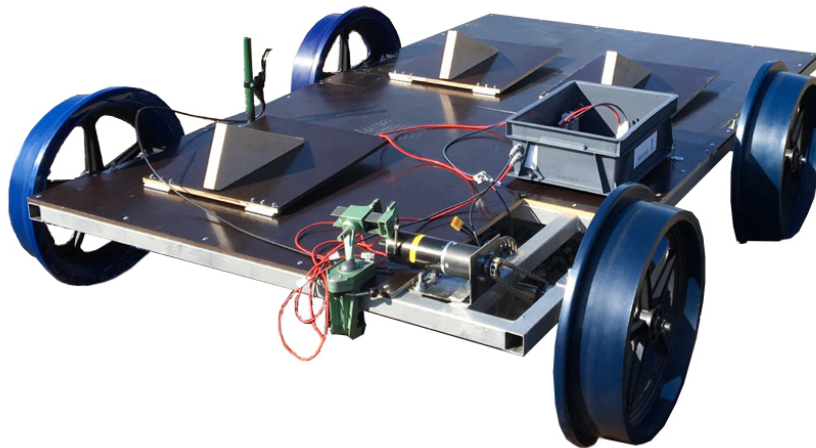




CHALMERS



Design och konstruktion av ett energieffektivt spårbundet fordon för deltagande i studenttävlingen Delsbo Electric

Kandidatarbete inom Energi och Miljö

ELIN BERGSTEDT, CARL LARSSON, DAVID RECKERMANN,
ULRIKA YRING, DANIEL ÖDMAN

KANDIDATARBETE ENMX02-16-09

**Design och konstruktion av ett energieffektivt
spårbundet fordon för deltagande i
studenttävlingen Delsbo Electric**

Elin Bergstedt, Carl Larsson, David Reckermann, Ulrika Yring,
Daniel Ödman



CHALMERS

Institutionen för Energi och Miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Design och konstruktion av ett energieffektivt
spårbundet fordon för deltagande i
studenttävlingen Delsbo Electric

ELIN BERGSTEDT, CARL LARSSON, DAVID RECKERMANN, ULRIKA YRING,
DANIEL ÖDMAN

© ELIN BERGSTEDT, CARL LARSSON, DAVID RECKERMANN, ULRIKA
YRING, DANIEL ÖDMAN, 2016.

Handledare: Stefan Lundberg, Institutionen för Energi och Miljö
Examinator: Jimmy Ehnberg, Institutionen för Energi och Miljö

Kandidatarbete ENMX02-16-09
Institutionen för Energi och Miljö

Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Cover: Fordonet sett bakifrån utan batterier, motorstyrenhet och klämskydd framför
hjulen. Sätena är i sitt nedfällda läge.

Design och konstruktion av ett energieffektivt spårbundet fordon för deltagande i studenttävlingen Delsbo Electric
ELIN BERGSTEDT, CARL LARSSON, DAVID RECKERMANN, ULRIKA YRING,
DANIEL ÖDMAN
Institutionen för Energi och Miljö
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Studenttävlingen Delsbo Electric anordnas 2016 den 28 Maj. Tävligen går ut på att färdas 3.36 km på en del av Dellenebanan och på denna sträcka förbruka minst energi per person och kilometer. År 2015 uppmättes en energiförbrukning på 1.26 *wattimmar per personkilometer* [Wh/pkm] för det vinnande laget. Detta projekt är ett kandidatarbete vid institutionen för Energi och Miljö vid Chalmers Tekniska Högskola som syftar till att designa och konstruera ett energieffektivt spårbundet fordon för deltagande i tävlingen. Förhoppningen är att kandidatarbetet blir årligt återkommande där kommande studenter fortsätter utveckla fordonet.

För att skapa ett energieffektivt fordon sattes en specifikation upp med krav som fordonet skulle uppfylla. Simuleringar och teoretiska modeller låg till grund för hur projektgruppen skulle konstruera och utforma komponenter till fordonet. Simuleringarna användes även för att estimeras en energiförbrukning för fordonet. Komponenterna anskaffades och konstruerades till ett komplett fordon. Det färdiga fordonet funktionstestades och en energiförbrukning för fordonet mättes. Energiförbrukningen jämfördes sedan mot simuleringens för att bedömma om simuleringen var korrekt.

Under testet kunde fordonet färdas stabilt på rälsen och ta sig igenom en växel på rälsen, vilket var ett krav då en växel förekommer på tävlingssträckan. Fordonets energiförbrukning uppmättes till 1.76 Wh/pkm på teststräckan. Simuleringen gav en energiförbrukning på 1.82 Wh/pkm, då underlaget antogs vara helt plant. Små variationer i lutning påverkade dock energiförbrukningen i simuleringen markant.

Projektet resulterade i ett fordon som uppfyllde kraven, och därmed möjliggör start i tävlingen. Med hjälp av simuleringverktygen estimerades en energiförbrukning som avvek från fälttestet med 3.4%. Denna uppskattning är dock osäker eftersom det fanns parametrar som var okända under testet. För kommande års studenter som fortsätter på detta arbete finns det flera delar av fordonet som har förbättringspotential. Framförallt är det fordonets vikt som kan minskas samt öka antal passagerare för att förbättra energieffektiviteten.

Avgränsningar som varit av betydelse för detta projekt var att energieffektiviteten ej hade krav på att vara så pass hög att fordonet skulle vinna tävlingen. Detta eftersom det hade varit problematiskt att åstadkomma i och med att erfarenheten ej är densamma som för skolor som deltagit tidigare år. Tävlingsresultat presenteras inte heller i rapporten, eftersom tävlingsdatumet är efter rapportens färdigställande.

Nyckelord: energieffektivt, spårbundet, rälsprofil, motorstyrenhet.

Abstract

The student race Delsbo Electric 2016 is held 28th of May. The race consists of a course of 3.36 km which is a part of Dellenebanan. The aim of this race is to travel this course and consume the least possible amount of energy per person and kilometre. In 2015 the energy consumption was measured to 1.26 *watt hours per person and kilometre* [Wh/pkm] for the winning team. This project is a bachelor thesis at the department of Energy and Environment at Chalmers University of Technology and aims to design an energy efficient rail bound vehicle to participate in the race. This project is supposed to be repeated yearly, and the following students should be able to improve from this project.

To be able to create an energy efficient vehicle, a specification was made which consisted of requirements that the vehicle had to fulfil. The foundation to the design and different components of the vehicle consisted of simulations and theoretical models. The simulations were also used to estimate the vehicles energy consumption. The function of the finished vehicle was tested and the real energy consumption was measured during a test run. The energy consumption was later compared to the simulated values to evaluate if the simulations were made correctly.

The vehicle moved steadily on the rails during the test run, and was able to get through the rail switch which was a demand since a switch appears on the race course. The energy consumption at the test run was measured to 1.76 Wh/pkm. The simulation of the test run resulted in 1.82 Wh/pkm when assumptions of completely flat ground was made. However, small variations in the inclination did effect the energy consumption in the simulations distinctly.

This project resulted with a vehicle that fulfils the specifications which enables the project group to participate in the race. The energy consumption was, using the simulations tools, estimated to 3.4% deviation from the test run. This estimate is though unsure due to unknown parameters during the test. For the students that will further develop the vehicle the following years, there are many ways to improve the energy efficiency of the vehicle. It is first and foremost the weight of the vehicle that can be cut, but one could also increase the number of passengers on the vehicle to improve the energy efficiency.

Constrains that were of significant value to this project were that the energy efficiency did not have any demands to result in a first place in the race. This constraint is set because the experience within the project group is far less then compared to schools that have been participating earlier years. No results from the race will be presented, due to the fact that the date of the race takes place after the report's completion.

Förord

Projektet *Design och konstruktion av ett energieffektivt spårbundet fordon för deltagande i studenttävlingen Delsbo Electric* utfördes på institutionen för Energi och Miljö på Chalmers Tekniska Högskola.

Stort tack till Stefan Lundberg som med sitt engagemang handlett oss genom projektet. Ett tack tillägnas Björn Pålsson vid institutionen för Tillämpad Mekanik för konsultation inom rälsdynamik. Gruppen önskar även uttrycka tack till Dan Berglund på *Jernhusen* som möjliggjorde att vi kunde testa fordonet i Göteborg, till de ansvariga för prototypverkstaden på Chalmers Tekniska Högskola Reine Nohlberg och Jan Bragé som hjälpte oss med konstruktionen av fordonet. Vi vill även tacka Christoffer Eriksson och Niklas Danell på *Jens S. Transmissioner AB* som försåg oss med en transmission. Ett tack riktas även till Stefan Skoog vid institutionen för Energi och Miljö för hjälp med batterier. Tack till Jonas Persson på Chalmers godsmottagning som hjälpte oss med leveranser av delar till fordonet.



Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Problemformulering	2
2	Om tävlingen	5
2.1	Tävlingsregler	5
2.2	Tidigare tävlingsresultat	6
2.3	Omvärldsanalys	8
3	Teori	11
3.1	Mekanisk påverkan	12
3.2	Rälsdynamik	12
3.3	Batteri	13
3.4	Motorstyrenhet	14
3.5	Motor	15
3.6	Transmission	17
3.7	Lagringar	18
3.8	Belastningsberäkningar	19
4	Metod	21
4.1	Specifikation	21
4.2	Koncept	21
4.3	Val	23
4.4	Design och konstruktion	23
4.5	Test och verifikation	23
5	Simulering	25
5.1	Implementering	25
5.2	Tester	26
6	Konceptval inför fordonsdesign	31
6.1	Kravspecifikation	31
6.2	Konceptgenerering	31
6.3	Elimineringsmatris	42
6.4	Pugh-matris	45

6.5	Kesselringmatrix	49
7	Design och konstruktion	51
7.1	Vidareutveckling av koncept	51
7.2	Slutgiltig fordonskonstruktion	53
7.3	Motivering av komponentval	54
7.4	Skillnader från koncept	58
8	Mätning av delsystem	59
8.1	Tomgångsförluster för motorn	59
8.2	Mätning av ankarresistans och spänningsfall för motorn	59
8.3	Verkningsgrad	59
9	Resultat	63
9.1	Simulerad energiförbrukning för fordonet	63
9.2	Fälttest	64
10	Diskussion	67
10.1	Utvärdering av mätvärden	67
10.2	Utvärdering av simulering	67
10.3	Utvärdering av fältresultat	67
10.4	Utvärdering av konstruktion	68
10.5	Utvärdering av metod	69
11	Slutsats	71
11.1	Fortsatt arbete	71
	Bibliography	73
	Referenser	73

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Sedan 2002 har tävlingen Delsbo Electric för spårdrivna fordon arrangerats på Delenbanan mellan Hudiksvall och Ljusdal. Då var målet att få de deltagande fordonen att färdas längsta möjliga sträcka med ett 1.5 V ficklampsbatteri som energikälla. År 2010 moderniserades tävlingen och nu siktar de tävlande lagen på att ta sig 3.36 km på minsta möjliga *wattimmar per personkilometer* [Wh/pkm]. Denna enhet används vanligtvis i jämförelsen av olika fordon, och anledningen att Delsbo Electric anammat den är att påvisa spårdrivna elfordons effektivitet och miljövänlighet. Energieffektiviteten på det vinnande fordonet år 2015 blev uppmätt till 1.26 Wh/pkm [1]. I Sverige har värden på energieffektivitet för vanliga fordon uppmätts till 456 Wh/pkm för bilar, 256 Wh/pkm för bussar och 117 Wh/pkm för spårvagnar år 2010 [2]. Energieffektiviteten för de olika fordonen är dock hastighetsberoende, vilket betyder att om till exempel en bil kör mycket långsamt kommer den ha en annan energieffektivitet än den som precis nämnts.

Detta projekt på Chalmers Tekniska Högskola, är en första iteration till ett tänkt årligt återkommande kandidatarbete där studenter ska delta i tävlingen Delsbo Electric. Tävlingen i år går av stapeln den 28 maj, vilket innebär att projektgruppen ej deltagit i tävlingen när denna rapport slutfördes. I tävlingen ska ett antal regler uppfyllas och en besiktning ska genomföras för att ett fordon ska få starta. För att bli godkänd på besiktningen krävs till exempel en fungerande broms och skydd kring roterande delar. År 2012 deltog Chalmers Tekniska Högskola i Delsbo Electric men då skedde en urkörning på banan och fordonet gick aldrig över mållinjen. Från detta fanns dock ingen användbart material att tillgå.

1.2 Syfte

Detta projekt syftar till att designa och konstruera ett energieffektivt batteridrivet spårbundet fordon som ska delta i tävlingen Delsbo Electric 2016. Projektet syftar även till att uppskatta energiförbrukningen i fordonets olika elektriska och mekaniska komponenter samt de förluster som kan tänkas uppstå vid körning.

1.3 Avgränsningar

Fordonet skulle vara konstruerat med avseende på energieffektivitet, men hade ej krav på att vara så pass energieffektivt att det skulle vinna tävlingen Delsbo Electric 2016. Detta eftersom det är första gången en projektgrupp från Energi- och miljöinstitutionen på Chalmers deltar i denna tävling, och därav ej har samma erfarenhet som andra skolor som deltagit i denna tävling flera gånger. De aktuella förlusterna för fordonets olika komponenter skulle dock vara estimerade och redovisade. I och med detta kommer energieffektiviteten hos det färdigställda fordonet ej vara bästa möjliga.

I och med att projektgruppen ej deltagit i tävlingen när denna rapport slutfördes kommer något tävlingsresultat ej att presenteras. Detta innebär att det ej kommer presenteras något resultat angående skillnader av estimerad energiåtgång och verklig energiåtgång över tävlingssträckan. De enda resultaten som presenteras vid körning av fordonet är efter mätningar av en testkörning av fordonet.

Konstruktion av fordonet utfördes till största del i Chalmers prototypverkstad, där möjligheten och tiden att utnyttja denna verkstad var mycket begränsad. Detta medförde att avgränsningar gällande fordonets komplexitet förekom, och därmed den slutgiltiga designen och konstruktionen hos fordonet. Det begränsade också vilka material som kunde väljas. Material som till exempel aluminium och magnesium är svårare att svetsa och forma än stål. Av den anledningen begränsades valet av material för chassi och andra delar som behövde svetsas till stål. Andra svårbearbetade material som inte är metaller, som till exempel kolfiber, valdes också bort.

Gällande lagringar för hjulaxeln undersökes endast rullningslager. Detta eftersom de är enkla att tillämpa och billiga att köpa. Lager som är bättre anpassade för denna typ av fordon kan alltså ha förbisetts, och lager med lägre friktion hade kunnat ge slutresultatet högre energieffektivitet.

Designen avgränsades till fordon bestående av fyra hjul. Detta på grund av att Delsbo Electric på sin tävlingshemsida beskriver att fordon med tre hjul ej färdas lika stabilt som fordon med fyra hjul, och därför bör undvikas [3]. Denna avgränsning sparar väldigt mycket resurser i form av tid, då undersökningar i möjligheter, fördelar och nackdelar med tre- respektive fyrhjuliga fordon ej behövts studerats.

För att fordonet ska kunna färdas på rälsen på bästa möjliga sätt krävs hjul tillverkade för detta, och därmed tillverkade med stor precision. I och med detta tillverkades hjulen ej själva av projektgruppen, utan istället beställdes de mest passande hjul som kunde tillgås. Detta berodde även på att det ej fanns resurser till att tillverka hjul med sådan precision. Det är alltså troligt att hjulen hade kunnat ha bättre utformning, och därmed att fordonet kunnat färdas bättre på spåret med andra hjul.

1.4 Problemformulering

Uppgiften för detta projekt var att tillverka ett energieffektivt fordon som uppfyllde tävlingsreglerna som gäller för Delsbo Electric 2016, och presenteras i Avsnitt 2.1. Denna uppgift delades in i olika deluppgifter, där alla deluppgifter hade olika pro-

blem som var tvungna att lösas för att kunna möjliggöra konstruktion av ett fordon som uppfyllede reglerna. Reglerna från tävlingen, samt eventuella önskemål från gruppen är det som hädanefter kommer kallas för fordonets specifikationer.

Utifrån dessa specifikationer kunde fordonets design och konstruktion bestämmas. Detta fordon skulle vara energieffektivt, säkert för passagerarna samt konstruerat på ett sådant sätt att urspårning och haveri kunde undvikas. Mer utförlig förklaring finns i Avsnitt 1.4.1. En drivlina för fordonet, som beskrivs i Avsnitt 1.4.2, skulle också fastställas, och när dessa deluppgifter var utförda skulle fordonet simuleras. Simuleringen, som förklaras ytterligare i Avsnitt 1.4.3, skulle kunna ge en uppskattning på energieffektiviteten för fordonet och kunna ge estimat för olika komponenters krav och specifikationer.

1.4.1 Fordonets design och konstruktion

Ett fordon som uppfyllde specifikationerna bestod av ett antal olika delar. Dessa var chassi att fästa komponenter på, hjul, hjulaxlar, lager och drivlina som försåg motorn med energi och effekt, en mekanisk broms, något typ av golv, säten för alla passagerare som skulle färdas på fordonet och klämskydd som förhindrar att passagerarna från att skada sig när de färdas på fordonet.

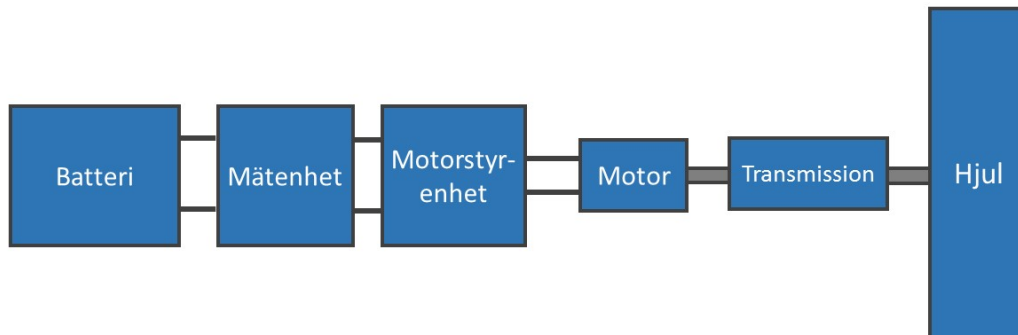
Designen och konstruktionen skulle i första hand utformas på ett sådant sätt att fordonet var så pass stabilt att urspårning och haveri kunde undvikas, samt att det var personsäkert. Därefter kunde fordonets energieffektivitet tas i beaktning. Ifall urspårning skulle ske spelar inte fordonets energieffektivitet någon roll, då detta skulle innebära diskvalificering. För att kunna åstadkomma ett stabilt fordon skulle fordonets konstruktion baseras på teorier för spårbundna fordon, och dessa omfattade främst hjul, lager, chassi och transmission.

1.4.2 Drivlina

De delar som ingick i drivlinan var ett batteri som skulle förse fordonet med effekt, en mätenhet som mätte energianvändningen, en motor och motorstyrenhet för denna, någon typ av transmission samt hjul, vilka kan ses i Figur 1.1. Grundkravet för drivlinan var att den skulle kunna leverera tillräckligt med effekt för att accelerera fordonet till den givna tävlingshastigheten inom en rimlig tid. Denna hastighet bör bibehållas under hela tävlingsbanan, vilket även innefattar en uppförsbacke. Batteriet måste kunna leverera tillräckligt med energi till att driva fordonet under hela körtiden. Utöver detta skulle även energiåtgången för drivlinan att i största möjliga mån minimeras.

1.4.3 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen av fordonet skulle vara en modell av fordonets drivlina samt övriga komponenter som påverkar fordonets energiåtgång. Dessa komponenter var fordonet, sett som fysikaliskt objekt, med parametrar som vikt, luftmotstånd, rullmotstånd, rullager och utväxling, samt dess komponenter såsom motor, motorstyrning och batteri.



Figur 1.1: Illustration av drivlinan, bestående av batteri, mätenhet, motorstyr-enhet, motor, transmission och hjul.

Denna modell skulle fokusera på förbrukningen av energi hos de olika komponenterna som utvecklas under sträckan som fordonet ska färdas. Simuleringsmodellen användes för att beräkna grundkraven på drivlinan, det vill säga hur mycket kraft och moment som krävdes för att fordonet skulle kunna färdas längs tävlingsbanan. Simuleringsmodellen skulle även analysera designen av fordonet och de valda komponenterna, och estimerar påverkan av val mellan olika komponenter och deras parametervärden.

2

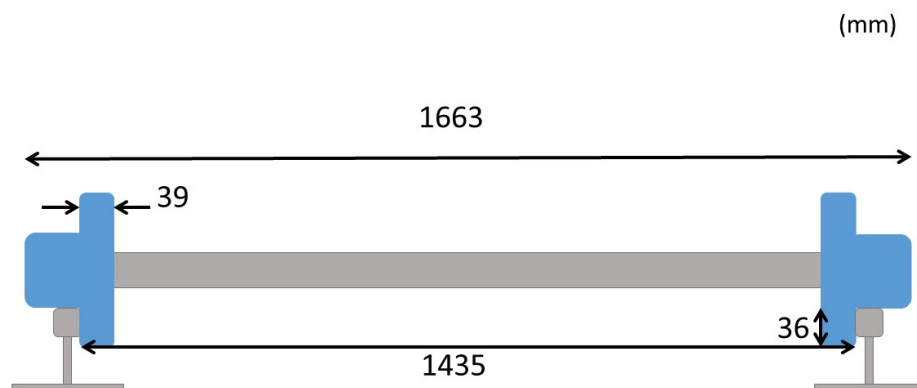
Om tävlingen

Delsbo Electric är en tävling för studenter där de tävlande lagen ska designa och konstruera spårdrivna fordon, och vinnaren är det lag som tar sig igenom tävlingsbanan med minsta möjliga energiförbrukning. I Avsnitt 2.1 beskrivs en sammanfattning av de regler som har störst påverkan på fordonets konstruktion, och som tävlingsdeltagarna måste uppfylla för att bli godkända i tävlingsmomentet. Fullständiga regler finns att läsa på deras hemsida [3]. Resultat från tidigare tävlingar kan hittas i Avsnitt 2.2. I Avsnitt 2.3 beskrivs en omvärldsanalys, där tidigare tävlingdeltagares fordon, och alla deras delsystem har undersökts.

2.1 Tävlingsregler

Det lag som går vinnande ur tävlingen är det lag som färdas tävlingbanan på 3.36 km med lägsta möjliga energiförbrukning, uttryckt i Wh/pkm. För att bestämma detta kommer en energimätare att monteras på alla fordon som mäter fordonens energiförbrukning under tävlingbanan. Denna energimätare ska placeras i en väderskyddad mätenhet som ska monteras mellan batteri och drivsystemet på fordonet, där kontakter för inkoppling av energimätaren samt en säkring finns inuti enheten. Dimensionerna för enheten är ca 40 cm×30 cm×20 cm, och denna enhet utdelas till samtliga tävlingslag efter att anmälningsavgiften är bokförd.

Sträckan består av ett järnvägsspår med en nominell spårvidd på 1435 mm, där variationer förekommer. Spårvidden som är en avgörande del i fordonsprofilen kan ses i Figur 2.1. Dessa variationer förekommer i och med att ett järnvägsspår ej kan konstrueras med exakt spårvidd, och på grund av slitage då banan är förlagd på ett existerande järnvägsspår. För att underlätta styrning garanteras ett fritt utrymme på rälsens insida med en bredd på 39 mm och ett djup på 36 mm. Maximalt tillåten bredd mellan hjulens ytterkanter är 1663 mm. Dessa mått är alla givna av tävlingen och enliga med svensk standard för rälsutformning [3].



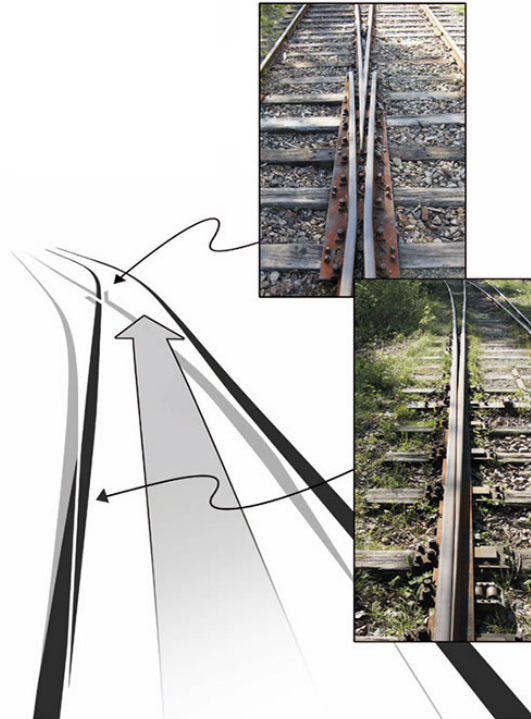
Figur 2.1: Illustration över den fordonsprofil som gäller för spårbundna fordon i Sverige, där den nominella spårvidden är 1435 mm, det garanterade utrymmet på rälsens insida är 39 mm brett och 36 mm djupt och den maximalt tillåtna bredd mellan hjulens ytterkanter är 1663 mm.

