

Design och konstruktion av ett energieffektivt spårburet fordon

För deltagande i tävlingen Delsbo Electric

Kandidatarbete inom tillämpad mekanik, produktutveckling och elkraft

Erik Benjaminsson, David Einarsson, Anna Johansson, Lucas Kristiansson, Tim Pagrell, Eskil Wirdheim

**INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se

Design och konstruktion av ett energieffektivt spårburet fordon

För deltagande i tävlingen Delsbo Electric

Kandidatarbete i mekanik och maritima vetenskaper

ERIK BENJAMINSSON, DAVID EINARSSON, ANNA JOHANSSON,
LUCAS KRISTIANSSON, TIM PAGRELL, ESKIL WIRDHEIM

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för Dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023

Design och konstruktion av ett energieffektivt spårburet fordon
För deltagande i tävlingen Delsbo Electric

ERIK BENJAMINSSON, DAVID EINARSSON, ANNA JOHANSSON, LUCAS
KRISTIANSSON, TIM PAGRELL, ESKIL WIRDHEIM

© ERIK BENJAMINSSON, DAVID EINARSSON, ANNA JOHANSSON,
LUCAS KRISTIANSSON, TIM PAGRELL, ESKIL WIRDHEIM, 2023

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Illustrativ skiss av spårbundet fordon

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2023

Sammandrag

Energieffektivitet är ett aktuellt ämne i dagens industrialiserade samhälle. Med detta i fokus har de senaste åren tävlingen *Delsbo Electric* anordnats, en tävling som går ut på att konstruera det mest energieffektiva spårfordonet. Detta kandidatarbete har undersökt möjligheterna att designa och konstruera ett energieffektivt spårburet fordon som kan delta i tävlingen. Med grund i mekanik samt elektronik har olika delsystem designats och implementerats.

Enligt tävlingens regler för deltagande har krav för fordonets respektive delar formulerats. Med hjälp av simuleringsmodeller har en teoretisk modell för att beräkna fordonets drift längs en uppskattad bana likt tävlingsbanan simulerats. Resultat från dessa simuleringar har använts som underlag inför beslutsfattande kring fordonets elektriska komponenter. Genom en produktutvecklingsprocess har olika koncept tagits fram utifrån de ställda kraven. De olika komponenterna har dimensionerats genom beräkningar samt simuleringar och därefter tillverkats, alternativt inhandlats. Delsystemen har anpassats för att fungera tillsammans samt vara modulära.

När alla respektive delar till fordonet konstruerats och levererats kunde de sammansättas till ett fullständigt fordon. Kåpan som skulle omsluta passagerarna blev dock aldrig färdigställd och kunde därför inte implementeras. För att verifiera hur väl fordonet uppfyller de krav som ställts utfördes ett bänkttest i labbmiljö samt ett fysiskt körprov hos Jernhusen i Fjällbo utanför Göteborg. Vid testerna kunde konstateras att drivlinan klarade av att driva fordonet framåt på ett säkert sätt med sex passagerare i en hastighet på 14,4 km/h. Från testkörningen kunde ingen exakt data över energiförbrukningen mätas då ingen komplett mätenhet fanns att tillgå. För att detta ska möjliggöras bör även styrningen av fordonet utvecklas ytterligare så att körningar med mer kontinuitet kan utföras.

Abstract

Energy efficiency is a relevant topic in today's industrialized society. With this in mind, the competition *Delsbo Electric* has been organized in recent years, a competition aimed at designing the most energy-efficient rail vehicle. This bachelor's thesis has investigated the possibilities of designing and constructing an energy-efficient rail-bound vehicle that can participate in the competition. Based on mechanics and electronics, different subsystems have been designed and implemented.

According to the competition's participation rules, requirements for the vehicle's respective parts have been formulated. Using simulation models, the operation of the vehicle has been simulated along an estimated track similar to the competition track. Results from these simulations have been used as a basis for decision-making regarding the vehicle's electrical components. Through a product development process, different concepts have been developed based on the specified requirements. The various components have been dimensioned through calculations and simulations and then manufactured or purchased. The subsystems have been adapted to work together and be modular.

Once all the respective parts for the vehicle had been designed and delivered, they could be assembled into a complete vehicle. However, the shell that would enclose the passengers was never completed and therefore could not be implemented. To verify how well the vehicle met the requirements that had been set, a bench test in a lab and a physical driving test were conducted at Jernhusen in Fjällbo, outside Gothenburg. During the tests, it was observed that the powertrain was able to drive the vehicle forward safely with six passengers at a speed of 14.4 km/h. No exact data on energy consumption could be measured from the test drive as no complete measurement unit was available. To make this possible, further development of the vehicle's control system is necessary so that it can be driven with more continuity.

Förord

Projektgruppen vill rikta ett stort tack till Erik Hulthén från institutionen för industri och materialvetenskap för all handledning och konsultation. Gruppen riktar även stort tack till handledare Stefan Lundberg på institutionen för elektroteknik för all rådgivning gällande elektroniken och tack till Björn Pålsson på institutionen för mekanik och maritima vetenskaper för all rådgivning gällande mekaniken. Ett hjärtligt tack till Peter Bäckgren från Fuse för den enorma hjälp och handledning som möjliggjort byggnationen av fordonet och tillverkning av specifika komponenter. Gruppen vill även rikta ett tack till Fuse för möjligheten till en permanent byggplats under projektets gång. Tack till Kjell Saebbo och Alf Magnusson för hjälp i verkstaden. Vi vill även tillägna ett tack till Dan Berglund på Jernhusen för möjligheten att få testköra fordonet på räls och även Chalmers Formula Student för att de möjliggjort resan dit. Ett tack till Monzon för sponsring av golv till fordonet. Tack till Cykelfiket och Sportson för sponsring och hjälp med diverse delar till fordonet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och målsättning	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Teori	3
2.1	Mekanisk påverkan på ett rälsgående fordon	3
2.1.1	Rälsdynamik	3
2.1.2	Axelböjning	4
2.1.3	Lager	4
2.1.4	Transmission	4
2.1.5	Rullmotstånd på rullande hjul	5
2.1.6	Luftmotstånd på fordon i rörelse	5
2.2	Elektronikkomponenter i ett eldrivet fordon	5
2.2.1	Elektriska motorer	5
2.2.2	AC-motorn	6
2.2.3	DC-motorn	6
2.2.4	BLDC-motorn	7
2.2.5	Batteri	8
2.2.6	Motorstyrning	9
3	Metod	10
3.1	Mekanik	10
3.1.1	Konceptgenerering	10
3.1.2	Chassi	11
3.1.3	Säten	11
3.1.4	Hjulaxlar	11
3.1.5	Lager	11
3.1.6	Hjul	11
3.1.7	Transmission	11
3.1.8	Nödbroms	11
3.1.9	Kåpa	11
3.2	Elektronik	12
3.2.1	Överblick av Matlab/Simulink modellen	12
3.2.2	Motor	13
3.2.3	Test av motor i bromsbänk	13
3.2.4	Batteri	14
3.2.5	Motorstyrning med Raspberry Pi & Python	14
4	Genomförande	15
4.1	Mekanik	15
4.1.1	Konceptgenerering	15
4.1.2	Chassi	16
4.1.3	Säten	17
4.1.4	Hjulaxlar	17
4.1.5	Lager	18
4.1.6	Hjul	19
4.1.7	Transmission	20
4.1.8	Nödbroms	22
4.1.9	Kåpa	22
4.2	Elektronik	23
4.2.1	Uppdatering av simuleringen	23
4.2.2	Motor	25
4.2.3	Test av motorn i bromsbänken	26
4.2.4	Batteri	27
4.2.5	Konfiguration och programmering av Raspberry Pi	27
4.3	Sammansättning av fordon	28

4.4	Testkörning av fordon	29
5	Resultat	31
5.1	Slutgiltigt fordon	31
5.2	Resultat från simuleringen av fordonet	31
5.3	Resultat från test av motorn i bromsbänken	32
5.4	Resultatvärden mot kravspecifikation	33
6	Diskussion	35
6.1	Diskussion av simuleringsresultatet	35
6.2	Diskussion av resultat i bromsbänken	35
6.3	Analys av testkörning	35
6.4	Utvecklingspotential	36
6.4.1	Chassi och säten	36
6.4.2	Hjulaxlar	36
6.4.3	Hjul	36
6.4.4	Transmission	36
6.4.5	Batteriet	37
6.4.6	Mätningar	37
6.4.7	Styrning	37
6.4.8	Kabeldragningar	37
A	Komponenter till koncept	A-i
B	Utvalda koncept	B-i
C	Konceptval - Viktad Pugh-matris	C-i
D	Axelböjningsberäkningar	D-i
E	Fordonsparametrar	E-i
F	Kravspecifikation	F-i
G	Parametrar till Matlabmodellen	G-i
H	Konfigurering av Waveshare RS485 CAN HAT	H-i
I	Ritningar	I-i
J	Ritningar	J-i
K	Fordonets specifikationer	K-i

1 Inledning

I dagens industrialiserade samhälle är energi en mycket viktig resurs som inte bör förbrukas mer än nödvändigt. Det stora behovet av energi innebär dessutom i många fall en påfrestning för miljön. Strävan efter att motverka detta har gett upphov till principen om hållbar utveckling som innebär att samhällets användande av resurser inte ska ske på bekostnad av framtida generationers behov.

Utöver att se till att energi produceras på ett hållbart sätt är också energikonsumtionen av intresse och den tekniska utvecklingen som sker möjliggör energibesparingar inom flera områden. En stor andel av Sveriges energiförbrukning utgörs av transportsektorn, vilket enligt Energimyndigheten stod för 22 % av den totala energiförbrukningen år 2020 [1]. Utveckling av nya metoder för effektiv fordonstransport kan därför medföra stora energimässiga besparingar, och därmed vara ett viktigt steg mot en hållbar framtid.

I denna rapport beskrivs utvecklingsprocessen av ett eldrivet, spårburet fordon med målsättningen att uppnå en så hög energieffektivitet som möjligt. Flera av fordonets olika delar har optimerats för minimal energiförlust samtidigt som en enkel modulär konstruktion uppnåddes. Fordonet konstruerades för att kunna delta i tävlingen *Delsbo Electric*.

1.1 Bakgrund

Med det övergripande målet att uppmåna nytänkande och innovation inom fordonstransport arrangeras årligen tävlingen *Delsbo Electric*. Tävlingen anordnas främst för högskolor och universitet och går ut på att bygga ett rälsgående elfordon som förbrukar så lite energi som möjligt per person [2]. På Delsbo Electric's hemsida går följande att läsa om tävlingens målsättning: "Our purpose is to drive the transformation to a more sustainable world - through a tangible and inspiring experience for tomorrow's creative minds" samt "The task is to design, build and drive a manned electrified rail vehicle. The most energy efficient vehicle wins".

Tävlingen går ut på att framföra ett fordon med så låg energiförbrukning som möjligt. Det lag som färdas den 3,36 km långa tävlingssträckan med lägst energiförbrukning, utan att diskvalificeras, vinner tävlingen [3]. Energiförbrukningen mäts i Wh/(person · km), vilket är ett mått på den totala nettoanvändningen av energi dividerat med antalet personer som färdades i fordonet. Med nettoanvändning menas all förbrukad energi subtraherat med eventuell återvunnen energi; Det är alltså tillåtet att ladda fordonets batteri med rörelseenergi vid inbromsning.

Delsbo Electric kräver att de tävlande följer de regler som är satta för att framföra fordonen på järnvägssträckan. Fordonet skall under färd ockuperas av 1–6 personer med minimal genomsnittlig vikt på 50 kg [3]. Varje person ska fördela majoriteten av sin vikt på rumpan, men det måste finnas ryggstöd med en minimihöjd på 35 cm samt en lutning mellan 60 och 90 grader från horisontalplanet. Det är tillåtet att använda vikter som representerar människor i tävlingsfordonet så länge den genomsnittliga vikten håller sig över den tidigare nämnda medelvikten.

Inför tävlingen monteras en mätenhet på fordonet, se figur 1, som övervakar all förbrukad och återvunnen energi, och skickar data via en antenn till analys. Ett krav på fordonet är att det ska innehålla ett fäste för mätenheten som enkelt ska kunna på- och avmonteras [3].



Figur 1: En bild på mätenheten. Hämtad från [3].

Chalmers har tidigare varit med i tävlingen vid två tillfällen i form av ett kandidatarbete på institutionen för elektroteknik. Projektet genomförs nu i ny regi där fler program involveras med förhoppningen att

nästkommande kandidatarbetaren kan vidareutveckla fordonet med de koncept och grunder som görs under detta arbete.

1.2 Syfte och målsättning

Projektets syfte var att utveckla ett rälsgående fordon som kan tävla i Delsbo Electric, enligt tävlingens regler, med så låg energikonsumtion som möjligt. Arbetet delades upp i huvudsakligen två delar, en mekanisk och en elektronisk del, vilket möjliggjorde parallell utveckling av fordonets olika områden. Fordonet designades även med utgångspunkt att det ska gå att vidareutveckla i framtida kandidatarbeten.

Målsättningen med projektet är följande:

- Konstruera och tillverka ett fordon som kan tävla i Delsbo Electric.
- Genomföra tävlingen med ett fordon som tar sig från start till mål.
- Konstruera ett fordon med modulär design samt formulera ett underlag för att möjliggöra vidareutveckling.

1.3 Avgränsningar

De avgränsningar som gjordes inom projektet grundade sig i att projektet utfördes under en tidsperiod på fem månader. Med detta i åtanke låg fokuset på att bygga ett enkelt fordon som uppfyller de regler och krav som ställs på fordonet för att få delta i tävlingen Delsbo Electric.

Fordonet skulle byggas från grunden och för att uppfylla projektets målsättning undersöktes inte innovationer gällande optimering av energikonsumtionen ingående. Vidare resulterade detta i en avgränsning gällande material och tillverkningstekniker. Beslutet togs att använda enkelt bearbetade material samt redan bekanta metoder och tekniker; därför undersöktes inte mer avancerade alternativ på en djupare nivå.

2 Teori

Här presenteras den teori som användes för att beskriva och lösa projektets mest centrala problem. Kapitlet är uppdelat i avsnitten *Mekanisk påverkan* och *Elektronikkomponenter* där ingående komponenter och teorier vidare beskrivs.

2.1 Mekanisk påverkan på ett rälgående fordon

En signifikant del av all energiförlust för ett spårburet fordon kommer från mekanisk påverkan. Utöver energiförluster är grundläggande konstruktion av ett spårburet fordon även centralt, vilket involverar bland annat rälsdynamik, belastningsberäkningar, lager och transmission.

Ett drivet rälgående fordon i rörelse påverkas av ett flertal krafter, se figur 2. Tyngdkraften beskrivs av

$$F_{\text{mg}} = mg, \quad (1)$$

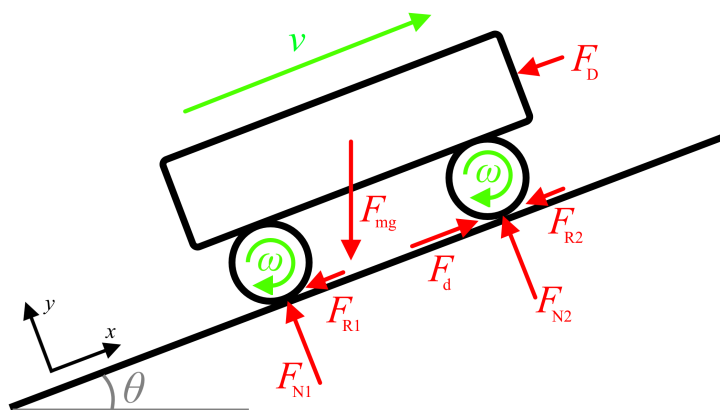
där m är fordonet och passagerarnas totala massa och $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ är tyngdaccelerationen. Normalkraften är beroende på tyngdkraften och rälsens lutning θ enligt

$$F_{\text{N}} = F_{\text{N1}} + F_{\text{N2}} = F_{\text{mg}} \cos \theta. \quad (2)$$

För $\theta > 0$ resulterar lutningen i en motståndskraft med storlek $|F_{\text{mg}} \sin \theta|$, medan $\theta < 0$ ger en drivande kraft med samma belopp. Friktionskraften F_{d} är den drivande kraften som resulterar från motorns vridmoment. Rullmotståndskraften $F_{\text{R}} = F_{\text{R1}} + F_{\text{R2}}$ och luftmotståndskraften F_{D} beskrivs vidare i avsnitt 2.1.5 respektive avsnitt 2.1.6. Summan av dessa krafter,

$$\vec{F}_{\text{tot}} = \vec{F}_{\text{mg}} + \vec{F}_{\text{N}} + \vec{F}_{\text{d}} + \vec{F}_{\text{R}} + \vec{F}_{\text{D}} = \hat{x}(F_{\text{d}} - F_{\text{mg}} \sin \theta - F_{\text{R}} - F_{\text{D}}), \quad (3)$$

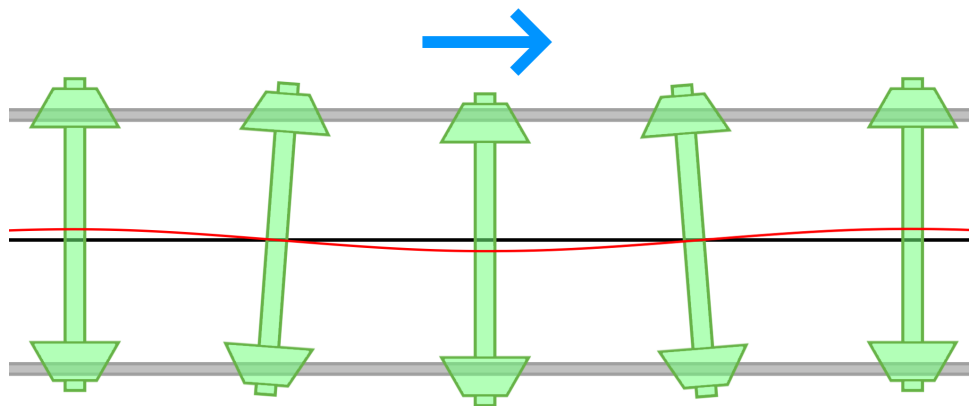
är nettokraften som bidrar till fordonets acceleration $a = F_{\text{tot}}/m$. Ju större motståndskrafter, desto större drivande moment behövs från motorn för att accelerera fordonet.



Figur 2: Ett kraftdiagram som illustrerar de krafter som påverkar ett drivet spårburet fordon i rörelse.

2.1.1 Rälsdynamik

För att underlätta med styrning av ett spårburet fordon är dess hjulprofiler konformade så att diametern minskar längre ut från flänsen [4]. Då ett hjulpar vanligtvis är fastmonterat på samma stela axel har de samma vinkelhastighet ω . Om axeln blir förskjuten på rälsen ökar diametern för det ena hjulet och minskar för det andra. Detta leder till en skillnad i den verkamma hjuldiametern mellan de båda hjulen, vilket innebär att sidan med större diameter färdas en längre sträcka än sidan med mindre diameter. Resultatet blir att fordonet naturligt svänger, vilket kallas självcentrering. En konsekvens av självcentrering är att hjulen får en naturlig svängningsrörelse utmed rälsen. Fenomenet kallas sinusgång, från att den färdade sträckan efterliknar en sinusvåg och illustreras i figur 3. Hur svängningen ser ut beror på hjulens radie, konicitet samt kontaktytans avstånd från centrum av rälsen.



Figur 3: Illustration av sinusgång. Den röda kurvan visar hur hjulaxelns mittpunkt färdas längs med rälsen.

2.1.2 Axelböjning

Hjulaxlarnas böjning kan beskrivas med hjälp av elastiska linjens ekvation

$$M(x) = -EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2}, \quad (4)$$

som beskriver böjning, vinkel, moment, tvärkraft samt belastningsintensitet genom integration av olika grad [5]. $M(x)$ är böjmomentet för positionen x , $w(x)$ är utböjningen för positionen x , E är materialets elasticitetsmodul och I är tvärsnittets böjtröghetsmoment. I fallet för en solid cylindrisk axel samt för en ihålig cylindrisk axel beräknas I enligt

$$I_{\text{solid}} = \pi \frac{r^4}{4}, \quad (5)$$

$$I_{\text{rör}} = \pi \frac{r_y^4 - r_i^4}{4}, \quad (6)$$

där r_y är den yttre radien och r_i den inre radien [6].

2.1.3 Lager

För att överföra krafter samt möjliggöra relativrörelse med lågt rörelsemotstånd mellan två delar används olika typer av lager [7]. I det här projektet används rullningslager som använder kullor eller rullar för att överföra krafter samt möjliggöra rotation. Sfäriska kullager består av två rader kullor som löper i en gemensam sfärisk löpbana i yttringen [8]. Detta ger möjlighet till snedställning av lagret och gör det självinställande. Kullager har liten kontaktyta vilket ger lågt rullmotstånd och lämpar sig för mindre belastningar.

2.1.4 Transmission

För att överföra mekanisk energi mellan två roterande system används mekanisk transmission, vars uppgift är att omvandla varvtal och moment mellan dem. Transmissionskomponenten kan ha flera utföranden och för en motor kan till exempel planetväxel, kuggväxel, kedjeväxel, eller remväxel användas. Dessa komponenter överför rotationshastigheter och beskrivs av

$$G_r = \frac{\text{rpm}_{\text{motor}}}{\text{rpm}_{\text{axel}}}, \quad (7)$$

$$\text{rpm}_{\text{axel}} = 60 \cdot \frac{v_{\text{fordon}}}{O_{\text{hjul}}}, \quad (8)$$

där rpm (revolutions per minute) betecknar rotationshastighet, v_{fordon} är fordonets hastighet, G_r är utväxlingen (gear ratio), och O_{hjul} är hjulets omkrets. Komponenterna är mekaniska vilket vid rotationer

medför friktion som bildar värme, vilket i detta fall ej är önskvärt och anses som mekaniska förluster. Verkningsgraden η är ett sätt att kvantifiera hur stor andel energi som nyttjas och beskrivs av

$$\eta = \frac{E_n}{E_t} = \frac{P_n}{P_t}, \quad (9)$$

där E_n är nyttjad energi och E_t är tillförd energi, och P är effekt med samma index. Med givna verkningsgrader från tillverkare eller från mätningar kan mängden arbete som krävs för att nå givet resultat räknas ut. Generellt sätt så har transmission med högre utväxling en lägre verkningsgrad, vilket gör att lägre utväxling premieras för en högre energieffektivitet [9].

2.1.5 Rullmotstånd på rullande hjul

Rullmotstånd är en kraft som motverkar rörelsen hos ett föremål som rullar på en yta, och beskrivs av

$$F_R = F_N C_R, \quad (10)$$

där F_R är rullmotståndskraften, F_N är normalkraften från ytan på föremålet, och C_R är rullmotståndskoefficienten som beror på materialen samt dimensioner på både föremålen och ytorna [10]. Framför allt minimeras C_R med styva material. För ett spårburet fordon verkar denna kraft mellan räls och hjul. Den sänker fordonets hastighet och resulterar således i energiförlust.

2.1.6 Luftmotstånd på fordon i rörelse

Luftmotstånd är en motståndskraft som verkar i motsatt riktning relativt ett föremåls rörelseriktning och beräknas enligt

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A, \quad (11)$$

där F_D är luftmotståndskraften, ρ är luftens densitet, v är föremålets hastighet relativt luften, C_D är luftmotståndskoefficienten, och A är föremålets tvärsnittsarea ortogonalt mot färdriktningen [11]. Denna kraft verkar för att sakta ned föremålet, relativt luften, och resulterar således i energiförlust för ett spårburet fordon som färdas i högre hastighet än luften runtom.

2.2 Elektronikkomponenter i ett eldrivet fordon

Nedan beskrivs de elektronikkomponenter som har undersökts och jämförts innan slutgiltiga beslut tagits.

2.2.1 Elektriska motorer

En elektrisk motors funktion är att omvandla elektrisk energi till mekanisk energi. Den elektriska motorn består av en stator och en rotor [12]. Statoren är stationär medan rotorn roterar innanför statoren och är kopplad till en axel. Genom att ändra magnetfältet eller strömmen i antingen rotorn eller statoren bildas det en kraft på rotorn. Kraften blir till vridmoment som får rotorn att rotera. Det moment som motorn behöver producera är kopplat till den kraft som fordonets styrsystem efterfrågar. Relationen beskrivs av

$$T_{\text{motor}} = \frac{F_{\text{ef}} \cdot r_{\text{hjul}}}{G_r}, \quad (12)$$

där F_{ef} är kraften som efterfrågas av styrningen för att transportera fordonet, r_{hjul} är hjulets radie på den drivande axeln och utväxlingen fås enligt ekvation 7. En riktlinje att hålla sig till vid val av motor är att se till att dess nominella moment är tillräckligt för att kunna driva fordonet så att den inte överbelastas.

Även märkvarvtalet går att hitta i databladet och är en viktig parameter som bestämmer maxhastigheten fordonet kan rulla under en längre period. Motorns varvtal vid varierande hastigheter v_{fordon} kan beräknas enligt

$$\omega_{\text{motor}} = \frac{G_r \cdot v_{\text{fordon}}}{r_{\text{hjul}}}. \quad (13)$$

Förlusterna i en elektrisk-motor kan delas upp i tre kategorier [13]. Den första kategorin är kopparförluster och kan i en trefasmotor beskrivas av

$$P_{\text{Cu,förlust}} = 3 \cdot R_{\text{Cu}} \cdot I^2, \quad (14)$$

där R_{Cu} är resistansen, och I är strömmen för en lindning i motorn. Det är alltså strömmen i rotorn och/eller statorn som ger upphov till kopparförlusterna. De två andra kategorierna är järnförluster och friktionsförluster. Järnförluster uppstår som följd av att magnetfältet behöver ändra riktning när motorn snurrar. Järnförluster korrelerar mot vilken hastighet motorn snurrar med men är svårare att kvantifiera exakt [13].

Friktionsförlusterna uppstår i rullningslagret på motorns axel och är vanligtvis väldigt små. Utöver det tillkommer det växelförluster i växelriktaren när den byter riktning på strömmen. Dessa förluster kan modelleras som en tomgångsförlust som drar en konstant effekt från motorn när den är i drift. Vid höga hastigheter och lågt moment så dominerar järnförlusterna medan det vid låga hastigheter och höga moment är kopparförluster som dominerar [13].

Ett sätt att minska förlusterna i motorn är att välja en överdimensionerad motor [14]. En elektrisk motor som är byggd för en högre effekt har generellt sett en högre effektivitet vid fullast. Det beror på främst att dessa använder större kopparlindningar i statorn och/eller rotorn som gör att resistansen minskar. Om resistansen minskar i ekvation 14 leder det till lägre effekt, vilket innebär lägre förluster. Nackdelen med en överdimensionerad motor är att tomgångsförlusterna ökar. För att ta vara på energivinsten i att välja en överdimensionerad motor måste den lastas korrekt. Om motorn skulle vara väldigt lättlastad skulle den istället riskera att dra mer effekt i jämförelse med en 'normalt' dimensionerad motor.

En elektrisk motor kan också fungera som generator ifall den drivs av ett moment i stället för att belastas med ett moment [15]. När motorn drivs av ett yttre moment generas en ström som går ut mot spänningskällan, vilket innebär att effekt går mot energikällan/nätet. Vid generatordrift förekommer förluster likt normaldrift, vilket gör att även generatorer har olika verkningsgrader inom olika intervall.

Ett vanligt sätt att minimera energiförbrukningen i elektriska fordon är att använda motorn som generator vid inbromsningar, så kallad regenerativ bromsning [16]. Då omvandlas en del av den mekaniska energin tillbaka till elektrisk energi i stället för att bli till energiförluster i form av värme i bromsarna.

2.2.2 AC-motorn

Växelströmsmotorn (AC-motorn) drivs av växelström (AC) och finns både i asynkron och synkron modell. Precis som en borstlös likströmsmotor har AC-motorn inga borstar vilket medför att den inte kräver mycket underhåll och har en lång livslängd [17]. För att justera hastigheten ut från växelströmsmotorn används ofta frekvensomriktare. Detta är något som skiljer AC-motorn från DC-motorn.

Vid spänningsmatning med ett batteri (likström) innebär detta att kraftelektronik krävs för att konvertera likström till växelström mellan batteriet och motorn. Detta innebär ytterligare förluster vid omvandlaren i drivlinan.

2.2.3 DC-motorn

Likströmsmotorn (DC-motorn) drivs av likström (DC). Om DC-motorn kopplas direkt till likspänning krävs ingen extra kraftelektronik för att driva motorn, vilket gör den väldigt lätt att installera och inga förluster sker i växelriktare [18]. För att i stället reglera magnetfältet i rotorn använder sig DC-motorn av borstar. Borstarna, som oftast är gjorda av kol, ligger an mot motorns rotor och gör att strömmen genom rotorn byter riktning för att få det elektromagnetiska fältet i motorn att rotera. Då rotorn roterar utsätts borstarna för slitage och detta innebär att den kräver regelbundet underhåll. Därför lämpar sig den borstade DC-motorn väl för användningsområden med kortvarig drift.

Förlusterna hos DC-motorn kommer i huvudsak från kopparlindningarna samt vid tomgång [18]. Genom att minimera dessa går det att få en motor med hög verkningsgrad. Förlusterna i kopparlindningarna hos motorn beskrivs enligt tidigare ekvation 14. Tomgångsförluster för motorn kan beskrivas enligt

$$P_{0,\text{förlust}} = \frac{U^2}{R_0}, \quad (15)$$

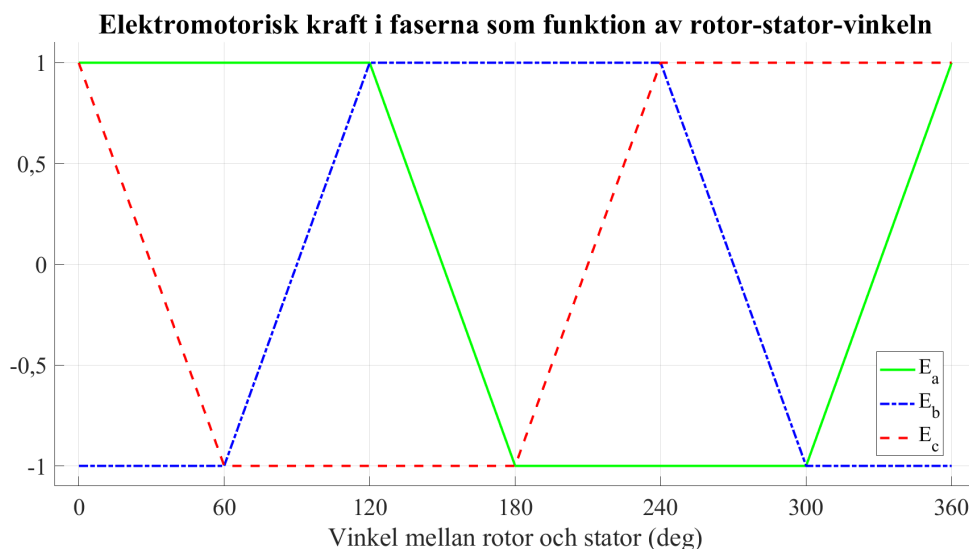
där U är den applicerade spänningen och R_0 är den ekvivalenta tomgångsresistansen.

2.2.4 BLDC-motorn

Den borstlösa likströmsmotorn (BLDC-motorn) beter sig invändigt som en växelströmsmotor (AC-motor) medan den från spänningskällan drar en likström [19], vilket gör att den klassas som en DC-motor. Det som skiljer BLDC-motorn från en traditionell borstad DC-motor är att den har elektroniska kommutatorer som byter riktning på strömmen i stället för mekaniska borstar. Fördelen med den elektriska kommutatorn är att det inte uppstår slitage som i en borstad DC-motor. Detta gör att BLDC-motorn är underhållsfri och mer effektiv då den har mindre friktion och växelförluster.

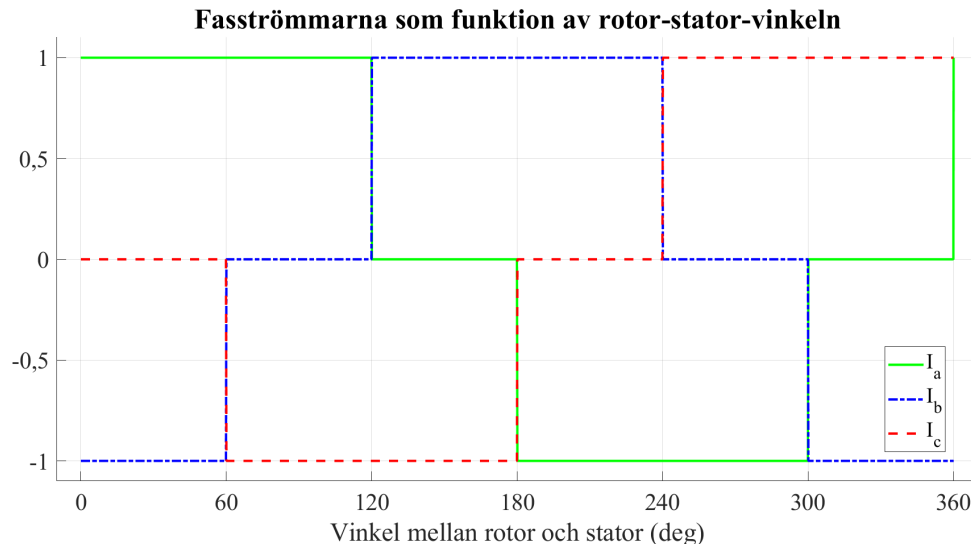
Det finns flera olika typer av BLDC-motorer, men den vanligaste är den trefasiga BLDC-motorn med trapetsformade mot-elektromotoriska krafter (mot-emk:er) [19]. Försättningsvis kommer teorin beröra funktionen för en trefasig BLDC-motor med trapetsformade mot-emk:er.

När motorn snurrar i magnetfältet induceras en elektromotorisk kraft vars riktning är motsatt den pålagda spänningen över motorn. Det är motorns konstruktion som bestämmer formen på emk:n. Varje fas i motorn har en emk som beror på vinkeln rotorn har i förhållande till statorn, vilket försättningsvis benämns motorns position. Nedanför, i figur 4, presenteras hur mot-emk:erna i en ideal BLDC-motor ser ut.



Figur 4: Mot-emk för de tre faserna a, b och c.

På bilden syns tre trapetsformade mot-emk:er, vilket tyder på att det är en trefasig BLDC-motor som är uppbyggd på sådant sätt att den ger trapetsformade mot-emk:er. I en ideal BLDC-motor är alltid en av emk:erna hög och den andra låg. I det första 60-graders intervallet är E_a hög medan E_b är låg. Då drivs strömmen in i fas a och ut i fas b, medan fas c inte för någon ström. Hur det ser ut under ett helt varv med strömmarna visas i figur 5.



Figur 5: Fasströmmarna för de tre faserna a, b och c.

I likhet med mot-emk:erna så är en av strömmarna hög och en annan låg. Det som skiljer sig från emk:erna är att i en av faserna går det ingen ström. För att uppnå denna styrning med strömmarna krävs det att vinkeln på motorn läses av. Ett av de vanligaste alternativen är att använda hall-sensorer för att läsa av motorns position [19]. Hall-sensorn skickar en signal vars styrka korrelerar till det omgivande magnetfältets styrka. Position skickas sedan till en växelriktare som styr spänningarna för motorn så att det flyter ström i rätt fas och motorn drivs jämnt. Växelriktaren ihop med hall-sensorn är den elektriska kommutatorn som används i motorn.

För att beskriva hur BLDC-motorn modelleras matematiskt hänvisas till Baldurssons rapport (avsnitt 3.3 [20]). I rapporten beskrivs hur mot-emk:erna beror på vinkelhastighet och hur momentet beror på fasströmmarna. Fortsatt så beskrivs hur motorn kan modelleras med hjälp av en tillståndsmodell. Även inverteraren beskrivs matematiskt, där funktionen beror på vinkelpositionen och vilka strömmar som är noll (avsnitt 4.2.2 [20]).

Det finns flera olika alternativ att styra motorn. Ett av de enklare alternativen är att styra en parameter så att den är inom ett visst intervall. Vanligtvis är det hastigheten eller momentet som styrs [20]. Om intervallet väljs för litet blir motorns gång ryckig och om den väljs för stor blir den i stället pendlande. För att styra momentet som motorn producerar styrs strömmen enligt

$$I_{\text{ref}} = \frac{T_{\text{ref}}}{k_t} \quad (16)$$

där k_t är motorns momentkonstant som anges i Nm/A. I_{ref} är DC strömmen som motorn drar vilket är lika med strömmen som flyter genom de två aktiva faserna i motorn.

2.2.5 Batteri

Batteriet behöver kunna lagra den energi som krävs av motorn och diverse tillkommande komponenter för att ta sig genom hela banan. Om effekten som krävs för att driva fordonet längs med banan mäts kan den totala energiförbrukningen räknas ut enligt

$$E_{\text{tot}} = \int P_{\text{fordon}} dt. \quad (17)$$

De två batterikemier som varit i fråga är bly-syra-batterier samt litiumjonbatterier. De skiljer sig åt i spänning och beroende på val behöver olika antal av respektive sort kopplas i serie för att uppnå den efterfrågade spänningen. Om litiumjonbatterier används kräver tävlingsreglerna att flamskydd och ett BMS (battery management system) används. Detta är inte något krav vid användning av bly-syra-batterier.

Bly-syra-batterier har en lång livslängd då de används på rätt sätt och är den äldsta varianten av laddningsbara batterier [21]. Standard för bly-syra-batterier är att de kan tillgodose en spänning på mellan 6 V och 12 V. För att batterierna alltid ska kunna förse den nominella spänningen är dess kapacitet vid full laddning högre än den nominella [22]. När batteriet används sjunker sedan spänningen tills dess att batteriet är urladdat.

2.2.6 Motorstyrning

För att kontrollera körningen av en BLDC-motor krävs i de flesta fall en dator som hanterar kommunikation med motorns motordrivare. Ett alternativ för detta ändamål är enkorts-datorn Raspberry Pi som både är liten och relativt enkel att implementera. Raspberry Pi kan förses med operativsystemet Raspberry Pi OS som är ett linux-baserat operativsystem med grafiskt gränssnitt. Detta gör det möjligt att utveckla programvara direkt på enheten. Raspberry PI har dessutom Wi-Fi, bluetooth, 4 usb-portar, och ett IO-gränssnitt vilket ger ett flertal möjligheter till kommunikation med andra enheter.

Ett vanligt sätt att skriva mjukvara för Raspberry Pi är att använda Python som är ett objektorienterat högnivåspråk. Python har många så kallade moduler som är utvecklade av tredje part. Moduler består av färdigutvecklad kod för godtyckliga ändamål. Genom att använda dessa kan man undvika att behöva programmera tekniskt komplicerade funktioner.

CANopen är ett kommunikationssystem som används inom automation, och är ett vanligt kommunikationsgränssnitt för motorstyrningar [23]. CANopen är baserat på CAN och använder dessutom samma hårdvara. Kommunikationen sker genom så kallade objekt som tillåter skrivning och läsning av data i anordningar som är anslutna till CAN-nätverket.

En teknik som används för att minska energikonsumtionen för fordon är pulse and glide (PnG). Principen bakom denna teknik är att man accelererar och retarderar ett fordon växelvis [24]. Till skillnad från körning med konstant hastighet kan detta förbättra en motors effektivitet genom att motorn kan drivas i sitt mest effektiva vridmoment.

3 Metod

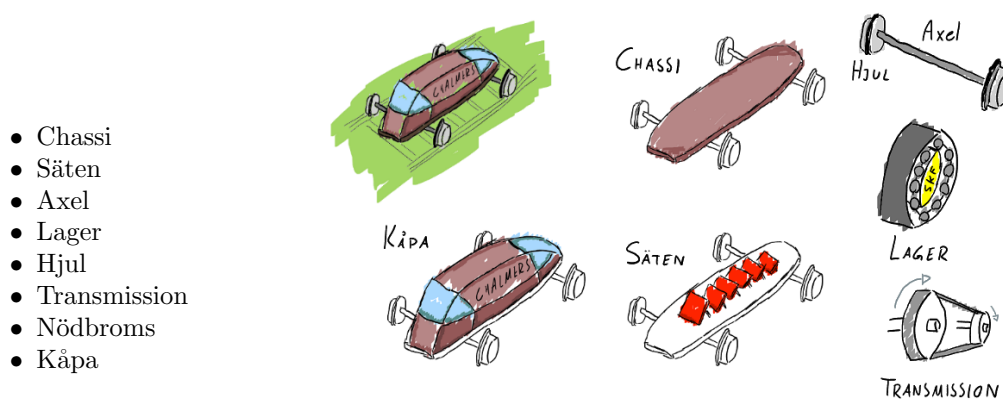
Som nämntes i avsnitt 1.2 delades arbetet upp i två delar, en mekanisk och en elektrisk del. Den mekaniska delen innefattade fordonets konstruktion och utformning medan den elektriska delen behandlade fordonets drivlina och styrning. Gemensamt för delarna var att utvecklingen grundade sig i preliminära beräkningar som ledde till att nya krav ställdes på fordonet. Med hjälp av simuleringar och detaljerade beräkningar förfinades kraven.

Från ett övergripande perspektiv följde den mekaniska delen och den elektroniska delen en liknande utvecklingsprocess, men på detaljnivå skilde de sig från varandra eftersom de olika delarna har olika förutsättningar. Arbetsprocesserna redovisas för sig för att tydliggöra vad som skiljer sig samt vilka unika aspekter som påverkar dem.

En övergripande metod som användes i projektet var omvärldsanalys som bestod till mesta del av att analysera tidigare fordon som varit med och tävlat i Delsbo Electric (genom referens [2]). Även rapporten från när Chalmers var med 2016 har legat som grund för detta projekt (referens [25]).

3.1 Mekanik

Den mekaniska konstruktionen behövde kunna rulla fritt på räls samt bestå av alla delar som behövs för att uppnå kraven som ställs på den. För att utveckla och förfina dessa utfördes en modularisering. Konstruktionen delades upp i följande delar (se figur 6):



Figur 6: Mekaniska komponenter

Det var viktigt för komponenterna att fungera oberoende av varandra för att möjliggöra utveckling och effektivisering av alla delar för sig. Det gemensamma målet var att skapa en konstruktion där vikt, rullmotstånd samt luftmotstånd var minimerade. De flesta delarna av konstruktionen dimensionerades efter hållfasthet och minimerad vikt där en del komponenter inte analyserades i detalj. Istället återanvändes vissa komponenter från kandidatarbetet 2016, eller köptes in och modifierades.

Hjulens diameter påverkar motorns egenskaper direkt i form av ökat/minskat vridmoment. Dimensionering av lager och axlar beror främst på belastning och dimensioner hos samtliga komponenter. Transmission är den direkta kopplingen mellan kraftkällan och önskad mekanisk verkan och påverkar därför motorns prestanda.

3.1.1 Konceptgenerering

Utifrån kravspecifikationen som presenteras i bilaga F, tillsammans med vikten av modularitet togs olika delkoncept fram som tillsammans skapade ett fungerande koncept. Det var viktigt att delkoncepten var lätt utbytbara, vilket möjliggör framtida byten och effektiviseringar av individuella komponenter utan att påverka fordonets struktur. Modulariseringen uppnåddes genom att undvika komponenter som är permanent monterade på fordonet. Ett exempel är att hjulen inte svetsas fast på axeln vilket skulle göra ett hjulbyte mer komplicerat än nödvändigt.

Vidare jämfördes de olika koncepten med diverse metoder för att visa fördelar och nackdelar, bland annat med en Pughmatris (information om matrisen i referens [26]). Koncepten realiserades sedan genom digitala modeller samt prototypbyggnad, vilket framhävde vilka koncept som kunde fungera, samt eventuella utvecklingsområden.

3.1.2 Chassi

Olika tillverkningsmetoder av chassi jämfördes tillsammans med befintliga möjligheter. Det beslutades om att använda ett befintligt alternativ för att spara tid och undvika en komplex tillverkningsprocess. För att möjliggöra montering av komponenter till chassit borrades hål utefter kraven från övriga komponenter. En nos tillverkades av plywood för att förlänga fordonet och utöka benutrymme samt ge plats åt batterier och styrenhet.

3.1.3 Säten

Fordonets sex säten ritades och sågades ut ur en plywoodskiva. Ett stöd till varje säte sågades ut, sådant att plywoodskivan fick en 60-graders vinkel mot golvet, och anpassades efter axelbehov samt utrymme. Stöden skruvades fast på respektive säte och alla säten monterades i golvet med gångjärn.

3.1.4 Hjulaxlar

För att dimensionera axlarna efter spårvidd och uppskattad belastning användes snittmetoden. Axeln delades upp i snitt och uttryck för tvärkraft och moment utvärderades för varje snitt baserat på krafterna på axeln. Uttrycken för moment användes sedan i elastiska linjens ekvation och integrerades för att ta fram vinkel och utböjning. Genom att flytta på krafterna kunde olika monteringsmöjligheter jämföras. Värderna för olika axelstorlekar sammanställdes i tabeller. De yttre axlarna fästes i golvet med axelklampor, och de inre hjulaxlarna med de yttre axlarna via lager och lagerhus.

3.1.5 Lager

I den inledande processen av att välja lager formulerades ett antal grundläggande krav. Dessa jämfördes mot egenskaper hos lager i standardutförande och användes som grund i val av lagertyp. Lasten på lagret undersöktes och med avseende på axelns diameter valdes ett lämpligt lager som uppfyllde kraven. Lagrets monteringsdata användes för att designa ett lagerhus som tillverkades genom att vattenskära runda aluminiumbitar ur en tjockare plåt. Dessa svarvades till önskat mått och monteringshål skapades där det fanns behov.

3.1.6 Hjul

För tillverkning av nya hjul undersöktes gjutmöjligheter i aluminium och stål. Sandgjutning framstod som ett möjligt alternativ för nytillverkning. Gällande modifikation av befintliga hjul undersöktes möjligheterna att stärka kontaktytan med metall.

3.1.7 Transmission

Efter givet utväxlingsintervall som räknades fram från motorsimuleringar (se avsnitt 3.2.2) införskaffades en kedjeväxel med uppfyllt förhållandekrav. För att möjliggöra fästning i axel och motor tillverkades fyra komponenter: Monteringsblock, adapter för drev vid motor, adapter för drev vid axel samt en hylsa för adaptorn vid motorn. En distansbricka tillverkades därefter för att säkerställa lagerlösning.

3.1.8 Nödbroms

Alternativet att använda en befintlig bromsskiva tillsammans med dess adapter undersöktes. För att möjliggöra montering av en bromsskiva anpassades en befintlig adapter efter axelkonstruktionens mått och utrymme. Ett monteringsblock för ett bromsok ritades och skars ut i en vattenskarare. En monteringspunkt för handtaget skapades i nosen i form av en metallstång.

3.1.9 Kåpa

För utveckling av kåpan användes Blender 3.4 för modellering och SimFlow 4.0 för aerodynamiksimuleringar. Utvecklingsprocessen utgick från de bestämda chassidimensionerna och var därefter iterativ, där

olika kåputformningar optimerades för att minimera luftmotstånd. Emellertid behövde kåpan även modifieras för att ge utrymme för samtliga passagerare samt att bevara enkelhet att bygga. Slutligen valdes ett av alternativen med minst luftmotstånd. Kåpan byggdes ihop med PVC-rör som sågades till längd och sattes ihop med knutpunkter som 3D-printades.

3.2 Elektronik

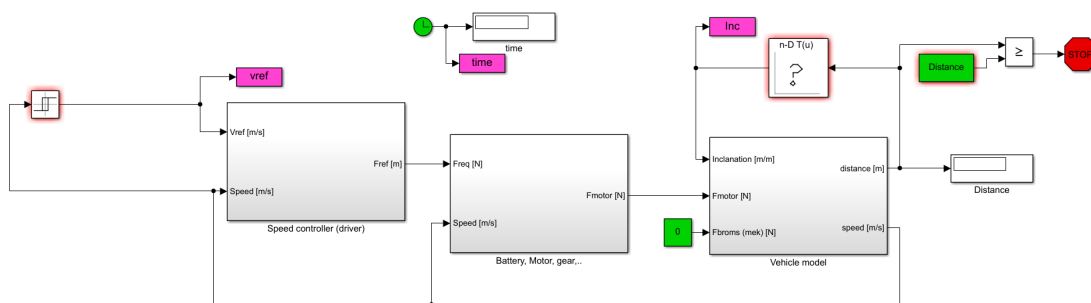
Fordonets elektronik delades in i motor, batteri och styrdator. Programmen Matlab och Simulink användes för att simulera körning med fordonet. Baserat på simuleringresultatet kunde motor och batteri väljas.