I spårsträckan finns hinder såsom vägövergångar, kurvor, upp- och nedförsbackar samt en växel. Växeln som är banans svåraste hinder kan ses i Figur 2.2, och bilden är publicerad med tillstånd av Lars Gustavsson [3]. Höjdskillnaderna illustreras i Figur 2.3. Det är därmed nödvändigt att fordonet är utrustade med hjul konstruerade för att undvika urspårning. För att bli godkänd i tävlingsmomentet ska ekipaget färdas hela sträckan utan urspårning, stopp eller att någon passagerare berör marken. Ifall något av detta inträffar under tävlingsmomentet blir ekipaget diskvalificerade. Diskvalificering kan även ske innan start vid kontroll ifall fordonet ej uppfyller tävlingens övriga regler.

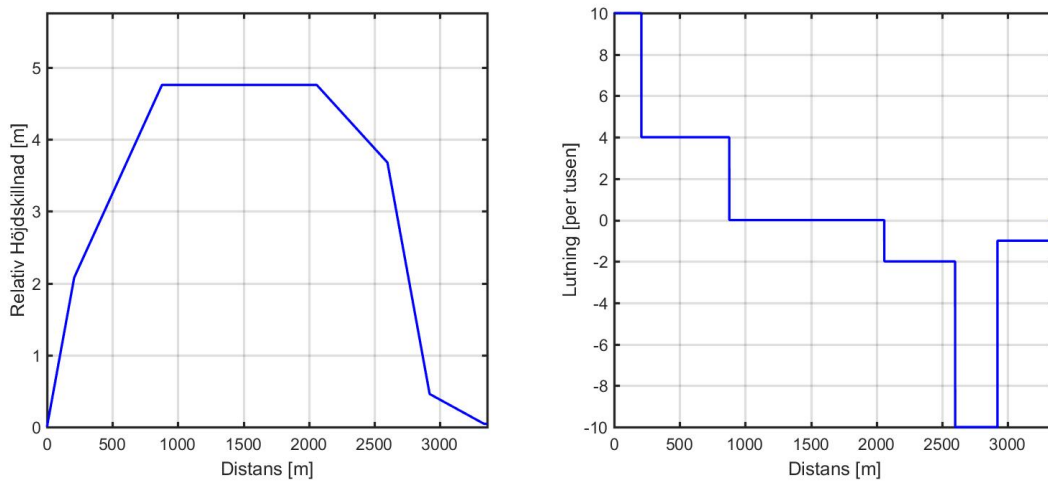
Under drift ska ekipaget hålla en medelhastighet på 10-15 km/h. De passagerare som ska färdas på fordonet måste sitta ned och ha ett ryggstöd med en lutning på 60-90° och en höjd på minst 35 cm. Det ska finnas något typ av golv på fordonet, vilket alltså endast kan vara bestående utav ett nät. Fordonet ska även vara utrustat med skydd mot roterande delar. Kravet är att fordonet ska vara så pass säkert att inga personskador ska kunna ske vid problem, såsom urspårning, kraftig inbromsning eller haveri. Fordonet måste även vara utrustad med en broms. Batteriet som driver fordonet ska ha spänning mellan 6-48 V och fordonet får ha en maximal momentan strömförbrukning på 20 A.

2.2 Tidigare tävlingsresultat

Som tidigare nämnt har Delsbo Electric funnits sedan 2002. I Tabell 2.1 presenteras tävlingsresultaten från 2013, 2014 och 2015. Där kan det observeras att Bromangymnasiet har haft en tydlig förbättring under dessa tre år. Högskolan i Gävle och



Figur 2.2: Illustration över hur en växel kan se ut, vilket är ett av de hinder som ska klaras av under tävlingsbanan. Bilden är publicerad med tillstånd av Lars Gustavsson [3].



(a) Relativ höjdskillnad för hela tävlingssträckan.

(b) Lutning för hela tävlingssträckan.

Figur 2.3: Illustration av tävlingssträckan. I a) visas den relativa höjdskillnaden som funktion av tillryggalagd sträcka från start. I b) visas lutningen som funktion av tillryggalagd sträcka från start.

2. Om tävlingen

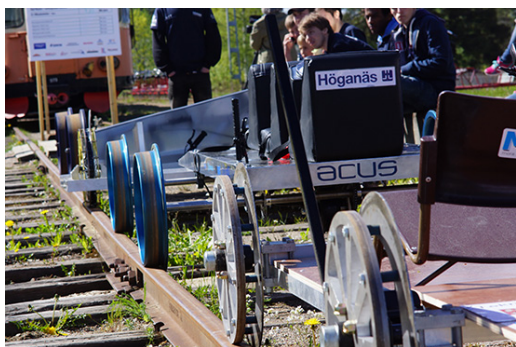
Staffansgymnasiet påvisar stabila resultat de år de deltagit. Det går även att observera att resultaten är spridda både sett till år och skola då Bromangymnasiet resultat varierar från >14.3 Wh/pkm 2013 till 1.26 Wh/pkm 2015.

Tabell 2.1: Resultat i tävlingen de tre senaste åren [4]. Resultaten presenteras i Wh/pkm. Endast de lag som slutförde loppet har presenterats.

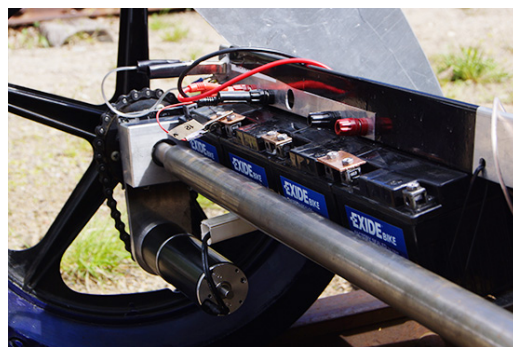
Skola	2013	2014	2015
Bromangymnasiet			
- PP Mark och Bygg	$>14,3$	-	-
- Hi-tek	11,8	1,71	-
- DX-1	-	1,75	-
- DX-2	-	-	1,26
Högskolan i Gävle			
- HiGtech	2,50	2,68	-
Staffansgymnasiet			
- Rail-Räcärs	-	2,60	3,43
S:t Mikaelsskolan			
- <i>Inget lagnamn</i>	-	-	9,83
Luleå Tekniska Högskola			
- ACUS	-	-	2,62

2.3 Omvärldsanalys

En omvärldsanalys användes för att få kunskap och erfarenhet för vilka typer av lösningar som var möjliga att åstadkomma. Detta görs genom att studera foton från hemsidan, två bilder därifrån visas i Figur 2.4, och är publicerade med tillstånd av Lars Gustavsson [5]. Denna analys tillsammans med teorin ligger till grund för fordonets konstruktion.



(a) Figuren visar några av de fordon som deltog i tävlingen.



(b) Detaljbild på ett av fordonen.

Figur 2.4: Figurerna visar exempel på hur tidigare fordonslösningar såg ut under Delsbo Electric 2015. Bilderna är publicerade med tillstånd av Lars Gustavsson [5].

2.3.1 Golv

Från tidigare års tävlingar kan det ses olika lösningar av golv på fordonet. Dessa är bland annat en tunn metallplatta på chassit, en platta i någon typ av trä över chassit, en metallbalk för att lägga fötterna på och ett nät uppspant under chassit för att förhindra att fötter vidrör marken. Vissa tidigare deltagares fordon hade inte något täckande golv, utan bestod endast utav chassit. Eftersom detta ej stämmer överens med årets gällande regler kan slutsatsen dras att reglerna ändrats från tidigare år, eller att dessa lag ej kom till start.

2.3.2 Chassi

Chassi är nödvändigt för att kunna åstadkomma ett stadigt och stabilt fordon, och lösningar för detta av tidigare tävlingsdeltagare har sett olika ut beroende på fordonets design. Detta eftersom alla olika delsystem måste fästas i chassit, och eftersom att antalet delsystem samt vilka olika typer av delsystem som använts ställer olika krav på design av chassit och fordonet. Antalet hjul medför olika krav på chassit, och även antalet passagerare som fordonet är dimensionerat för, samt placeringen av dessa ställer olika krav på chassit.

Majoriteten av tidigare deltagare har använt sig utav en chassiram i någon metall. Sedan har olika antal stänger fästs mellan sidor i ramen för att kunna fästa delsystem på. Ramen har ibland varit placerad utanför hjulen och ibland innanför, och därmed har bredden på chassit varierat. Majoriteten av tidigare deltagare har även använt sig utav ett stelt chassi, där alla delar är fastsvetsade eller sammansatta på något annat sätt så att hjulparen är låsta i förhållande till varandra.

2.3.3 Hjul

Från tidigare deltagande lag vid tävlingen kan det ses att fordonen varit utrustade med både tre och fyra hjul. Delsbo Electric säger själva på deras hemsida att de rekommenderar tävlingsdeltagarna att använda sig utav fyra hjul istället för tre, då det är svårt att uppnå samma stabilitet med trehjuliga fordon som enbart har styrning på rälsens insida. Detta på grund av att Delsbo Electric endast garanterar styrning mot rälsens insida enligt svensk standard. Styrning på utsidan av rälsen kan hindras av t.ex växtlighet, grus, vägövergångar och rälsspik [3].

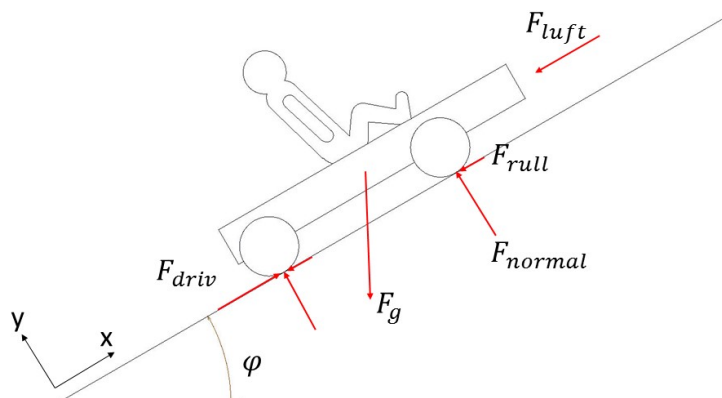
Utifrån tidigare deltagare kan det ses att det finns en mängd olika alternativ när det kommer till konstruktion av hjul. En vanlig form på hjulen är konform för att hjulet ska kunna glida över rälsens vidd och ha liten kontaktyta med rälsen, samt att hjulet är utrustat med en fläns som förhindrar att hjulet helt glider av rälsen. Vanligast är att de är konstruerade i någon metall, men det har även förekommit hjul i plast.

En annan konstruktion som förkommit är att använda en eller flera tunnare stålskivor som bultas ihop med en fläns som har en något större diameter än själva hjulet. Vissa har använt sig utav cykelhjul för att åstadkomma något liknande.

3

Teori

Fordonet utsätts för mekanisk påverkan i form av krafter. I detta arbete används en modell som visas i Figur 3.1 som utgångspunkt. Den drivande kraften F_{driv} tillförs från fordonets drivlina, men även luftmotstånd och lutning kan verka för att föra fordonet framåt under rätt förutsättningar. Detta beskrivs mer ingående i Avsnitt 3.1.



Figur 3.1: Illustration av fordonet sett som mekaniskt objekt med de krafter som verkar på fordonet. F_{driv} är den drivande kraften från motorn, F_g tyngdkraften som verkar på fordonet och F_{luft} är luftmotståndet. F_{rull} , som betecknar rullmotståndet, och F_{normal} , som betecknar normalkraften från underlaget, verkar på alla fyra hjul. Riktningarna på pilarna visar krafternas riktning. Vinkel φ betecknar lutningen av underlaget som fordonet färdas på.

Drivlinan och dess komponenter utgår ifrån modellen i Figur 1.1 och de teoretiska uppställningarna för dessa komponenter är beskrivna i Avsnitt 3.3 *Batteri*, 3.4 *Motorstyrenhet*, 3.5 *Motor* och 3.6 *Transmission*. Vidare tas förlusterna från lagringarna också i åtanke enligt modellen som beskrivs i 3.7 *Lagringar*.

3.1 Mekanisk påverkan

Beträffande mekanisk påverkan på fordonet tar modellen hänsyn till följande fenomen:

- Rullfriktion
- Luftmotstånd
- Lutning

Den bromsande friktionskraften mot hjulen beskrivs enligt

$$F_{rull} = C_r \cdot F_{normal} = C_r \cdot g \cdot m \quad (3.1)$$

där C_r är en friktionskoefficient, F_{normal} är normalkraften från underlaget, g är gravitationskonstanten och m är fordonets massa. Friktionskoefficienten antas vara konstant eftersom det är svårt att uppskatta förändringar av detta värde till följd av till exempel slitage på rälsen.

Luftmotståndet kan estimeras som

$$F_{luft} = \frac{C_a \cdot \rho_l \cdot A_{eff} \cdot v^2}{2} \quad (3.2)$$

med C_a som en koefficient beroende på fordonets utformning, ρ_l är luftens densitet, A_{eff} är fordonets effektiva tvärsnittsarea som utsätts för luftmotståndet och v är fordonets hastighet relativt luften.

Lutningens kraftbidrag kan både verka mot och med färdriktningen beroende på om fordonet befinner sig i nedförsbacke eller uppförsbacke. Detta kraftbidrag går att beskriva med

$$F_{lutning} = F_g \cdot \sin(\varphi) = g \cdot m \cdot \sin(\varphi) \quad (3.3)$$

där φ är backens lutning i grader och bestämmer alltså kraftbidragets tecken. Data för banans lutning finns offentligt på tävlingens hemsida, och redovisas även i Figur 2.3. Kraften F_{netto} som driver fordonet framåt kan nu summeras som

$$F_{netto} = \sum F_x = m \cdot a = F_{driv} - F_{rull} - F_{luft} - F_{lutning} \quad (3.4)$$

där $\sum F_x$ är summan av samtliga krafter i x-led, se Figur 3.1. Kraftbidraget från F_{luft} och $F_{lutning}$ antas ha en negativ påverkan som utgångspunkt och a är fordonets acceleration.

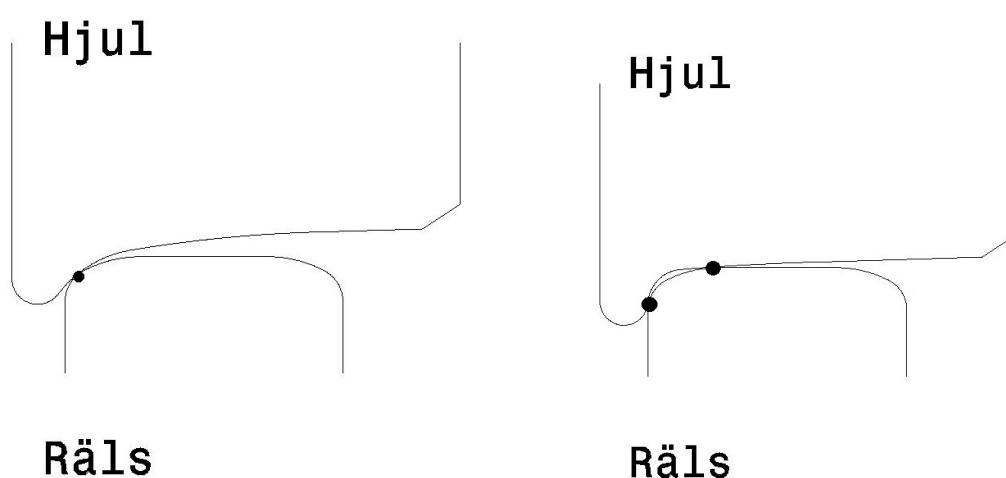
3.2 Rälsdynamik

För att rälsbundna fordon ska kunna färdas effektivt framåt på en räls krävs det att fordonet är utrustat med hjul anpassade efter rälsen som det ska gå på. Detta innebär att placeringen av hjulen måste vara anpassade efter spårvidden, och hjulens konstruktion måste vara anpassade efter utseendet på rälsen.

Geometrin av hjul och räls är helt avgörande för hur styrningsprestandan blir när ett spårbundet fordon färdas på räls. Det är därför viktigt att hjulets och rälsens fysiska egenskaper tas till hänsyn och anpassas efter varandra. Detta förhållande

kallas rälsprofil, och syftar till hjulets geometriska form samt ytan hos rälsen. Eftersom hjulen vanligtvis har en konad form, så är rälsen anpassade efter detta på det sättet att rälsen är monterad med en lutning inåt. I Sverige är denna lutning på 1:30, men denna standard är olika i olika länder [7].

Varje hjul har en yta som är i kontakt med rälsen, så kallad *kontaktyta*, och en fläns, där flänsen ska förbättra hjulets styrning i sidled när detta blir nödvändigt. Dessa visas i i Figur 3.2. Hjulparen är vanligtvis fastsatta på en stel axel så att de roterar i samma hastighet. I hjul- och rälsprofiler kan denna kontaktyta normalt röra sig kontinuerligt mot flänsen när hjulet rör sig i sidled över rälsen, vilket sker i optimala fall då det endast är *en* kontaktyta, vilket gäller för en slitenprofil. För andra hjul- och rälsprofiler kan kontaktytan hoppa mellan olika kontaktpunkter, och kan även ligga i kontakt med flera kontaktpunkter åt gången [7].



(a) Rälsprofil med en kontaktpunkt för en sliten hjulprofil.

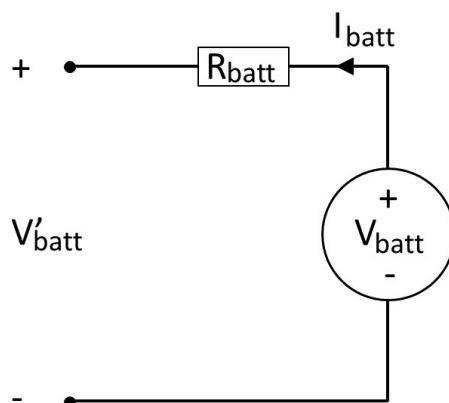
(b) Rälsprofil med två kontaktpunkter för ny hjulprofil.

Figur 3.2: De kontaktpunkter som uppstår mellan hjul och räls för olika rälsprofiler.

Styrmekanismen hos hjulparet sker genom att när rälsen svänger, glider hjulparen i sidled över rälsen, där rälsprofilens form medför att radien vid kontaktytan för de olika hjulen är olika stora. Alltså, när radien vid kontaktytan på ena sidan ökar, minskar radien vid kontaktytan på motsatt sida. När kontaktpunkten går upp mot flänsen, där radien ökar kraftigare, kommer hjulparen att 'glida' ner och fordonet centreras på detta sätt på rälsen. Hjulen kommer alltså ej att slira på rälsen genom en kurva. Detta fenomen kallas *självcentrering*, och sker på grund av gravitationsbelastningen. Genom detta fenomen är det möjligt för hjulparen att ta sig smidigt igenom en kurva på rälsen [7].

3.3 Batteri

Batteriet har variabel spänning beroende av sin inre resistans och den ström som dras från batteriet. För att kunna veta om en viss batterimodell kan förse motorn med tillräckligt hög spänning undersöks detta samband som visas i Figur 3.3.



Figur 3.3: Teoretisk modell av ett batteri med inre resistans. V'_{batt} betecknar den riktiga utspänningen, R_{batt} batteriets inre resistans, I_{batt} strömmen genom batteriet och V_{batt} batteriets märkspänning.

Sambandet mellan utspänning som fordonet kan dra nytta av och märkspänning på batteriet beskrivs enligt

$$V'_{batt} = V_{batt} - I_{batt} \cdot R_{batt} \quad (3.5)$$

där V'_{batt} är den riktiga utspänningen från batteriet, V_{batt} är batteriets märkspänning, I_{batt} är strömmen ut från batteriet och R_{batt} är batteriets inre resistans.

3.4 Motorstyrenhet

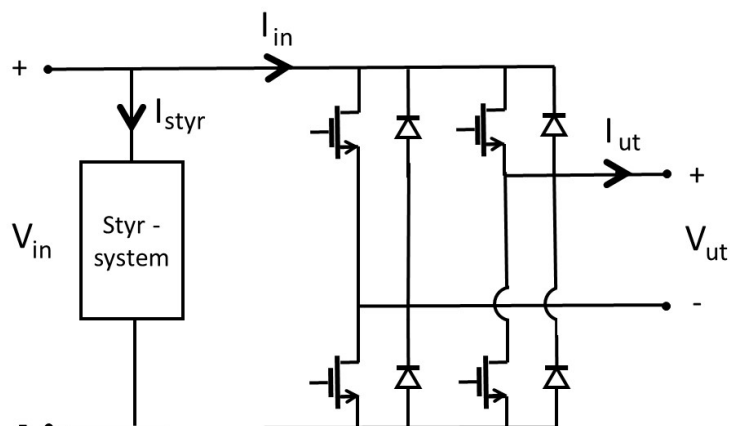
En första modell av motorstyrenheten är i form av en H-brygga parallellt med ett styrsystem för att bestämma styrningen av H-bryggan, enligt Figur 3.4, där inspänningen V_{in} skalas ner till en utspänning V_{ut} .

Oberoende på given styrsignal kommer ett transistorpar vara aktiva och därmed ge en effektförlust. Det inaktiva paret transistorer ger samtidigt inte någon effektförlust. För att approximera motorstyrenheten effektförlust används

$$P_{styr} = 2 \cdot R_d \cdot I_{in}^2 + V_{in} \cdot I_{styr} \quad (3.6)$$

där R_d är "Drain-Source"-resistansen i omriktarens transistorer, I_{in} är strömmen som går in i H-bryggan, V_{in} är spänningen över ingången på H-bryggan och I_{styr} är den konstanta tomgångsström som styrsystemet i styrenheten kräver.

Modellen för motorn enligt Figur 3.5 implementeras och tomgångsförluster approximeras vara konstanta som en utgångspunkt, vilka i första hand går att finna i motorns datablad och sedan förfinas med egna mätningar.



Figur 3.4: Illustration av en H-brygga, uppbyggd av 4 MOSFET och 4 skyddsdioder. V_{in} betecknar inspänningen, I_{styr} konstanta tomgångsströmen som styrsystemet i styrenheten kräver, I_{in} strömmen in till H-bryggan, I_{ut} strömmen ut från H-bryggan och V_{ut} utspänningen.

3.5 Motor

Det finns ett flertal olika typer av eldrivna motorer att välja mellan. Nedan undersöks tre av dessa sorter som medför ett utbud av både växel- och likspänning.

3.5.1 Likströmsmotor

Bland likströmsmotorer finns ett stort utbud av olika motorer att tillgå. En växelriktare skulle inte behövas, men en H-brygga som matar motorn är att föredra, eftersom motorn på så vis blir lättare att kontrollera. En ekvivalent krets för en likströmsmotor med förlustkomponenter används som utgångspunkt, där den effektiva spänningen E_a , ankarresistansen R_a och tröskelspänningen V_t implementeras. Denna visas i Figur 3.5. Denna modell leder till två samband mellan ström, spänning, varvtal och moment

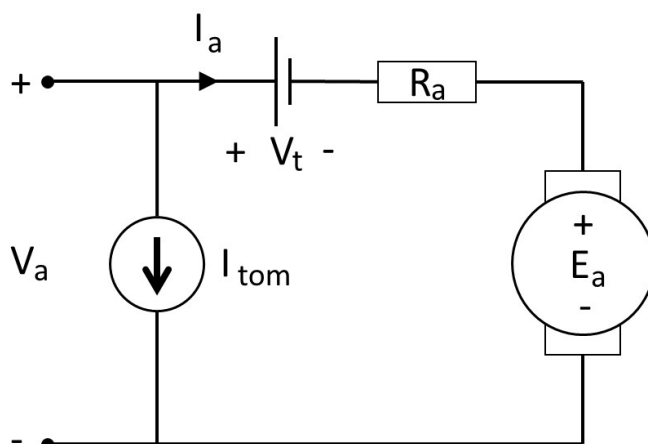
$$I_a \cdot \phi_m = T_e \quad (3.7a)$$

$$\frac{E_a}{\phi_m} = \omega_r \quad (3.7b)$$

där T_e är det motorns utvecklade moment, ω_r är vinkelfrekvensen på drivaxeln och ϕ_m är en magnetiseringskonstant. När motorn förbrukar en ström I_a över en spänning V_a kommer förluster att uppstå i ankarresistansen R_a enligt

$$P_a = R_a \cdot I_a^2 \quad (3.8)$$

där P_a är effektförlusterna. Till denna enkla modell tillkommer dessutom tomgångsförluster som representeras med en konstant ström I_{tom} . Till följd av en del



Figur 3.5: Ekvivalent modell för DC-motor med förlustkomponenter. V_a betecknar inspänningen, I_{tom} tomgångsströmmen, I_a strömmen genom ankarresistansen, V_t tröskelspänningen för motorn, R_a ankarresistansen och E_a den effektiva spänningen.

spänningfall i motorn kan en ekvivalent tröskelspänning V_t i motorn att bli märkbar.