3.2.1 Överblick av Matlab/Simulink modellen

För att simulera fordonet med hänsyn till de elektroniska komponenterna användes Matlab och Simulink. En modell för simuleringen från år 2016 när Chalmers var med i tävlingen, vidareutvecklades i detta projekt [25]. Ytterligare utvecklades en mer avancerad Simulink-modell för att simulera motorn, vilket presenteras efter den första Simulink modellen.

I Matlab-modellen skickas värden in till Simulink modellen som används för simulering. Parametrarna var konstanta under simuleringstiden och vissa räknades ut med hjälp av enklare ekvationer, som presenteras i avsnitt 4.2.1. Vissa av parametrarna var fasta och medan andra ändrade sig mellan simuleringstillfällena. Dessa presenteras som bilaga G.

Den första Simulinkmodellen består av tre submoduler, vilket är presenterat i figur 7.



Figur 7: Simuleringsmodellen i Simulink

Submodulerna är de tre grå rutorna, där den första är PID-regulatorn vars ingångar är referenshastigheten och den simulerade hastigheten. Med hjälp av de två parametrarna bestämmer den vilken kraft som ska efterfrågas av motorn.

Den efterfrågade kraften skickas vidare till drivline-submodulen. Kraften går genom transmissionen där förlusteffekter adderas för att få ut vilken effekt som krävs av motorn, vilket beskrivs av

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{mek}}}{\eta_{\text{planet}} \cdot \eta_{\text{kugg}}}. \quad (18)$$

In i modulen går också fordonets hastighet, vilken omvandlas till motorns varvtal med ekvation 13. Med hjälp av varvtalet går det att utläsa från en graf (bilaga G) vilken verkningsgrad motorn har. Med hjälp av den utvärderade verkningsgraden går det att addera förlusteffekter till motorn vilket totalt blir den effekt som dras från batteriet, enligt följande ekvation.

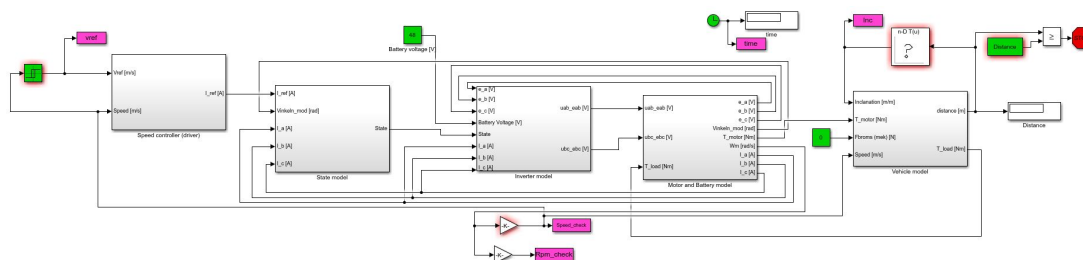
$$P_{\text{batt}} = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}}. \quad (19)$$

Batteriets effekt integreras sedan över tid för att få den totala energiförbrukningen för resan enligt ekvation 17.

Den efterfrågade kraften från PID-regulatorn skickas också vidare till den sista submodulen. Den sista modulen räknar på alla krafter som verkar på fordonet för att bestämma accelerationen, hastigheten och

sträcka som fordonet har färdats (enligt avsnitt 2.1). In i submodulen går också banans lutning, vilken bestäms från en graf (bilaga G) utifrån på hur långt fordonet har färdats.

Simulink-modellen uppdaterades också till att inkludera en mer detaljerad simulering av motorn för att räkna på dess effektivitet. Den uppdaterade Simulink-modellen visas i figur 8.



Figur 8: Uppdaterad Simulink modell

Den uppdaterade modellen består av fem submoduler i stället för tre som det var tidigare i figur 7. Den första och den sista submodulen är nästan oförändrade medan den i mitten har blivit utbytt mot tre andra. Den första submodulen har ändrats genom att multiplicera kraften med hjulradien för att få momentet och sedan använt ekvation 16, för att omvandla momentet till en referensström.

Referensströmmen skickas vidare in i den andra modulen där strömmarna från motorn jämförs med referensströmmen för att bestämma om motorn ska försöka minska strömmarna. Även motorns elektriska position skickas in i denna modul för att bestämma i vilket läge växelriktarmodellen ska vara i. Utifrån hur motorströmmarna förhåller sig till referensströmmen och vilken position motorn är i, skickas vilket tillstånd växelriktaren ska vara i. Tillståndet matas in i nästa modul, vilket är växelriktarmodulen.

Växelriktarmodulen använder tillståndssignalen ihop med batterispänningen, motorns strömmar och mot-emk:er för att bestämma vilken spänning som ska läggas över respektive fas. Hur detta görs i detalj beskrivs av tabellerna 4.2 och 4.3 i avsnitt 4.2 i Baldursson rapport ([20]). Fasspänningarna skickas vidare till den näst sista modulen som simulerar motorn.

I motor-modulen beräknas strömmarna, motorns position och varvtalet enligt tillståndsmodellerna beskrivna av ekvation 3.12 och 3.13 i Baldurssons rapport. Även mot-emk:erna och motorns vridmoment räknas ut enligt ekvationerna 3.5, 3.6, 3.7 och 3.8 i Baldurssons rapport. Slutligen beräknades den totala effekten genom att addera till motorns effekt (ekvation 18) kopparförlusterna (ekvation 14) och en konstant tomgångseffekt.

3.2.2 Motor

Med hjälp av simuleringen uppskattades vilken effekt och vridmoment som skulle krävas för att ta sig igenom tävlingsbanan. Utifrån dessa uppgifter valdes en motor som är stark nog att driva fordonet genom banan. Vid valet av motor premierades en hög verkningsgrad och lågt varvtalet. Den höga verkningsgraden är viktig för att minska förlusterna i motorn och på så sätt öka fordonets energieffektivitet enligt ekvation 19. Varvtalet behövde hållas lågt för att minska utväxlingen som krävs av transmissionen; ju större utväxling desto sämre effektivitet får transmissionen, enligt teorin i avsnitt 2.1.4.

3.2.3 Test av motor i bromsbänk

För att testa motorn och den tillhörande växellådans verkningsgrad samt ta reda på hur den reagerar då den lastas olika tungt utfördes tester i en bromsbänk. Detta gjordes genom att ge motorn en referens för önskat varvtalet med hjälp av Nanotech's program *Plug & Drive* ([27]) och därefter låta motorn accelerera upp till det önskade varvtalet. Motorn kunde sedan belastas genom att lägga på ett visst moment som justerades via en ström i bromsbänken. Från mätningarna erhöles även strömmen i motorn och med en konstant spänning möjliggjorde detta att effekten in kunde beräknas. Varvtalet i rpm omvandlades till radianer per sekund och detta gav den mekaniska effekten. Med kända värden på effekt in och mekanisk effekt kunde verkningsgraden för olika tunga laster vid olika varvtalet erhållas.

3.2.4 Batteri

Batterikapaciteten bestämdes utifrån simuleringen samt verkliga tester. I valet av batteri togs i beaktande att batteriets spänning sjunker i takt med att laddningsnivån sjunker. För att fatta ett beslut kring batterikemi undersöktes möjligheterna för BMS samt flamskydd för batteriet vid ett eventuellt val av litiumjonbatterier.

3.2.5 Motorstyrning med Raspberry Pi & Python

För att styra motorn valdes en Raspberry Pi 3b+ med operativsystemet Raspberry Pi OS. Python valdes som programmeringsspråk för mjukvaru-utvecklingen. Den specifika implementeringen samt hur det slutliga körschemat skulle programmeras bestämdes utifrån motorval, simuleringsmodellen och verkliga tester. Följande frågeställningar undersöktes, där fokus låg på minimering av energiförbrukning.

- Hur snabbt ska fordonet accelereras?
- Vilken hastighet ska fordonet åka i?
- Är det effektivt med puls and glide?
- Vad är den mest optimala puls and glide cykeln?

4 Genomförande

I detta kapitel presenteras utvecklingsprocessen, från hur teorin i avsnitt 2 applicerades till konstruktion och uppbyggnad av fordonet. Eftersom projektet till stor del utförts i två separata delar, mekanik och elektronik, sker en naturlig uppdelning av kapitlet därefter.

I början av projektet utfördes en omvärldsanalys av framför allt tidigare tävlande fordon vilket gav inspiration samt en överblick på uppgiften. Framgångsrika fordon hade alla en långsmal konstruktion med sex sittplatser på rad, vilket optimerar luftmotstånd per sittplats samtidigt som alla möjliga sittplatser utnyttjas. Dessa fordon använde sig även av en yttre, orörlig axel runt om den inre roterande axeln, för att placera kullagren långt ut och således minimera den inre axelns utböjning. Fordonen hade alla även en heltäckande kåpa för att minimera luftmotstånd. För att driva fordonen användes en AC- eller BLDC-motor som var monterad längst ut på en av de yttre axlarna.

Utöver bildinformation från nyligen deltagande fordon i tävlingen fanns tillgång till Chalmers tidigare tävlande fordon från 2016 ([25]). Detta skilde sig mycket från de framgångsrika fordonen som beskrivs i föregående stycke; det var ett öppet (ingen kåpa), två personer brett fordon med fyra sittplatser samt en cykelbroms, och hade i tävlingen presterat förhållandevis dåligt (sistaplats med $3,25 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$ jämfört med $1,25 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$ som var förra årets sistaplats [28]). Det fanns dock delar av fordonet som hade potential att återanvändas, exempelvis hjulen och axlarna.

En kravspecifikation utfärdades därefter i enlighet med omvärldsanalysen, regler från tävlingen Delsbo Electric, hållfasthetskriterier samt modularitet för framtida kandidatarbeten. Kravspecifikationen lades som grund för val av kommande komponenter och presenteras i bilaga F. För att ha underlag för fordonskonstruktion skapades, med hjälp av handledarexpertis från Björn Pålsson, fordonsparametrar där komponenters utföranden kan undersökas och sedan konstrueras. Dokumentet presenteras i bilaga E.

Under projektets gång tillkom information om att Delsbo Electric-tävlingen genomgick en omställning vilket medförde att tävlingsplatsen byttes från Delsbo till Hudiksvall, vars tävlingssträcka bestod av en betydligt kortare distans samt brantare backe. Det påverkade arbetet i den mån att simuleringarna och kraven för motorn var anpassade för den nya sträckan, vilket beskrivs i avsnitt 4.2.1. Sträckans koordinatdata erhöles med hjälp av Google Earth vilket, trots att värdena inte var av samma noggrannhet som en mätenhets, gav data för hur fordonet kommer att transporteras på spåret. Kraven på kravspecifikationen som innefattar sträckans utförande valdes dock att behållas då det ansågs vara fördelaktigt att kunna mäta energidata med längre sträcka vilket öppnar upp för undersökning av andra, längre järnvägssträckor för tester.

4.1 Mekanik

I detta avsnitt presenteras mekanikdelen av genomförandet. Inledningsvis följer konceptgenerering och framtagning av det slutgiltiga utförandet av fordonet vilket kompletteras med framtagandet av samtliga komponenter. Tillverkningsdetaljer presenteras med beskrivande text samt renderingar. Komponenternas ritningar samt sammanställningsritningar presenteras i bilaga I respektive J.

4.1.1 Konceptgenerering

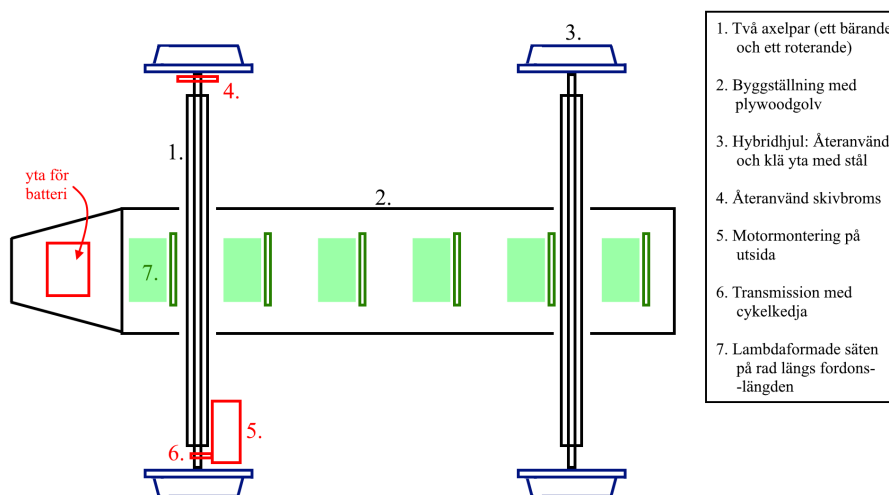
Efter omvärldsanalys konstaterades att fordonets två primära mekaniska moduler är dess kåpa som bör vara av- och påtagbar samt dess lastbärande struktur, eller huvudstrukturen, som består av golv och axlar med tillhörande komponenter. De två modulerna ansågs vara till en så pass stor del oberoende av varandra att de kan hanteras separat när det kommer till konceptgenerering.

Huvudstrukturen består av ett flertal komponenter, se figur 6 som i sin tur kan ha olika typer av utföranden. Komponenterna, som finns att se i bilaga A, kombinerades till 2560 koncept vilket reducerades ned till sex lämpliga koncept med hjälp av en morfologisk matris. De koncepten finns i bilaga B. Efter framtagningen utfördes en vidare eliminering med hjälp av tre Pugh-matris-iterationer (Beskrivs i [26]) där koncepten jämfördes med avseende på åtta olika viktade kriterier, se bilaga C, där koncept IV fick bästa resultat vid varje iteration. Detta koncept valdes således till den design som fordonets huvudstruktur ska ha. Sammansättningen ses i tabell 1.

Tabell 1: Valt koncept.

Koncept	Chassi	Axel	Hjul	Broms
IV	Ställning	Två axlar	Hybrid	Återanvänd
	Golv	Säten	Montering	Transmission
	Plywood	Lambda	Utsida	Kedja

Konceptets preliminära utförande var en byggställning som chassi, två uppsättningar axelpar (ett bärande och ett roterande), hybridhjul, skivbroms som återanvändes, plywoodgolv, sex säten med lambdaform i linje längs fordonets längd, motor på utsida och transmission från motor till hjul med hjälp av kedja. En komponent som inte behandlades vid konceptgenereringen var lager då det är en nödvändig komponent för att möjliggöra relativrörelse mellan två komponenter och därmed beslutades vara onödig att ta med i framtagningsfasen. Den konceptuella skissen finns att se i figur 9. Batteriet placerades på en yta i fronten för snabb montering och enklare åtkomlighet för den främre passageraren.



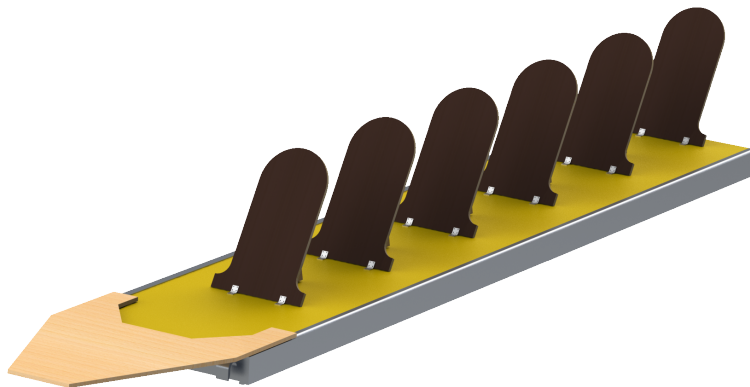
Figur 9: Skiss av valt koncept.

4.1.2 Chassi

För att dimensionera chassits bredd och längd utfördes ett så kallat sitttest där samtliga i gruppen satte sig tätt på rad och det totala fotavtrycket mättes, samt separata sitttest med säten från 2016. Resultatet var att golvet behövde vara ungefär tre meter långt och en halvmeter brett.

Genom att utföra testet av dimensionerna hos den föreslagna strukturen, drogs slutsatsen att ett fallskydd från en byggställning skulle erbjuda en lämplig grund för montering av golv och axlar. Trots detta visade testresultaten av ett befintligt fallskydd att dess struktur inte var tillräckligt stark vilket skulle ge oacceptabel deformation. Baserat på dessa observationer valdes en ställningsgolvstruktur som det mest lämpliga alternativet för ändamålet. Mer specifikt valdes "U-Plattformar 61 (glasfiber)" med måtten $3,07\text{ m} \times 0,61\text{ m}$ som projektet fick sponsrat från företaget Monzon. För att möjliggöra montering av komponenter borrades hål för nos, hjulaxel samt ryggestöd. Nosen, vars huvudsakliga funktion är att ge extra fotutrymme samt plats för elektronik, sågades ut ur plywood och monterades med M8-skruvar och muttrar, se figur 10.

Med ställningsgolvet som utförande försvann behovet av golv, då gångplattan bestod av en glasfiberskiva, vilket ansågs vara fördelaktigt då den totala vikten för fordonet således minskade.



Figur 10: 3D-Rendering av ställningsgolv med monterade säten och plywoodnos.

4.1.3 Säten

De obligatoriska ryggstöden för varje sittplats utformades likt de som användes i Chalmers fordon 2016, med en platt plywoodskiva och en stödplanka. Dock gjordes plywoodskivan smalare med rundade hörn för att maximera benutrymme för passagerarna som sitter bakom. Ryggstöden monterades, likt tidigare fordon, med gångjärn så att de kan fällas ned för att underlätta påstigning och transport.

Plywoodskivorna sågades ut med bandsåg och stödplankorna med fogsvans, sådant att ena sidan av plankan fick 45° vinkel och den andra sidan 15° vinkel relativt kortsidan, vilket summeras till en ryggstödsvinkel på 60° . I två av plankorna sågades extra material ut med bandsåg för att ge utrymme för axlarna mellan ryggstöd och stödplanka. En plankan gjordes även betydligt mindre än de andra; detta så att sätet längst bak kunde placeras så långt bak som möjligt, vilket ger mer utrymme åt övriga sittplatser. Stödplankorna fästes i plywoodskivorna med två träskruvar, och gångjärnen i skivan med två stycken M5-skruvar (med muttrar och brickor) per gångjärn. I figur 10 syns, utöver en 3D-rendering av chassit, även ryggstöden monterade i golvet.

4.1.4 Hjulaxlar

Med hjälp av elastiska linjens ekvation (se ekvation 4) kunde ett uttryck för hjulaxelns utböjning härledas, se ekvation 20. Uttrycket gäller för mitten av axeln där M beskriver det maximala böjmomentet i axeln och L_{lager} är avståndet mellan axelns fästpunkter i dess lager. Axelns böjning utanför lagrena analyserades och ansågs försumbar, då avståndet mellan hjul och lager minimerats.

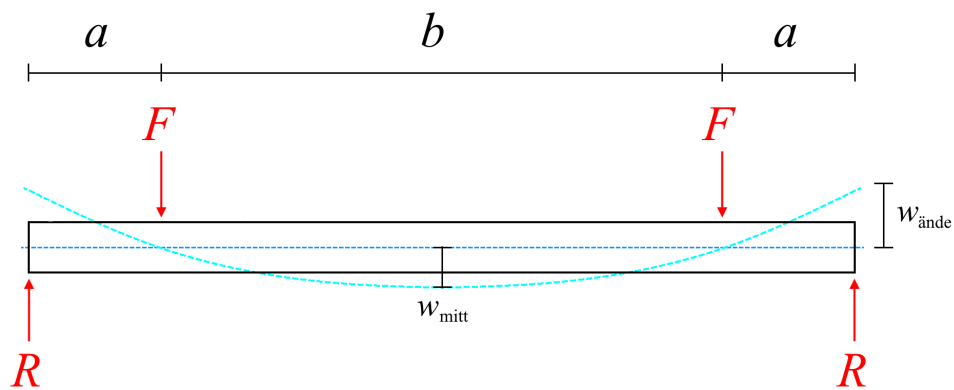
$$w_{\text{mitt}} = \frac{ML_{\text{lager}}^2}{8EI}. \quad (20)$$

För det yttre röret kring axeln kan samma fall användas i motsatt scenario. Röret belastas på två punkter symmetriskt kring mitten och är monterat i respektive lager. Avståndet mellan golvets fästpunkter i axeln är liten vilket gör utböjningen vid rörets ände dominant. Denna utböjning beskrivs av $w_{\text{ände}}$ i ekvation 21 där $L_{\text{ände}}$ är avståndet från golvets fästpunkt till rörets ände.

$$w_{\text{ände}} = \frac{ML_{\text{ände}}^2}{2EI} + L_{\text{ände}} \sin\left(\frac{ML_{\text{lager}}}{2EI}\right). \quad (21)$$

Momentet beskrivs av ekvation 22, som baseras på figur 11.

$$M = Fa = \frac{m_{\text{tot}}g}{4}a. \quad (22)$$

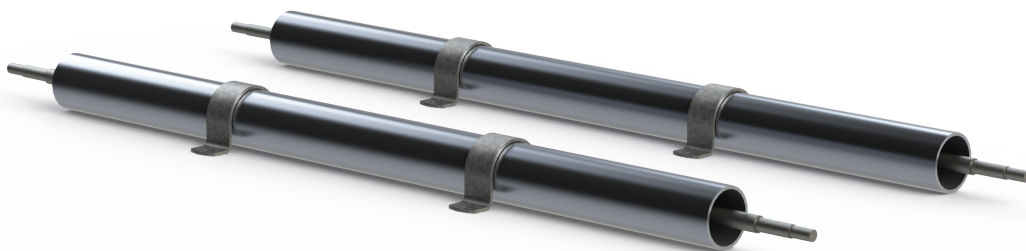


Figur 11: Utböjning av axlar

Axlarna dimensioneras efter utböjning då valda lager har ett krav på snedställning, se avsnitt 4.1.5. Samtliga axlar som uppfyller kraven på utböjning klarar även belastningarna på axlarna, därmed är utböjningen den dimensionerande faktorn. Uttrycken användes för flera axlar och rör av både stål och aluminium. Resultaten sammanställdes i två tabeller som användes för att jämföra alternativen inför ett slutgiltigt beslut; dessa tabeller presenteras i bilaga D. Utifrån tabellerna beslutades att hjulaxlarna från 2016 skulle återvändas som inre axlar och att de yttre axlarna skulle bestå av aluminiumrör med ytterdiameter $D = 90$ mm och tjocklek $t = 5$ mm. Varför detta rör valdes över exempelvis aluminium ($D = 100$ mm, $t = 4$ mm) är att det gick att beställa som tre meter, jämfört med sex meter.

Aluminiumröret delades till två rör som kortades ned till 1320 mm respektive 1360 mm, det ena något kortare än det andra för att ge utrymme för bromsskiva och drev med tillhörande monteringslösningar. En av de återanvända inre axlarna bearbetades; ett kilspår på bromssidan och ett skruvhål på drevsidan frästes in i axeln för att möjliggöra momentöverföring genom de två komponenterna.

De yttre röraxlarna monterades på chassit med fyra inköpta 89 mm-diameter rörklämmor från OFAB som i sin tur fästes i ställningsgolvet via åtta 120 mm långa M12 skruvar med muttrar och brickor. De inre axlarna monterades i de yttre axlarna via lagren och specialgjorda lagerhus, vilka beskrivs i djupare detalj i nästkommande avsnitt. Figur 12 visar en rendering av axlarna med rörklämmor.



Figur 12: Hjulaxlar med rörklämmor.