3.5.2 Växelströmsmotor

AC-motor, även kallad växelsströmsmotor, är en elektrisk maskin som drivs av trefas eller enfas växelström vilket medför att den i de flesta fall är det främsta alternativet om motorn skall drivas från ett växelströmsnät. Växelströmsmotorn fungerar genom att spänningarna ger upphov till ett roterande magnetfält inuti motorn. Magnetfältet alstrar i sin tur en ström som skapar ett vridmoment på rotorn. Denna typ av motor används i många tillämpningar men används i hög grad i produktions- och industrisyften [14]. Vid implementation av växelströmsmotor skulle en växelriktare behöva installeras och detta skulle leda till ytterligare förluster i drivlinan.

3.5.3 Linjärmotor

En linjärmotor ser ut som ett platt rätkblock i metall som utnyttjar elektromagnetisk kraft för att med statisk motor putta en rörlig skena eller tvärt om. Denna typ av motor används dels i industrisammanhang men också som driftsmotor för tåg. Verkningsgraden för denna motor kan bli upp till 78.9% [9] men varierar stort med effektiv yta och avstånd till rälsen. Ett sätt att öka den effektiva ytan är att installera ett tredje, betydligt bredare rälsparti i körfältets mitt som endast används som drivbana till linjärmotorer. Att minimera avståndet mellan räls och motorplattan medför en ny typ av problematik. Om motorn kommer i kontakt med rälsen tillkommer istället stora förluster och ökad säkerhetsrisk, varför man inte kan ha för litet avstånd mellan motor och räls. Det sistnämnda ställer dessutom högre krav på ojämnheter i rälsen eftersom även små variationer kan leda till direktkontakt.

Eftersom linjärmotorn ger upphov till en drivande elektromagnetisk kraft kommer en växelriktare att behöva installeras vid användande av denna. I och med detta skulle en växellåda att bli överflödigt eftersom drivkraften i fråga appliceras direkt mot rälsen.

3.6 Transmission

För att ett fordon ska röra sig framåt behövs en nettokraft åt det håll det ska röra sig, och för att åstadkomma denna kraft behövs en drivande kraft från elmotorn. Vanligtvis arbetar elmotorer med högre vinkelhastigheter och lägre moment. Därför kan det vara fördelaktigt att införa en transmission som ger en utväxling som möjliggör motorn att arbeta vid en lämpligare arbetspunkt [6]. Generellt gäller det för en friktionsfri transmission att utväxlingen k uttrycks enligt

$$k = \frac{\omega_{in}}{\omega_{ut}} = \frac{M_{ut}}{M_{in}} \quad (3.9)$$

där ω_{in} är vinkelhastigheten in i transmissionen och ω_{ut} är vinkelhastigheten ut, M_{in} är momentet in i transmissionen och M_{ut} är momentet ut.

Det är inte bara den överförda vinkelhastigheten och momentet som är av intresse när transmissioner studeras. Ofta är det av intresse att veta den överförda effekten. Om det bortses från förluster kan effekten P beräknas enligt

$$P = M\omega \quad (3.10)$$

där M är momentet och ω är vinkelhastigheten. I verkligheten förekommer dock förluster. Verkningsgraden η för en transmission definieras som

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{ut}} = \frac{M_{in}}{M_{ut}} \cdot \frac{\omega_{in}}{\omega_{ut}} \quad (3.11)$$

där P_{in} är effekten in i transmissionen, P_{ut} är effekten ut. Verkningsgraden är alltså ett mått på hur stora förlusterna är. Den totala verkningsgraden kan variera beroende på vilka moment och rotationshastigheter som transmissionen utsätts för. Av den anledningen är det svårt att i förväg beräkna ett teoretiskt värde på verkningsgraden [6].

3.6.1 Kugghjulsväxel

Kugghjulsväxlar finns i flera olika utförande som kan vara användbara i olika situationer. Den vanligaste består utav två kugghjul med kuggar på utsidan som går in i varandra när hjulen roterar. Detta medför att utväxlingen blir exakt och inte är belastningsberoende utan formlös. En annan vanlig kugghjulsväxel är planetväxeln som består av flera lager av kugghjul, vilket medför att den alltså kan skapa en väldigt stor utväxling. Kugghjulsväxeln har möjlighet att överföra stor effekt och stora moment. Den har hög noggrannhet i utväxlingen samt relativt hög typisk verkningsgrad. Detta kräver dock att tillverkning och montering av kugghjulsväxeln är genomförd med relativt hög precision. Växeln kan även ha relativt hög bullernivå, samt erfordrar smörjning för att fungera optimalt [6].

3.6.2 Remväxel

I en remväxel överförs moment och rotationshastighet genom att spänna en rem över två eller flera remskivor[6], och det är även möjligt att ha vinklar mellan dessa remskivor. Utväxlingen uppstår genom skillnaden i remskivornas diameter och effektöverföringen sker på grund av friktion mellan rem och remskiva. Den effekt som går att överföra genom remmen beror till stor del på hur den är spänd, varför transmissionen kallas kraftbetingad, och har därmed möjlighet att överföra relativt stor effekt. Det förekommer slirning i denna typ av transmission, vilket medför en belastningsberoende utväxling. Remväxelen är relativt dålig på att överföra stora moment, och har relativt dålig typisk verkningsgrad [6].

Det finns en typ av remväxel som använder sig av kuggar i remmen och inte beror av friktion i samma utsträckning som andra remväxlar, som kallas kuggrem. Denna gör att utväxlingen blir exakt och formbetingad och eftersom den inte slirar mot remskivorna har den en högre verkningsgrad än andra remväxlar.

3.6.3 Kedjeväxel

Kedjeväxel har egenskaper av både kugghjuls- och remväxel. Transmissionen består av två eller flera kugghjul och en kedja. Kedjan är styv och stark i längsriktning men flexibel i ett plan. I och med att kedjan sitter fast i kuggarna på kugghjulet vid rotation är transmissionen exakt och formbetingad. Kedjeväxel har hög noggrannhet i utväxlingen och har relativt hög typisk verkningsgrad. Den är även enkel att tillämpa. Eftersom kedjeväxeln har vissa egenskaper från kugghjulsväxeln kräver även denna smörjning, samt kan ha relativt hög bullernivå [6].

3.7 Lagringar

Lagringar förekommer i många tekniska applikationer där krav finns på relativ rörelse mellan olika maskindelar. Oftast är målet med att tillsätta lagringar att minimera rörelsemotstånd. Detta kan göras på flera sätt och det finns många varianter. Exempel på olika varianter på lagringar är rullningslager, glidlager och bussningar. Rullningslager är enkla att tillämpa eftersom det finns mycket information kring hur de bör väljas och det är enkelt att implementera i konstruktioner.

Rörelsemotstånd i rullningslager kan delas upp i viskös friktion, inre friktion och yttre friktion. Viskös friktion beror i huvudsak på hastigheten, inre och yttre friktion beror främst på belastningen. Av detta följer att rörelsemotståndet i stor grad är beroende av hastighet och belastning. För att kunna göra överslagsberäkningar bortses hastighetsberoendet i första hand, och istället används ett enkelt samband [6],

$$\Delta M \approx \Delta M_P = \mu \cdot P \cdot d/2 \quad (3.12)$$

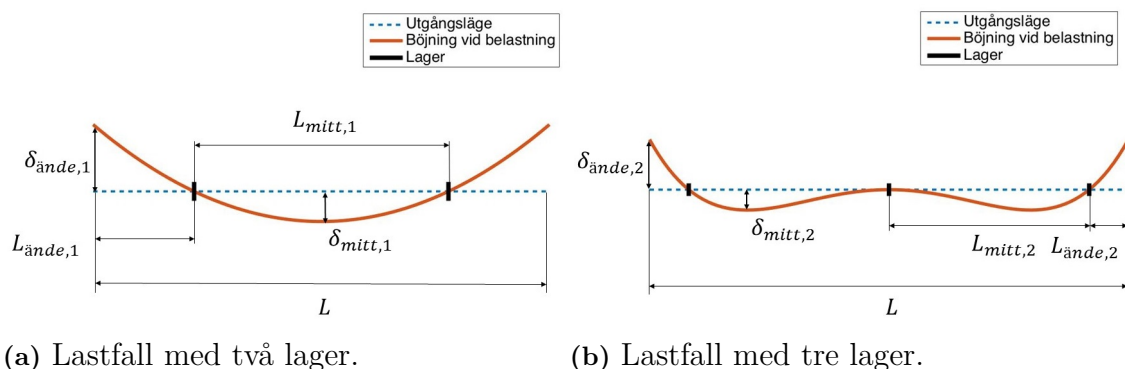
där ΔM är totala rörelsemotståndet, ΔM_P rörelsemotståndet beroende på lasten, μ lagrets friktionstal (hämtas från tabell), P ekvivalenta lagerlasten och d diametern på axeln genom lagret. Den ekvivalenta lagerlasten är en sammanvägning av axiella och radiella laster som verkar på lagret. Vid antagandet att axiella laster ej förekommer är den ekvivalenta lagerlasten lika med den radiella lasten.

Det finns flera olika typer av rullningslager som har olika för- och nackdelar beroende på var de används. Några exempel på olika typer är spårkullager, cylindriskt rullager, vinkelkontaktkullager och sfäriskt radiallyager. Vid val av rullningslager bör typ av belastning noteras för att kunna välja rätt [6].

3.8 Belastningsberäkningar

En viktig del av konstruktionen av ett fordon är de axlar som sammanbinder hjulen. Dessa ansågs viktiga att undersöka med avseende på hållfasthet eftersom den utsätts för stora krafter i förhållande till andra komponenter. Dessutom bör de inte böja ut för mycket från utgångsläget (rak stång) och de går att välja i ett antal olika tjocklekar. Anledningen till att de inte bör böja ut för mycket är att det sätter högre krav på lagrena. Dessutom har en för stor utböjning på axeln som följd att hjulen vinklas inåt, vilket kan ge sämre egenskaper vid drift på räls. Med utböjning menas avståndet från utgångsläget till den position axeln har förflyttat sig då den belastas.

Beräkningarna för en belastad axel avser hur den kommer att böja ut ifrån sitt ursprungsläge. Två fall undersöktes: axel med två respektive tre rullningslager, se Figur 3.6. På lagerna verkar tyngdkraften från fordonet ovanifrån och underifrån verkar normalkraften från underlaget, vilket ger utböjningarna. Det som beräknades i de två fallen var utböjningen från utgångsläget i ändarna av axeln och den maximala utböjningen mellan två lager.



Figur 3.6: Illustration av utböjningen vid de två lastfallen som uppstår då axeln belastas med tyngdkraften från fordonet ovanifrån och normalkrafter från marken underifrån. Utböjningarna är överdrivna i figurerna i åskådliggörande syfte. Beteckningen δ betecknar axelns utböjning och L axelns längd. Indexet "ände" syftar till axelns ändrar och "mitt" till avståndet mellan två lager. Indexen "1" och "2" betecknar fallet med två respektive tre lager.

För att räkna ut utböjningarna för lastfallet med två lager vid de önskade positionerna användes formler för elementarfall av balk i böjning [10]. För att erhålla utböjningen i mitten av axeln i fallet med två lager användes

$$\delta_{mitt,1} = \frac{ML_{mitt,1}^2}{8EY} \quad (3.13)$$

där $\delta_{mitt,1}$ betecknar utböjningen i mitten av stången, M momentet som uppstår på grund av normalkraften från marken och hävarmen från axelns ände och lagret, $L_{mitt,1}$ avståndet mellan lagrena, E axelns elasticitetsmodul och Y dess yttröghetsmoment. Yttröghetsmomentet för en rund massiv stång erhålls enligt

$$Y = \frac{\pi r^4}{4} \quad (3.14)$$

där r är stångens radie.

Utböjningen i änden av axeln beräknades genom att lägga ihop bidraget från utböjningen av en i ena änden fast insatt axel, med bidraget från vinkeln som erhålls från av att mittendelen av axeln böjs. Det slutliga uttrycket blir

$$\delta_{ände,1} = \frac{ML_{ände,1}^2}{2EY} + L_{ände,1} \sin\left(\frac{ML_{mitt,1}}{2EY}\right) \quad (3.15)$$

där $\delta_{ände,1}$ är utböjningen i mitten av axeln och $L_{ände,1}$ längden på axelns respektive ändar.

För att göra beräkningar för fallet med tre lager för utböjningen i ändarna och den maximala mellan två lager användes formler för elementarfall av balk i böjning [10]. Den maximala utböjningen erhöles genom att söka maxvärdet av funktionen

$$\delta_{mitt,2}(\xi) = \frac{ML_{mitt,2}^2}{16EY} \xi(1 - \xi) \quad (3.16)$$

där $\delta_{mitt,2}(\xi)$ är axelns utböjning från utgångsläget beroende av ξ , som är positionen mellan två lager och $L_{mitt,2}$ avståndet mellan de yttre lagrena. För att erhålla utböjningen i ändarna användes samma tankegång som vid fallet med två lager. Det slutliga uttrycket blir

$$\delta_{ände,2} = \frac{ML_{ände,2}^2}{2EY} + L_{ände,2} \sin\left(\frac{ML_{mitt,2}}{8EY}\right) \quad (3.17)$$

där $L_{ände,2}$ betecknar längden från axelns ände till första lagret.

4

Metod

Projektets olika delmoment har behandlats med hjälp av olika metoder. Dessa kan läsas om i Avsnitt 4.1 *Specifikation*, 4.2 *Koncept*, 4.3 *Val*, 4.4 *Design och konstruktion* samt 4.5 *Test och verifikation*. Hela denna metod och dess tillvägagångsätt är illustrerat i Figur 4.1, som visar de olika stegen i arbetsprocessen.

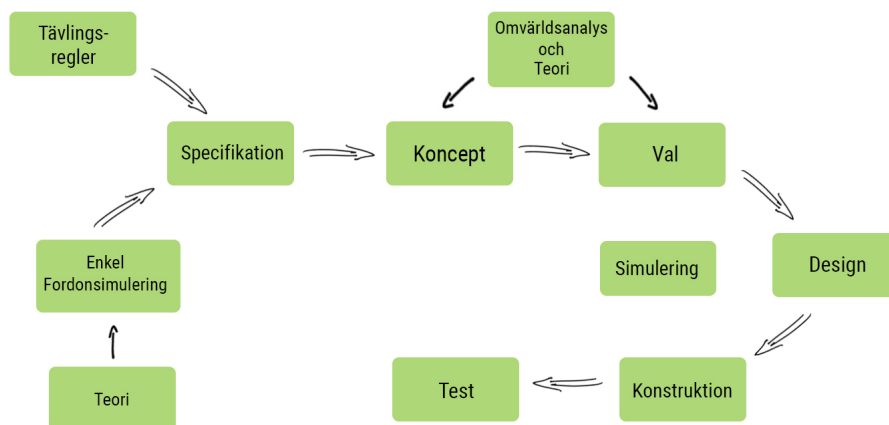
Från Figur 4.1 kan det avläsas att metoddelen *Specifikation* baseras först och främst på *Teori*. *Teorin* leder i sin tur till en *Enkel fordonssimulering*, som tillsammans med *Tävlingsreglerna* utgör krav och önskemål för att sätta upp en *Specifikation*. Utifrån denna specifikation skapades sedan olika *Koncept*, och med hänsyn till dessa koncept gjordes *Val* av vilket eller vilka koncept som var relevanta. *Designen* av fordonet började modelleras och därefter konstrueras när valet av koncept var färdigt, samtidigt mättes effektförluster i de olika komponenterna som kan läsas mer om i Avsnitt 4.5. När konstruktionen var färdigställd *Testades* fordonet, och de uppmätta effektförlusterna av testet jämfördes med värdena som tagits fram i *Simuleringen* som pågått parallellt med hela processen. Arbetsgången återgick sedan till val av koncept, och därefter upprepas följande steg fram till ett nytt test av fordonet. Parallellt med valet, designen, konstruktionen och test pågick simulering av fordonsmodellen, då simuleringsmodellen behövde uppdateras när verkliga effektförluster uppmätts.

4.1 Specifikation

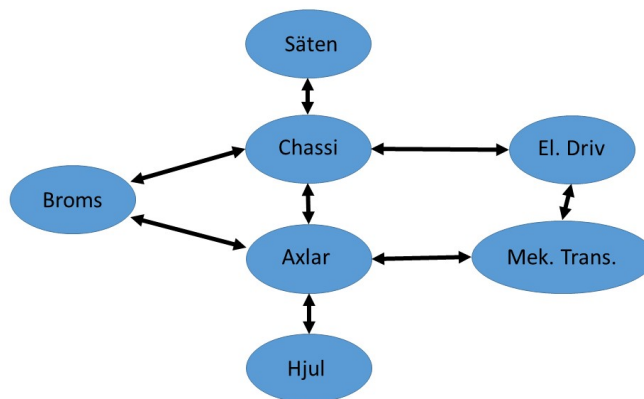
Utgångspunkten för designen och konstruktionen av fordonet är en enkel fordons-simulering, detta kan läsas om i Avsnitt 4.5. Fordonssimuleringen tillsammans med de uppsatta reglerna ligger till grund för fordonets specifikationer som skapades. Detta med hjälp av en litteraturstudie där vetenskapliga artiklar, kurslitteratur och produktblad satte ramarna för vidare arbete i projektet, och gav en bakgrund för att sedan kunna skapa ett koncept för fordonet.

4.2 Koncept

För att skapa olika koncept för fordonet delades det in i delsystem. Ett delsystem kan till exempel vara typ av motor, motorstyrning, chassi, drivsystem eller säten. För att tydliggöra hur dessa relaterar till varandra skapades ett blockschema som visar hur delsystemen samverkar, vilket illustreras i Figur 4.2.



Figur 4.1: Arbetsmodell för projektet. Teori, en enkel fordonssimulering och tävlingsregler lade grunden till att skapa en specifikation för fordonet. Vid skapande av koncept fanns krav och önskemål från specifikationen som vägledning. Omvärldsanalys och kunskaper om relevant teori fanns som hjälp i beslutet om vilket koncept som skulle väljas för vidareutveckling. Det valda konceptet designades och konstruerades sedan. Slutligen testas det. Parallellt med valet, designen, konstruktionen och test pågick simulering av fordonsmodellen.



Figur 4.2: Blockschema som illustrerar sammanlänkningen mellan de olika delsystemen. Pilarna betyder att delsystemen som de pekar interagerar med varandra.

I nästa steg behövdes lösningar för delsystemen skapas. För att kunna skapa lösningar behövdes det kunskap om dessa, vilket erhöles från teorin och omvärldsanalysen. I omvärldsanalysen studerades fordon från Delsbo Electric’s hemsida. Detta gjordes för att skapa idéer och ta lärdom utifrån andra lösningar för design och konstruktion. För att skapa koncepten sattes olika lösningar från olika delsystem samman till kompletta fordonlösningar. Genom denna process togs ett flertal koncept för fordonet fram.

4.3 Val

När de olika koncepten var färdigställda gjordes olika val baserat på prioriteringar för att på så sätt komma fram till det mest optimala konceptet. Detta skedde med hjälp av olika matriser, som kan läsas om i Avsnitt 6.3 *Elimineringsmatris*, 6.4 *Pughmatris* samt 6.5 *Kesselringmatris*.

Elimineringsmatrisen syftar till att välja bort alla koncept som inte uppfyller ställda krav. Denna matris användes först i elimineringsprocessen eftersom de koncept som återstår garanterar att uppfylla alla krav. I nästa steg användes Pughmatris, vilken innebär att de kvarvarande koncepten jämförs med egenskaper hos en referenslösning. Koncepten fick då ett visst antal ”poäng”, beroende på hur de förhöll sig till referenslösningen. Referensen kan vara en existerande lösning eller ett av koncepten, i detta fallet var denna ett av koncepten. Detta steg genomfördes två gånger, där referenslösningen varierades vid varje iteration, därigenom fanns det bara kvar ett fåtal koncept som uppfyllde alla krav och hade goda förutsättningar för vidare utveckling.

Det sista steget i urvalsprocessen var Kesselringmatris. I den listas önskade egenskaper tillsammans med en siffra på en skala, till exempel 1-5, som säger hur viktig den önskade egenskapen är. Därefter ges en siffra för hur väl ett koncept uppfyller den önskade egenskapen som sedan multipliceras med siffran för hur viktig den är. Ideal representerar vad ett koncept som fått maximalt med poäng och alltså totalt uppfyller de krav och önskemål som gruppen ställt på koncepten. Detta är dock endast en referens. Värdena summeras sedan för respektive koncept och jämförs med varandra, för att tydliggöra vilket koncept som bör väljas. Efter att Kesselringmatrisen gått igenom fanns alltså ett kvarstående koncept vilket togs vidare för design och konstruktion.

4.4 Design och konstruktion

När konceptet hade valts arbetades en detaljkonstruktion för fordonet fram, detta gjordes genom 3D-modellering i dator även kallat Computer-aided design (CAD). Därefter togs idén till Chalmers prototypverkstad för att konsultera handledarna i verkstaden om konstruktionen var möjlig att bygga. Hela konstruktionen ritades sedan upp i CAD. CAD-ritningen användes sedan för att hämta mått för tillverkningen av delar till konstruktionen. Alla delar sattes därefter ihop till ett komplett fordon och alla komponenter för drivlinan installerades för att sedan kunna testas.

4.5 Test och verifikation

Till att börja med togs en enkel simuleringsmodell fram, denna tog hänsyn till fysikaliska fenomen och gav möjlighet att extrahera data som var av intresse. Den första modellen användes dels som ett skal för fortsatt simulering och dels för att ge en initial överblick och kännedom om storheternas storlekar. Med kunskap om till exempel effektutvecklingens storlek kunde slutsatser om drivlinans prestandakrav

dras. Simuleringen hade även betydelse beträffande val av koncept då koncepten simulerades för att ge kvantitativa underlag för att jämföra dem.

En viktig del för få fram ett energieffektivt fordon är att mäta dess effektförluster på komponentnivå. För att få fram värdefull data att implementera i simulationsmodellen utfördes först mätningar på enskilda komponenter. Mätningarna skedde till största del med hjälp av multimetrar. För att mäta på komponenterna behövdes även apparater så som spänningsaggregat och bromsmotor.

En slutgiltig del av projektet var att testa och verifiera fordonet. Detta skedde genom ett fälttest på en järnväg i närheten av Göteborg för att jämföra simulerade och uppmätta värden mot de verkliga värdena. Mätningen för fordonets energieffektivitet gjordes med hjälp av multimetrar och varvtalsmätare. Dessa mätningar jämfördes sedan med de simulerade mätvärdena. Testet gjordes även för att säkerställa att fordonet fungerade som det skulle inför tävlingen på Dellenbanan i Delsbo. Först och främst testades säkerhet och funktionalitet.

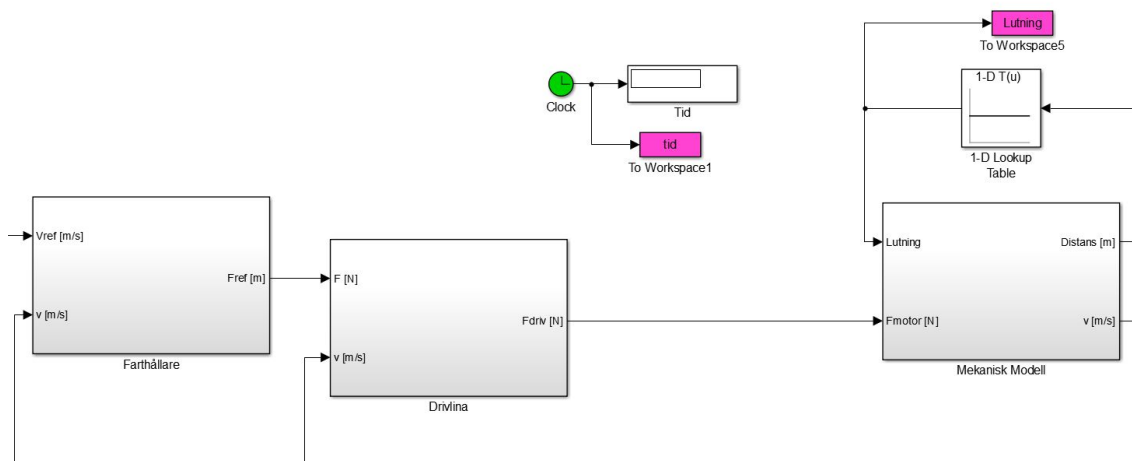
5

Simulering

En simuleringsmodell är ett verktyg som frekvent används för att analysera hypotetiska beteenden och prestationer utan att behöva realisera sina idéer. Fördelen med denna typ av verktyg är att det sparar in på resurser i form av framför allt tid, pengar såväl som miljöpåverkan. Med detta i åtanke ställdes en modell upp för detta projekt för att analysera flertalet koncept och parametrars inverkan med avseende på energiåtgång. Modellen har byggts upp i Mathworks Simulink och tar hänsyn till drivlinans prestation och energiförluster såväl som ett antal mekaniska belastningar av fordonet.

5.1 Implementering

Modellen kan i sin helhet delas in i två delar: Drivlinan och mekanisk påverkan av fordonet. Denna modell har byggts upp i Simulink för att kunna genomföra nödvändiga beräkningar och går att observera i Figur 5.1. Figuren visar drivlinan, mekanisk påverkan på fordonet såväl som en farthållare som ger en kraftreferens för att kunna testa resterande system.



Figur 5.1: Överskådlig figur av simuleringsmodellen i Simulink. Figuren visar en farthållare som ger drivlinan en kraftreferens. Drivlinan ger i sin tur en drivkraft till den mekaniska modellen av fordonet. Drivlinan och den mekaniska modellen bygger på teori från Avsnitt 3

I *Drivlina* från Figur 5.1 implementeras teori om drivlinan som presenteras i

Avsnitt 3.3 till 3.7 och i *Mekanisk Modell* implementeras de krafter som introduceras i Avsnitt 3.1.

För att finna energibehovet under ett simuleringsförlopp integreras effekten över tiden som dras från batteriet enligt

$$E_{batt} = \int_0^T P_{batt}(t) dt \quad (5.1)$$

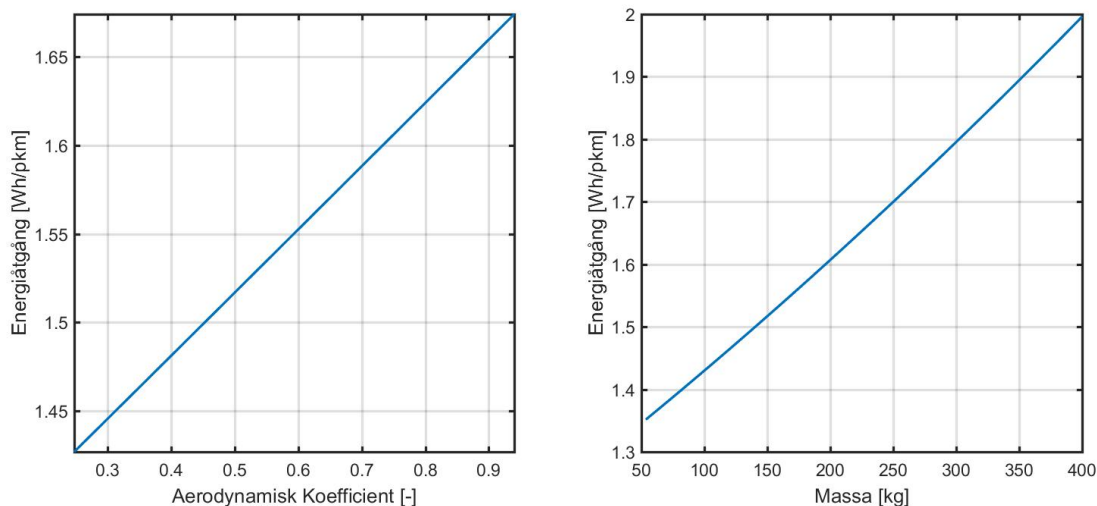
där E_{batt} är den energi som tas från batteriet, T är totala tiden sedan motorn startades. P_{batt} är den momentana effekten som beräknas enligt

$$P_{batt} = V'_{batt} \cdot I_{batt} \quad (5.2)$$

och förser batteriet med effekt.

5.2 Tester

För att kunna kvantifiera och vikta olika parametrar har ett antal tester körts där olika variabler varierats. Genom att låta en parameter variera medan resterande värden hålls statiska kan man iaktta sagd parameters inverkan och beteende. Av särskilt intresse är att söka en eventuell minimal energiåtgång eller kunna väga möjligheterna att hålla energiförbrukningen så låg som möjligt för varje variabel. I Figur 5.2 illustreras beroendet mellan energiåtgången med avseende på aerodynamisk konstant och fordonets massa. Båda grafer i Figur 5.2 visar ett linjärt beteende



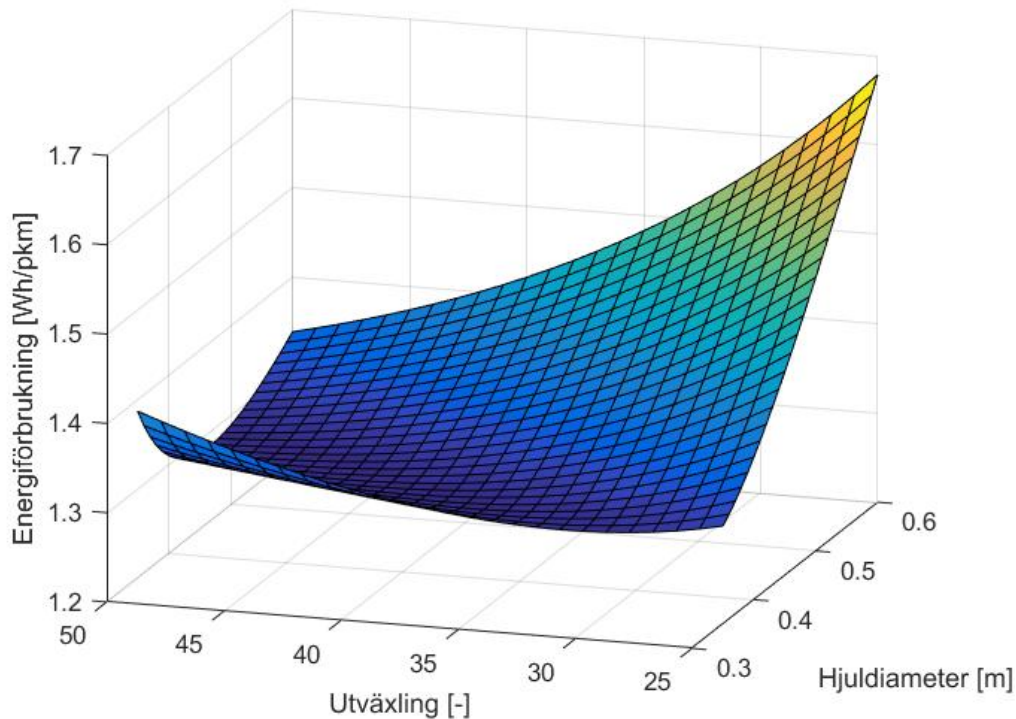
(a) Sveg av aerodynamisk konstant.

(b) Sveg av fordons massa.

Figur 5.2: Tester med avseende på aerodynamiskt konstant och fordonets massa. Figur a) visar att energiförbrukningen ökar linjärt med avseende på aerodynamisk koefficient. I b) visas att energiförbrukningen ökar linjärt med avseende på massan.

där både minskat luftmotstånd och massa ger ett mer gynnsamt resultat. Det linjära beteendet i Figur 5.2a överensstämmer med (3.2).

Beträffande transmission och hjuldiameter bör en gynnsam kombination undersökas för att placera motorn på en effektiv arbetspunkt. Dessa två beteenden undersöks därför i förhållande till varandra och resultatet presenteras i Figur 5.3.



Figur 5.3: Relation mellan energiförbrukning, utväxling och hjuldiameter. Figuren visar det för en given utväxling finns ett optimalt val av hjuldiameter, och vice versa.

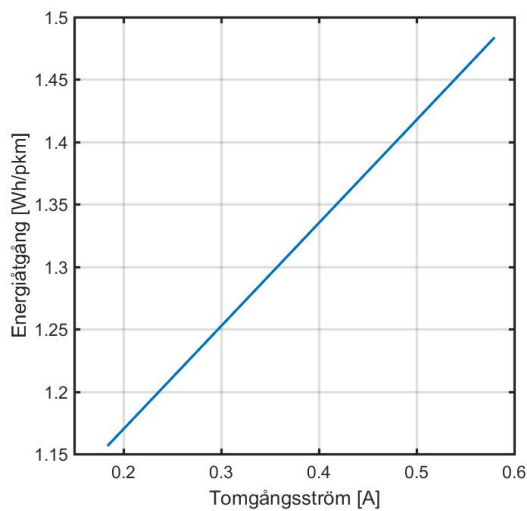
Från Figur 5.3 observeras att både utväxling och hjuldiameter visar på ett kvadratisk beteende och att dessa parametrars samverkan resulterar i en linje av preferabla kombinationer. Till följd av det kvadratiska beteendet kommer det vara av stor vikt att försöka optimera dessa parametrar. När en storlek på hjul har fastställts med avseende på rälsdynamiska egenskaper kan en utväxlingsfaktor väljas.

Av intresse är också att se vilken inverkan motorns tomgångsström är för att avgöra vilka specifikationer man bör ha vid val av motormodell. Med vetskapen att förluster kommer att ske även i transmissionen görs en undersökning om hur dessa energiförluster kan påverka det slutgiltiga resultatet. Detta undersöks med en tänkt verkningsgrad för transmissionen. Dessa två undersökningar illustreras i Figur 5.4.

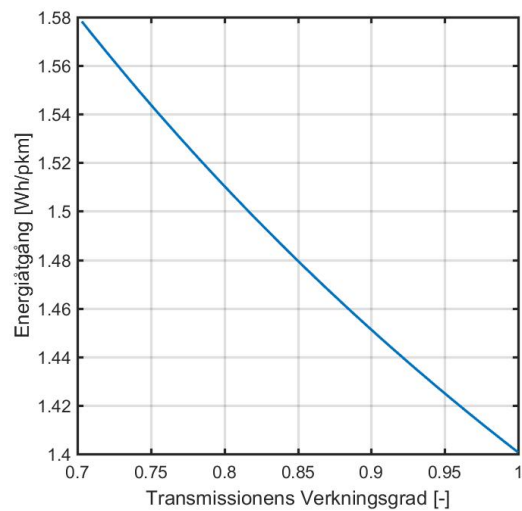
Mellan energieffektivitet och tomgångsströmmen avläses ett linjärt samband och för att minska energiåtgången bör därför denna ström hållas minimal. En så hög verkningsgrad som möjligt på transmission bör eftersträvas under val av komponenter.

En undersökning av fordonets hastighet genomfördes också för att bestämma vilken hastighet som är effektivast med avseende på energieffektivitet. Resultatet av denna simulering visas i Figur 5.5.

Från Figur 5.5 avläses att när hastigheten ökar kommer även energiåtgången öka. Med detta som motivering bör fordonets hastighet att hållas så låg som möjligt.



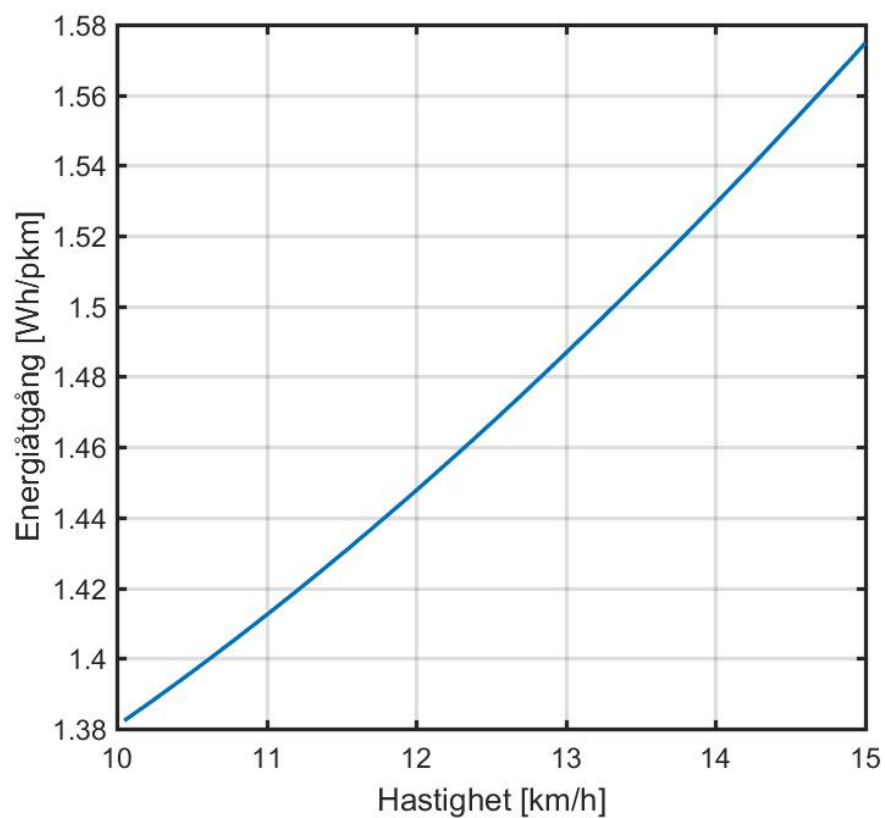
(a) Svep av motorns tomgångsström.



(b) Svep av transmissionens verkningsgrad.

Figur 5.4: Tester med avseende på motorns tomgångsström och transmissionens verkningsgrad. Figur a) visar att förhållandet mellan energiåtgång och motorns tomgångsström är linjär. Figur b) visar att förhållandet mellan energiåtgång och transmissionens verkningsgrad är närmast linjärt.

Enligt Avsnitt 2.1 måste fordonet ha en hastighet på minst 10 km/h och därför eftersträvas 10.5 km/h som fordonets hastighet.



Figur 5.5: Relationen mellan fordonets hastighet uttryckt i km/h och energiätgång uttryckt i Wh/pkm. Det framgår av grafen att en lägre hastighet medför en lägre energiätgång.

6

Konceptval inför fordonsdesign

Processen utav konceptval inför fordonsdesign utfördes genom att först ta fram en kravspecifikation där alla krav fordonet behöver uppfylla för att fungera och få delta i tävlingen. I kravspecifikationen finns även önskemål som gruppen satt upp för att underlätta och förbättra konstruktionen. Flera koncept för design av fordonet genererades av gruppen som sedan jämfördes mot varandra. Jämförelsen fungerade genom att koncepten fick utvärderas i flera matriser med olika värderingskrav, som kan finnas i avsnitten 6.3 Elimineringmatris, 6.4 Pugh-matris och 6.5 Kesselringmatris, där kraven grundades i kravspecifikationen. Detta för att på bästa möjliga sätt, utan personliga åsikter eller värderingar, komma fram till det mest optimala konceptet enligt specifikationerna och de mål som satts upp.

6.1 Kravspecifikation

En kravspecifikation, som kan avläsas i Figur 6.1, sattes upp inför skapande och val av koncept, för att ha en utgångspunkt på vilka specifikationer koncepten var tvungna att hålla sig inom. Kravspecifikationerna grundade sig främst i tävlingsreglerna, som kan hittas i Avsnitt 2.1. Utöver dessa, med hjälp av omvärldsanalysen samt teoriavsnittet, satte projektgruppen upp egna specifikationer som ansågs vara nödvändiga för att kunna skapa ett stabilt, personsäkert och energieffektivt fordon. *Justerbara avstånd mellan hjulen* ansågs vara viktigt, det vill säga vikt 5, då variationer mellan rälsen kan förekomma, se Avsnitt 2.1. För att sänka sin energiåtgång under loppet finns möjligheten att *återmata bromsenergin*. Därför har projektgruppen valt att vikta 5 på detta önskemål. *Enkelhet, energieffektivitet, styva/hårda hjul* och *låg massa* var mycket önskvärda och viktades 4 eftersom de påverkade fordonets energiåtgång till de lägre och anseddes vara relativt enkla att genomföra. *Lågt luftmotstånd* viktades med 3 på grund av att det var önskvärt men fordonet behöver inte lågt luftmotstånd för att färdas framåt. *Utseende/design* tilldelades vikten 1 då det var något gruppen kunde ta hänsyn till i mån av tid.

6.2 Konceptgenerering

En del i processen för att skapa det slutgiltiga fordonet är att skapa koncept för hur fordonet kommer se ut. Med ett koncept menas en principiell lösning för fordonets utformning och funktioner och är därmed inte beskriven i detalj utan mer övergripande. Av den anledningen kommer det ej finnas några mått med i beskrivningen av koncepten och alla komponenters placering, som till exempel batterier, kommer inte

6. Konceptval inför fordonsdesign

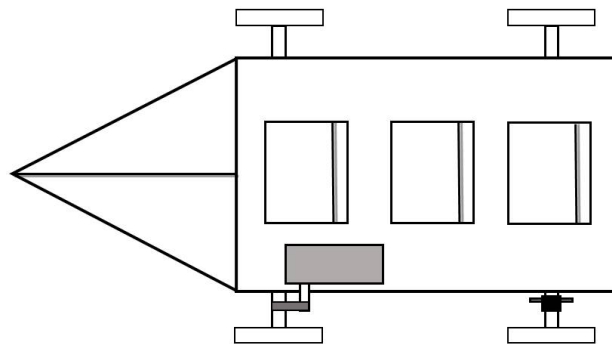
Tabell 6.1: Kravspecifikation där dels de krav från tävlingen, och dels de krav som gruppen själva ansett relevanta presenteras. De krav som ställts av gruppen har även viktats från 1-5, där 5 är en kritisk egenskap, medan 1 endast är en önskvärd egenskap.

Kriterier	Krav/ önskemål	Vikt 1-5	Referens (kravställare)	Syfte/kommentar
Funktion:				
Förflyttning av sittande passagerare via räls	K		Tävlingsregler	
Justerbara avstånd mellan hjulen	Ö	5	Projektgruppen	Möjliggör justeringar för varierande spårvidden för anpassning vid tävlingsbanan
Broms	K		Tävlingsregler	Manuell broms, av säkerhetsskäl
Prestation:				
Kunna hålla en genomsnittshastighet på 10-15 km/h över tävlingsträckan	K		Tävlingsregler	Genomsnittshastigheten gäller över hela sträckan, stillastående start och stillastående stopp
Fordonet ska drivas uteslutande av elenergi	K		Tävlingsregler	
Spänningskäll måste ha spänningen 6-48V	K		Tävlingsregler	
Maximal momentan strömförbrukning 20A	K		Tävlingsregler	
Kunna köra hela tävlingssträckan på 3,36 km	K		Tävlingsregler	
Återmatning av bromsenergi	Ö	5	Projektgruppen	För att få lägsta möjliga genomsnittsförbrukning
Det måste finnas plats för 1-6 personer	K		Tävlingsregler	
Kunna köra genom växel, vägövergångar, kurvor samt upp- och nedförsbacke	K		Tävlingsregler	
Storlek:				
Gå att köra på räls med nominell spårvidd 1435mm och variationer	K		Tävlingsregler	Begränsning på grund av utformning på rälsen
Inom tillåtna ramar för rälsbundna fordon (Figur 2.1)	K		Tävlingsregler	Begränsade dimensioner
Säkerhet:				
Säte för varje passagerare där större delen av tyngden är fördelad på rumpen	K		Tävlingsregler	
Ryggstöd för säte måste ha lutning mellan 60-90 grader, rel. horisontalplanet	K		Tävlingsregler	
Ryggstödet minimala höjd, 35 cm	K		Tävlingsregler	
Bedömas vara säkert så att inga personskador sker vid kraftig inbromsning, haveri eller urspårning	K		Tävlingsregler	
Golv eller nät som förhindrar fötter och armar från att fastna mot mark eller slipers	K		Tävlingsregler	
Skydd mot klämrisk av t.ex. fingrar i hjul och ekrar	K		Tävlingsregler	
Konstruktion:				
Enkelhet	Ö	4	Projektgruppen	Begränsad tid, möjlighet att konstruera samt kunskapsnivå
Energieffektivitet	Ö	4	Projektgruppen	Meningen med tävlingen, samt ett av gruppens huvudmål
Utseende/design	Ö	1	Projektgruppen	Gruppen ska representera Chalmers vid tävlingstillfället
Styva/hårda hjul	Ö	4	Projektgruppen	Styvare hjul medför mindre rullningsmotstånd
Flänsar på hjulen	K		Projektgruppen	Av säkerhetssjäl och samt för körning igenom en växel
Låg massa	Ö	4	Projektgruppen	Simuleringen visade lägre vikt på fordonet ger lägre energiförbrukning
Lågt luftmotstånd	Ö	3	Projektgruppen	Simuleringen visade att lägre luftmotstånd medför lägre energiförbrukning
Mätenhet:				
Plats för montering av mätenhet mellan batteri och drivsystem med dim. 40x30x20 cm	K		Tävlingsregler	
Locket på mätenheten måste kunna öppnas	K		Tävlingsregler	

nödvändigtvis specificeras. Dessa koncept består utav lösningar för olika delsystem som sedan har satts samman till kompletta fordonslösningar. Samverkan mellan delsystem beskrivs av blockschemat i Figur 4.2. Som kan observeras i figuren är chassit, säten, motor, hjulaxlar och broms sammankopplade. Motorn driver den mekaniska transmissionen som går till hjulaxlen, som i sin tur driver hjulen. Mellan chassit och hjulaxeln är en broms kopplad för att kunna bromsa fordonet.

6.2.1 Koncept A

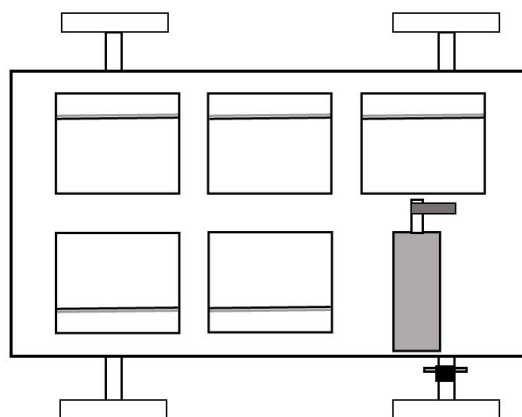
Koncept A är ett fordon som är tänkt att ha mindre luftmotstånd och är konstruerat för tre personer, vilket illustreras i Figur 6.1. Med en "näbb" i fronten blir fordonet mer strömlinjeformat och den personen som är placerad längst fram sitter med stor del av kroppen bakom "näbben". De tre personerna sitter även på ett led för att få ett minskat luftmotstånd. Fordonet har två stela hjulaxlar med drift på vänster sida på den främre hjulaxeln. Motorn, som är en likströmsmotor, sitter även den på vänster sida av fordonet, och som transmission mellan hjulaxel och motorn används en kedjeväxel. Vid motorn finns även plats för batteri och mätenhet. Motorn styrs av den som sitter längst fram i fordonet och den personen har även tillgång till en manuell broms. Bromsen är i form av en skrivbroms som är fäst på höger sida av hjulaxeln. Ramen till chassit är gjord i stålbalkar för att fordonet ska klara av tre personer. Golvet består av plywood för att minska vikten och för att förhindra att ben vidrör marken. Ryggstöden består även de av plywood med en lutning på 60 grader.



Figur 6.1: Illustration av koncept A. Konceptet består av säten för tre personer, en "näbb" för mindre luftmotstånd, likströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln i fram, stelt chassi, golv som skydd och skrivbroms.