4.1.5 Lager

Val av lager begränsades snabbt till rullningslager då det är bäst lämpat för ändamålet. Vidare ställs ett krav på att lagret ska kunna ta upp vinkelfel då axeln böjs under last. Det ska monteras på den befintliga axeln med en diameter på 25 mm och få plats i ett lagerhus som kan placeras i röret med innerdiameter 80 mm. Lagret kommer användas utomhus och är delvis exponerat vilket gör att tätningar är lämpliga. Lasten på ett lager uppskattas till ett högsta värde av 1470 N enligt

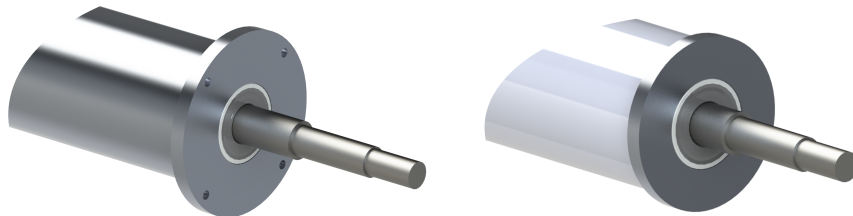
$$\frac{g(m_{\text{fordon}} + n_{\text{personer}} \cdot 80 \text{ kg})}{n_{\text{lager}}} = \frac{g(120 + 6 \cdot 80)}{4} \approx 1470 \text{ N}, \quad (23)$$

som baseras på ekvation 1. Den uppskattade massan är för högsta möjliga fall och kommer vara lägre om fordonet viktoptimeras samt passagerarvikten minskas. Med en relativt låg lagerlast samt krav på självinställande valdes lager av typen sfäriska kullager. Av möjliga sfäriska kullager med en innerring på 25 mm valdes det minsta möjliga tätade lagret: 2205 E-2RS1TN9 [8]. Det har ett dynamiskt bärighetstal på 14,3 kN och ett statiskt bärighetstal på 4 kN vilket gör det lämpligt för lasterna från fordonet. Då lagret ej är i bruk under längre perioder och används i utomhusmiljöer där smuts kan förekomma ansågs det att livslängdsberäkningar ej var nödvändigt då lagret med största sannolikhet fördärvas av föroreningar eller misskötsel innan utmattning.

Lagret ställer följande krav på lagerhus:

- Ytterdiameter: 52 mm
- Yttering: Max 46,4 mm
- Innerring: 30,6 – 31 mm
- Kälradie: Max 1 mm

För att lagrena skulle fästas på de bärande aluminiumaxlarna och hållas på plats tillverkades olika lagerhus för den bakre och den främre axeln (se figur 13) samt två distansbrickor som beskrivs nedan.



Figur 13: Lagerhus för den drivande respektive den fria hjulaxeln.

- **Lagerhus på bakre hjulaxel**

Vid den bakre icke-drivande hjulaxeln konstruerades lagerhus vars uppgift enbart var att fungera som lagerhus som fästs i yttre axeln. De tillverkades genom att vattenskärnas och sedan bearbetas i svarv.

- **Lagerhus på drivande hjulaxel**

Dessa lagerhus hade, bortsett från deras huvudfunktion, ytterligare en funktion; de har skruvhål för monteringsbrickor som beskrivs vidare i avsnitt 4.1.7 respektive 4.1.8. Tillverkningsmetoden var vattenskarvning tillsammans med svarvning. Designen skiljer sig åt i att flänsarna är bredare för att möjliggöra yta för fyra gängade hål. Dessa hål borrades ut med hjälp av en fräs och gängades därefter för hand.

- **Distansbrickor**

Lagrena har naturlig låsning i riktning mot fordonets centrum genom att lagerhuset förhindrar yttringen att förflyttas. Dock saknades lagerlåsnings ut från fordonet. Detta uppfylldes genom att svarva ut två tunna aluminiumbrickor som placeras mellan lagrena och lagerstoppen vilka återanvändes från projektet 2016. Distansbrickorna användes enbart på bakre hjulaxeln då komponenter vid främre kommer att fungera som lagerstopp.

4.1.6 Hjul

För hjulen undersöktes möjligheten att tillverka hjul med optimerade mått och låg vikt i ett hårt material. Syftet med nya hjul var att eventuellt minska vikten men främst ge lägre rullmotstånd med ett hårdare material. Efter överläggning ansågs det ej rimligt inom tidsramen att tillverka hjul från grunden. I stället återanvänds hjulen som använts 2016. De är tillverkade i plast och har följande mått:

- Yttre diameter: 457 mm

- Inre diameter: 469 mm
- Bredd: 95 mm
- Konicitet: 1:16
- Fläns längd: 26 mm
- Fläns bredd: 22 mm

Vidare undersöktes möjligheterna att förse de befintliga hjulen med en hårdare kontaktyta för att minimera F_R och minska deformationen mot rälsen. Ett hybridformat var även det bästa enligt konceptgenereringen. Efter vidare undersökning ansågs det för tidskrävande att utföra en sådan modifikation med ett bra resultat och det beslutades att använda de befintliga hjulen i deras nuvarande utförande.

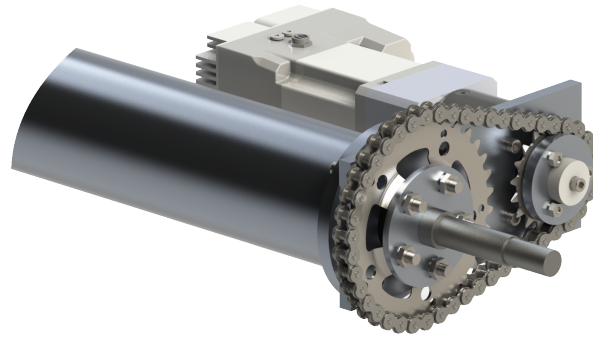


Figur 14: Befintliga hjul.

4.1.7 Transmission

Efter motorsimuleringar, som beskrivs i avsnitt 4.2.2, valdes en motor med tillhörande planetväxel med utväxling 10:1 [29]. Som beskrivet i avsnitt 4.2.2 fanns det ett intervall av utväxling för att uppfylla hastighetskravet i enlighet med reglerna från Delsbo Electric. Med bidraget från planetväxeln fanns det ett krav hos kedjeväxeln att uppnå en utväxling mellan 2,36:1 och 1,89:1 där ett lägre förhållande skulle medföra högre medelhastighet vid ett givet varvtal.

Då transmissionen skulle bestå av en kedjekoppling valdes cykelkomponenter som en lösning som både var tidseffektiv och ekonomiskt fördelaktig. Två drev köptes in från det lokala företaget Cykelfiket med 34 respektive 18 tänder vilket gav en lokal utväxling på 1,89:1. Detta tillsammans med planetväxeln skulle bidra till en total utväxling för drivlinan på 18,9:1 vilket precis hamnar innanför intervallet. Kedja för dreven införskaffades från Biltema och var en vanlig cykelkedja med justerbar länklängd. Se figur 15 för en rendering av transmissionen.



Figur 15: 3D-rendering av CAD-modellen på transmissionen.

Vid konstruktionen tillkom ytterligare komponenter för att de ovannämnda delarna ska uppfylla drivlinans funktion.

- **Monteringsblock**

Monteringsblocket tillhandahåller ett avstånd mellan motorn och axeln samtidigt som dess styvhet garanterar ett radiellt referensplan som håller komponenterna på plats. För att kunna montera på kedjan och justera kedjespänning designades den med slitsade hål på ena sidan. Monteringsblocket tillverkades genom användning av vattenskräpare samt fräs från Fuse-labbet. Se figur 16, komponent A.

- **Drevadapter för motor samt hylsa**

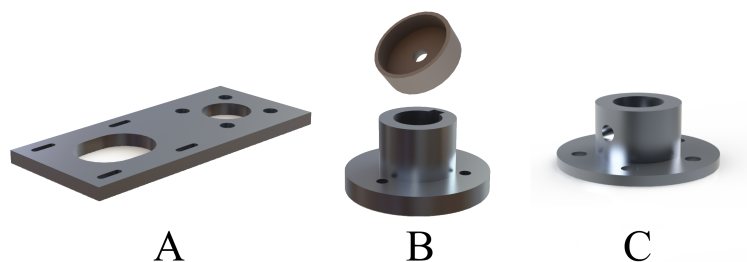
För att drevet vid motorns axel ska passa planetväxels utgående axel tillverkades en adapter utifrån mått tagna från växellådans hemsida (se referens [29]) och drevets mått. Adaptern tillverkades genom vattenskrävning av en 30 mm tjock aluminiumplåt som sedan bearbetades i en svarv på Fuse-labbet. För att adaptern inte ska röra sig axiellt tillverkades även en hylsa som skruvas på på utsidan in i planetväxels utgående axel. Se figur 16, komponenter B.

- **Drevadapter för axel**

Likt drevadaptern för motorn konstruerades och tillverkades denna utifrån mått givna från axelns dimensioner samt drevet för axeln. I och med att adaptern inte monteras på axelns slut designades ett gängat hål för en stoppskruv. Syftet med stoppskruven är att överföra momentet till axeln samt spänna fast komponenten axiellt. Adaptern tillverkades med samma metod som förra adaptern. Se figur 16, komponent C.

- **Bricka**

Lagret vid transmissionens sida var i behov av axiell fastspänning. Därför tillverkades en bricka vars uppgift var att fylla avståndet mellan lagret och drevadaptern. Brickan tillverkades genom att svarva ned ett tunt aluminiumrör med en tjocklek som inte översteg lagrets tillåtna kontaktyta på innerringen.



Figur 16: 3D-Rendering av tillverkade transmissionsdetaljer.

4.1.8 Nödbroms

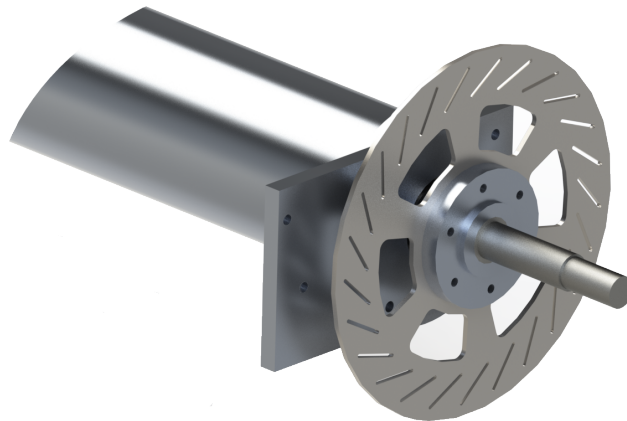
Då broms ej ansågs vara ett område som gynnar fordonets prestanda återanvändes den redan fullt tillräckliga hydrauliska bromsen från föregående fordon. Den fylldes på med bromsvätska samt kompletterades med en 90°-adapter för att möjliggöra en infästning vinkelrätt mot hjulaxelns riktning. Bromsskivan återanvändes också, men justeringar och tillverkningar utfördes för att möjliggöra en uppdaterad bromsanordning. Se figur 17 för en rendering av bromsmodulen utan bromsok.

- **Monteringsblock**

För att fästa bromsoket på ett lämpligt avstånd tillverkades ett monteringsblock med konstruktionsdesign tagen från den i avsnitt 4.1.7 med skillnaderna att hålen inte var slitsade samt att det inte fanns några hål för montering av planetväxel. Den tillverkades genom vattenskrining och kopplades på lagerhuset där hålplacering kunde märkas ut genom att för hand se vilken placering för bromsoket som var optimal gentemot bromsskivan.

- **Bromsadapter**

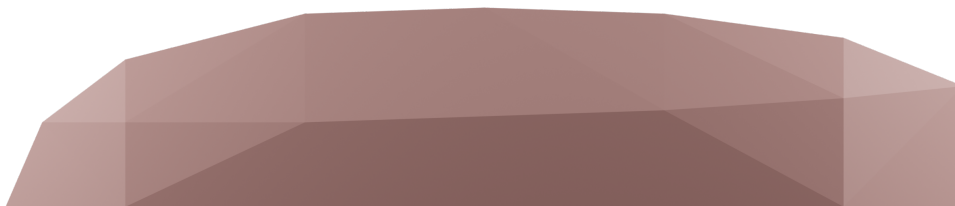
Från fordonet som tillverkades 2016 återanvändes bromsadaptern som kopplar samman bromsskivan med axeln. Den bearbetades dock till en ny design då utrymmet var betydligt begränsat. Ändan på adaptern designades för att agera lagerlås. Den svarvades ned i längd samt tjocklek och fick ytterligare ett gängat skruvhål för att spänna fast komponenten i axiell riktning.



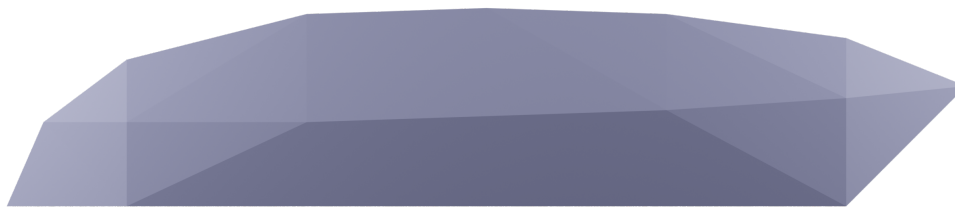
Figur 17: 3D-Rendering av bromsmodul utan bromsok.

4.1.9 Kåpa

Enligt den iterativa processen som beskrevs i avsnitt 3.1.9 modellerades totalt 23 stycken kåpor med utrymme för sex passagerare och med ställningsgolvet från Monzon som utgångspunkt. Från den första kåpan som modellerades till den sista mer än halverades luftmotståndet från 2,65 N till 1,11 N vid en hastighet på $4 \text{ m/s} = 14,4 \text{ km/h}$. I slutändan stod det mellan två alternativ, kåpa A och kåpa B, vilka illustreras i figur 18 respektive figur 19.



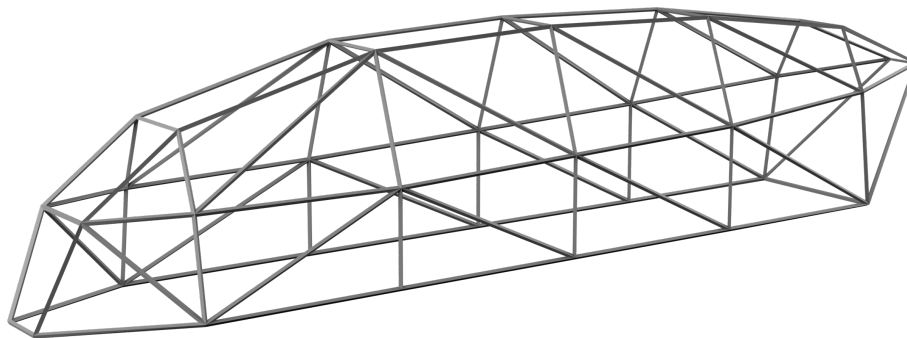
Figur 18: Kåpa A sidprofil.



Figur 19: Kåpa B sidprofil.

Skillnaden mellan kåpa A och B i aerodynamisk prestanda var $\Delta F_D = 0,12 \text{ N}$, vilket motsvarar 3 % av de 3,9 N som hela fordonet med kåpa B utsattes för under simulering. I kombination med att luftmotstånd är en relativt liten källa till energiförlust ($3,9 \text{ N} \cdot 1000 \text{ m} / (3600 \text{ s} \cdot 6 \text{ Personer}) \approx 0,18 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$) kunde denna skillnad mellan de två kåporna försummas. Det andra som skilde kåporna åt var utseendet på bakkdelen; kåpa B valdes eftersom den ansågs se bäst ut.

Utifrån 3D-modellen av kåpa B framställdes en motsvarande trådramsmodell, se figur 20, som illustrerar hur kåpan ser ut utan vinylfilm. Utifrån trådramsmodellen modellerades knutpunkter, som 3D-printades, för plaströren. Eftersom axlarna fästes ovanpå golvet modellerades ytterligare knutpunkter som går runt axelklamparna.



Figur 20: En trådramsmodell av det slutgiltiga kåpkonceptet.

Med alla knutpunkter färdigprintade sågades PVC-rören till längd och kåpskelettet byggdes ihop, med lim från en limpistol för att binda knutpunkterna med rören. Härfter kläddes kåpan i självhäftande, svart vinylfilm, med transparent vinylfilm som framruta. Den svarta vinylfilm som användes hade måtten $60 \times 150 \text{ cm}$, varför tio rullar behövdes för att täcka kåpan. En värmepistol användes, både för att böja några PVC-rör och således uppnå en mer strömlinjeformad kåpa, samt för att värmekrympa och därigenom spänna den applicerade filmen.

4.2 Elektronik

I detta avsnitt presenteras utvecklingsprocessen för olika komponenter som bygger upp den elektriska sidan av fordonet. Först kommer avsnittet om simuleringen, sedan följer de olika komponenterna. Varje delavsnitt följer en kronologisk följd av arbetet.

4.2.1 Uppdatering av simuleringen

I modellen som fanns kvar från 2016 ingick en PID-regulator som reglerade kraften som efterfrågades för att följa referenshastigheten. Hastighetsreferens (v_{ref}) sätts enligt

$$v_{\text{ref}} = \frac{n_{\text{effektiv}}}{60} \cdot \frac{2 \cdot r_{\text{hjul}} \cdot \pi}{R_g}. \quad (24)$$

r_{hjul} är hjulets radie, R_g är transmissionens totala utväxling och n_{effektiv} är det varvtal för motorn som är mest effektivt, mätt i varvtal per minut (rpm). För att styra PID-regulatorn skickades parametervärden

från Matlab till Simulink enligt

$$Kp_{sc} = \alpha_{sc} \cdot m_{tot}, \quad (25)$$

$$B_a = Kp_{sc}, \quad (26)$$

$$Ki_{sc} = B_a \cdot \alpha_{sc}, \quad (27)$$

$$F_{lim} = N_{lim} \cdot \frac{R_g}{r_{hjul}}, \quad (28)$$

$$P_{lim} = P_{märkvärde}. \quad (29)$$

Där Kp_{sc} är proportionella förstärkning, α_{sc} är bandbredden av kontrollen, m_{tot} är fordonets massa, B_a är den aktiva dämpning, Ki_{sc} är integralförstärkningen, F_{lim} är kraftbegränsningen, och P_{lim} är effektbegränsningen. N_{lim} är motorns driftsmoment, och $P_{märkvärde}$ är motorns effektklassning, som båda erhöles från faktabladet [30].

Simuleringsmodellen från 2016 uppdaterades också. Transmissionens påverkan på effektberäkningar lades till enligt ekvation 18. Även motorns förluster uppdaterades till att bero på varvtalet av motorn, där verkningsgraden i ekvation 19 beror på varvtalet. Möjligheten att driva fordonet med så kallad puls and glide teknik lades till, även funktion att kunna överföra energi tillbaka till motorn via bromsåterföring.

En förändring som uppstod under projektets gång var att platsen för tävlingen ändrades. Den gamla banans lutning och längd uppdaterades för att stämma överens med den nya banan. Som jämförelse gentemot den gamla banan simulerades samma max-, medel- och min-scenario som är beskrivet i nästkommande motoravsnitt.

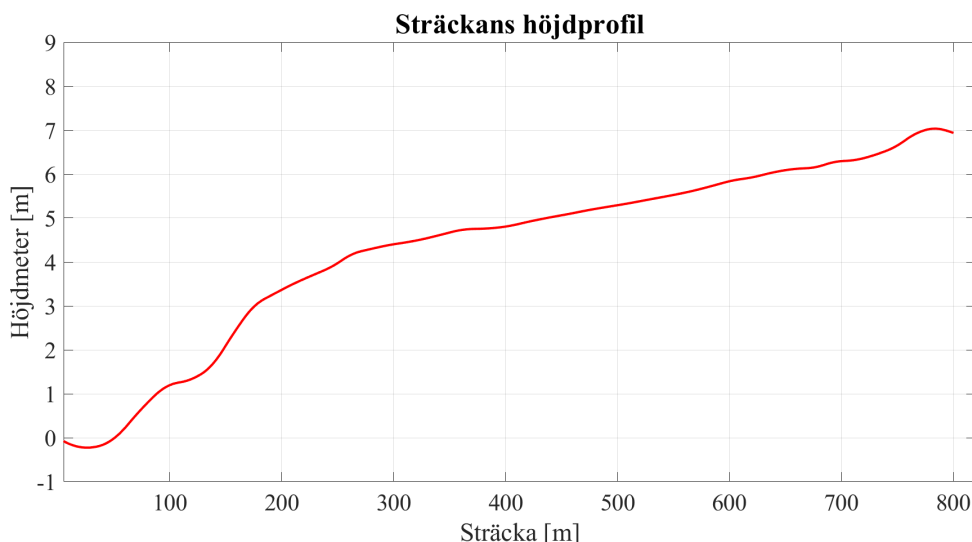
Tabell 2: Sammanfattning av resultat för de olika scenarierna med nya banan.

Variabel	Max	Medel	Min
Gamla banan: F_{max} (N)	96	60	52
Nya banan: F_{max} (N)	254	173	160
Gamla banan: P_{max} (W)	300	180	160
Nya banan: P_{max} (W)	860	590	560

Ur tabell 2 går det att utläsa att effekten och kraften som krävs av den nya banan är ungefär tre gånger så stor jämfört med den gamla. Denna nyhet erhöles efter att motorn beställdes vilket innebar att motorn inte längre var överdimensionerad för den nya banan. När motorn var beställd kom beskedet att det skulle dröja fem veckor innan motorn skulle levereras. För att ta vara på tiden medan leveransen inväntades valdes att uppdatera simuleringen så att den var mer detaljerad.

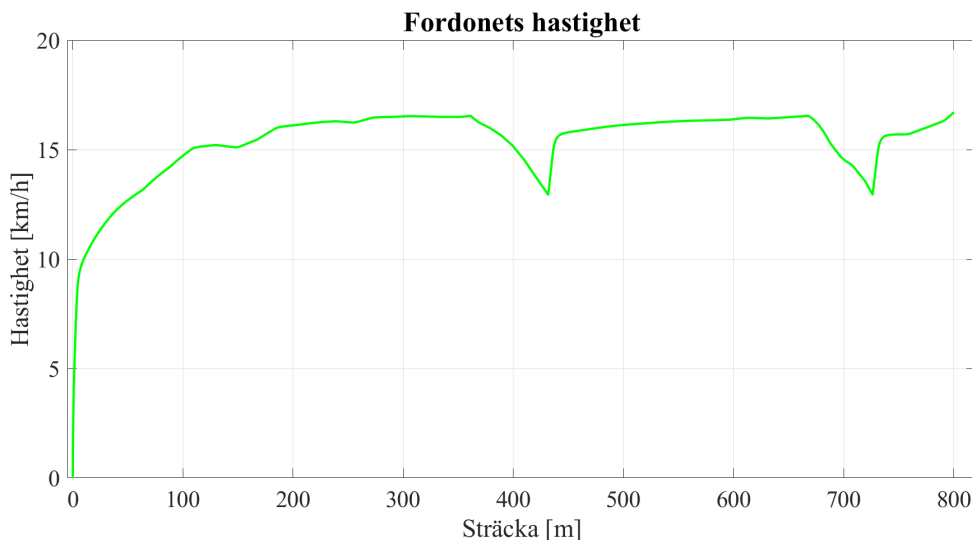
Genom litteraturstudie stöttes Baldurssons rapport på om hur en BLDC-motor kan simuleras i Matlab/-Simulink [20]. Genom att använda Baldurssons rapport som guide och referens kunde en modell byggas upp i Simulink vilken kunde integreras med den redan existerande modellen från 2016. Nackdelen med den uppdaterade modellen var att simuleringstiden ökade från cirka tio sekunder till upp emot en timme. Anledningen till den stora tidsskillnaden är att den uppdaterade modellen behövde göra nya uppdateringar av växelriktaren var sextionde grad som motorn roterade samtidigt som den försökte hitta nya värden för parametrarna i tillståndsmoellen. Det hela gjorde att felsökningen och testningen av åtgärder blev en långdragen process.

För att jämföra dem två modellerna valdes det att simulera 800 meter av tävlingssträckan och jämföra energiförbrukningen. Anledningen till att 800 meter valdes trots att den nya tävlingen var 1140 meter var på grund av att den uppdaterade modellen inte klarade att simulera längre utan att motorströmmarna skenade i väg över 100 ampere. Höjdprofilen för de första 800 meterna visas i figur 21.



Figur 21: Banans höjdprofil tagen från Google Earth.

Från figur 21 syns det att sträckan börjar med en liten nerförsbacke för att sedan gå upp för med varierande lutning. Över denna sträcka användes tre olika metoder för att simulera energiförbrukningen. Två använde sig av den ursprungliga Simulinkmodellen, där den ena var inställd på konstant hastighet och den andra körde i puls and glide cykler. Den sista metoden använde sig av den uppdaterade Simulinkmodellen och var inställd på konstant hastighet. Resultatet av simuleringen presenteras i resultat-delen (avsnitt 5.2). När puls and glide metoden användes skedde endast två puls and glide-cykler vilket illustreras i figur 22.