6.2.2 Koncept B

Koncept B är gjort för att så många passagerare som möjligt ska åka med på fordonet, och kan ses i Figur 6.2. Det är gjort för fem personer som sitter mitt emot varandra och färdas i sidled för att fordonet ska kunna ha minsta möjliga längd. Fordonet har två stela hjulaxlar och drivs på den bakre axeln. Motorn, som är en växelströmsmotor, sitter längst bak i mitten av fordonet och använder kedjetransmission genom golvet till hjulaxeln. Till vänster om motorn finns det plats för batteri och mätenhet. Personen som sitter bredvid batteri och mätenhet ska styra motorn och det finns även tillgång till en skivbroms vid vänster bakhjul. Golvet och bänkar att sitta på är gjorda av plywood för att vikten ska bli så liten som möjligt. Ryggstöden är gjorda av metall för att vara stabila. Ramen till chassit är gjort av stålbalkar.



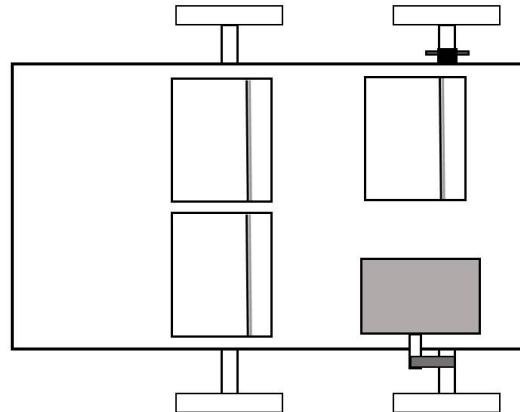
Figur 6.2: Illustration av koncept B. Konceptet består av säten för fem personer, växelströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln, stelt chassi, golv som skydd och skivbroms. Passagerare sitter riktade mot fordons mitt.

6.2.3 Koncept C

Koncept C är gjort för att kunna transportera tre personer, två fram till och en baktill, se Figur 6.3. Chassit har inga frihetsgrater utan är helt stelt och gjort av stålbalkar. Drivsystemet består av en likströmsmotor och en kedjeväxel från motor till ett kugghjul på den drivande axeln, vilken är den bakre. I konceptet ingår att det går att förflytta motorn vilket medför att kedjan mellan motorn och kugghjulet på axeln enkelt ska gå att spänna. För att bromsa fordonet finns det en skivbroms monterad vid bakre axel. Bromsoket som klämmer fast mot bromsskivan sitter fast i chassit och kan användas av personen som sitter längst bak.

För att förhindra att det går att sätta ner fötterna under färd finns det med ett golv av plywood. Motorstyrning, batterier och mätenheten sitter till vänster om personen som sitter baktill, se Figur 6.3. Detta ska medför att allt som styr motorn

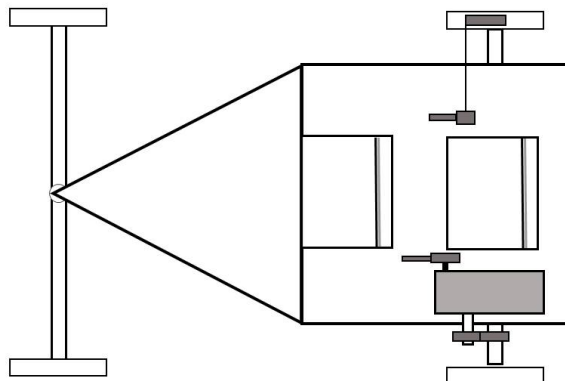
ska sitta nära varandra för att inte behöva dra onödigt mycket kablar och ha allt lättillgängligt. En funktion som detta koncept har, som inte tydligt framgår från Figur 6.3, är att hjulen på antingen vänstra eller högra sida av fordonet ska gå att justera så att en anpassning mot rälsen kan göras.



Figur 6.3: Illustration av koncept C. Konceptet består av säten för tre personer, likströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln, stelt chassi, ställbara hjul, golv som skydd och skivbroms.

6.2.4 Koncept D

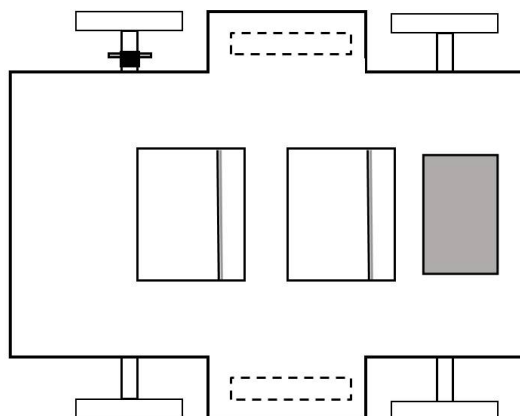
I koncept D finns plats för två personer som sitter på rad i färdriktningen, se Figur 6.4. Chassit, gjort av stålbalkar, tillåter att hjulparens axlar kan röra sig i förhållande till varandra i ett plan så att det uppkommer en vinkel mellan dessa, i till exempel kurvor. Motorn är en likströmsmotor som är kopplad till den bakre axeln via två kugghjul. Motorn går att flytta medelst en spak som den bakre föraren kan använda, på dennes vänstra sida. Denna funktion ska möjliggöra att motorn går att frikoppla från den drivande axeln. För att bromsa fordonet finns en spak på den bakre förarens högra sida som går till en enkel bromskloss som mekaniskt trycks mot ett hjul. Batterier, styrning och mätenheten är placerade längst bak på fordonet för att spara plats och ha det som behövs för styrning av motorn på en plats. Som skydd för passagerare finns ett plåtgolv.



Figur 6.4: Illustration av koncept D. Konceptet består av säten för två personer, ett chassi med en frihetsgrad, likströmsmotor, kugghjulsväxel, broms mot hjul och golv som skydd. Motordrift går att koppla från under drift medelst en spak.

6.2.5 Koncept E

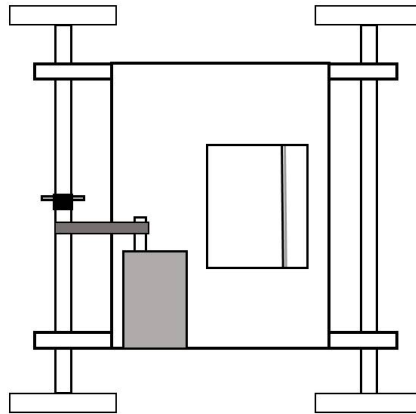
Koncept E är ett fordon för två passagerare illustrerat i Figur 6.5. Fordonet är utrustat med två linjärmotorer som båda hålls på plats precis ovan rälsen med metallfästen. För att åstadkomma denna konstruktion måste chassit, som är stelt och gjort av stålbalkar, expanderas i sidled mellan hjulparen. Eftersom linjärmotorn drivs med växelspanning måste en växelriktare installeras men en mekanisk transmission behövs inte. Säten är i form av trästolar med avsågade ben, och mekanisk inbromsning sker med skivbroms på främre hjulaxeln. Som skydd för passagerare finns ett plåtgolv.



Figur 6.5: Illustration av koncept E. Konceptet består av säten för två personer, ett stelt chassi, linjärsmotor, skivbroms och golv som skydd.

6.2.6 Koncept F

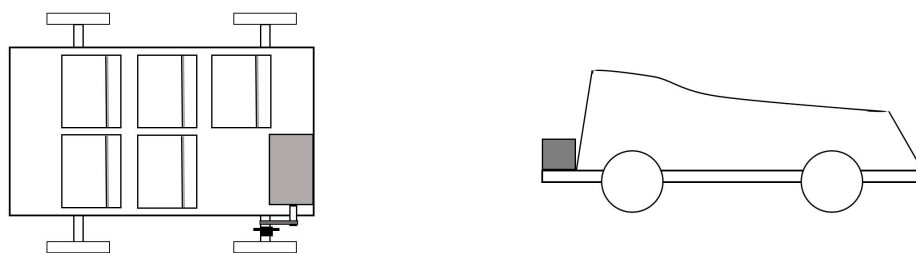
Koncept F lägger fokus på att minska fordonets vikt så mycket som möjligt och illustreras i Figur 6.6. Fordonet är designat för endast en passagerare och chassits storlek kan därför göras mycket mindre vilket också minskar vikten. Energiåtgången minskar på detta sätt, vilket kan vara till fördel. Chassit är stelt och gjort av stål-balkar. En likströmsmotor används tillsammans med en kedjeväxel för att motorn ska nå till den främre axeln. I detta koncept används skivbroms på den främre axel och trästolar. Golvet är av plywood och chassit är i form av stål-balkar.



Figur 6.6: Illustration av koncept F. Konceptet består av ett säte för en person, ett stelt chassi, likströmsmotor, kedjeväxel, skivbroms och golv som skydd.

6.2.7 Koncept G

Koncept G, som finns illustrerat i Figur 6.7, drivs av en likströmsmotor som sitter baktill tillsammans med de andra elektriska komponenterna i en metalllåda som skydd för väta. Axeln drivs med hjälp av en kugghjulsväxel som kopplas mellan motor och bakre axel. Fordonet kan bromsas medelst en skivbroms på bakre axeln. Fordonet har en kaross gjord av plywood och sittplatser för fem personer bestående av bänkar gjorda av träskivor som klätts med tyg. Karossen är fäst på ett stelt chassi gjort av stål-balkar. Som golv har en metallplatta fästs på chassit och hindrar kläder och kroppsdelar från att fastna i rörliga delar. Avståndet mellan två hjul kan justeras eftersom hjulen sitter på var sitt rör, som sitter fästa i ett rör med större diameter.



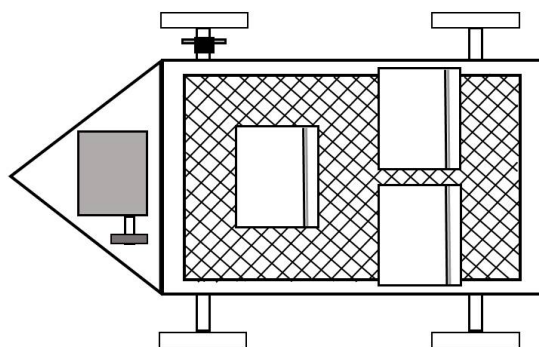
(a) Koncept G sett uppifrån

(b) Koncept G i profil

Figur 6.7: Illustration av koncept G. Konceptet består av säten för fem personer, ett stelt chassi, kaross, likströmsmotor, kugghjulsväxel, skivbroms och golv som skydd. Hjulavståndet på en axel är justerbart.

6.2.8 Koncept H

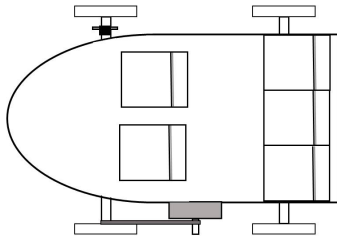
Koncept H har ett stelt chassi gjort av stålbalkar och det finns plats för tre passagerare, vilket illustreras i Figur 6.9. Längst fram återfinns en triangel fastlänkad för att få minskat luftmotstånd. Detta koncept är framhjulsdrivet och likströmsmotor, mätenhet, batteri och kedjeväxel är placerade längst fram i det tomrum som skapas i den främre triangel. Fordonet kan bromsas medelst en skivbroms på främre axeln och för att skydda passagerare från klämrisk finns skydd framför hjulen. För att ingen av passagerarna ska snudda marken med fötterna har ett nätgolv fästs i chassit.



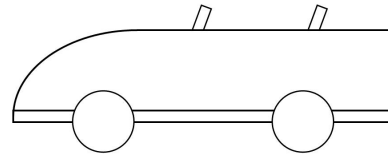
Figur 6.8: Illustration av koncept H. Konceptet består av säten för tre personer, likströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln, stelt chassi, nätgolv som skydd och skivbroms. I främre delen av fordonet finns en triangelformad del.

6.2.9 Koncept I

Koncept I är framtaget i syfte att vara strömlinjeformat, med formen lik en vanlig bil men utan tak, och på så sätt minska luftmotståndet. Det kommer vara sittplatser för fem personer, där tre sitter bak och två fram, och kan ses i Figur 6.9. Chassit kommer vara helt stelt och gjort av stålbalkar, och tak, väggar och golv hos fordonet kommer vara tillverkade i plywood, eller någon typ av plast om möjligt. Batteriet samt motorn, som är en likströmsmotor, kommer vara placerade längst bak tillsammans med mätenheten och övriga elektriska komponenter. Fordonet kommer därmed vara bakhjulsdrivet med en kedjeväxel mellan motorn och det bakre hjulparet. Det kommer även finnas en skivbroms på något av hjulen i det främre hjulparet.



(a) Koncept I sett uppifrån

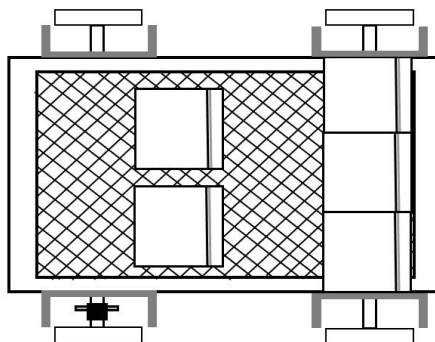


(b) Koncept I sett i profil

Figur 6.9: Illustration av koncept I. Konceptet består av säten för fem personer, likströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln, stelt chassi, golv och skivbroms. En kaross är monterad i syfte att göra fordonet mer strömlinjeformat.

6.2.10 Koncept J

Koncept J är framtaget för att ha så låg vikt som möjligt och finns illustrerad i Figur 6.10. Golvet består av nät och syftar till att passagerarna inte ska kunna beröra marken när de färdas på fordonet. Det kommer vara sittplatser för fem personer, där tre sitter bak och två fram. Batteriet som driver motorn, som är en likströmsmotor, kommer vara placerad framtill i fordonet bredvid sätet för två personer tillsammans med motorn, mätenheten samt övriga elektriska komponenter. Fordonet kommer vara framhjulsdrivet med en kedjeväxel mellan motorn och det främre hjulparet. Det kommer även finnas en skivbroms som bromsar på den främre hjulaxeln. För detta koncept kommer det vara någon typ av skydd över hjulen så passagerarna inte kan skada sig. Hjulens position ska även kunna justeras på axlarna för att optimera hjulavståndet. Chassit är stelt och består av sammanfogade stålbalkar.



Figur 6.10: Illustration av koncept J. Konceptet består av säten för fem personer, likströmsmotor, kedjeväxel mot drivande axeln, stelt chassi, ställbara hjul, nätgolv, och skivbroms. Framför hjulen finns klämskydd och avståndet mellan hjulen går att justera.

6.2.11 Uppskattning av konceptens mått, vikt och energiförbrukning

Tidigt uppskattade och ungefärliga mått tillsammans med varje koncepts rörprofil kan observeras i Tabell 6.2, där måtten är framtagna genom beräkning av personerna i projektgruppens personliga mått, och en grov uppskattning av viktskillnaden och energiförbrukningen mellan de olika koncepten presenteras Tabell 6.3. Energiförbrukningen beräknades genom att använda simuleringsmodellen i Avsnitt 5. Dessa uppskattningar utfördes för att få en grov överblick över hur de olika koncepten jämförs med varandra i dessa två avseenden. I Tabell 6.3 kan massan för de olika konceptens rörprofil, golv, säten och den totala massan avläsas samt hur många personer som fordonet är designat för och den uppskattade energiförbrukningen för de olika koncepten.

Tabell 6.2: Konceptens grovt uppskattade mått och konceptens rörprofil. Måtten utgår från personerna i projektgruppens personliga mått.

Koncept	Längd [mm]	Bredd [mm]	Rörprofil [mm]
A	2100	1400	40×40×3
B	2100	1400	60×30×3
C	2100	1400	40×40×3
D	2500	700	40×40×3
E	2500	700	40×40×3
F	1100	1000	40×40×3
G	2000	1300	40×40×3
H	1900	1100	40×40×3
I	2100	1300	60×30×3
J	2100	1300	60×30×3

För beräkning av massan i Tabell 6.3 hos de olika konceptens ramar användes antingen fyrkantströr med mått på 40×40×3 mm med massa 3.76 kg/m [11] eller 60×30×3 mm med massa 4.13kg/m [11]. Dessa rörprofiler valdes på grund av att ett alternativ med kvadratisk tvärsnitt och ett med rektangulärt tvärsnitt kunde vara önskvärda. När val av rör var gjort beräknades längd och bredd av de olika koncepten, se Tabell 6.2, samt hur många rör som skulle behövas sättas emellan ramen för att stabilisera fordonet. I den totala vikten på samtliga koncept är axelvikt och hjulvikt adderad då dessa är samma för alla koncept. Till detta användes en hjulaxel med en diameter på 25 mm, som är en slipad rundstång med massan 3.88 kg/m [11]. En passagerare antas väga 75 kg och även detta är gemensamt för samtliga koncept. Vid beräkning av golvmassan av de olika koncepten användes respektive ytprofil, storleken av chassit, samt val av material. För koncept med golv i plywood användes en tjocklek på 12 mm som hade en massa på 5.8 kg/m² [12]. För koncept med golv i aluminium användes en tjocklek på 3 mm som hade en massa på 8.1 kg/m². Detta värde beräknades utifrån densiteten på Aluminium. Vid användande av nätgolv i koncepten uppskattades denna vikt till nästintill försumbar, och estimerades till 0.5 kg.

För beräkning av massan hos säten för de olika koncepten togs först antalet säten i beaktning, samt storleken av dessa. Utifrån detta valdes material, och massan beräknades. Material för säten kunde bestå utav plywood, med eller utan tyg som stoppas, eller färdiga stolssäten. I de fall som stoppning användes beräknades vikten vara försumbar. Den totala massan för de olika koncepten beräknades genom att massan hos rörprofilen, golvet, säten samt hjulaxlarna adderades. Den totala massan var intressant i det avseende att en låg vikt på fordonet var något som föredrogs av gruppen. Mer förklaring om detta kan finnas i avsnitt 6.5.

I Tabell 6.3 kan det tydligt ses att antalet personer påverkar den totala energiförbrukningen. Fler personer leder till minskad energiförbrukning i enheten Wh/pkm, se koncept B och koncept F, där koncept B hade 5 passagerare och genererade en låg energiförbrukning. Koncept F hade endast 1 passagerare och fick en 3 gånger så hög energiförbrukning. Detta borde berott på att motorn ej drar dubbelt så hög ström per passagerare man adderar. Även tomgångsströmmen är statisk och kommer ej

Tabell 6.3: I denna tabell är axelvikt och hjulvikt inräknat i totala massan, då dessa är samma för alla koncept. Samt är antal passagerare för varje fordon angivet, vikten för en person uppskattas till 75 kg och är inräknat i totala massan.

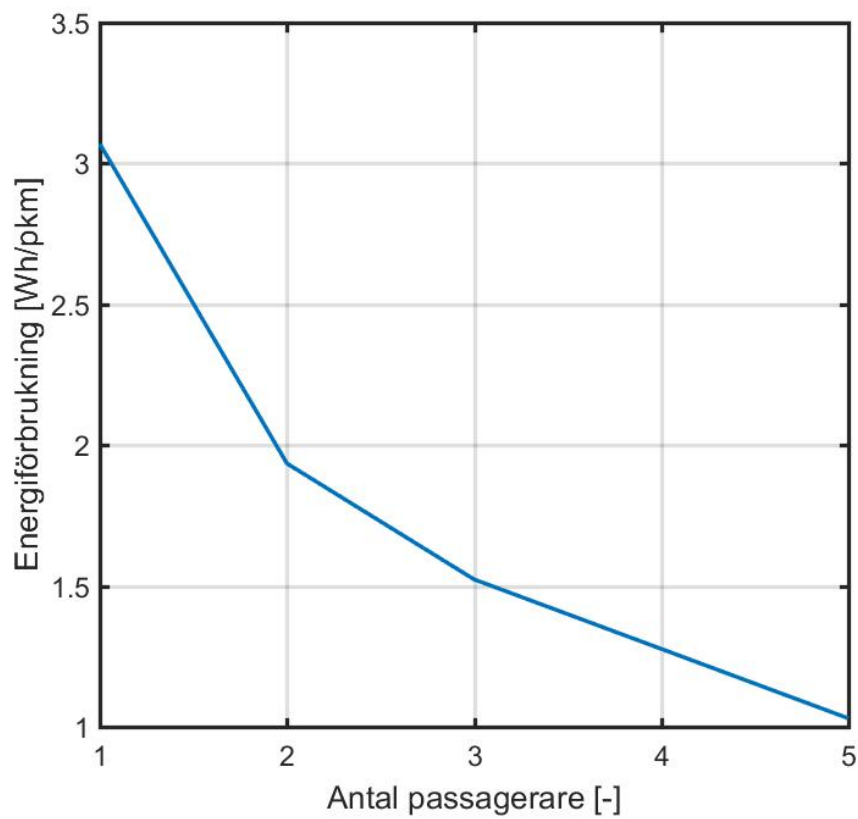
Koncept	Passagerare	Rörprofil [kg]	Golv [kg]	Säten [kg]	Total [kg]	Energiförb. [Wh/pkm]
A	3	44,60	17,37	5,57	332,96	1,44
B	5	45,02	22,32	9,28	492,03	1,03
C	3	40,60	23,81	5,57	335,41	1,45
D	2	30,46	14,18	3,71	238,76	1,93
E	2	33,46	14,18	3,71	241,77	1,94
F	1	25,57	8,91	1,86	142,84	3,07
G	5	35,32	0,50	6,97	503,25	1,05
H	3	35,32	16,64	3,48	465,26	1,68
I	5	40,06	18,71	9,28	491,75	1,04
J	5	40,06	0,50	9,28	454,72	1,00

bero på antalet passagerare, alltså blir energiförbrukningen lägre då fler passagerare adderas. Denna iakttagelse har sammanställts i Figur 6.11, där antalet passagerare jämförs med energiförbrukningen som presenteras i Tabell 6.3. Från Figur 6.11 iaktas att ökat antal passagerare medför minskad energiförbrukning per person.

6.3 Elimineringssmatris

Elimineringssmatrisen i sin helhet kan finnas i Tabell 6.3, och förklaras i Avsnitt 4.3. Den består främst utav punkter som kan finnas i kravspecifikationen i Avsnitt 6.1. Utöver dessa finns punkten *Flänsar*, då det bedömdes utav gruppen att flänsar på hjulen var en egenskap som var nödvändig för att undvika urspårning, och på så vis kunna erhålla ett personsäkert fordon.

Efter de olika koncepten gått igenom elimineringssmatrisen resulterade det i att koncept B och E ej uppfyllde elimineringssmatrisen krav, och därmed ej gick vidare till nästa matrisgenomgång, pughmatrisen. Koncept B uppfyllde ej kraven då samtliga passagerare färdades i sidled och därför var risken att passagerare skulle kunna skada sig högre. Koncept E gick ej vidare då oron att fordonet ej färdas stabilt på grund av komplexitetens att implementera en linjärmotor. Eftersom elimineringssmatrisens uppgift är att utesluta de koncept som ej uppfyller ställda krav valdes det att ej modifiera de uteslutna koncepten.



Figur 6.11: Energiförbrukning i [Wh/pkm] med avseende på antalet passagerare som färdas på fordonet. Det framgår att ett ökat antal personer resulterar i en lägre energiförbrukning.

Tabell 6.4: Elimineringssmatris där alla koncept är redovisade. De krav som är listade är de krav som tävlingen själva ställt, dessa återfinns i kravspecifikationen. samt 'Flänsar' som också kan återfinnas i kravspecifikationen, då gruppen ansåg att dessa var nödvändiga för att förhindra urspårning. Elimineringssmatrisen redovisar vilka koncept som uppfyllde kraven eller ej.

Kriterium	Koncept A	Koncept B	Koncept C	Koncept D	Koncept E	Koncept F	Koncept G	Koncept H	Koncept I	Koncept J
Förflyttning av sittande passagerare på via räls	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Manuell inbromsning	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Kunna hålla en genomsnittshastighet på 10-15 km/h över tävlingsträckan	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Fordonet ska drivas uteslutande av elenergi	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Spänningskäll måste ha spänningen 6-48V	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Maximal momentan strömförbrukning på 20A	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Kunna köra hela tävlingssträckan på 3,36 km	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Det måste finnas plats för 1-6 personer	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Kunna köra genom växel, vägövergångar, kurvor samt upp- och nedförsbacke	JA	JA	JA	JA	~	JA	JA	JA	JA	JA
Gå att köra på räls med nominell spårvidd 1435mm och variationer	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Inom tillåtna ramar för rälsbundna fordon*	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Totala kostnaden för material och tillverkning får ej överstiga 20 000 kr	JA	JA	JA	JA	~	JA	JA	JA	JA	JA
Säte för varje passagerare där större delen av tyngden är fördelad på rumpan	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Ryggstöd för säte måste ha lutning mellan 60-90 grader, rel. horisontalplanet	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Ryggstödet minimala höjd, 35 cm	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Bedömas vara säkert så att inga personskador sker vid kraftig inbromsning, haveri eller urspårning	JA	NEJ	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Golv eller nät som förhindrar fötter och armar från att fastna mot mark eller slipers	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Skydd mot klämrisk av t.ex. fingrar i hjul och ekrar	JA	NEJ	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Flänsar	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Plats för montering av kopplingsbox mellan batteri och drivsystem med dim. 40x30x20 cm	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Kopplingsbox har lock som måste kunna öppnas	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Uppfyller kraven:	Godkänd	Underkänd	Godkänd	Godkänd	Underkänd	Godkänd	Godkänd	Godkänd	Godkänd	Godkänd

6.4 Pugh-matris

De olika koncepten gick igenom pugh-matrisen, beskriven i Avsnitt 4.3 två gånger, och dessa matriser i sin helhet finns i Tabell 6.5 och i Tabell 6.4. Pugh-matrisen består främst utav punkter gruppen själva såg som önskvärda. Ett antal huvudkriterier ansattes och dessa blev:

- Konstruktionens egenskaper, tillverkning
- Användning
- Funktioner
- Säkerhet
- Kostnad

Ett fordon med låg *Vikt* ansågs vara till fördel mot ett fordon med hög vikt eftersom det krävs mindre kraft för att driva ett lågviktigt fordon, samt att fordonet ska kunna förflyttas utav projektgruppen utan några större problem. Ett fordon med liten *Storlek* sågs också som en fördel, då fordonet skulle kunna förflyttas och förvaras, och möjligheterna för förvaring av detta fordon var begränsade.

Utseendet på fordonet sågs ej som en viktig egenskap, men i mån av tid och möjlighet ändå en önskvärd punkt eftersom gruppen ska representera Chalmers Tekniska Högskola vid deltagande i tävlingen. Eftersom gruppmedlemmarnas erfarenhet av liknande uppgifter är begränsad, samt tiden för tillverkning av detta fordon sågs punkterna *Enkel att tillverka* samt *Tid för tillverkning* som viktiga, för att kunna åstadkomma ett fungerande fordon inom den givna tidsramen. Ur samma synpunkt kom punkten *Antal standardkomponenter*. För att kunna konstruera ett fordon med minimal energiförbrukning sågs *Luftmotstånd*, *uppskattad* som en viktig egenskap, då mindre luftmotstånd skulle medföra ett effektivare fordon.

Eftersom detta är tänkt att vara en första iteration av ett årligt återkommande projekt sågs det som önskvärt att delar av det slutgiltiga fordonet ska kunna återanvändas av nästkommande grupp studenter, och därav kom punkten *Potential för återanvändning*. *Uppskattad energiförbrukning* upplevdes som en viktig punkt i det avseende att det är energiförbrukningen som avgör vilket lag som går vinnande ur tävlingen.

På grund av gruppens bristfälliga erfarenhet av liknande projekt ansågs det viktigt att fordonet skulle vara *Användarvänligt*. Broms på fordonet är med i specifikationerna, vilket var anledningen bakom punkten *Inbromsning*. *Justerbarhet* sågs ej som en punkt av stor betydelse, men absolut en egenskap som kunde fara en fördel ifall vissa komponenter ej monterats rätt. Även för punkten *Tekniska osäkerheter* sågs det till en fördel med ett fordon med minimala osäkerheter för underlättat arbete. *Materialkostnader* och *Tillverkningskostnader* ansågs av betydelse eftersom en budget hade satts i början av arbetet, och det var en begränsad summa pengar som fanns att tillgå.

I första genomgången av Pugh-matrisen användes koncept A som referens, och de andra koncepten jämfördes med detta. Ifall jämförda koncept ansågs ha likvärdig egenskap ansattes 0. Vid bättre egenskap ansattes + och vid sämre ansattes -. Till exempel fick koncept B - på kriteriet *Vikt* då det ansågs vara tyngre och lättare fordon var att föredra. Inför Tabell 6.5 hade koncept B och koncept E eliminerats bort i elimineringsmatrisen. Vinnande koncept ur denna tabell blev koncept F. I

andra omgången av Pugh-matrisen i Tabell 6.4 användes koncept F som referens och ingen modifiering av resterande koncept utfördes, detta för att se ifall samma koncept blev vinnande ur båda genomgångarna av Pugh-matriserna. Koncept F blev vinnande ur båda genomgångarna, men på övriga placeringar differentierade det något mellan de olika koncepten de olika genomgångarna av matrisen.

Tabell 6.5: Första iterationen av genomgången av de kvarstående koncepten i Pugh-matrisen. I denna används Koncept A som referens, och alla andra koncept jämförs med detta. Detta är representerat genom att ett ”+” betyder att konceptet i fråga är bättre än referensen, och ett ”-” betyder att det är sämre än referensen. Sedan summeras alla ”+” och alla ”-” och differensen av detta redovisas i ”Nettovärde”. Utifrån detta värde rangordnas koncepten.

Kriterium		Koncept A	Koncept C	Koncept D	Koncept F	Koncept G	Koncept H	Koncept I	Koncept J
Konstruktionens egenskaper, tillverkning	Vikt	0	-	+	+	0	+	-	+
	Storlek	0	0	+	+	-	+	-	0
	Utseende	0	-	-	-	+	-	+	0
	Enkel att tillverka	0	+	-	+	0	+	-	-
	Tid för tillverkning	0	+	-	+	-	+	-	0
	Antal standardkomponenter	0	+	-	+	-	+	0	0
	Luftmotstånd, uppskattad	0	-	0	+	-	0	-	-
	Potential för återanvändning	0	0	0	-	+	0	0	+
Användning	Uppskattad energiförbrukning	0	-	+	-	0	0	+	+
	Användarvänlig	0	0	-	0	0	0	0	0
Funktioner	Inbromsning	0	0	-	+	-	0	-	-
	Justerbarhet	0	+	0	0	0	0	0	0
Säkerhet	Tekniska osäkerheter	0	0	-	+	+	0	0	0
	Stabilitet mot urspårning	0	+	+	0	0	0	0	0
	Skaderisk	0	0	-	0	+	0	+	0
Kostnad	Materialkostnader	0	+	-	+	-	+	-	+
	Tillverkningskostnader	0	0	-	0	0	0	0	0
$\Sigma+$		0	6	4	9	4	6	3	4
$\Sigma-$		0	4	10	3	7	1	7	3
Nettovärde		0	2	-6	6	-3	5	-4	1
Rangordning		4	3	7	1	5	2	6	3

Tabell 6.6: Andra iterationen av genomgången av de kvarstående koncepten i Pugh-matrisen. I denna används Koncept F som referens, och alla andra koncept jämförs med detta. I denna matris jämfördes det ifall koncepten blivit rangordnade i samma ordning som Pugh-matrisen innan utifrån "Nettovärdet", samt vilka koncept som var värda att vidareutveckla, som representeras i raden "Vidareutveckling".

Kriterium		Koncept A	Koncept C	Koncept D	Koncept F	Koncept G	Koncept H	Koncept I	Koncept J
Konstruktionens egenskaper, tillverkning	Vikt	-	-	-	0	-	-	-	-
	Storlek	-	-	-	0	-	-	-	-
	Utseende	+	+	+	0	+	0	+	+
	Enkel att tillverka	-	0	-	0	-	-	-	-
	Tid för tillverkning	-	-	-	0	-	-	-	-
	Antal standardkomponenter	-	0	-	0	-	-	-	0
	Luftmotstånd, uppskattad	-	-	0	0	-	-	-	-
	Potential för återanvändning	+	+	0	0	+	+	+	+
Användning	Uppskattad energiförbrukning	+	+	+	0	+	+	+	+
	Användarvänlig	0	0	-	0	-	0	0	0
Funktioner	Inbromsning	-	-	-	0	-	-	-	-
	Justerbarhet	0	+	0	0	0	0	0	0
Säkerhet	Tekniska osäkerheter	-	+	-	0	0	0	0	0
	Stabilitet mot urspårning	0	0	+	0	0	0	0	0
	Skaderisk	0	0	-	0	+	0	+	0
Kostnad	Materialkostnader	-	-	-	0	-	-	-	0
	Tillverkningskostnader	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma+$		3	5	3	0	4	2	4	3
$\Sigma-$		9	6	10	0	9	8	8	6
Nettovärde		-6	-1	-7	0	-5	-6	-4	-3
Rangordning		6	2	7	1	5	6	4	3
Vidareutveckling		NEJ	JA	NEJ	JA	NEJ	JA	NEJ	JA

6.5 Kesselringmatris

I Kesselringmatrisen, förklarad i Avsnitt 4.3, valdes det att endast gå vidare med ett antal av koncepten, de fyra koncept med bäst placering totalt i de två omgångarna utav Pugh-matriserna. Kesselringmatrisen i sin helhet kan ses i Tabell 6.5. Här skapades olika kriterium utifrån gruppens egna åsikter och tankar, grundade i syftet och kraven med projektet samt punkter från Pugh-matrisen, som sedan viktades.

Den punkt som ansågs som viktigast, och därför hade en viktning 5 är *Tid för tillverkning*, eftersom ifall fordonet ej hade hunnits konstruerats i tid så skulle deltagande i tävlingen ej vara möjligt, samt ej ge gruppen ett fullständigt resultat. De punkter som blev viktade med 4 är *Enkel att tillverka*, *Energieffektiv*, *Vikt* och *Justerbarhet* eftersom dessa sågs som avgörande för fordonets resulterande funktion.

Punkter som ansågs nödvändiga och hade en viktning 3 är *Luftmotstånd* *Kostnader*, då dessa var punkter som ansågs viktiga att ta i beaktning, men ej avgörande. *Användarvänlig* viktades 2 då denna punkt ansågs vara önskvärd, och *Utseende* viktades 1 eftersom fordonets utseende endast ansågs som en punkt som endast kunde tas i beaktning i mån av tid, pengar, och ifall alla de andra punkter har uppfyllts.

Vinnande koncept ur denna matris blev koncept C, och detta koncept blev alltså utgångspunkten för design och konstruktion av fordonet.

Tabell 6.7: Kesselringmatris där de resterande koncepten är redovisade. I denna matris har ett antal kriterium viktats enligt gruppmedlemmarnas egna åsikter, där "v" är viktat värde som representerar hur väl det specifika konceptet uppfyller det kriteriet, och 't' är 'v' multiplicerat med viktningen av kriteriet. De värden som är grönmärkerade är utmärkande för det specifika konceptet.

Kriterium	Viktning	Ideal		Koncept C		Koncept F		Koncept H		Koncept J	
		v	t	v	t	v	t	v	t	v	t
Enkel att tillverka	4	5	20	4	16	4	16	3	12	4	16
Tid för tillverkning	5	5	25	4	20	5	25	3	15	4	20
Energieffektiv	4	5	20	4	16	1	4	4	16	5	20
Utseende	1	5	5	3	3	3	3	4	4	4	4
Användarvänlig	2	5	10	5	10	4	8	2	4	3	6
Vikt	4	5	20	3	12	5	20	4	16	4	16
Luftmotstånd	3	5	15	3	9	4	12	3	9	2	6
Justerbarhet	4	5	20	4	16	2	8	1	4	1	4
Kostnader	3	5	15	4	12	5	15	4	12	4	12
Totalt			150		114		111		92		104
T/T,Ideal (%)			1		0,76		0,74		0,61		0,69
Rangordning			-		1		2		4		3

7

Design och konstruktion

Efter att ett koncept hade valts behövdes det vidareutvecklas eftersom beskrivningen av konceptet inte var tillräckligt detaljerad för att ligga till grund för ett färdigställt fordon. I dessa avsnitt förklaras processen hur vidareutveckling av konceptet gick till, se Avsnitt 7.1, och i slutet av den processen tillverkades det slutliga fordonet, se Avsnitt 7.2.

7.1 Vidareutveckling av koncept

Vidareutvecklingen från koncept till fordon behöver gå igenom ett antal steg för att slutligen kunna resultera i ett färdigställt fordon. Dessa steg kan delas in i 7.1.1 Konsultation, 7.1.2 3D-modellering i dator (CAD), 7.1.3 Belastningsresultat och slutligen tillverkning. Mer om fordonet, dess komponenter och hur det konstruerades kan finnas i Avsnitt 7.2. Dessa delar syftar till att skapa en mer detaljerad beskrivning av konceptet, uppskatta hållfastheten, förbereda för tillverkning och tillverka fordonet. Dessa delar sker ej i kronologisk ordning utan förlöper snarare parallellt, eftersom de är beroende av varandra.

7.1.1 Konsultation

Konsultation skedde med Jan Bragee och Reine Nohlborg, två forskningsingenjörer från Teknisk mekanik/Teknisk support vid Chalmers Tekniska Högskola. Jan och Reine är ansvariga för prototypverkstaden där fordonet tillverkades. Genom denna kontakt erhöles information om vad som är möjligt att tillverka på egen hand, uppskatta tidsåtgången av byggprocessen och var vissa material kunde införskaffas. Dessutom kunde de hjälpa till med att göra rimliga uppskattningar på hur det färdiga fordonet skulle klara de förväntade belastningarna. Det behövdes dock ytterligare uppskattningar från beräkningar för att försäkra att viktiga komponenter inte belastas för mycket, se Avsnitt 7.1.3.

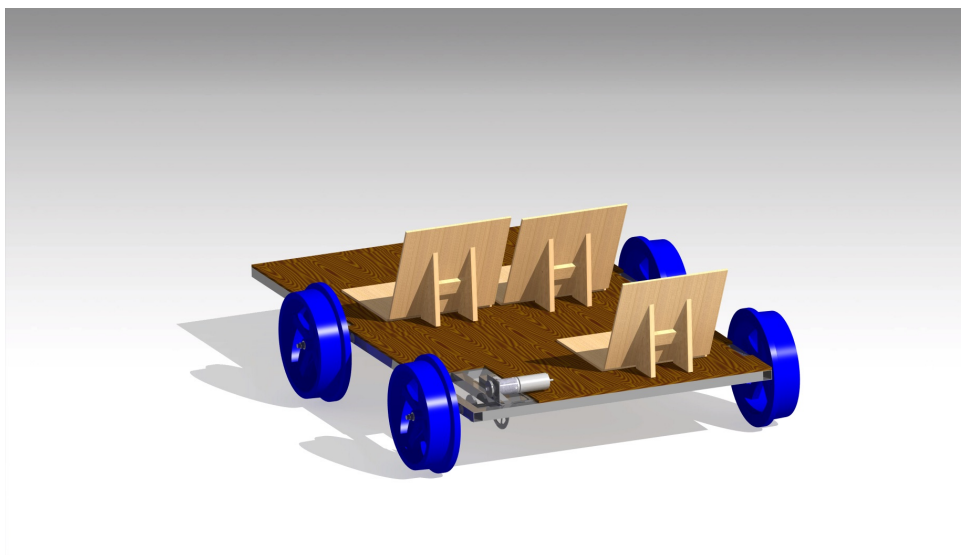
7.1.2 3D-modellering, CAD

En viktig del i processen att gå från koncept till fordon var att skapa en virtuell 3D-modell i datorn. Den huvudsakliga anledningen till varför det valdes att göra en 3D-modell var dock att det är ett enkelt sätt att visualisera hur det färdiga fordonet kommer att se ut. Det är ett verktyg för att sätta exakta mått på olika komponenter

så att de passar ihop och förenklar tillverkningsprocessen avsevärt eftersom ritningar på modellen kan skapas.

En annan avgörande aspekt var att det är lätt att ändra en virtuell 3D-modell i efterhand, jämfört med en verklig modell, och detta är något som ofta utnyttjats. Det är alltså möjligt att skapa en 3D-modell i datorn som är svår eller omöjlig att tillverka i verkligheten. Under vidareutvecklingsfasen har modellen ändrats många gånger i och med att material köpts in och efter att beräkningar gjorts på grund av vägledning genom konsultation.

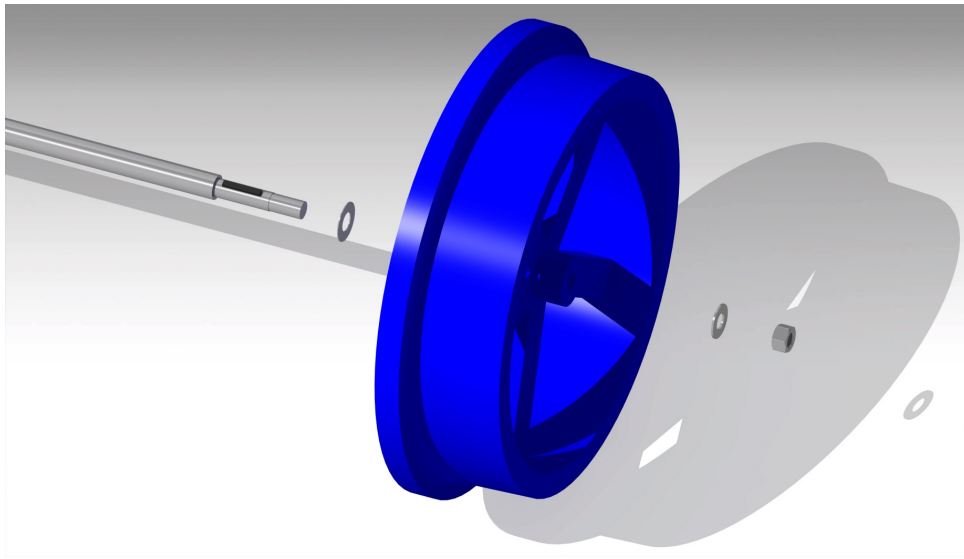
Den slutliga 3D-modellen av fordonet visas i Figur 7.1 och det var den som låg till grund för ritningar inför tillverkningen av fordonet. Figuren visar designen av fordonet, placering av säten, motor och hjul. En av de största utmaningarna i tillverkningen var att fästa hjulen. Figur 7.2 illustrerar hur det slutliga fästet för hjulen blev. Ändarna på hjulaxlarna svarvas ner och gängas längst ut, vilket skapade en ansatts som hjulen kunde ansättas mot. Detta medförde att hjulen kunde spännas fast med en mutter på den gängade delen av axeln. Figuren visar även en kil, den svarta delen på axeln, som passar in i hjulets kilspår. Denna möjliggör att hjulen roterar med axeln.



Figur 7.1: Virtuell 3D-modell av fordonet där placering av säten, motor och hjul visas.

7.1.3 Belastningsresultat

För att få en uppskattning av hur hjulaxeln belastas beroende på var lagren placerades, samt beroende på hjulaxelns diameter utfördes belastningsberäkningar. Dessa visas i Figur 7.3a och i Figur 7.3b. I Figur 7.3a framgår att utböjningen på axeln mellan två hjul minskar i ändarna mellan två lager då avståndet mellan de yttre lagrena går mot rälsens spårvidd, alltså där hjulen sitter, och är uträknat enligt hjulaxeln, tidigare nämnd i Avsnitt 6.2.11. Uträkningarna till figuren är gjorda för en axel med diameter 25 mm och elasticitetsmodul 206 GPa. När avståndet minskar, minskar även momentet och hävarmen. Detta gäller både för fallet med två och tre



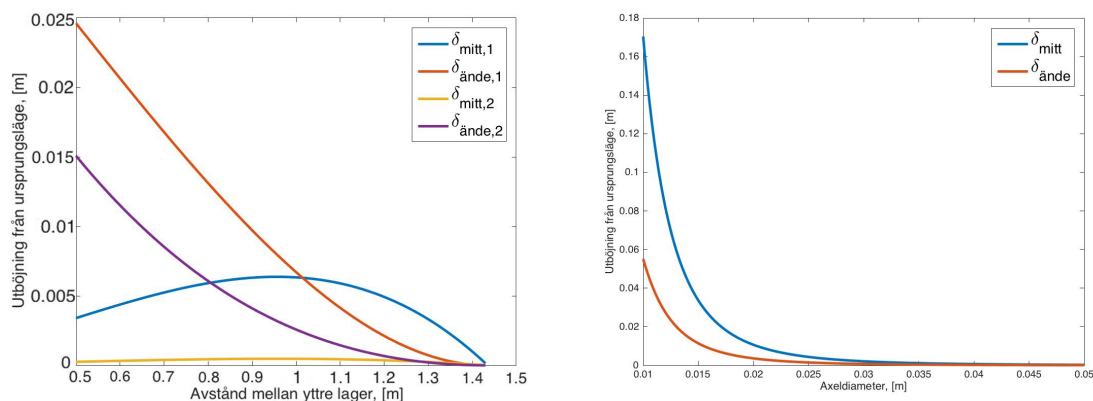
Figur 7.2: Explosionsvy som illustrerar hur hjulen är fästa på axeln. Från höger: Mutter, bricka, hjul, bricka och axel. Hjulet spänns fast mot ansatsen på axeln med hjälp av muttern och gängningen längst ut på axeln. Gängningen är dock ej synlig i figuren. Den svarta delen på axeln är en kil som passar in i hjulets kilspår och tvingar hjulet och axeln att rotera samtidigt.

lager på en axel. Detta påvisar att det finns en fördel med att sätta de yttre lagrena långt ut på axeln, för att på så sätt minska utböjningen. För att hålla nere rullningsmotstånd från lagrena valdes två istället för tre lager och chassit gjordes brett för att minska utböjningen. Figur 7.3b visar att utböjningen för en axel med två lager går mot noll då axelns diameter ökar, och är beräknat för ett lageravstånd på 1240 mm samt vikt enligt Avsnitt 6.2.11. Utböjningen minskar snabbt för små diametrar men planar sedan ut, ungefär efter en diameter på 30 mm. För fordonet valdes dock diametern 25 mm för att spara vikt och för att utböjningen ansågs tillräckligt liten. Den slutliga utböjningen för en axel på 25 mm och två lager med avståndet 1240 mm uppgick till 4.4 mm i mitten av axeln och 1.5 mm i ändarna.

7.2 Slutgiltig fordonskonstruktion

I slutet av vidareutvecklingsfasen av konceptet var fordonet konstruerat, vilket redovisas i detta avsnitt. Figur 7.4 är en bild på hela fordonet, utan batterier och motorstyrenhet. Det är dock inte det färdiga. Det som fattas är klämskydd för hjulen, vilka är tänkta att monteras fast på sidan av chassit vid vardera hjul. Dessa monteras precis innan tävlingen eftersom de lätt kan ta skada vid transport.

En central del av drivlinan till fordonet är batterier, mätenhet och motorstyrenhet. Placeringen för dessa visas i Figur 7.5. Batteriet är kopplat till mätenheten, som i sin tur är kopplad till motorstyrenheten. Motorstyrenheten är kopplad till motorn, som sitter fast i planetväxeln som i sin tur sitter fast i chassit via det som kallas motorfäste, se Figur 7.6. Fäst i planetväxeln är också ett kugghjul med en kedja som går till ett annat kugghjul på hjulaxeln. På detta sätt överförs drivkraften



(a) Utböjningen som funktion av avståndet mellan de yttre lagrena. Diameter 25 mm och vikt enligt 6.2.11.

(b) Utböjningen som funktion av axelns diameter. Lageravstånd 1240 mm och vikt enligt 6.2.11.

Figur 7.3: Dessa två grafer visar utböjningen för axeln mellan två hjul. δ innebär utböjningen från axelns utgångsläge och indexen "mitt" och "ände" talar om ifall det är i änden av axeln eller den maximala utböjningen mellan två lager. Indexet "1" innebär att det finns två lager på en axel och "2" att det finns tre.

från motorn till hjulen. I Figur 7.6 visas även en bromsskiva, fäst på hjulaxeln, med tillhörande bromsok. Dessa utgör den manuella bromsen.