Figur 22: Fordonets hastighet med puls and glide metoden.

300 meter in i banan avtar lutningen, vilket syns i figur 21, vilket innebär att motorn kommer upp i referenshastigheten och slår på glide-funktionen. Under den planare delen av banan hinner motorn accelerera upp igen till referenshastighet för att åter slå på glide-funktionen.

4.2.2 Motor

För att uppskatta vilken effekt och vilket moment som motorn behöver leverera simulerades banan med hjälp av Matlab och Simulink. Tre scenarion ställdes upp; ett max-scenarior, ett medel- och ett min-scenarior. I max-scenariot sattes vikten på fordonet till 150 kg, vilket var maxvikten för fordonet ([3]). Varje person approximerades till att väga 80 kg i genomsnitt, C_r sattes till 0,002. Antagandet gjordes att det var hård motvind, vilket simulerades genom att sätta C_d till 2,8.

I medel-scenariot sänktes vikten till 130 kg på fordonet och 50 kg per person. C_r sattes till 0,0015 och C_d till 0,8. I min-scenariot sänktes fordonets vikt ytterligare till 100 kg, C_r sattes till 0,001 och C_d sattes till 0,4.

Tabell 3: Sammanfattning av variabelvärden för olika scenarion.

Variabel	Max	Medel	Min
m (kg)	150	130	100
m_{pass} (kg)	80	50	50
C_r	0,002	0,0015	0,001
C_d	2,8	0,8	0,4

En överslagsberäkning gjordes för att få en uppskattning av vilket moment motorn skulle behöva. Om radien på hjulet är 0,25 m (radien för de nuvarande hjulen), motorns märkvarvtal är 3000 rpm och den ska driva fordonet i 12 km/h (ger marginal till det lägsta 10 km/h [3]) leder det till att axeln behöver snurra 127 varv per minut och att utväxlingen blir 23,6:1. Med den utväxlingen och max-scenariot som krävde 96 N \implies 24 N m leder det till att motorn behöver kunna producera ~ 1 N m.

För att minska driftförlusterna så mycket som möjlig söktes en överdimensionerad motor (se avsnitt 2.2.1). Fordonen från tidigare års tävlingar analyserades och det visade sig att de antingen använde sig av en BLDC- eller AC-motor för att driva fordonet. Efter konsultation med Stefan Lundberg togs beslutet att gå vidare med att söka efter en BLDC-motor, eftersom batterierna levererar en DC-spänning.

Flera motoralternativ jämfördes innan det slutligen stod mellan tre alternativ av samma motor. Antingen motor med separat styrenhet, motor med inbyggd styrenhet utan skydd för damm eller motor med inbyggd styrenhet med skydd för damm.

Slutligen landade valet på motorn med inbyggd styrenhet skyddad mot damm. Motorn har effektklassen 534 W och märkmomentet på 1,7 N m (se referens [31]). Det främsta anledningen till att just denna motor valdes var på grund av dess höga verkningsgrad (se avsnitt 4.2.3). Motorn har märkvarvtal på 3000 rpm vilket gör att utväxlingen på fordonet behöver ligga mellan 19 – 28 gånger för att fordonet ska hålla 15 – 10 km/h.

4.2.3 Test av motorn i bromsbänken

Från testerna i bromsbänken försågs motorn med 48 V från ett spänningsaggregat. Via Nanotech's program *Plug & Drive* ([27]) varvades motorn sedan upp till olika varvtal i intervall om 500 rpm upp till 3000 rpm, därefter intervall om 100 rpm upp till 3700 rpm. Genom att inte lägga på någon last kunde den ström motorn drog vid tomgång avläsas för respektive varvtal. Med hjälp av den kända spänningen på 48 V, U_{motor} , samt det uppmätta strömvärdet, I_{motor} , kunde effekten in i motorn beräknas enligt

$$P_{\text{in}} = I_{\text{motor}} \cdot U_{\text{motor}}. \quad (30)$$

Vidare beräknades den mekaniska effekten som förbrukades enligt

$$P_{\text{mek}} = \omega \cdot T_{\text{last}}. \quad (31)$$

De värden som användes var den angivna hastigheten i rpm omvandlat till radianer per sekund, ω , samt det moment motorn lastats med, T_{last} .

Från mätningarna kunde även den högsta uppmätta strömmen jämföras med motorns rekommenderade maxström på 14 A. Från testerna kunde det verifieras att det momentant gick att överstiga maxströmmen utan vidare konsekvenser. Enligt ekvation 30 kunde därefter effekten in beräknas och det gick att bekräfta att motorn klarade av en eventuell överbelastning. Hur effekten in varierade med olika moment och varvtal presenteras i avsnitt 5.3.

Motorn utlovade en högsta verkningsgrad på 89 % ([31]). Med data för förbrukad effekt in och uppmätt mekanisk effekt kunde teoretiska beräkningar utföras för verkningsgraden enligt

$$\eta = \frac{P_{\text{mek}}}{P_{\text{in}}}. \quad (32)$$

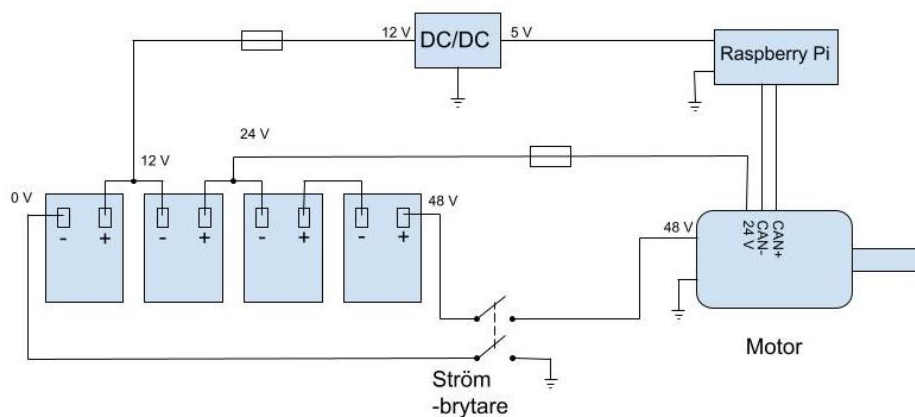
Detta utfördes för olika varvtal och vid varierande last, och resultatet för detta presenteras i avsnitt 5.3 Vidare kunde dessa värden ställas mot varandra för att se hur motorn ska användas för att uppnå högst verkningsgrad.

4.2.4 Batteri

Via simuleringarna i Simulink och Matlab simulerades fordonet att förbruka 24 Wh enligt ekvation 17. Vid en spänning på 48 V motsvarar 24 Wh \rightarrow 0,5 Ah. Beslutet togs att överdimensionera energikapaciteten i batterierna så att det skulle finnas en marginal på några Ah. Detta för att minska ändringen av batterispänningen under tävlingssträckan eftersom batterispänningen sjunker i takt med att batteriet laddas ur.

Planen från start var att använda sig av litiumjonbatterier för att förse fordonet med energi. Vid detta val var flamskydd samt BMS ett krav enligt tävlingens regler [3] och därför undersöktes alternativ för dessa. Vid detta stadium upptäcktes att leveranstiden skulle överstiga tidsplanen för projektet. Med detta som grund togs beslutet att i stället använda sig av bly-syra-batterier.

Genom att tänka om och använda bly-syra-batterier behövdes inget flamskydd eller BMS inskaffas och projektet kunde hålla sig inom tidsramen. Genom att välja fyra bly-syra-batterier med nominell spänning på 12 V och seriekoppla dessa kunde den efterfrågade spänningen uppnås. Vardera av dessa batterier kunde leverera 9 Ah vilket innebär att det fanns god marginal till det uppskattade värdet på 0,5 Ah. Från ett av dessa batterier kunde även styrenheten förse med 5 V, genom en 12/5 V DC/DC-omvandlare. Genom att grenna av en slinga från två seriekopplade batterier kunde motorn förse med 24 V. En överblick av batterikretsen visas i figur 23.

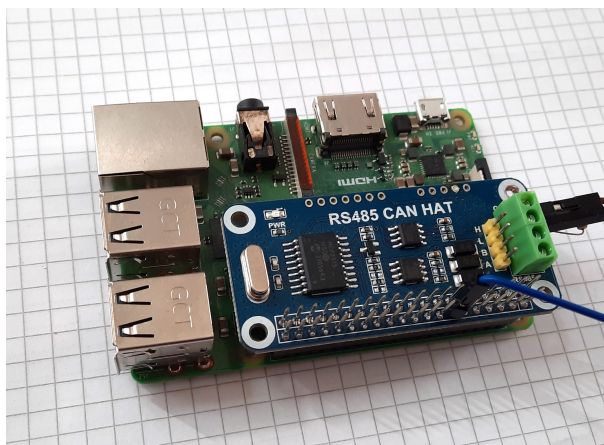


Figur 23: Kopplingschema för drivlinan med dess tillhörande komponenter.

För att ladda batteriet användes en batteriladdare avsedd för tolvvoltsbatterier. Batteriladdarens positiva och negativa sida delades upp i fyra delar så att de fyra batterierna kunde laddas samtidigt, parallellt.

4.2.5 Konfiguration och programmering av Raspberry Pi

För att styra den motor som valdes krävs kommunikation med CANopen. Eftersom Raspberry Pi 3b+ inte har hårdvarustöd för CAN utrustades Raspberry Pi-kortet med en CAN-adapter från waveshare enligt figur 24. För att kunna använda CAN-adaptern utfördes en konfiguration av systemet. Denna process beskrivs i detalj i bilaga H.



Figur 24: Raspberry Pi med CAN-adapter.

Det första steget i programmerandet av styrdatorn var att skapa grundläggande funktioner för att skicka data mellan styrenhet och motor. För detta ändamål användes modulen `canopen` som ger stöd för kommunikation via CAN-open. För att strukturera koden skapades en klass kallad `Motor` som innehåller attribut och metoder vars syfte är att ta hand om CAN-kommunikationen. Dessa funktioner användes sedan som byggstenar för att skapa nya funktioner som med önskvärda parametrar driver motorn i något av dess driftlägen, vilka är hastighetsdrift och vridmomentsdrift.

En av de funktioner som skapades kallas för `driveSpeed()` som tar hastighet, acceleration och retardation som parametrar. Funktionen accelererar fordonet med den angivna accelerationen tills den givna hastigheten uppnåtts. Fordonet fortsätter sedan tills funktionen `turnOff()` anropas, varpå fordonet retarderar till stillastående med den angivna retardationen.

En annan funktion som skapades heter `driveTorque()` som tar som parameter en promille-andel av motorns maximala vridmoment, och driver sedan motorn med motsvarande vridmoment. För att stoppa motorn används funktionen `turnOff()`.

En lite mer avancerad funktion som skapades kallas för `driveDistance()`; den tar hastighet, acceleration, retardation samt ett önskat avstånd som parametrar. Med den angivna accelerationen ökar denna funktion fordonets hastighet tills den angivna hastigheten har uppnåtts. Funktionen mäter sedan kontinuerligt hastighet och tid. Hastigheten integreras med avseende på tiden för att ge sträckan som färdats. Fordonet börjar sedan retardera till stillastående så att den totala tillryggalagda sträckan överensstämmer med den som angivits.

I simuleringen uppvisade pulse and glide en viss förbättring av energiförbrukningen. Denna förbättring var dock relativt liten. Detta i kombination med en begränsad mängd tester ledde till att ingen dedikerad funktion för pulse and glide programmerades. Funktionalitet för pulse and glide kan dock enkelt implementeras med hjälp av någon av de tidigare beskrivna funktionerna

4.3 Sammansättning av fordon

Vid fordonets sammansättning användes chassit som baskomponent där komponenter monterades i följande ordning.

1. Montering av bärande hjulaxlar, säten och nos

På chassit märktes hållplats och hålmått ut för att montera på hjulaxlarnas axelklämmor samt sätens gångjärn. Efter hålbörning skruvades säten på plats samt axelklämmor som fästs runt de bärande axlarna. Slutligen skruvades nosen på främre sidan av chassit.

2. Montering av inre axlar samt lager

Lagrena presspassades i lagerhusen med hydraulisk press och sattes därefter fast på ena sidan av båda bärande axelöppningar med hjälp av plasthammare. Med ena fordonssidan öppen kunde de roterande axlarna tryckas genom och sedan färdigställas genom att pressa på de andra lagerhusen

med ditsatta lager.

3. Montering av transmission och motor

Transmissionsmodulen sammansattes genom att skruva fast monteringsbrickan löst mot lagerhuset i främre vänstra hörnet, vilket medför att brickan kan justeras i de slitsade hålens riktning. På monteringsbrickans andra sida skruvades motor och planetväxel fast. Adapterdelarna med monterade drev fördes in genom axlarna och fastsattes med stoppskruv respektive adapterhylsa. Kedjan monterades på och dess spänning justerades med hjälp av hålslitsarna.

4. Montering av bromsmodul

Monteringsblocket för broms skruvades på lagerhuset i samma led som transmissionsmonteringsbrickan. Därefter fördes den modifierade bromsadaptorn på och låstes med hjälp av stoppskruv som resulterar i att hela främre axeln med lager inte har någon frihetsgrad kvar mer än rotation. Från bromsoket som skruvades fast på monteringsblocket fördes slangen till främsta passagerarstolen och handtaget fästes fast på ett lodrätt metallrör som skruvades fast på nosen.

5. Montering av hjul

Hjulen fästes på axlarna på samma sätt som för fordonet 2016, vilket innebär att de fördes på den roterande axeln och spändes på plats med hjälp av mutter. En kil sitter mellan axel och hjul för att överföra moment.

6. Kabeltillverkning

För att koppla ihop batterikretsen krävdes att kablar i rätt storlek klipptes ut och försågs med kabelsko. Även en strömbrytare infördes i kretsen för att utlösa ifall det skulle ske någon kortslutning. Säkringar på 3- och 5 ampere lades till i kretsen från 12 volts-terminalen respektive 24 volts-terminalen.

De fyra seriekopplade batterierna kopplades vidare ihop med motorn med en strömbrytare emellan. Detta för att strömmen snabbt ska kunna brytas.

7. Elektronikdragning på fordon

Alla elektronikkomponenter placerades framför det främsta sätet på fordonet av säkerhetsskäl då motorn satt på främre axeln. För att hålla koll på de flesta kablarna användes en befintlig plastlåda. I denna placerades även mätutrustningen.

4.4 Testkörning av fordon

När fordonet monterats ihop genomfördes en testkörning på Jernhusens spår i Fjällbo utanför Göteborg. Vid detta tillfälle kunde det sammansatta fordonet för första gången provköras för att identifiera eventuella förbättringar som kan genomföras inför kommande körningar, se figur 25



Figur 25: Testkörning i Fjällbo.

För att mäta strömmen användes en multimeter med strömtång och för att mäta spänningen användes en

annan multimeter. Momentana mätningar för strömmen och spänningen utfördes. Det uppmättes då en ström på 15 A vid en spänning på 51 V. Vid testkörningen styrdes fordonet med både CAN och Nanotech's program Plug and Drive. Vid första försöket att driva fordonet klarade inte motorn att få fordonet i rullning. Det berodde på att det i motorns mjukvara fanns parametrar som begränsade strömmen och momentet som motorn kunde drivas med (se referens [27]). När ström- och momentbegränsningen ökades till 150% av märktalen så kunde motorn driva fordonet utan problem.

Vidare analyserades fordonets spårhållning och hur konstruktionen påverkades under färd. Det ansågs att fler platstester behövdes för att kalibrera fordonet. Då kandidatprojektets inlämningsdeadline satts tidigare än de tider som fanns för platstester beslutades att optimeringar sker utanför den planerade tidsramen.

5 Resultat

I detta avsnitt presenteras det slutgiltiga fordonet, resultaten från simuleringen och bromsbänken, samt en jämförelse av resultatet mot kravspecifikationen.

5.1 Slutgiltigt fordon

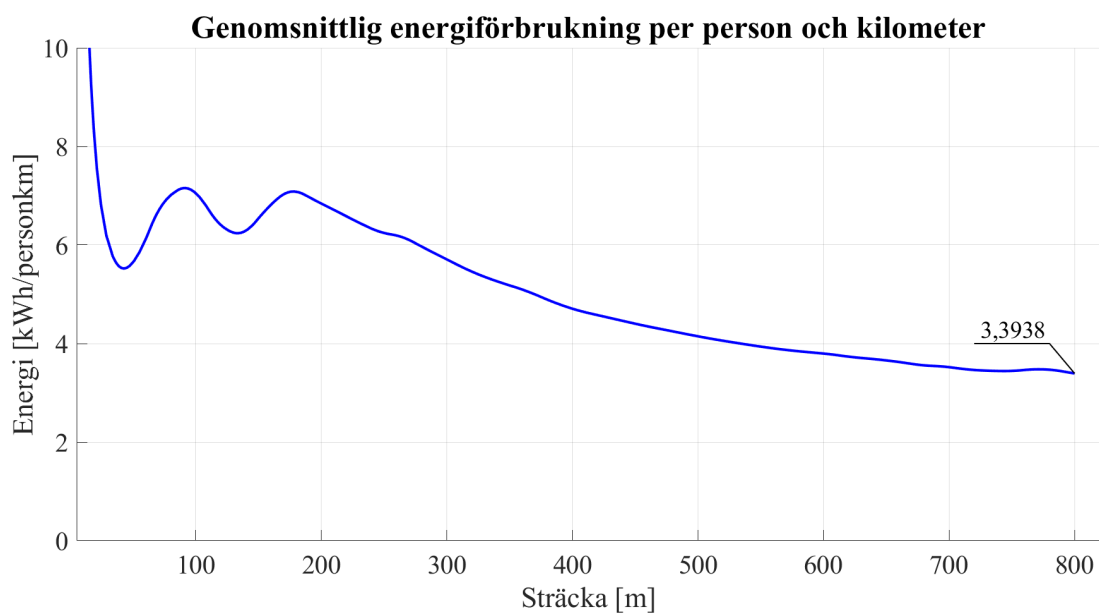
Det slutgiltiga fordonet är ett eldrivet rälsgående fordon vars motor driver den främre hjulaxeln. Då fordonet är rälsdrivet är axlar stela och hjul koniska. De övergripande specifikationerna för fordonet sammanfattas i bilaga K och det färdiga fordonet presenteras i figur 26.



Figur 26: Slutgiltigt fordon, fotograferat av Marcus Folino.

5.2 Resultat från simuleringen av fordonet

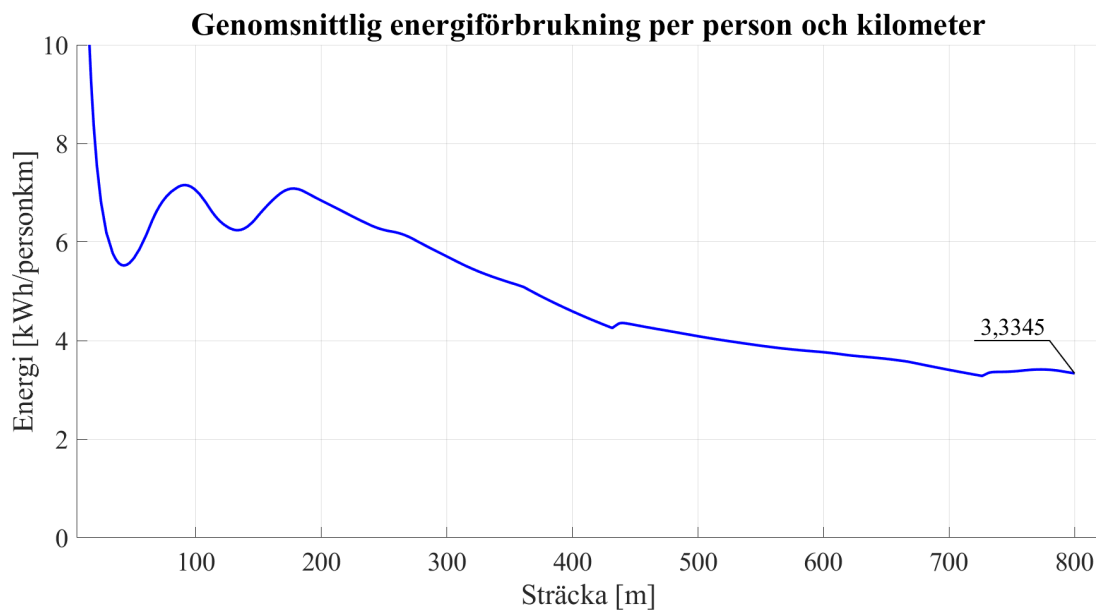
Energiförbrukningen simulerad med ursprungliga modellen för konstant hastighet presenteras i figur 27.



Figur 27: Energiförbrukningen simulerat med ursprungliga modellen och konstant hastighet.

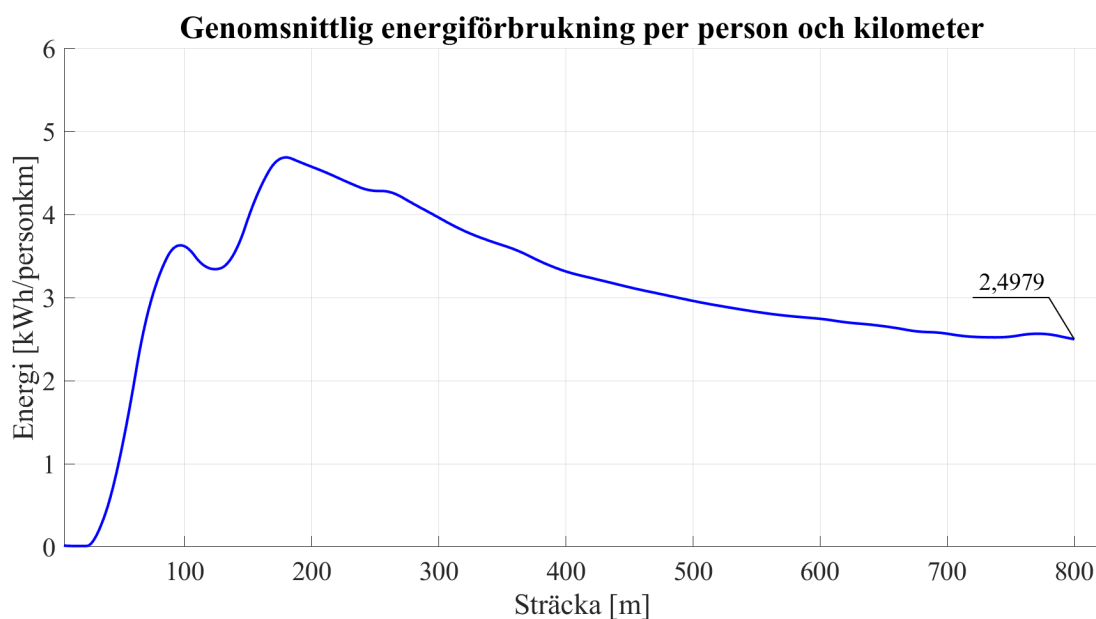
Den genomsnittliga energiförbrukningen för sträckan landade på cirka $3,4 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$. Energi-

förbrukningen var högre i början av banan då det var brantare lutning. I figur 28 visas simuleringsresultatet av samma modell fast körd i puls and glide cykler.



Figur 28: Energiförbrukningen simulerat med ursprungliga modellen med pulse and glide.

Den genomsnittliga energiförbrukningen är här $3,3 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$. Slutligen presenteras resultatet för den uppdaterade modellen med konstant hastighet i figur 29.