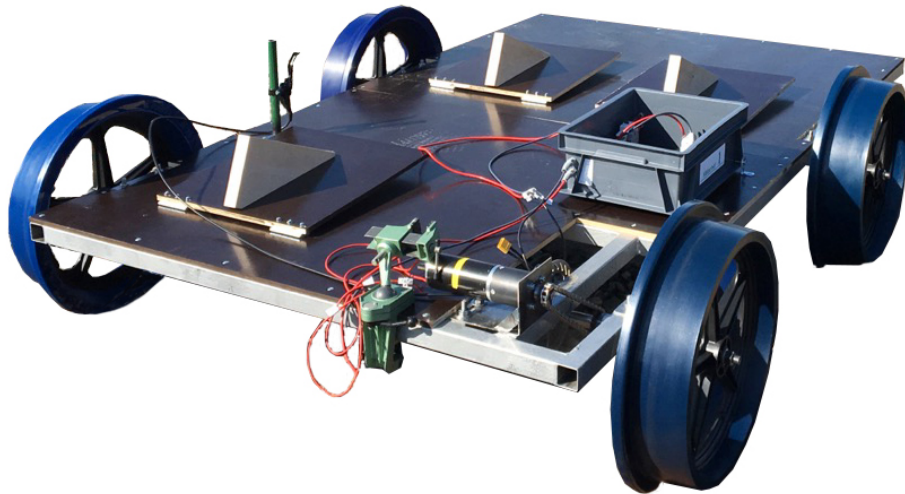
Det var avgörande för fordonet att hjulen var fästa på fordonet med hög precision. Den slutliga lösningen visas i Figur 7.7. Hjulen fästs på axelns nersvarvade ändar och spänns fast med hjälp av en mutter i änden mot en bricka och ansats på axeln. Den yttre hjulbrickan sitter mellan muttern och hjulet. Den inre hjulbrickan sitter mellan hjulet och ansatsen på axeln. Genom att ta bort eller lägga till fler brickor på insidan av hjulen kan avståndet mellan två hjul på en axel justeras. På axeln sitter också ett lager, som i sin tur är fäst i chassit.

7.3 Motivering av komponentval

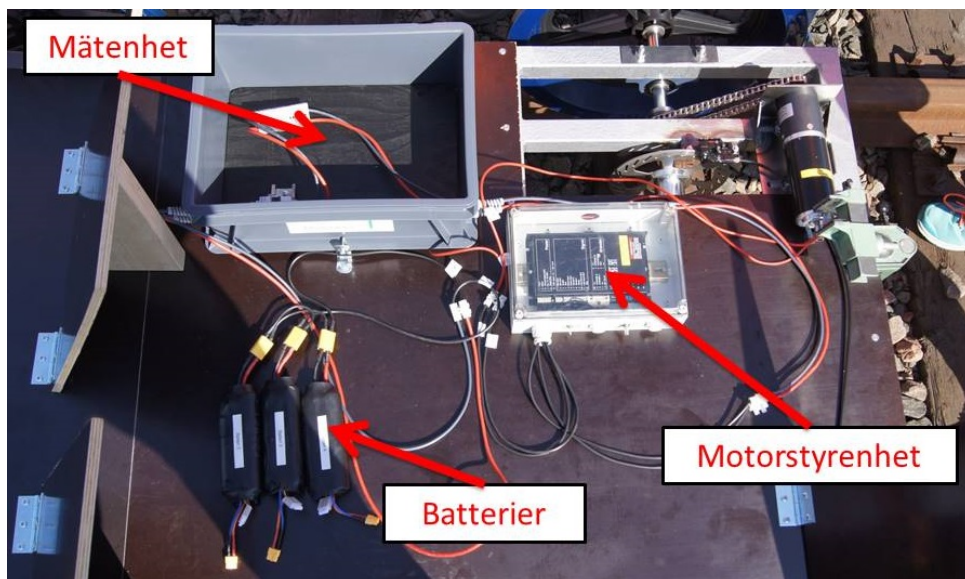
Fordonet ska kunna accelereras upp i en hastighet mellan 10-15km/h enligt kravspecifikationen, se Tabell 6.1. Fordonet accelereras genom att justera spänningen över motorn med hjälp av en potentiometer kopplad till motorstyrenheten, vilken kan ses i Figur 7.5. Till motornstyrenheten är även en brytare kopplad för att kunna bryta spänningen över motorn.

7.3.1 Broms

Det finns även krav på att fordonet måste ha en broms, vilket löstes genom att montera en bromsskiva på den bakre axeln. Denna bromsas av ett bromsok som är fäst på chassit, vilket illustreras i Figur 7.6. Bromsoket trycker mot bromskivan när personen som sitter baktill klämmer på ett bromshandtag, precis som på en cykel.



Figur 7.4: Fordonet sett bakifrån utan batterier, motorstyrenhet och klämskydd framför hjulen. Sätena är i sitt nedfällda läge.

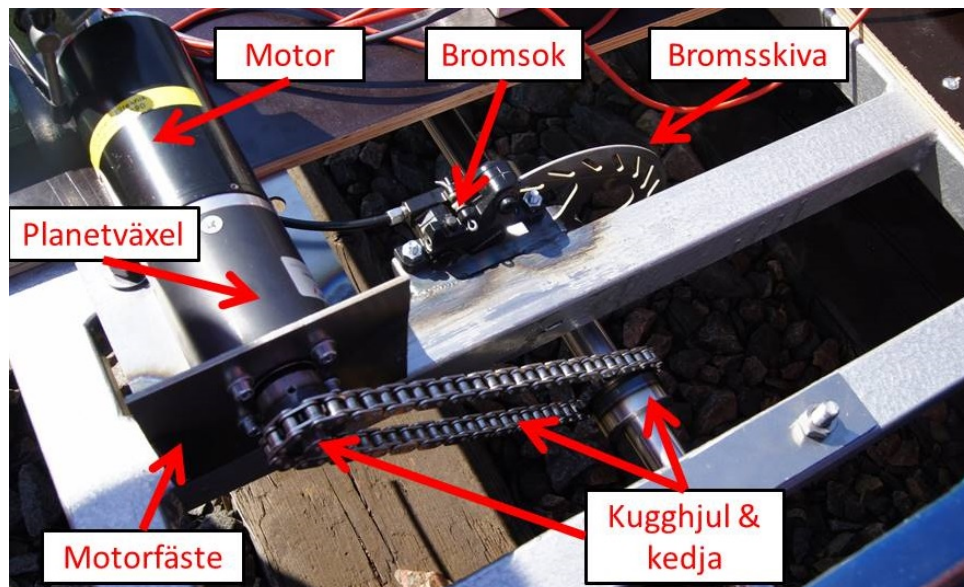


Figur 7.5: Mätenheten, batterierna och motorstyrenheten utplacerade på fordonet.

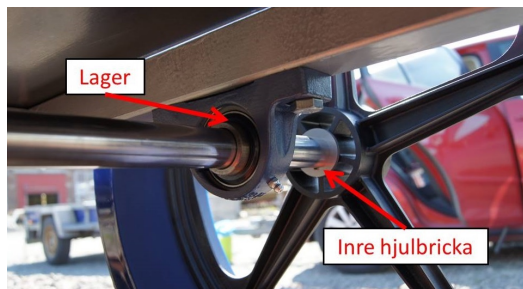
7.3.2 Hjul

En av de största utmaningarna i att konstruera fordonet var att skapa en lösning för hjulen. Hjulen är en viktig del av fordonet eftersom de direkt påverkar energiförluster och stabilitet vid körning på räls. Därmed var det stora krav på att hjulen skulle ha rätt hjulprofil, se Avsnitt 3.2, och även vara så lätta som möjligt. Efter undersökningar på utbud av hjul med de kraven valdes hjulen på Figur 7.4 och Figur 7.7, som är tillverkade i polyuretan, en sorts plast, och som har en diameter på 431.8 mm. Dessa importerades från USA och tillverkade för att användas på lättviktiga rälsgående fordon.

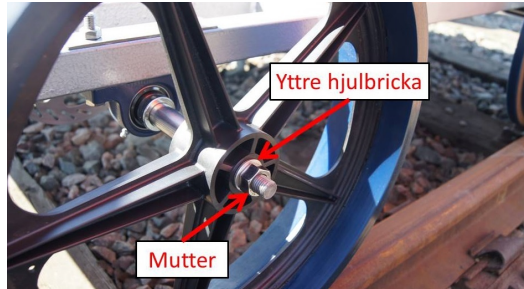
Att få hjulen i rätt position är kritiskt för att kunna åka på räls. Av den an-



Figur 7.6: Motorn är fäst i planetväxeln, som i sin tur är fastsatt i chassit med hjälp av motorfästet. På planetväxeln sitter ett kugghjul och en kedja som går till ett kugghjul på axeln som ska drivas. På axeln sitter även en bromsskiva monterad som kan bromsas via ett bromsok monterat på chassit.



(a) Hjulfäste, insida



(b) Hjulfäste, utsida

Figur 7.7: Figurerna visar hur hjulen sitter fast på axeln och även hur axeln sitter fast i chassit. Axeln går genom ett lager som i sin tur är fastsatt i chassit, vilket visas i a). I a) visas även den inre lagerbrickan, som är en viktig del i konstruktionen. Det kan antingen läggas till eller tas bort brickor på insidan av hjulet vilket leder till att avståndet mellan hjulen på en axel varierar, vilket möjliggör anpassning till räls som är ojämna. Från b) framgår att hjulet är fastsatt mot axeln med en mutter som fästs på axelns gängade ände.

ledningen har det möjliggjorts att ändra avståndet mellan hjulen. Detta har gjorts genom att ge möjligheten att lägga till eller ta bort brickor mellan hjulen och axeln. På det viset kunde avståndet mellan två hjul på en axel ändras, och det går att anpassa hjulavståndet till spårvidden på rälsen.

7.3.3 Lager

Lagrena som valdes har beteckningen SY 25 WF och är av typen kullager. Dessa valdes eftersom de skulle passa på den valda axeln och lagerhuset, fästet för lagret, gick enkelt att fästa vid chassit. Dessutom gick lagrena att skruva fast mot axeln för att förhindra att den rör sig i lagret. I lagrena sitter gummiringar som förhindrar att smuts tränger in och försämrar rullfriktionen.

7.3.4 Batteri

Eftersom mätningen av effekten under tävlingen sker efter batteriet är flera av dess egenskaper ej relevanta för valet av batteri. Batteriets verkningsgrad, det vill säga hur mycket effekt batteriet gör av med för att leverera ström, var till exempel av mindre intresse. Istället blev låg vikt och konstanta spänningsnivåer eftertraktade egenskaper. Cellerna som valdes för användning är ANR26650M1A och ett batteri bestod av 4 seriekopplade celler, som vardera har inre resistans på 14.6 mΩ en energikapacitet på 2.3 Ah (Amperetimmar) och nominell spänning på 3.3 V [13]. På fordonet användes 3 stycken batterier för att med säkerhet behålla den önskade hastigheten genom hela loppet. Den totala spänningen blir alltså 39.6 V. Den totala energin E_{tot} beräknas genom

$$E_{tot} = V_{tot} \cdot (I \cdot t) \quad (7.1)$$

där $(I \cdot t)$ uttrycks i Ah. Detta blir 91.1 Wh då $(I \cdot t)=2.3$ Ah. För att jämföra detta värde beräknas den simulerade totala energiförbrukningen

$$E_{simulerad} = L \cdot n \cdot x \quad (7.2)$$

där L är tävlingssträckan, n är antalet passagerare och x är den simulerade energiförbrukningen från Avsnitt 9.1. $x=1.40$ Wh/pkm och leder till att $E_{simulerad}$ beräknas till 14.1 Wh vilket är mycket lägre än vad de tre batterierna kan leverera.

7.3.5 Motorstyrenhet

Vid val av motorstyrenheten fanns en fyrkvadrantig (4-Q) och en enkvadrantig (1-Q) motorstyrenhet tillgänglig för förfogande från Chalmers Tekniska Högskola. Vid undersökning av dessa upptäcktes det att en enkvadrantig motorstyrenhet endast hanterar positiv ström och spänning, vilket medför att den ej kan återmata energi. Återmatning av energi var önskvärt för att kunna minska den totala energiförbrukningen. Av denna anledning användes den fyrkvadrantiga motorstyrenheten.

7.3.6 Hjulaxel

För att få en så lätt hjulaxel som möjligt utan att få för stor utböjning på valdes en 25 mm slipad rundstav i stål. Den diametern passade även mot den lösningen på hur hjulen skulle monteras på hjulaxeln. Då hjulen hade en hub på 19.05 mm med kilspår var ändarna på hjulaxlarna för fordonet tvungna att svarvas till två olika diametrar för att få hjulet att sitta fast. Den yttersta diametern svarvades samt

gängades till M16, vilket är ett standardmått för gängor. På detta kunde man fästa en mutter med bricka för att trycka mot navet på hjulet. Innanför gängorna svarvas axeln ner till 19.05 mm för hjulhubben, där frästes även ett kilspår ut för en kil. Kilen är till för att hålla hjulet på plats för att förhindra att hjulet roterar kring axeln.

7.3.7 Motor

En likströmsmotor från Maxon Motors fanns tillgänglig för förfogande från Chalmers Tekniska Högskola. Projektgruppen utförde flertalet mätningar på motorn för att säkerställa att motorn var lämplig för projektets syfte, se Avsnitt 8. Med en märkström på 9.32 A uppfyllde den kravet att inte överskrida 20 A ström [14].

7.4 Skillnader från koncept

Det slutliga fordonet har flera skillnader från det ursprungliga konceptet som valdes ut, se Avsnitt 6.2.3. Dessa uppkom i vidareutvecklingsfasen, beskriven i Avsnitt 7.1, som följd av ny kunskap som erhållits.

Från konceptbeskrivningen i Avsnitt 6.2.3 framgår att fordonet ska ha en kedjeväxel. Det framgick dock senare under utvecklingsprocessen att det skulle vara opraktiskt att implementera en kedjeväxel med endast två kugghjul på grund av den höga utväxlingen 1:20-1:25 som framtogs med hjuldiametern på 431.8 mm. Detta enligt metoden som beskrivs i Avsnitt 5.2, som beskriver relationen mellan transmission, energiförbrukning och hjuldiameter. För att denna utväxling skulle fungera med endast kedjeväxel skulle det behövas ytterligare två kugghjul, ett litet och ett stort, monterade på samma axel mellan de andra två kugghjulen. Denna lösning hade varit tidskrävande och svår att implementera och därför valdes istället en planetväxel. Planetväxeln fanns färdig att köpa till motorn och skulle vara lättare att implementera, eftersom den kan monteras direkt på motorn. För att få momentöverföringen från planetväxeln till axeln användes dock fortfarande en kedjeväxel.

Från början var det tänkt att kugghjulet från kedjeväxeln och skivbromsen skulle sitta på utsidan av chassit. Vid fordonet sitter dessa dock på insidan. Detta är en följd av belastningsberäkningarna, se Avsnitt 7.1.3, som visade att ett större avstånd mellan lagrena på utsidan av chassit är fördelaktigt. Av den anledningen gjordes chassit så brett som möjligt, vilket gjorde att kugghjulet och skivbromsen inte längre fick plats på utansidan, utan fick istället flyttas innanför chassits ram.

Slutligen finns det två skillnader som är av liten betydelse. I Figur 6.3 är det bakre sätet på höger sidan i färdriktningen medan det på fordonet är på vänster sida. Dessutom går avståndet mellan hjulen att justera på båda sidor av fordonet istället för på ena sidan, som det står i konceptbeskrivningen, se Avsnitt 6.2.3.

8

Mätning av delsystem

Inför mätningen av de olika delsystemen användes olika komponenters datablad för att få en uppfattning om deras verkningsgrad och därmed olika komponenters förluster. Denna verkningsgrad är dock inte alltid densamma som den verkningsgrad som kan mätas upp. Dessa mätningar kunde sedan utnyttjas för att ytterligare förfinas slutresultatet i simuleringen.

8.1 Tomgångsförluster för motorn

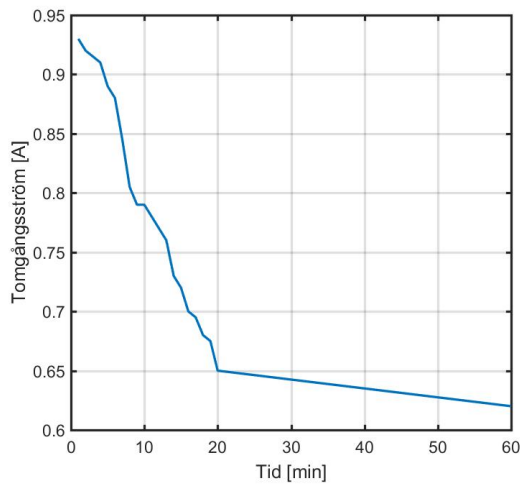
På motorn gjordes en tomgångsmätning med målsättning att dels ge data till simulering och dels för att undersöka om denna parameter har ett temperaturberoende. Mätningen sattes upp genom att fästa motorn och med obelastad axel försågs motorn med 36 V likspänning. Resultatet av denna mätning presenteras i Figur 8.1. Det observeras att strömbegäret sjunkit med mer än 250 mA efter 20 minuter och 300 mA efter en timmes drifttid. Detta går att utnyttja för att minska fordonets energiförbrukning.

8.2 Mätning av ankarresistans och spänningsfall för motorn

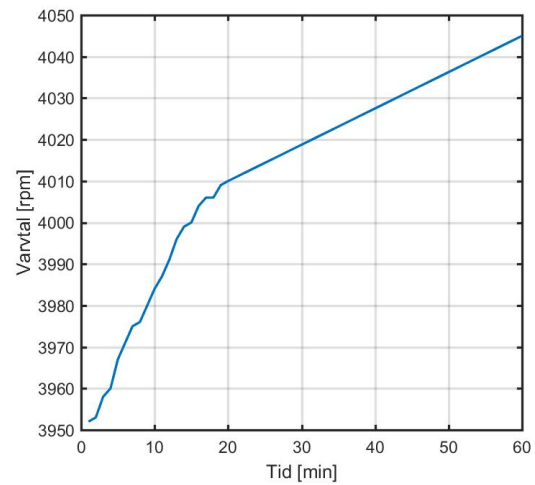
För att kunna mäta ankarresistansen R_a hölls rotorn still medan strömmen varierades mellan 0-10 A och mätningen presenteras i Figur 8.2. Enligt (3.7b) kommer nu spänningsfallet E_a att vara 0 V och spänningen över R_a och V_t lika med V_a . Från linjär anpassning i Figur 8.2 hittas ett värde på $R_a=0.249 \Omega$ och en offset läses av, vilken alltså är värdet på $V_t=0.029$ V i Figur 3.5. Värdet på R_a bör enligt datablad ha ett värde på 0.174Ω vilket alltså är lägre än uppmätt värde [14].

8.3 Verkningsgrad

Förutom mätningarna i Figur 8.2 har verkningsgraden för motorn och ett antal komponenter i drivlinan kartlagts. Förutom att vara underlag för simulering kan man dessutom dra nytta av vetenskapen om verkningsgraden för att komma fram till hur fordonet bör köras. Figur 8.3 visar verkningsgraden för varmkörd motor vid olika arbetspunkter och hur dessa skiljer sig från samma arbetspunkter på kall



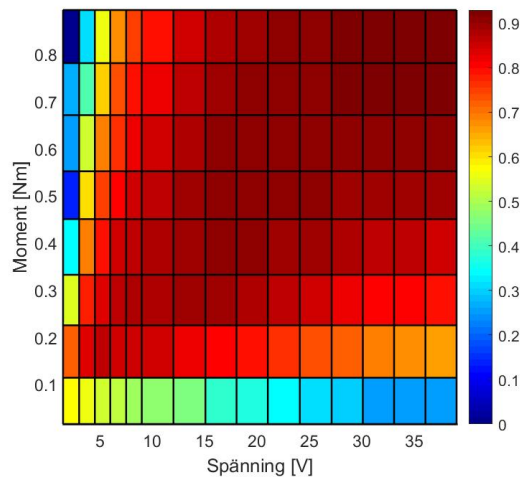
(a) Motorns tomgångsström med avseende på drifttid.



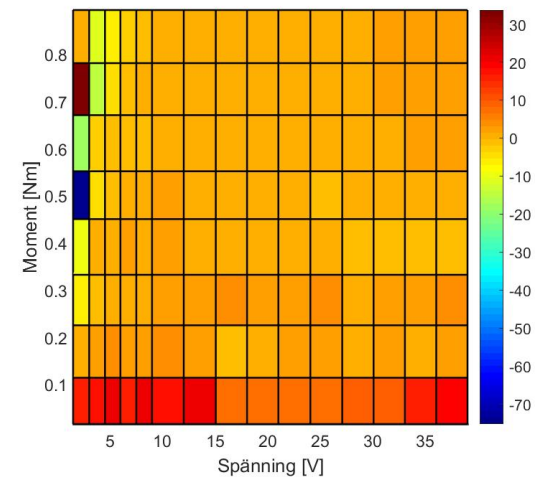
(b) Motorns varvtal under tomgångsmätning.

Figur 8.1: Resultat av tomgångsmätning beträffande strömförbrukning och varvtal med avseende på drifttid. a) visar att tomgångsströmen minskar desto längre motorn varit på. Först snabbt, för att sedan plana ut. b) visar att varvtalet vid tomgångskörning ökar med ökad tid.

motor. Motorn kopplades upp mot en varierbar broms och ett nätaggregat vilket gav förutsättningarna att variera spänningen och det bromsande momentet.



(a) Verkningsgrad för varm motor.



(b) Skillnad mellan varm och kall motor.

Figur 8.3: Verkningsgrad för motor och förhållandet mellan varm och kall motor. Mörkröda färger innebär en hög verkningsgrad och mörkblåa innebär låg verkningsgrad i a). b) visar hur mycket högre verkningsgrad den varma motorn har jämfört med den kalla.

Från Figur 8.3a ser man att verkningsgraden blir betydligt lägre när man belastar

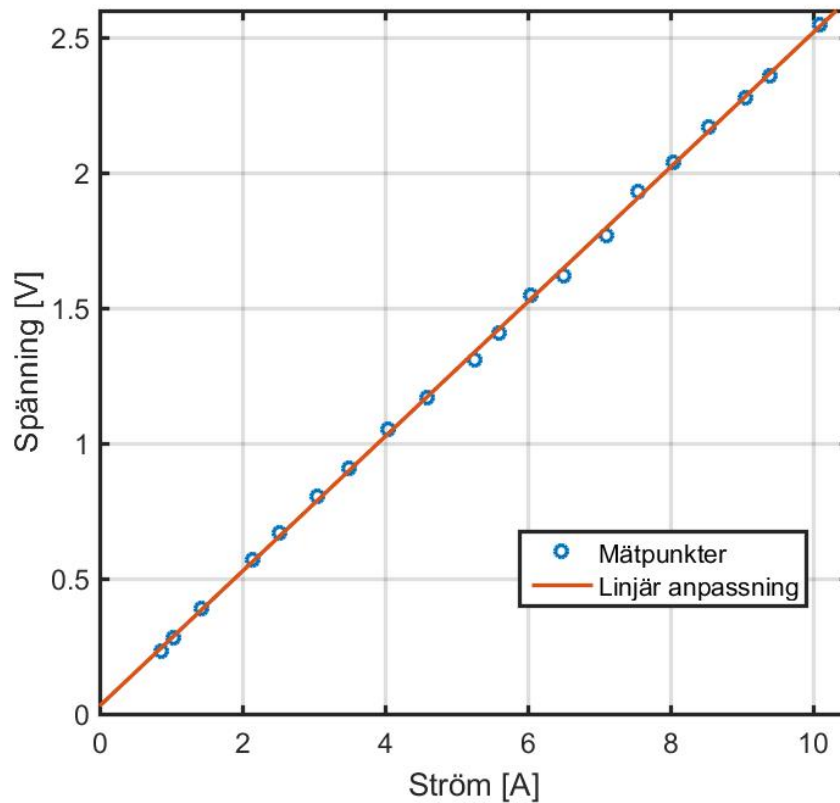


Figure 8.2: Motors strömåtgång med statisk rotor, samt linjärt anpassad kurva.

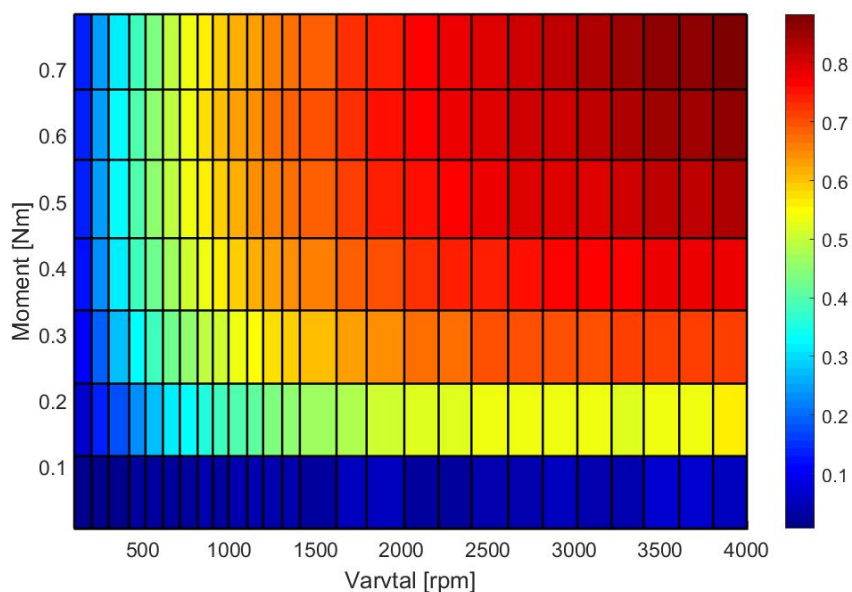
motorn tungt vid lågt varvtal och när motorn arbetar på högt varvtal med lågt moment, vilket överensstämmer med teori från Avsnitt 3.5.1 eftersom förhållandet mellan tomgångsförlusterna och strömproportionella förlusterna i R_a ständigt varierar. Från Figur 8.3b ser man att framför allt området med hög spänning och lågt moment drar stor nytta av att motorn är varm vid drift.

En mätning för motorstyrenheten ställdes också upp. Motorstyrenheten kopplades in till motorn som belastas av en varierbar broms. Resultatet av denna mätning kan observeras i Figur 8.4, när systemet körts varm.

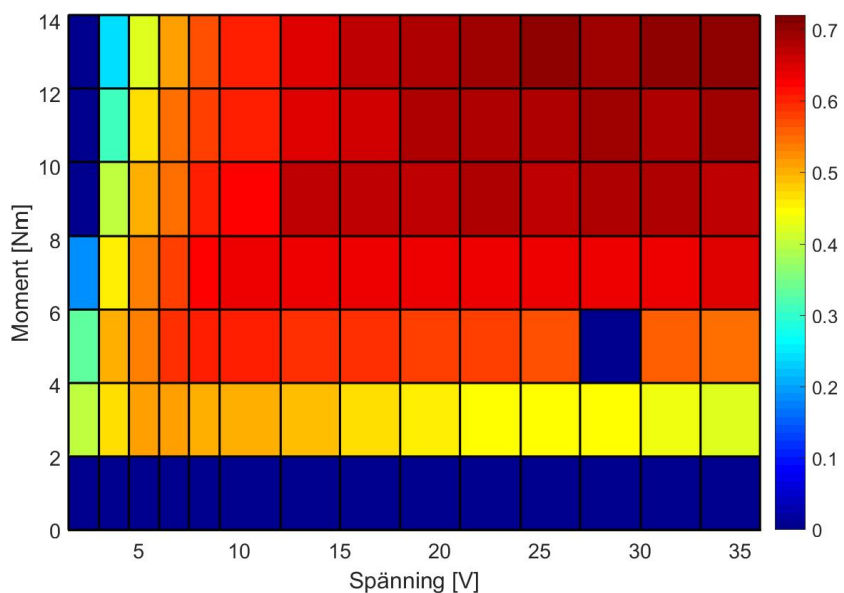
I samband med mätningar på motorstyrenheten betraktades en tomgångsström på 316 mA vilket kommer att betraktas som en konstant förlust vid drift.

Transmissionen kopplades på motorn och motorstyrenheten kopplades bort. Nätaggregatet kopplade för att förse motorn med energi och en broms användes efter transmissionen. Sedan varierades spänningen och momentet för att undersöka verkningsgraden även för transmissionen. Resultatet av denna mätning presenteras i Figur 8.5. Från Figur 8.5 observeras en avvikande mätpunkt, vilken vi tolkar och behandlar som ett mätfel.

Samtliga av dessa verkningsgrader har jämförts mot simuleringen och använts för att anpassa parametrar i simuleringsmodellen för att efterlikna verkligheten med så hög precision som möjligt. Resultatet av detta presenteras i Tabell 9.1.



Figur 8.4: Verkningsgrad för varmkörd motor seriellt med motorstyrenhet.



Figur 8.5: Verkningsgrad för motor seriellt med transmission. Detta med avseende på spänning och moment. Den blå rutan i figuren som inte passar in i mönstret antas vara ett mätfel.

9

Resultat

I denna del presenteras resultaten från den simulerade energiförbrukningen över tävlingssträckan för fordonet. Detta är beroende utav ett antal variabler som också redovisas. Resultatet av fälttestet visas också, och jämförs med simuleringsresultat över denna teststräcka.

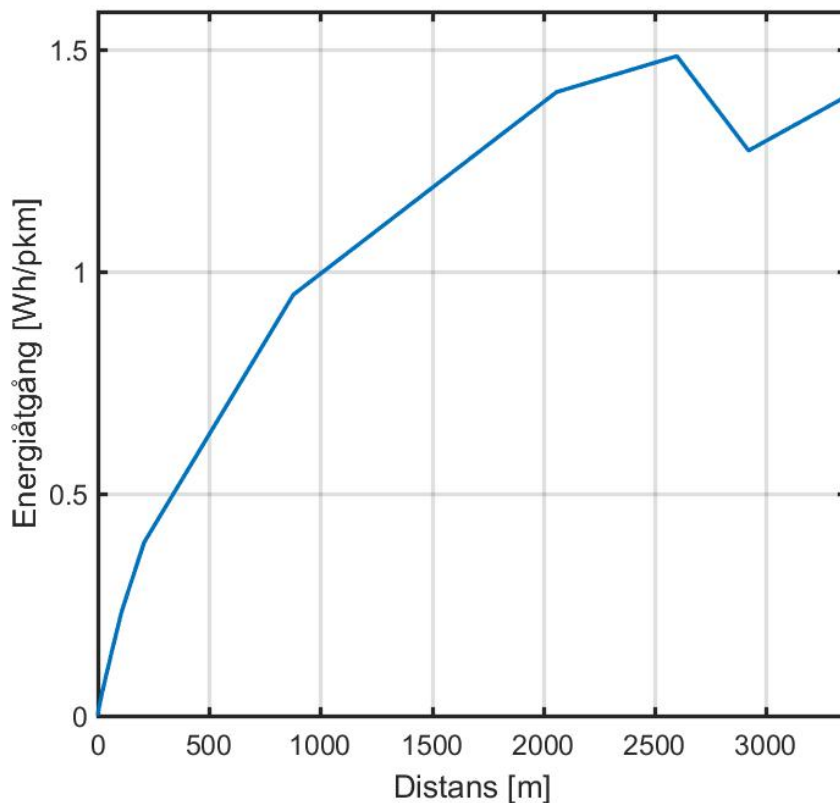
9.1 Simulerad energiförbrukning för fordonet

Med målsättning att simuleringen ska efterlikna verkliga fenomen och på så vis ge en så noggrann uppskattning av energiförbrukning som möjligt har modellen som introduceras i Avsnitt 5 och dess tillhörande variabler anpassats, uppmätts eller uppskattats. Flertalet variabler har erhållits baserat på direkta mätningar och resterande värden har anpassats utefter vetskap om olika delsystems verkningsgrader. En sammanställning av samtliga variabler presenteras i Tabell 9.1.

Tabell 9.1: Presentation av samtliga simuleringsvariabler och hur de valts ut. Med vikten m menas fordonets totala vikt med 3 passagerare som vardera väger 75 kg.

Variabel	Enhet	Uppmätt värde	Anpassat värde	Uppskattat värde
m	[kg]	-	-	335,41
A_{eff}	[m ²]	-	-	0.5
C_a	[-]	-	-	0.5
ρ_l	[kg/m ³]	-	-	1.18
C_r	[-]	-	-	0.001
d	[m]	0.43	-	-
k	[-]	22.12	-	-
$\eta_{transmission}$	[-]	-	0.86	-
ϕ_m	[Nm/A]	11.78	-	-
R_a	[Ω]	0.249	-	-
I_{tom}	[A]	0.620	-	-
V_t	[V]	0.029	-	-
I_{styr}	[A]	0.316	-	-
R_d	[Ω]	-	0.050	-
v	[km/h]	-	10.5	-
R_{batt}	[m Ω]	14.6	-	-
V_{batt}	[V]	39.6	-	-

I Avsnitt 8 beskrivs hur de uppmätta variabelvärdena i Tabell 9.1 har erhållits. Med variabelvärden från Tabell 9.1 beräknas tävlingssträckan att kräva en energiförbrukning på 1.40 Wh/pkm. Med vetskap om banans höjdvariationer från Figur 2.3 kan den momentana energiåtgången iaktas i Figur 9.1.



Figur 9.1: Figuren visar simulerad energiförbrukning längs tävlingsbanan. Den ökar fram till en viss punkt, där energiförbrukningen minskar. Detta är den del av tävlingsbanan där det går att återmata energi tillbaka in i batterierna.

9.2 Fälttest

En viktig del i detta projekt var att utföra ett fälttest där den totala energiförbrukningen för fordonet skulle mätas upp men även för att testa om motorn skulle orka driva fordonet framåt. Det var även viktigt att testa fordonets beteende på rälsen, att det kunde färdas utan urspårning, ta sig igenom kurvor samt att det kunde ta sig igenom en växel.

Under fälttestet testades fordonet på en bangård med en rälssträcka på cirka 250 m där rälsen svängde på två ställen, och på området fanns även en växel. Testet började med att kontrollera ifall fordonet rörde sig som förväntat på rälsen och att motorn orkade driva fordonet framåt. Detta genomfördes först utan passagerare, sedan med en och till slut med tre passagerare. Sedan utfördes en funktionsverifikation, där det kontrollerades att fordonet kunde färdas på spåret utan urspårning och

klarade av att ta sig igenom växeln i olika hastigheter. Fordonet klarade fälttestet utan problem, dock vandrade det från sida till sida över rälsen. Detta gjorde att flänsen periodiskt gick emot och skrapade mot rälsen.

Fordonets energiförbrukning testades också under fälttestet, och utfördes då på teststräckan. Under mätningarna satt tre personer på fordonet för att få samma belastning under varje test. Då sträckan som testades endast var cirka 250 m, vilket är väldigt kort jämfört med tävlingssträckan på 3.36 km, hann ej fordonet upp i och hålla den konstanta hastigheten på 10-15 km/h under en längre period. På denna teststräcka uppmättes energieffektiviteten till 1.76 Wh/pkm. Energieffektiviteten på denna teststräcka simulerades både för plan sträcka, samt även för en sträcka med en lutning på $\pm 1\%$. För plan sträcka simulerades energieffektiviteten till 1.82 Wh/pkm. För en sträcka med lutning på $+1\%$ simulerades energieffektiviteten till 2.35 Wh/pkm, och för lutning på -1% simulerades energieffektiviteten till 1.30 Wh/pkm. En sammanställning av dessa värden finns i Figur 9.2.

Tabell 9.2: Sammanställning av resultat från fälttest samt simulering av fälttest med olika lutningar.

	Energiförbrukning [Wh/pkm]	% av Mätvärde
Mätvärde	1.76	100.0
Simulering (0%)	1.82	103.4
Simulering (-1%)	1.30	73.9
Simulering (+1%)	2.35	133.5

10

Diskussion

Det som framförallt diskuteras i detta avsnitt är de resultat som presenteras i Avsnitt 9. Konstruktionen av fordonet diskuteras också, såsom vilken påverkan val av komponenter hade på slutresultatet.

10.1 Utvärdering av mätvärden

Under arbetets gång har flera mätningar på de olika komponenterna i drivlinan genomförts. I de fall där det varit intressant har mätningarna utförts både med motorn och de relevanta komponenterna. Vid mätningen observerades att motorn hade förbättrad verkningsgrad varm gentemot kall. Detta kan utnyttjas under tävlingen genom att värma upp motorn innan start för att få en högre verkningsgrad.

En iakttagelse under var att variabelvärdena i motorns datablad ej överensstämde med egna mätningar. Ett exempel är den tidigare redovisade tomgångsströmmen som mättes upp till 620 mA, vilken i databladet är redovisat till 437 mA. Detta är en signifikant avvikelse som bidrog till en ökad energiförbrukning.

10.2 Utvärdering av simulering

All simulering bygger på förenklade modeller, vilka kan leda till stora skillnader mot verkliga värden. Ett exempel är tomgångsströmmen som uppskattas vara konstant, vilket den ej är, utan har ett varvtalsberoende. I de fall som simulerade och uppmätta värden har kunnat jämföras har dock simuleringarna visat sig vara relativt likvärdiga, och kan därför anses vara ett gynnsamt verktyg för att uppskatta energiförbrukning.

Utifrån Figur 6.11 kunde slutsatsen dras att fler passagerare på fordonet bidrog till mindre energiförbrukning på personkilometer. I och med detta borde energiförbrukningen minska markant ifall fler passagerare skulle färdas på fordonet, då fordonet är färdigkonstruerat och alltså har samma vikt oavsett antal passagerare. Det är däremot inte säkert att motorn på fordonet skulle klara av att driva och accelerera fordonet framåt med den extra vikten.

10.3 Utvärdering av fältresultat

Fälttestet kan ses som lyckat eftersom fordonet kunde färdas på rälsen och genom växeln utan komplikation, vilket möjliggör deltagande i tävlingen. När det kommer

till fordonets energieffektivitet är det svårt att säga ifall resultatet är bra, eftersom något fälttest på tävlingssträckan ej är presenterat. Det kan däremot utifrån fälttestet och simuleringsresultatet för teststräckan antas att simuleringsmodellen är rimlig, då resultatet från fälttesten befann sig inom simuleringsresultatet för en lutning på $\pm 1\%$. Skillnaden mellan resultaten för lutning på $\pm 1\%$ är dock ganska stor, och eftersom lutningen under fälttestet ej var känd så medför detta stora osäkerheter i resultatet för fälttestet.

Under fälttestet observerades att fordonet färdades från sida till sida på rälsen, vilket troligtvis beror på att rälsen ej hade exakt vidd. Då hjulen ej hade optimal hjulprofil stötte hjulens fläns mot rälsen och trycktes tillbaka mot andra sidan. Att flänsen får kontakt med rälsens insida ger upphov till en bromsande kraft vilket både saktar ner fordonet och ökar energiförlusterna. Hjul med optimal hjulprofil hade istället rört sig upp mot flänsen, och sedan glidit ner och fordonet hade självcentrerat sig.

10.4 Utvärdering av konstruktion

Från fälttestet, Avsnitt 9.2, vet vi att fordonet uppfyllde de krav som ställts på det, och kan därför anses lyckat. Det finns dock mycket förbättringspotential.

För att göra fordonet energieffektivare skulle det göras så lätt som möjligt. I och med osäkerheter och begränsade beräkningar blev många delar av konstruktionen dock överdimensionerade, och därmed tyngre än vad de hade behövt vara. Genom en smartare design och optimerade dimensioner på komponenter skulle fordonet kunna göras betydligt lättare. Även genom att göra mer genomtänkta materialval skulle fordonets vikt kunna minskas avsevärt. Det är framförallt chassit som har stora förbättringsmöjligheter, men även andra delar som till exempel golv och säten.

Hjulen som köptes var en gynnsam lösning i och med att de gav fordonet ett stabilt beteende vid färd på räls. Eftersom de köptes färdiga sparades mycket tid och planering in. Dessutom är de lätta, vilket är fördelaktigt med avseende på energieffektiviteten och transport av fordonet. En nackdel med hjulen är dock utformningen av flänsen. Från Avsnitt 3.2 framgår att det hade varit mer fördelaktigt om flänsövergången hade varit mindre snäv.

En annan del som inte undersöktes genomgående och där det skulle kunna finnas förbättringspotential är lagrena. Val av lager skulle kunna undersökas betydligt mer för att välja ut det mest lämpliga. Dessutom skulle det eventuellt vara möjligt att ta bort gummiringarna i lagrena för att minsta friktion och därmed öka energieffektiviteten.

De aerodynamiska egenskaperna av fordonet har inte undersökts nämnvärt i projektet, vilket kan vara en källa för förbättrad energieffektivitet. Genom att anpassa fordonets utformning och design skulle luftmotståndet som uppstår vid färd reduceras.

10.5 Utvärdering av metod

Genom att använda metoden skapades resultat som återknyter till syftet med projektet och kan därför ses som lyckat. Det finns dock delar av metoden som kunde utformats på ett fördelaktigare sätt.

I efterhand kan det konstateras att den metod som användes under projektets gång, se Avsnitt 4, var tidskrävande. Det var framförallt genereringen och valet av koncept som tog mycket tid i anspråk. Detta kan bero på att största delen av projektgruppen inte hade någon tidigare erfarenhet eller kunskap om hur en sådan process kan gå till.

En annan anledning till att genereringen och valet av koncept tog mycket tid kan ha varit att fokus låg på fel delar av konstruktionen när koncepten genererades. I efterhand kan det tyckas som att många av de delar som beskrevs i koncepten kunde ha optimerats oberoende av vad för koncept som valdes, vilket hade gjort att val av koncept hade varit mindre relevant. Till exempel var det tänkt att skivbromsen i det valda konceptet skulle varit på utsidan av chassit men det visade sig att det var bättre att den var på insidan. Valet att ha en lik- eller växelströmsmotor behövde inte göras i konceptvalet utan kunde ha gjorts antingen tidigare eller senare i projektet, eftersom det inte påverkar resten av konstruktionen nämnvärt.

Fokus skulle istället ha varit på att välja ut de funktioner de olika koncepten skulle ha och hur dessa löses, principiellt. Ett exempel: fordonet ska ha funktionen att ta sig fram på räls, vilket betyder att den behöver framåtdrift. Detta skulle kunna lösas genom en motor som driver hjul, en linjärmotor eller en annan sorts motor. Genom att lägga ett övergripande fokus på funktioner, och hur dessa löses, tror vi att processen att skapa ett slutgiltigt koncept skulle gå snabbare. Dessutom tror vi att det skulle leda till att koncepten blir mer varierade. Många av de koncept som genererades under projektet var relativt lika varandra, med vissa undantag. Detta gjorde att valet blev svårt och inte helt relevant.

Ett annat sätt att få större variation på koncepten skulle kunna vara att skapa koncept innan omvärldsanalysen och sedan skapa ytterligare koncept efteråt. Det var väldigt enkelt att bli påverkad av hur andras lösningar. Dessutom, tror vi, bidrog den tidiga uppdelningen i delsystem till att en bild av hur fordonet ska se ut skapades i ett för tidigt skede. Uppdelningen hjälpte dock att identifiera viktiga delar och hur dessa samverkar, vilket ökade förståelsen av det som skulle göras.

Efter genereringen av koncept blev det tydligt att medlemmarna i projektgruppen hade olika fokus på vad som är viktigt att ha med i konceptbeskrivningen och hur detaljerad denna ska vara. Det vi kom fram till i efterhand var att det är viktigt att bestämma vad konceptbeskrivningarna ska innehålla, innan de skapas. På så vis blir beskrivningarna mer likvärdiga, vilket lägger en bättre grund till val av koncept. Även detta skulle spara tid.

För att skapa ett bättre slutgiltigt koncept kunde matriserna för konceptval kunnat användas mer aktivt. Efter vi använt Kesselringmatrisen kunde det varit mer fördelaktigt att addera de önskvärda egenskaperna från de bästa koncepten för att skapa nya koncept och undersöka hur de förhåller sig till varandra. Detta gjordes dock inte, delvis eftersom koncepten som användes i Kesselringmatrisen var relativt lika varandra. Detta gjorde att det inte ansågs nödvändigt att lägga ihop olika delar

från dessa koncept.

Som det nämndes tidigare i rapporten, se Avsnitt 7.1, skedde 3D-modellering av fordonet parallellt med att det tillverkas, vilket inte var planerat från början. Det visade sig dock vara ett väldigt naturligt sätt att arbeta på i detta projekt, delvis eftersom vi inte visste vilket material och komponenter vi hade att tillgå långt i förväg. Därmed blev 3D-modellen och det verkliga fordonet nästan färdigställda samtidigt.

11

Slutsats

Fordonet kan färdas på räls och genom växlar samt har en konstruktion som är personsäker. Dessutom hålls batteriets spänningsnivå och motorns strömbegär inom tillåtna ramar, vilket innebär att kraven för att få delta i tävlingen är uppfyllda.

Vidare har ett simuleringsverktyg skapats i syfte att estimerar energiförbrukning för fordonet som i jämförelse med fälttester avviker på 3.4 %. Osäkerheten på denna uppskattning är dock stor till följd av okända parametrar under mätning.

11.1 Fortsatt arbete

Till nästa iteration av projektet har vi som grupp ett antal förslag på vad som skulle kunna undersökas:

- Chassits material och utformning
- Frikopplad motor
- Hjul med annan hjulprofil
- Fler passagerare

Det var viktigt att säkerställa att chassit var så pass hållbart att det var säkert för passagerarna, och till följd av detta överdimensionerades det. Mer fokus på optimering av chassits utformning skulle leda till att det blev lättare. Dessutom bör materialvalet för chassit göras med mer eftertanke än det gjorts i detta arbete. Även former som bidrar till minskat luftmotstånd eller annat antal passagerare kan potentiellt leda till en energieffektivare lösning.

En frikoppling av motorn kan potentiellt bidra till ett bättre resultat eftersom arbetstiden vid arbetspunkter med hög verkningsgrad kan ökas. När verkningsgraden, som minskar vid lågt moment, blir för låg frikopplas motorn för att spara energi innan nästa acceleration.

I nuläget ger inte hjulprofilen möjlighet till det självcentrerande beteende som eftersträvas. Med en annan hjulprofil kan en högre energieffektivitet åstadkommas, till följd av att fordonet glider upp mot flänsarna. En högre energieffektivitet kan även uppnås om fordonet avses för fler passagerare. Det bör därför undersökas om motorn och chassit skulle klara av den extra belastningen.

Litteraturförteckning

- [1] "Om tävlingen," *Delsbo Electric*, 2015; http://www.delsboelectric.se/om_tavlingen.html [Hämtad: 27 jan. 2016].
- [2] M. Gustavsson *et al.*, The IVL Scenario: Energy Scenario for Sweden 2050, IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Göteborg, Sverige, 2011; <http://www.mtonga.se/documents/2011%20Energy%20scenario%20for%20Sweden%202050.pdf> [Hämtad: 7 feb. 2016].
- [3] "Regler 2016," *Delsbo Electric*, 2015; <http://www.delsboelectric.se/regler2016.html> [Hämtad: 28 jan. 2016].
- [4] "Resultat" *Delsbo Electric*, 2015; <http://www.delsboelectric.se/resultat.html> [Hämtad: 5 maj 2016].
- [5] "Bilder" *Delsbo Electric*, 2015; <http://www.delsboelectric.se/bilder.html> [Hämtad: 16 maj 2016].
- [6] Mart Mägi och Kjell Melkersson, "Lärobok i maskinelement", Göteborg 2014;
- [7] E. Andersson *et al.*, "Wheel-rail guidance mechanisms," *Rail Vehicle Dynamics*, Stockholm: RAILWAY GROUP KTH, 2007;
- [8] *Elteknik* Institutionen för Energi och Miljö Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola;
- [9] Higuchi T *et al.*, "On the Design of HighEfficiency Linear Induction Motors for Linear Metro", *Electrical Engineering in Japan*, 137:36-43, 2001; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eej.1086/epdf> [Hämtad: 4 maj 2016]
- [10] Institutionen för hållfasthetslära KTH, Bengt Sundström *et al.*, "Handbok och formelsamling i hållfasthetslära", Stockholm 2013
- [11] Rostfritt stål 2007, TIBNOR, 2007; http://www.e-magin.se/v5/viewer/files/viewer_s.aspx?gKey=1349sgf8&gInitPage=1 [Hämtad: 29 feb. 2016]
- [12] Konstruktionsplywood, Byggplywood: Otterbäcken, VÄNERPLY, u. d; <https://www.moelven.com/PageFiles/60852/Vanerply%20produktsortiment%20brochure%2012%20sider%20juli%202012.pdf> [Hämtad: 29 feb. 2016]
- [13] O. Josefsson, "Investigation of a Multilevel Inverter for Electric Vehicle Applications", Institutionen för Energi och Miljö, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, 2015;
- [14] RE 65 Ø65 mm, Graphite Brushes, 250 Watt: Specifikation, MaxonMotors, u. d.; <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/re/re65/353296> [Hämtad: 12 feb. 2016]