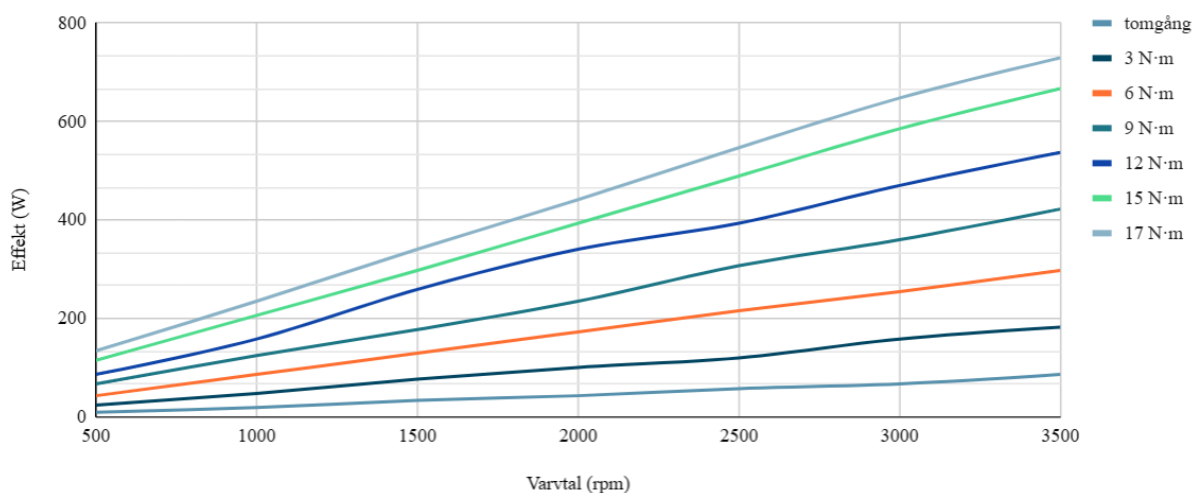
Figur 29: Energiförbrukningen simulerat med uppdaterade modellen och konstant hastighet.

Här landade förbrukningen på $2,5 \text{ Wh}/(\text{person} \cdot \text{km})$.

5.3 Resultat från test av motorn i bromsbänken

Nedan i figur 30 presenteras vilken effekt motorn drog vid olika moment och varvtal.

Effekt in för olika moment

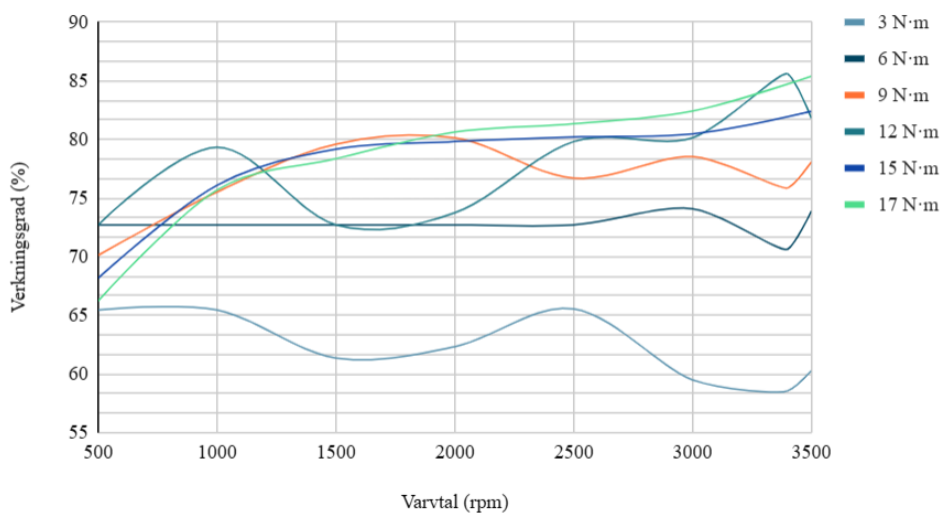


Figur 30: Effekt in för motorn vid olika moment.

Momentet som motorn belastades med syns i kolumnen till höger om figuren, angivet i N·m. Den högsta effekten vid 17 N·m och 3500 rpm, var 730 W.

Figur 31 visar verkningsgrader som uppmättes i bromsbänken. Ekvation 32 användes för att få fram värdena

Verkningsgrad för olika moment



Figur 31: Verkningsgrad för motorn vid olika moment.

Den högsta verkningsgraden uppmättes när motorn var belastad med 12 N·m och drevs med 3400 rpm. Verkningsgraden var då 85,6 %. Generellt var verkningsgraden högre, med avvikelser inom intervallet, ju högre moment motorn var belastad med.

5.4 Resultatvärden mot kravspecifikation

Efter testkörningen med fordonet samt mätningar på delkomponenter sammanställdes resultaten i tabell 4 som en jämförelse mot kravspecifikationen (bilaga F).

Tabell 4: Resultat gentemot kravspecifikation.

Kriterium	Resultat	Kontroll	Kommentar
1. Förflyttning av sittande passagerare via räls	Ja	Fysiskt test	Fordonet kunde förflytta sex personer utmed en teststräcka
2. Broms	Ja	Fysiskt test	Fordonet stannade med motorbroms inom det godkända intervallet
3. Kunna hålla givna medelhastighet	Ja	Fysiskt test	Fordonet kunde hålla 15 km/h
4. Fordonet ska drivas av elenergi	Ja	Fysiskt test	Fordonet kunde köras enbart med energi från batterier
5. Spänningskällan måste ha spänningen 12–48 V	Ja	Fysiskt test	Batterierna översteg ej 53 V
6. Maximal momentan strömförbrukning 20 A	Ja	Fysiskt test	Den högsta uppmätta strömmen var drygt 15 A
7. Återmatning av bromsenergi (Ö)	Nej	N/A	Designval
8. Frånkoppla motorn (Ö)	Nej	N/A	Designval
9. Det måste finnas plats för sex personer	Ja	Fysiskt test	Sex personer fick plats i fordonet
10. Kunna köra genom varierande spår	N/A	N/A	Testbanan hade enbart raksträcka
11. Gå att köra på standardiserad räls	Ja	Fysiskt test	Fordonet kunde köra på standardräls med variationer
12. Inom tillåtna ramar för rälsbundna fordon	Ja	Fysiskt test	Fordonet överskred inga yttre gränser för fordon på tågräls
13. Elskydd för litiumjonbatteri	N/A	N/A	Litiumbatterier används ej
14. Snabb utrymning av fordonet	Ja	Fysiskt test	Utrymning inom tidsram. Dock inget test med kåpa
15. Ryggstöd för säte inom 60–90°	Ja	Mätning	Samtliga säten uppfyller vinkelkravet
16. Ryggstöd minimala höjd, 35 cm	Ja	Mätning	Samtliga säten uppfyller höjkravet
17. Golv eller nät som förhindrar kontakt med mark	Ja	Konstruktion	Heltäckande golv
18. Skydd mot klämrisk	N/A	N/A	Kåpa ej färdig vid test, den ska uppfylla kravet
19. Manuell (mekanisk) nödbroms	Ja	Fysiskt test	Fordonet stannade inom den givna tiden
20. Modularitet (Ö)	Ja	Konstruktion	Fler än tre delkomponenter är utbytbara
21. Energieffektivitet (Ö)	N/A	N/A	Utförlig mätning av prestanda ej möjlig vid test
22. Utseende (Ö)	N/A	N/A	Kåpa ej färdig
23. Styva/hårda hjul (Ö)	Nej	Konstruktion	Återanvända plasthjul uppfyller ej
24. Flänsar på hjulen	N/A	N/A	Fordonet spårade ej ur men test med utsatt kraft ej utfört
25. Låg massa (Ö)	Ja	Mätning	Fordonets vikt ~ 104 kg
26. Lågt luftmotstånd (Ö)	Nej	Simulering	Simulering gav $C_d \approx 0,6$
27. Plats för montering av mätenhet	Ja	Fysiskt test	En överdimensionerad låda fick plats på nosen
28. Locket på mätenheten måste kunna öppnas	N/A	N/A	Mätenhet ej tillgänglig

6 Diskussion

I detta avsnitt analyseras och diskuteras genomförandet, resultaten, inkluderande simuleringen, bromsbänken samt testkörningen. Avslutningsvis formuleras även förslag på förbättringsunderlag till en framtida kandidatgrupp.

6.1 Diskussion av simuleringsresultatet

Från figurer 27 och 28 går det att urskilja att puls and glide körstilen är något mer energieffektiv i simulationen. Anledningen till att det inte blir så stor skillnad är att motorn behöver kämpa för att komma upp i referenshastigheten under det brantare partiet av banan och inte kan börja med puls and glide förrän lutningen minskar något. Pulse and glide-tekniken har inte testats med verkliga mätningar så om liknande energibesparing går att få i verkligheten kan inte verifieras.

Den uppdaterade simuleringsmodellen visar på markant mindre energiförbrukning jämfört med den ursprungliga. Ett skäl till detta kan vara att den ursprungliga inte tar hänsyn till vilket moment motorn måste producera utan endast i vilket varvtal motorn befinner sig i. Ytterligare är motorns järnförluster väldigt svårmodellerade och det finns aspekter som påverkar förlusterna. För att få mer noggrant resultat behöver mätningar göras i verkligheten på den fysiska motorn.

Simuleringsresultaten går ej att jämföra med tidigare års resultat eftersom banprofilen har ändrats till en bana med brantare backar. Det gör att energiförbrukningen sett per längdenhet blir mycket högre. Exempelvis är energiförbrukningen från figur 27 högre än Chalmers resultat från 2016 [28], då flertalet förbättringar har gjorts på årets fordon jämfört med fordonet från 2016. Hur energieffektivt fordonet är fås först i jämförelse med andra fordon som kör samma sträcka. I fortsatta studier skulle det gå att införa en ny parameter som jämför fordonets energikonsumtion med ett idealt fordon som kör samma sträcka. Utifrån den beräkningen skulle en procentsats för fordonets energieffektivitet beräknas.

Anledningen till att stor vikt lades på simuleringsjobbet under detta projekt var att den fysiska motorn endast var levererad under de sista två veckorna av detta projekt.

6.2 Diskussion av resultat i bromsbänken

Från figur 30 går att avläsa en högsta uppmätt effekt in på 730 W. Med en konstant spänning på 48 V motsvarar detta en uppmätt ström på drygt 15 A enligt ekvation 30. Därav kan verifieras att motorn klarar av strömmar något högre än den rekommenderade maxströmmen på 14 A. Vid körningar med det fysiska fordonet kan stora strömmar som även överstiger 15 A uppstå vid exempelvis start eller på delar av banan med brantare lutning.

Med datan kan även bekräftas att en eventuell överbelastning av motorn är möjlig. Detta då den är dimensionerad för 534 W vilket är cirka 200 W under det högsta uppmätta värdet. Troligtvis hade det gått att belasta motorn ännu mer. Detta var dock något som undveks vid testerna då det inte ansågs nödvändigt utan enbart bidrog till onödiga överbelastningar av motorn.

Den högsta verkningsgrad som uppmättes, se figur 31, var drygt 85 %. Den utlovade verkningsgraden på 89 % var enbart för motorn i sig utan växellåda. Då planetväxellådan har en verkningsgrad på 96 % gör det att den teoretiska verkningsgraden landar på $0,89 \cdot 0,96 = 0,8544$, vilket gör att den testade verkningsgraden stämmer överens med den teoretiska. Eventuellt skulle en högre verkningsgrad kunna uppmätas om tester vid fler varvtal och laster utförts. Generellt uppmättes de högsta verkningsgraderna vid tyngre last vilket anses rimligt för en motor dimensionerad för en hög effekt. Eftersom tomgångsförlusterna har mindre andel av effekten vid högre effekttal anses det rimligt att verkningsgraden ökar med ökad belastning på motorn.

6.3 Analys av testkörning

Vid testkörningen kunde det verifieras att drivlinan klarade av att driva fordonet framåt på plan mark med sex passagerare, som i genomsnitt vägde mer än 50 kg, vilket är en större belastning än vad som är tänkt vid tävlingstillfället. Styrningen av fordonet testades både med Nanotech's plug and drive och med den planerade styrningen via CAN.

Som mest testades fordonet vid en hastighet på 3000 rpm vilket motsvarar en hastighet på ca 14,4 km/h. Vid detta varvtal uppmättes en spänning på 51 V och motorn drog då en ström på drygt 15 A. Effekten in i motorn kan därför uppskattas till drygt 765 W vilket är högre än de värden som tidigare uppmätts. Att ha i åtanke är att denna effekt krävdes enbart för att driva fordonet på plan mark med sex passagerare. För att klara av en mer kuperad körsträcka likt tävlingsbanan är det därför rimligt att dra ner på antalet passagerare och ersätta dessa med vikter på 50 kg.

Det problem som uppstod gällande elektroniken var främst kopplade till styrningen av fordonet. Det hade krävts fler testkörningar för att få till optimala inställningar av parametrarna för styrningen, både via Plug and drive och CAN. Att få till styrningen av fordonet bättre skulle bidra till körningar med mer kontinuitet. Vidare skulle detta kunna leda till tydligare mätdata och större förståelse för hur fordonet kan köras på bästa sätt.

Svängningsrörelsen var relativt stor och fordonet pendlade från fläns till fläns. Det konstaterades att avståndet mellan hjulen på samma axel var för kort då det var relativt stor plats mellan räls och fläns. Detta möjliggjorde en svängningsrörelse som var större än önskat. Distansbrickor finns tillgängliga för att öka avståndet mellan hjulen och kommer testas vid ett senare körtillfälle. Under färd upplevdes vibrationer i fordonets golv. Dessa var relativt små och ansågs ej vara ett problem utan snarare en följd av att konstruktionen är odämpad.

6.4 Utvecklingspotential

Nedan följer förslag på förbättringsområden som skulle kunna vidareutvecklas för att uppnå bättre resultat för fordonet.

6.4.1 Chassi och säten

Chassit som använts på fordonet är ett ställningsgolv med en nos monterad. Fördelen med att använda ett färdigt golv är att det inte behöver läggas tid och resurser på att tillverka ett chassi, utan enbart justeringar behöver utföras på golvet. Nackdelen är att det inte är anpassat efter ändamålet och kan leda till att delar är överdimensionerade och medför onödig massa. Genom att designa och tillverka ett chassi finns möjligheten att optimera konstruktionen efter belastningarna på chassit. Det bör analyseras vilka fördelar som kommer med ett specialtillverkat chassi och tid samt resurserna det kräver. Vidare kan sätesdesignen optimeras ytterligare. Vid ett specialtillverkat chassi kan sätena integreras direkt i konstruktionen. Används säten som en separat del går det att undersöka om andra material än nuvarande trä och plywood sparar vikt och ger möjlighet till bättre utformning.

6.4.2 Hjulaxlar

Den inre hjulaxeln på nuvarande fordon är tillverkad i solitt stål och återanvänds från ett tidigare fordon. Genom att använda en hjulaxel som är dimensionerad efter ändamålet är det möjligt att reducera vikten. Ytterligare viktoptimering kan fås genom att använda en ihålig axel då samma böjmotstånd samt vridmotstånd kan uppnås med en lägre vikt (se uttryck för böjtröghetsmoment i ekvation 20 och 21).

6.4.3 Hjul

Hjulen som användes är gjorda i plast och är därför mjukare än alternativ i exempelvis metall. En mjukare rullyta innebär större rullmotstånd, och en förbättring skulle därför ges av ett styvare hjul. Detta skulle kunna innebära en modifikation av de nuvarande hjulen, exempelvis att en rullyta i metall integreras, eller att helt nya hjul tillverkas i exempelvis aluminium eller stål.

6.4.4 Transmission

Med nuvarande transmission finns ingen möjlighet för frigång av hjulen relativt motorn. Det leder till en risk att motorn ger ett bromsande moment när den ej driver. Ett frihjul är en möjlig lösning, däremot försvinner då möjligheten att använda motorns sensorer och dess data när drivningen är frikopplad. En annan möjlig lösning är att införa bromsåterföring för att utnyttja energin från motorns bromsande moment. Detta kan vara speciellt gynnsamt vid körning i nedförsbacke.

6.4.5 Batteriet

Användning av litiumjonbatterier möjliggjordes inte i detta projekt då gruppen stötte på problem gällande leveranstid. Av denna anledning kan alternativet att använda sig av litiumjonbatterier undersökas vidare. Detta skulle innebära att alternativ för flamskydd samt BMS behöver utredas. Genom att använda litiumjonbatterier skulle det potentiellt innebära en viktbesparing för fordonet

6.4.6 Mätningar

I detta projekt mättes ström och spänning manuellt med multimetrar och strömtång. Genom att införskaffa, eventuellt konstruera, en bättre mätenhet skulle mer data kunna loggas vid testkörningar. Detta skulle bidra till mer exakta mätresultat för att optimera körningen.

6.4.7 Styrning

Att undersöka med verkliga tester hur fordonet skulle styras för minsta energiförbrukning hanns inte med inom tidsramen för projektet. Eftersom det endast gick att få momentana värden på strömmen och spänningen, som inte loggades, kunde ingen större analys göras av fordonets faktiska energieffektivitet. Om tillgången till bättre mätdata fanns, kunde frågeställningarna i avsnitt 3.2.5 undersökas i detalj.

Det finns stor potential för vidareutveckling av både styrdatorns hårdvara och mjukvara. Ett sätt att uppnå högre energieffektivitet är att undersöka alternativ till Raspberry Pi som förbrukar lägre ström. Ett exempel är att istället använda en mikrokontroller som är mycket enklare i sitt utförande och inte behöver ett operativsystem vilket minskar energikonsumtionen. Det går också att undersöka hur man ska utforma en styralgoritm som maximerar motorns effektivitet.

6.4.8 Kabeldragningar

Gällande kopplingarna finns möjlighet att förfina dessa och anpassa kablarna för att ta upp så liten yta som möjligt på fordonet. Exempelvis skulle en dimensionerad låda för drivlinan kunna byggas för att ha kablarna samlade för en förhöjd säkerhet. Ett annat alternativ för att uppnå detta kan vara att dimensionera kablarna mer exakt för att inte ta upp mer plats än nödvändigt.

Referenser

- [1] Energimyndigheten, *Energiläget*, <https://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/>. (hämtad 2023-02-03).
- [2] *Delsbo Electric*, <https://www.delsboelectric.se/>. (hämtad 2023-02-01).
- [3] D. Electric, *Regler 2023*, <https://www.delsboelectric.se/regler2023>. (hämtad 2023-02-01).
- [4] E. Andersson, M. Berg, S. Stichel och C. Casanueva, *Rail Systems and Rail Vehicles Part 1: Rail Systems*, 3rd edition. Kungliga Tekniska Högskolan, 2018, s. 4-6 - 4-8.
- [5] C. Ljung, N. S. Ottosen och M. Ristinmaa, *Introduktion till Hållfasthetslära*, Upplaga 1:6. Studentlitteratur AB, 2007, s. 116.
- [6] B. Alfredsson, B. Broberg, B. Sundström och G. Hedner, *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*, Upplaga 11. 2014, s. 344.
- [7] M. Mägi, K. Melkersson och M. Evertsson, *Maskinelement*, Upplaga 1:2. Studentlitteratur AB, 2017, s. 198.
- [8] *Rullningslager*. SKF, 2019, s. 20, 438, 452–453.
- [9] S. Derammelaere, S. Dereyne, P. Defreyne, E. Algoet, F. Verbelen och K. Stockman, "Energy efficiency measurement procedure for gearboxes in their entire operating range," i *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, ISSN: 0197-2618, okt. 2014, s. 1–9. DOI: 10.1109/IAS.2014.6978376.
- [10] M. Kamran, "Chapter 10 - Electric vehicles and smart grids," i *Fundamentals of Smart Grid Systems*, M. Kamran, utg., Academic Press, jan. 2023, s. 431–460, ISBN: 9780323995603. DOI: 10.1016/B978-0-323-99560-3.00002-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323995603000028> (hämtad 2023-05-10).
- [11] T. Benson, *The Drag Coefficient*, Publisher: NASA, maj 2021. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/dragco.html> (hämtad 2023-05-10).
- [12] *Electric motor - Energy Education*. URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electric_motor (hämtad 2023-05-07).
- [13] *StackPath*. URL: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21251043/portescap-understanding-losses-in-blcd-motors> (hämtad 2023-05-06).
- [14] C. Wohlgemuth, *Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook*, aug. 1996. URL: <https://p2infohouse.org/ref/42/41621.pdf> (hämtad 2023-05-06).
- [15] I. Boldea, "Electric generators and motors: An overview," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, årg. 1, nr 1, s. 3–14, mars 2017, ISSN: 2096-3564. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7911104.
- [16] X. Nian, F. Peng och H. Zhang, "Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, årg. 61, nr 10, s. 5798–5808, okt. 2014, ISSN: 1557-9948. DOI: 10.1109/TIE.2014.2300059.
- [17] RS, *AC Motors*. URL: <https://uk.rs-online.com/web/c/automation-control-gear/electric-motors/ac-motors/?applied-dimensions=4294570859,4291062147> (hämtad 2023-05-08).
- [18] *Elteknik*, Institutionen för Energi och miljö Göteborg, Chalmers Tekniska Högskola.
- [19] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, English, 2003. URL: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf) (hämtad 2023-05-08).
- [20] S. Baldursson, "BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab®/Simulink® Implementation," examensarb., Chalmers University, Gothenburg, maj 2005. URL: <https://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/BaldurssonStefanMSc.pdf> (hämtad 2023-05-06).
- [21] RS, *Lead Acid Batteries*. URL: <https://se.rs-online.com/web/c/batteries-chargers/rechargeable-batteries/lead-acid-batteries/> (hämtad 2023-05-09).
- [22] *RS PRO Lead Acid Battery - 12V, 9Ah*. URL: <https://docs.rs-online.com/f0fc/A700000009435524.pdf> (hämtad 2023-05-09).
- [23] *CANopen – The standardized embedded network*, <https://www.can-cia.org/canopen/>. (hämtad 2023-05-08).

- [24] W. Cao, Y. Tsuyoshi och K. Taketoshi, "Pulse and Glide Strategy Analysis Based on Engine Operating Point During Pulse Mode," *European Journal of Control*, årg. 65, maj 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2022.100629>.
- [25] D. Ödman, U. Yring, E. Bergstedt, D. Reckermann och C. Larsson, "Design och konstruktion av ett energieffektivt spårbundet fordon för deltagande i studenttävlingen Delsbo Electric," 2016. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/238553> (hämtad 2023-05-08).
- [26] B. J. Lindstedt. P, *The Value Model*. Value Model Arusid AB, 2016.
- [27] *Technical Manual PD6-E*, juli 2022. URL: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Plug_Drive/PD6-E/fir-v2213/PD6E_CANopen_Technical-Manual_V1.0.0.pdf?1663155760 (hämtad 2023-05-09).
- [28] D. Electric, *Resultat*, <https://www.delsboelectric.se/resultat>. (hämtad 2023-04-16).
- [29] *GPLE80-1S-10-F80 - Precision planetary...* — NANOTEC. URL: <https://en.nanotec.com/products/2202-gple80-1s-10-f80> (hämtad 2023-05-09).
- [30] *PD6-EB80xD-x-65-2 Datasheet*, aug. 2022. URL: https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Datenblaetter/Plug_Drive/PD6-EB/PD6-EB80xD-x-65-2.pdf?1663135503 (hämtad 2023-05-06).
- [31] *PD6-EB80MD-E-65-2 - Brushless DC motor with...* — NANOTEC. URL: <https://en.nanotec.com/products/10241-pd6-eb80md-e-65-2> (hämtad 2023-05-06).

A Komponenter till koncept

Chassi	Axel	Hjul
Byggställning	En axel (Roterande och bärande)	Återanvänd från 2016 (Plasthjul)
Badkarsform (av glas-/kolfiber)	Två axlar (En roterande och en bärande)	Nya hjul i aluminium
Framework av fyrkantsjärn		Nya hjul i stål
Sandwich-konstruktion med kolfiber och cellplast		Hybrid (Återanvänd + metallinklädsel)
Kajak/kanot		
Golv	Säten	Broms
Plywood	Lambdaform	Återanvänd skivbroms
Aluminium	T-stav (Två rör)	Ankare (Inte optimal)
Montering av motor	Transmission	
Innanför chassi	Kugghjul insida hjul	
Utanför chassi (på axel)	Kugghjul på axel	
	Kedjeväxel axel	
	Remväxel axel	

B Utvalda koncept

Koncept	Chassi	Axel	Hjul	Broms	Golv	Säten	Montering	Transmission
I	Ställning	En axel	Återanvänd	Återanvänd	Plywood	T-stav	Insida	Kedja
II	Badkar	Två axlar	Nya i aluminium	Återanvänd	Aluminium	Lambda	Utsida	Kugghjul insida
III	Ställning	Två axlar	Nya i aluminium	Återanvänd	Aluminium	Lambda	Utsida	Kugghjul
IV	Ställning	Två axlar	Hybrid	Återanvänd	Plywood	Lambda	Utsida	Kedja
V	Framework	Två axlar	Återanvända	Återanvänd	Plywood	T-stav	Utsida	Kedja
VI	Badkar	En axel	Nya i stål	Återanvänd	Plywood	T-stav	Insida	Rem

C Konceptval - Viktad Pugh-matris

C-1

Kriterium	Vikt	Iteration 1						Iteration 2					Iteration 3			
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	I	III	IV	V
Låg kostnad	4	<i>R</i>	-	-	0	-	-	0	-	-	<i>R</i>	0	-	-	0	<i>R</i>
Låg vikt	4	<i>E</i>	-	-	-	-	0	+	+	0	<i>E</i>	-	+	0	+	<i>E</i>
Modularitet	5	<i>F</i>	+	+	+	+	-	-	0	0	<i>F</i>	0	-	0	0	<i>F</i>
Hållfasthet	5	<i>E</i>	+	+	+	+	-	-	0	+	<i>E</i>	+	-	0	-	<i>E</i>
Enkel montering	4	<i>R</i>	-	0	0	0	0	0	-	-	<i>R</i>	0	+	-	0	<i>R</i>
Enkel tillverkning	3	<i>E</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	<i>E</i>	-	+	-	+	<i>E</i>
Miljövänlig	3	<i>N</i>	-	-	0	-	-	0	-	-	<i>N</i>	-	+	0	+	<i>N</i>
Estetiskt tilltalande	2	<i>S</i>	+	0	0	+	+	0	+	+	<i>S</i>	+	-	-	-	<i>S</i>
SUMMA +		0	12	10	10	12	2	7	6	7	0	7	11	0	10	0
SUMMA -		0	18	14	7	14	20	10	14	12	0	10	16	13	7	0
SUMMA TOT		0	-6	-4	3	-2	-18	-3	-8	-5	0	-3	-5	-13	3	0
Rangordning		2	5	4	1	3	6	2	4	3	1	2	3	4	1	2
Behålla?		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Ja	Nej	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej	Ja	Nej

D Axelböjningsberäkningar

Belastnings- och viktberäkningar för en yttre axel (rör) av olika dimensioner och material. Dimensionerna på rören som ingår i tabellen är valda efter produkter från Alumeco. Vikten är beräknad för två axlar med egenlängden 1400 mm.

Aluminium	Ytterdiameter [mm]	Tjocklek [mm]	Böjning max [mm]	Vikt [kg]
$E = 69 \text{ GPa}$	70	3	5,39	4,77
$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$	70	4	4,23	6,27
	70	5	3,53	7,72
	80	3	3,56	5,48
	80	5	2,30	8,90
	80	8	1,61	13,7
	90	3	2,47	6,20
	90	4	1,91	8,17
	90	5	1,58	10,1
	100	3	1,78	6,91
	100	4	1,38	9,12
	100	5	1,13	11,3
	100	8	0,78	17,5
Stål				
$E = 210 \text{ GPa}$	60	3	2,88	13,4
$\rho = 8,9 \text{ g/cm}^3$	60	4	2,27	17,5
	60	5	1,91	21,5
	70	2	2,55	10,6
	70	3	1,77	15,7
	70	4	1,39	20,7
	70	5	1,16	25,4
	80	2	1,69	12,2
	80	3	1,17	18,1
	100	1	1,65	7,75
	100	2	0,85	15,3

Belastnings- och viktberäkningar för en inre axel (massiv stång) av olika dimensioner och material. Dimensionerna på stängerna som ingår i tabellen är valda efter produkter från metallvaror.se. Vikten är beräknad för två axlar med egenlängden 1435 mm.

Aluminium	Diameter [mm]	Böjning max [mm]	Vikt [kg]
$E = 69 \text{ GPa}$	25	4,05	3,97
$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$	30	1,95	5,72
	35	1,05	7,79
	40	0,62	10,2
	45	0,39	12,9
Stål			
$E = 210 \text{ GPa}$	20	3,25	8,38
$\rho = 8,9 \text{ g/cm}^3$	22	2,22	10,1
	24	1,57	12,1
	25	1,33	13,1
	26	1,14	14,2
	28	0,85	16,4
	30	0,64	18,9
	35	0,35	25,7
	40	0,20	33,5

E Fordonsparametrar

Chalmers	Dokumenttyp	Fordonsparametrar
	Projekt	Spårbundet fordon
		Skapad: 2023-02-10
		Modifierad: 2023-02-10
Parametrar	Tillvägagångsätt	
Mekanik		
Hjulbas [m]	Bestäms genom benchmarking och analys av gångstabilitet	
Antal drivande axlar	Bestäms genom omvärldsanalys och expertis från handledare	
Hjulradie	Bestäms genom benchmarking och analys av gångstabilitet, beror på motorval	
Konicitet	Bestäms genom benchmarking och analys av gångstabilitet	
Chassi dimensioner	Bestäms genom <i>Sittestet</i> TM och simulering	
Hjulaxel dimensioner	Beräknas utifrån balkekvationer, beror på hjulaxelkoncept	
Kåpa dimensioner och utformning	Bestäms utifrån regler, chassi-dimensioner samt simulering	
Säte dimensioner	Bestäms utifrån regler, chassi-dimensioner samt <i>Sittestet</i> TM , iterativt.	
Elektronik		
Motor		
Typ av motor	AC/DC (borstad/oborstad). Bestäms av utbud, kostnad och enkelhet att implementera	
Vridmoment	Bestäms mha simuleringar och slutgiltigt körprov	
Effekt	Bestäms mha simuleringar och slutgiltigt körprov	
Strömförbrukning	Bestäms genom testning av motorn	
Tomgångström	Bestäms genom testning av motorn	
Mekanisk tröghet	Bestäms genom testning av motorn	
Verkningsgrad	Från databladet för motorn och testning av motorn	
Driftvarvtal	Från databladet för motorn och testning av motorn	
Batteri		
Spänning	Bestäms från motorn samt testas vid testkörning	
Energimängd	Bestäms från simulering och testkörning	
Styrning		
Spänning	Bestäms från styrningens datablad, eventuell spänningsomriktare behövs	
Energjätermätning	Bestäms utifrån gruppbeslut	
Körstil	Puls and Glide etc. Bestäms genom simulering och testkörning	
Drivlina		
Utväxling	Beror på motorval, hjulradie och fordonets driftstyngd	
Transmissionstyp	Kedja/Kuggväxel... Bestäms utifrån benchmarking och analys av verkningsgrader	
Verkningsgrad	Bestäms genom testkörning	
Frikoppling	Bestäms utifrån gruppbeslut, exempelvis frihjul	

F Kravspecifikation

Chalmers	Dokumenttyp	Kravspecifikation			
	Projekt	Spårbundet fordon			
		Skapad: 2023-01-25 Modifierad: 2023-03-28			
Kriterier	Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)
Funktion(er)					
Förflyttning av sittande passagerare via räls	Åka rutt på 3,36 km	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Broms	Stanna inom 20 meter från maxhastighet	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Prestanda					
Kunna hålla tävlingskriteriets medelhastighet	10 - 15 km/h under sträckan	K		Fysiskt test/Simulering	Tävlingsregler
Fordonet ska drivas uteslutande av elenergi	Boolesk: Ja	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Spänningskällan måste ha spänningen 12-48V (aldrig överstiga 60V)	48 V	K		Fysiskt test med mätningar	Tävlingsregler
Maximal momentan strömförbrukning 20A	<= 20 A	K		Fysiskt test med mätningar	Tävlingsregler
Återmatning av bromsenergi	Boolesk: Ja	Ö	4	Fysiskt test med mätningar	Projektgruppen
Frånkoppla motorn	Mekanisk frikoppling	Ö	3	Fordonskonstruktion	Projektgruppen
Det måste finnas plats för sex personer	Ska finnas sex sittplatser	K		Fysiskt test	Projektgruppen
Kunna köra genom växel, vägövergångar, kurvor samt upp- och nedförsbacke	Boolesk: Ja	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Storlek					
Gå att köra på räls med nominell spårvidd 1435mm och variationer	Genomförbart i 3,36km	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Inom tillåtna ramar för rälsbundna fordon	Inte överskrida de givna måtten	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Säkerhet					
Eldskydd för batteri samt BMS och skyddskrets (ifall litiumjonbatterier)	Enligt tävlingens standard	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Snabb utrymning av fordonet	max 20 sekunder från 15 km/h	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Ryggstöd för säte måste ha lutning mellan 60-90 grader, rel. horisontalplanet	60 - 90 grader	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Ryggstödet minimala höjd, 35 cm	minst 35 cm	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Golv eller nät som förhindrar fötter och armar från att fastna mot mark eller slippers	Heltäckande golv (inga hål större än en pingisboll)	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Skydd mot klämrisk av t.ex. fingrar i hjul och ekrar	Heltäckande kåpa (inga hål större än en pingisboll)	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Manuell (mekanisk) nödbroms	Stanna fordonet inom 10 sekunder från 15 km/h	K		Fysiskt test	Tävlingsregler
Konstruktion					
Modularitet	Minst 3 modulära delsystem	Ö	4	Fordonskonstruktion	Projektgruppen
Energieffektivitet	1 Wh/ personkilometer	Ö	5	Fysiskt test med mätningar	Projektgruppen
Utseende	Tre färger: svart, gul och brun	Ö	1	Fordonskonstruktion	Projektgruppen
Styva/hårda hjul	minst 124 HB	Ö	3	Fordonskonstruktion	Projektgruppen
Flänsar på hjulen	Tåla en sidokraft på 1000 N	K		Fordonskonstruktion	Projektgruppen
Låg massa	Under 150kg	Ö	4	Våg	Projektgruppen
Lågt luftmotstånd	Luftmotstånd konstant mindre än 0.4	Ö	2	Simulering	Projektgruppen
Mätenhet					
Plats för montering av mätenhet mellan batteri och drivsystem med dim. 28x21x15 cm	Mätenheten går att placera på den fastmonterade ramen	K		Fordonskonstruktion	Tävlingsregler
Locket på mätenheten måste kunna öppnas	Locket ska kunna öppnas inom 10 sekunder	K		Fysiskt test	Tävlingsregler

G Parametrar till Matlabmodellen

Fasta parametrar som inte varierades.

- Tyngdacceleration: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Fordonets främre tvärsnittsarea: $A_f = 0,632 \text{ m}^2$
- Luftens densitet: $\rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$
- Antalet passagerare: $n_{\text{pass}} = 6$ stycken
- Planetväxelns effektivitet: $\text{eff}_{\text{planet}} = 96\%$
- Kugghjulsväxelns effektivitet: $\text{eff}_{\text{kugg}} = 90\%$
- Transmissionens utväxling: 20:1
- Hjulradien: $r_{\text{hjul}} = 0,25 \text{ m}$
- Bandbredden av hastighetskontrollen: $\alpha_{sc} = 1 \text{ rad/s}$
- En graf över motorns effektivt: Modellerades utifrån motorfaktabladet [30]
- Motorns fasresistans: $R_{fas} = 0,05 \Omega$
- Motorns fscapacitance: $C_{fas} = 0,3 \text{ mF}$
- Motorns momentkonstant: $k_t = 0,12 \text{ Nm/A}$
- Motorns mot-emkkonstant: $k_e = 0,12 \text{ Vs/rad}$
- Motorns friktionskonstant: $k_f = 17,4 \mu\text{Nms/rad}$
- Systemets totala tröghet: $k_e = 0,10 \text{ gm}^2$
- En tabell av tävlingssträckans lutning: Gjordes enligt

Parametrar som varierades.

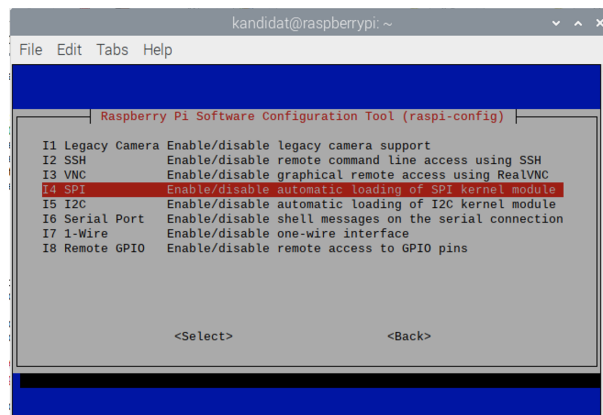
- Fordonets massa: m [kg]
- Luftmotståndskoefficienten: C_d enhetslöst
- Rullmotståndskoefficienten: C_r enhetslöst
- Genomsnittsmassan för passagerarna: m_{pass} [kg]
- Banans längd: D_{bana} [m]

H Konfigurering av Waveshare RS485 CAN HAT

Första steget i att konfigurera Raspberry Pi för användning av CAN-adaptorn var att initiera hårdvaran. Detta gjordes genom att lägga till följande i filen `/boot/config.txt`:

```
# Konfigurera RS485 CAN HAT
dtoverlay=mcp2515-can0,oscillator=12000000,interrupt=25,spimaxfrequency=2000000
```

SPI-gränssnittet initierades sedan med hjälp av terminalkommandot `sudo raspi-config`. Detta kommando öppnade en meny där alternativet "Interface Options" valdes. Därefter kunde SPI-kommunikationen slås på via menyvalet som visas i figur 32.



Figur 32: Meny för raspi-config.

För att se till att de nödvändiga kernel-modulerna `can` och `can_raw` alltid laddas vid uppstart, skapades filen `/etc/modules-load.d/can.conf`. I denna fil lades följande rader till:

```
can
can_raw
```

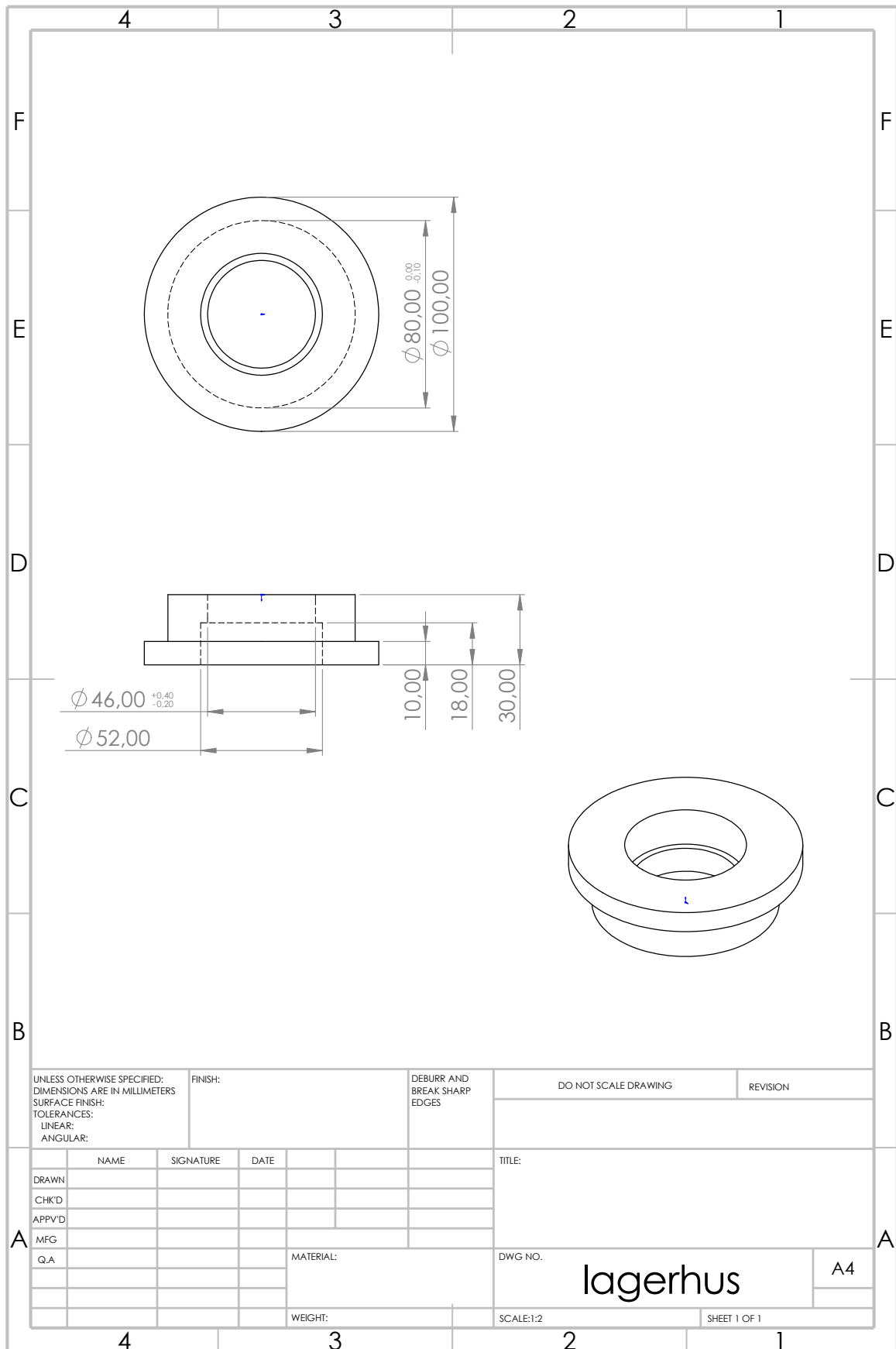
Därefter installerades och konfigurerades `systemd-networkd` för att automatisk initiera CAN-kommunikation vid uppstart. För att starta `systemd-networkd` användes följande kommandon i en terminal:

```
sudo systemctl start systemd-networkd
sudo systemctl enable systemd-networkd
```

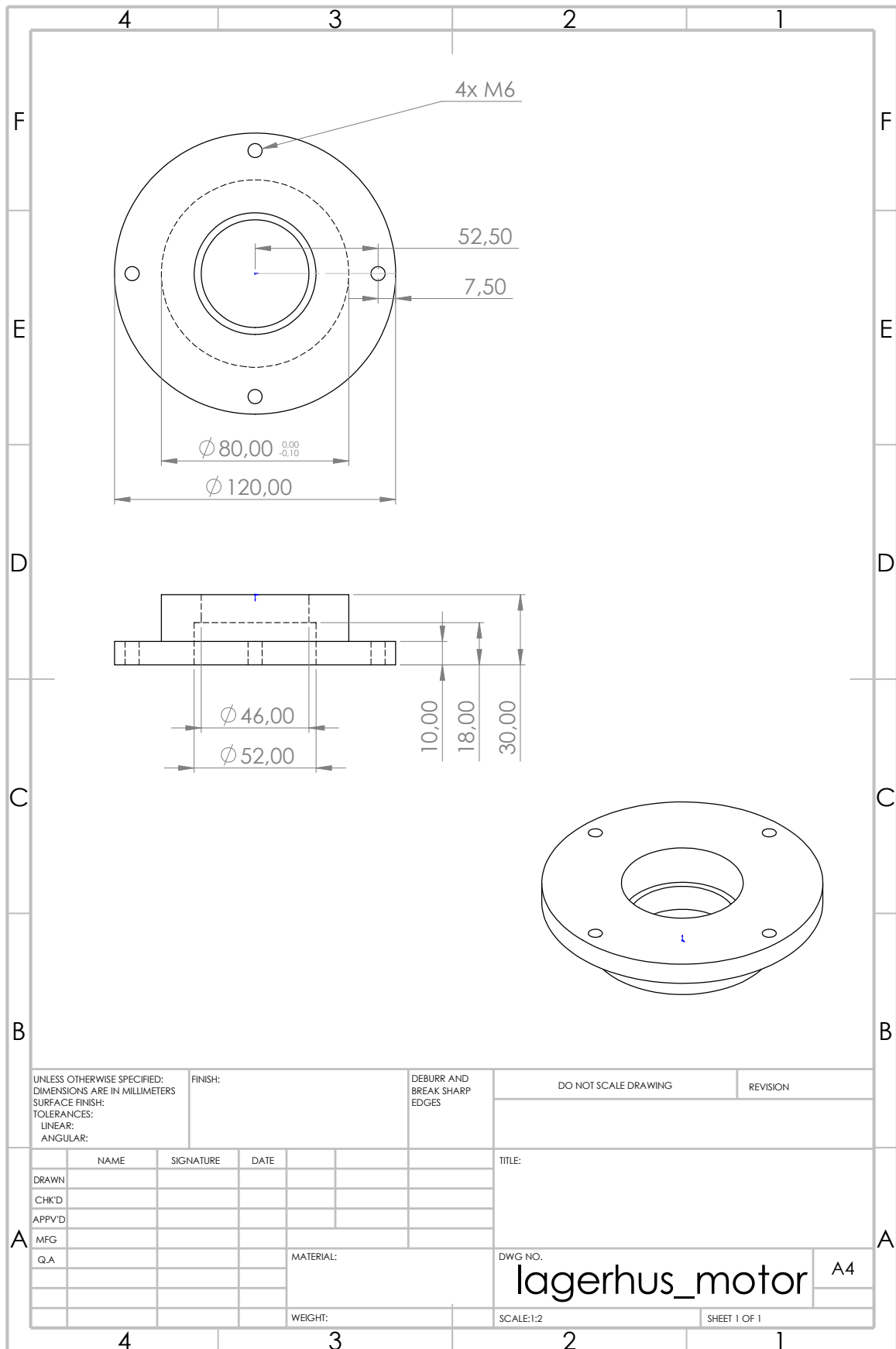
Slutligen konfigurerades `systemd-networkd` genom att skapa filen `/etc/systemd/network/80-can.networkd` och lägga till följande:

```
[Match]
Name=can0
[CAN]
BitRate=500K
RestartSec=100ms
```

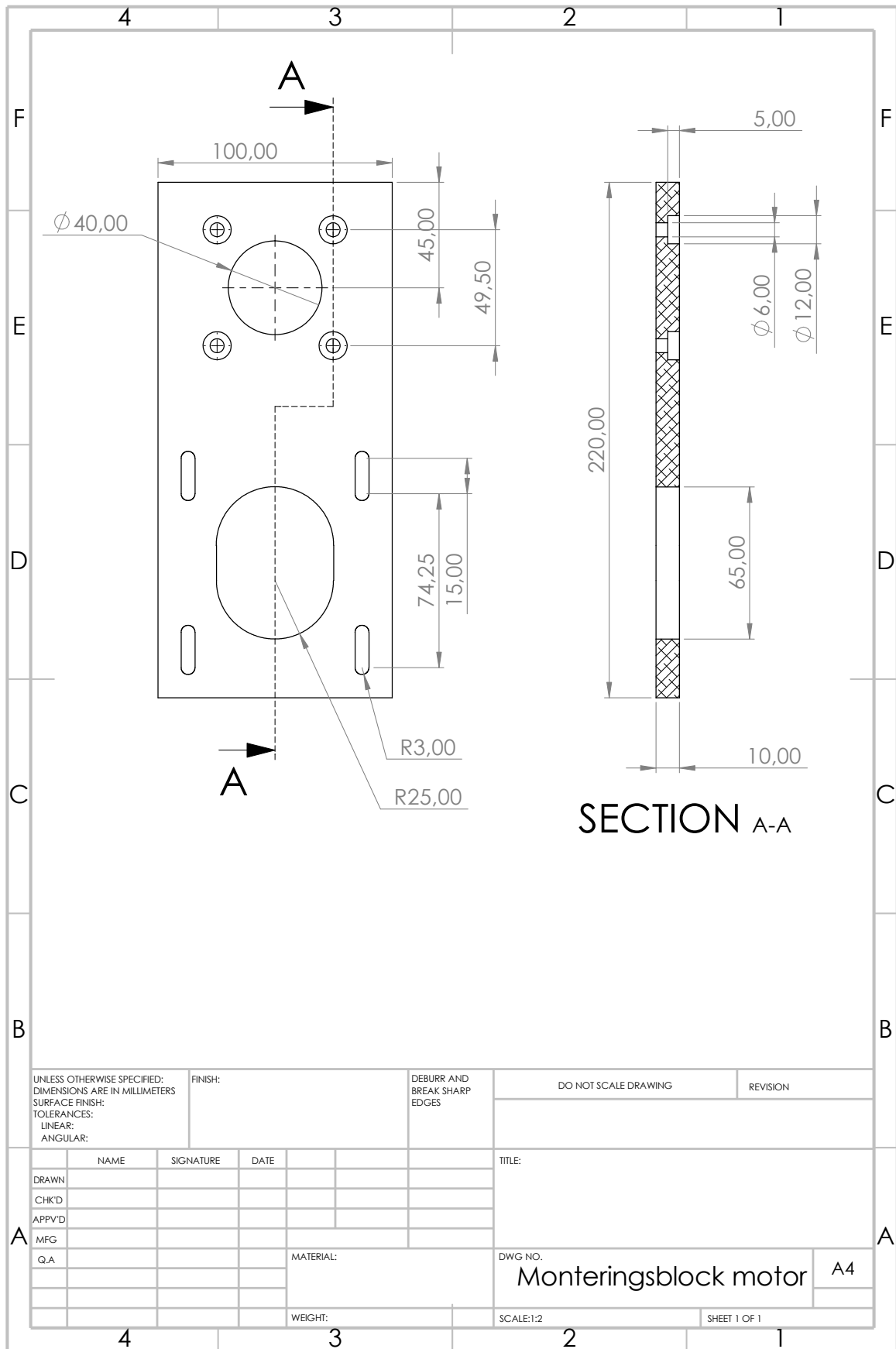
I Ritningar



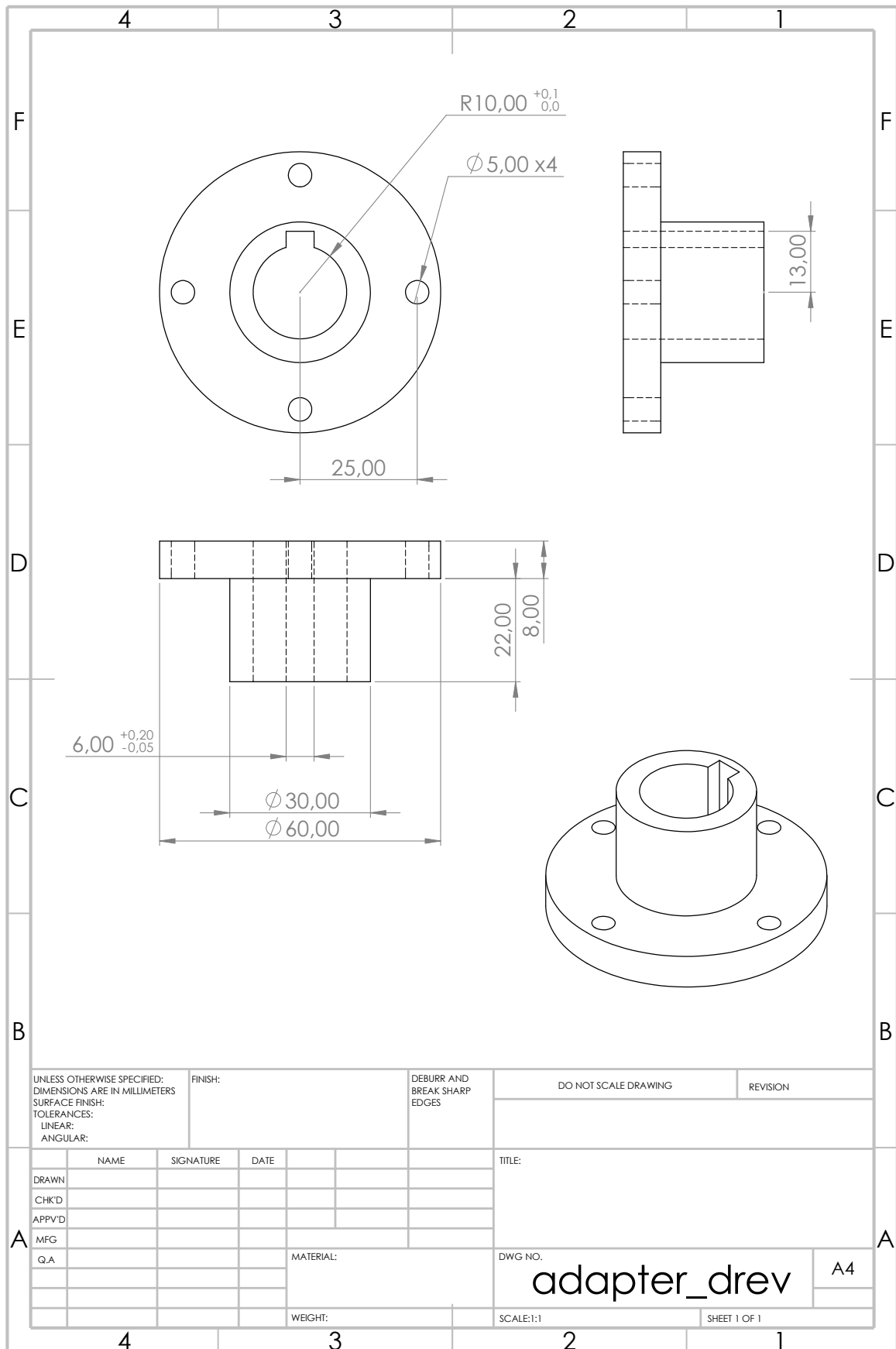
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



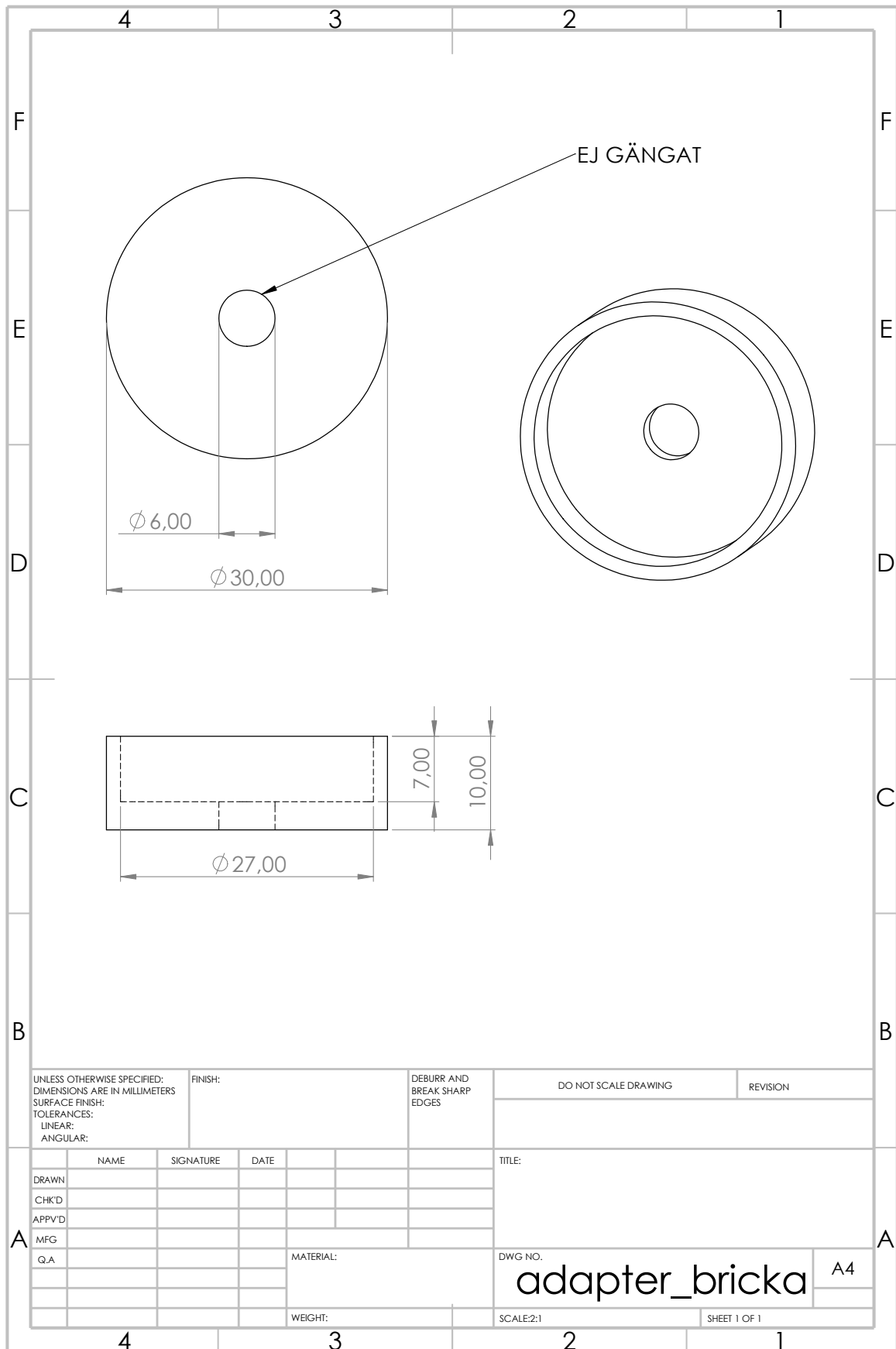
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



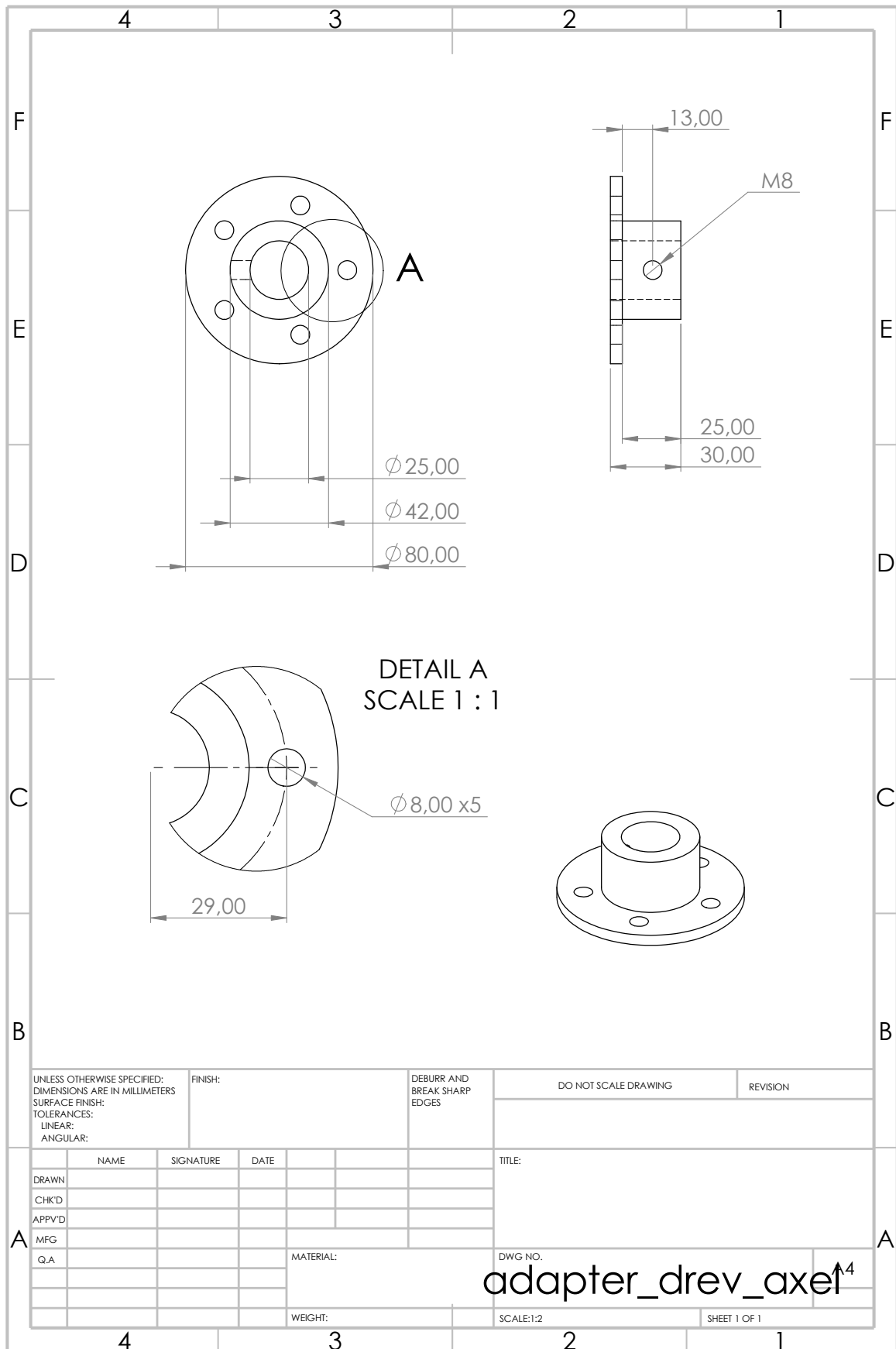
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



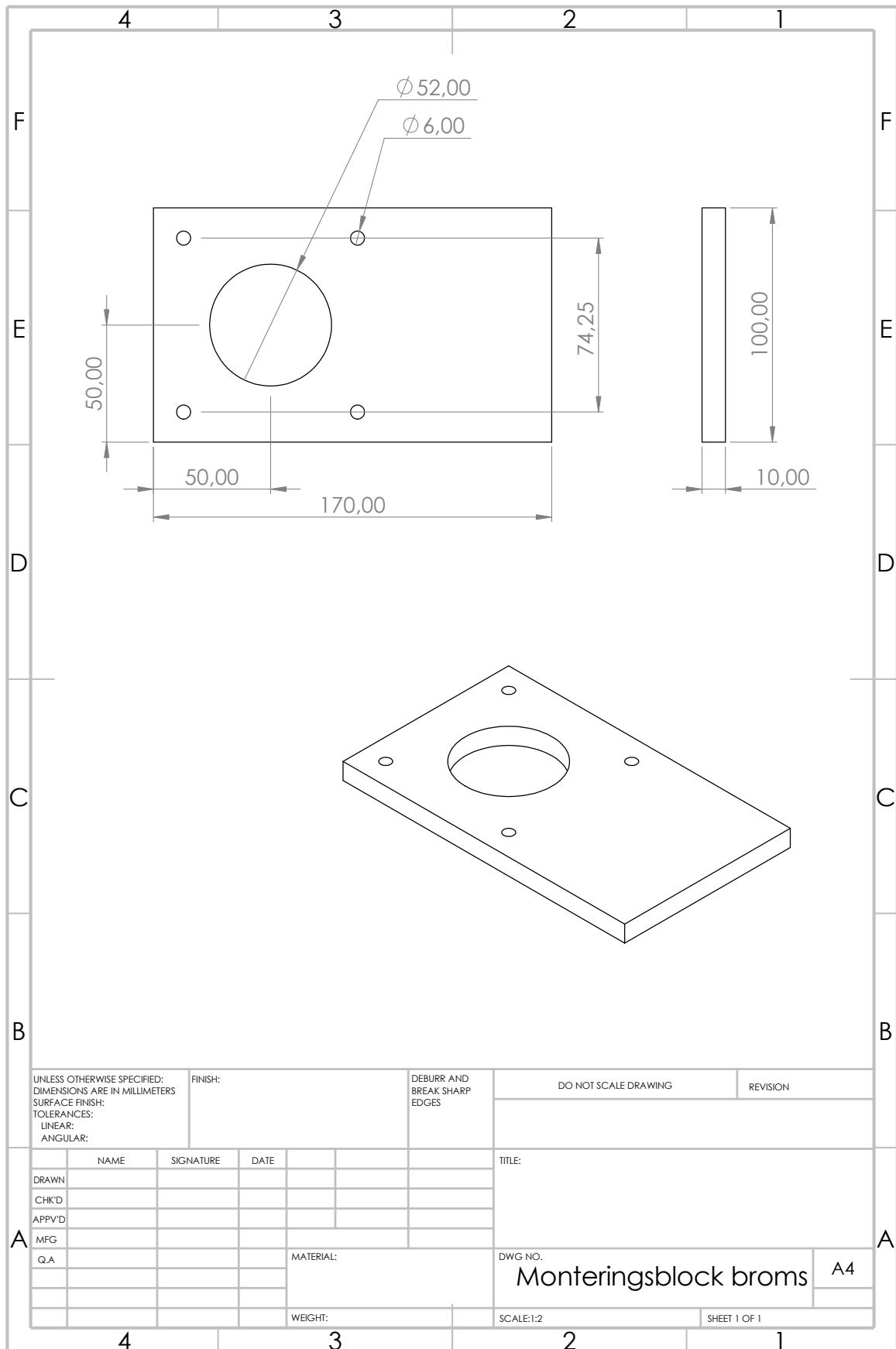
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

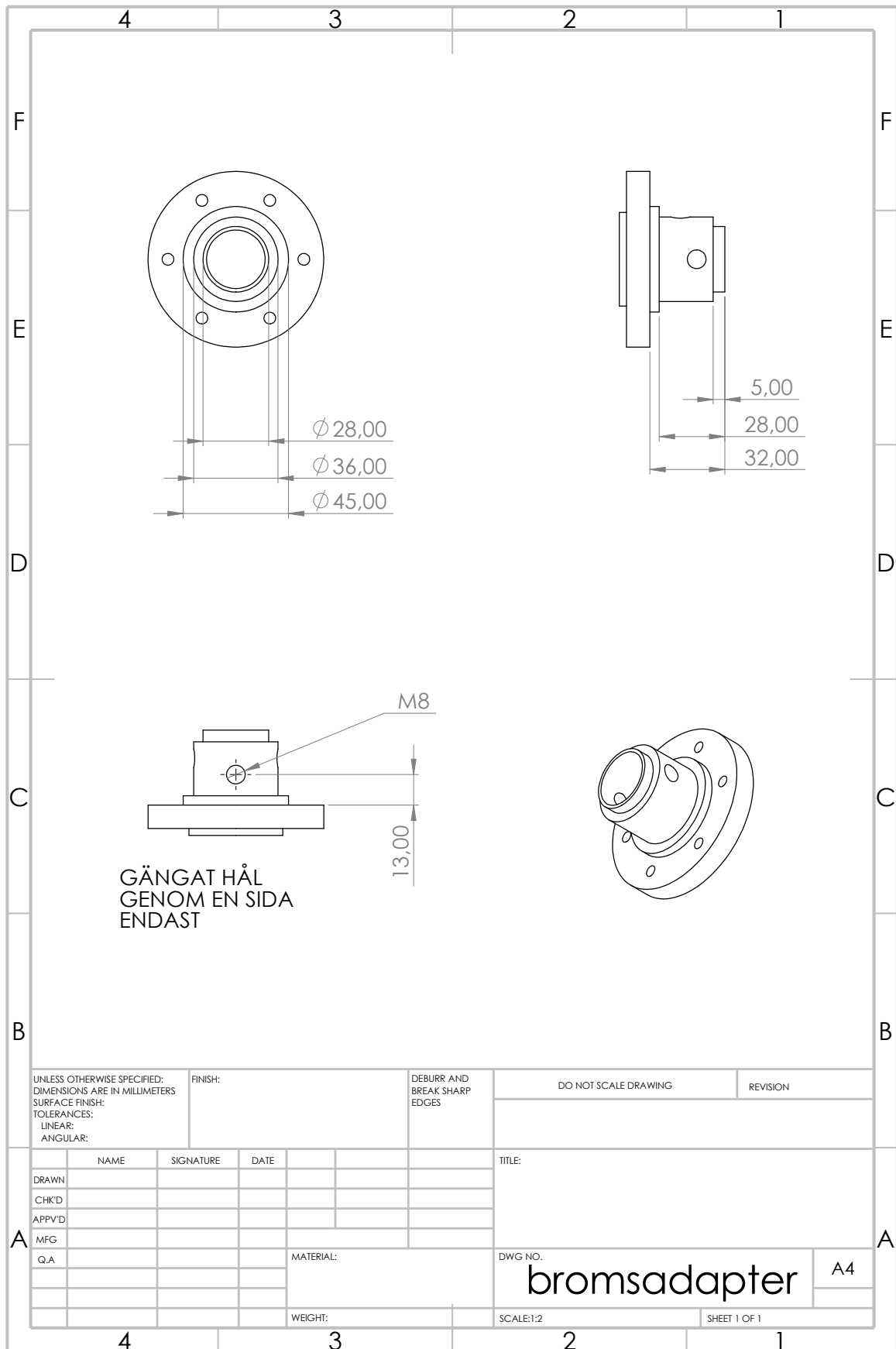


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



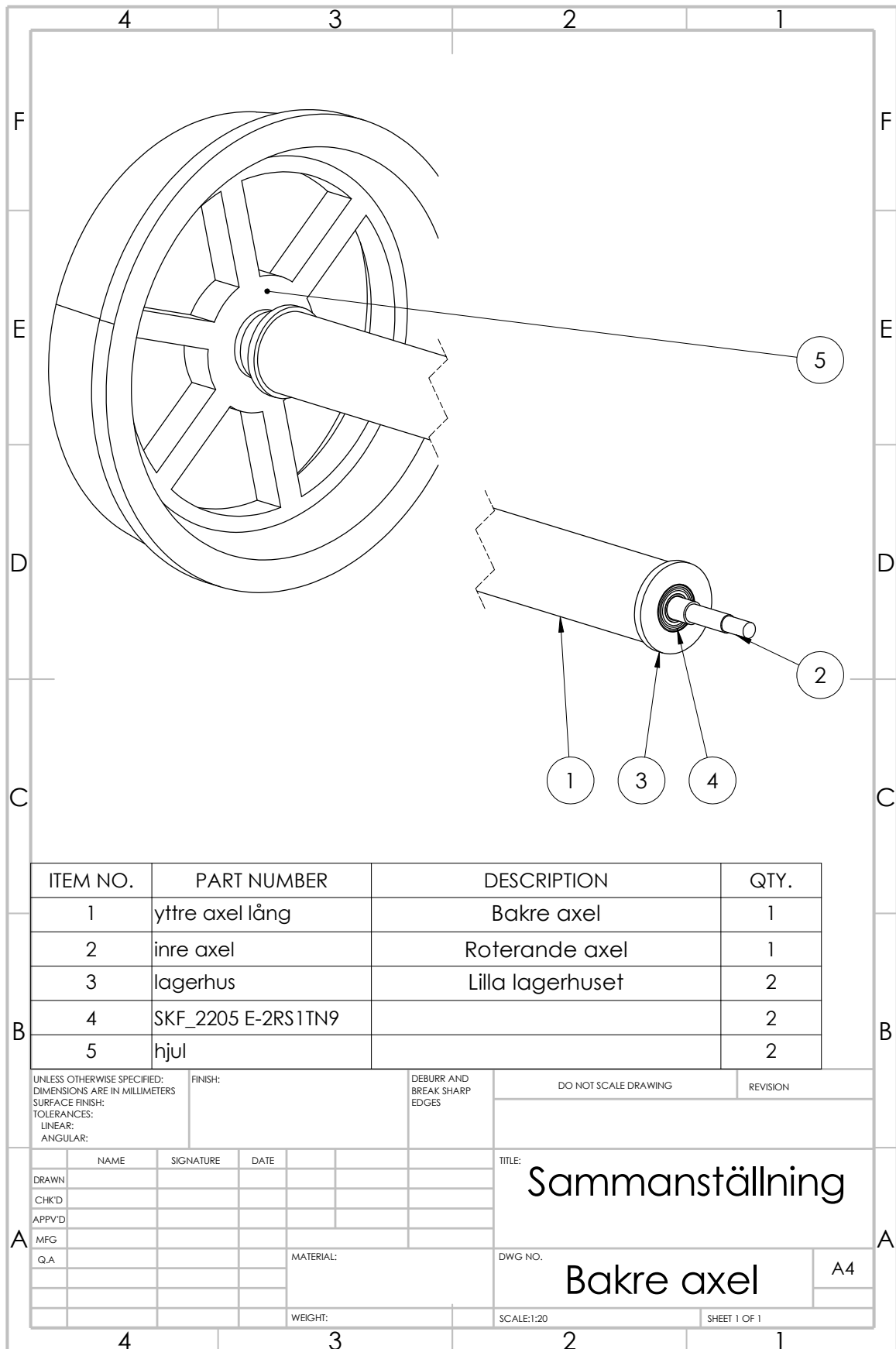
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		SIGNATURE	DATE	TITLE:		
CHK'D				DWG NO. Monteringsblock broms		
APPV'D						
MFG						
Q.A						
		MATERIAL:		SCALE:1:2		
		WEIGHT:		SHEET 1 OF 1		

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



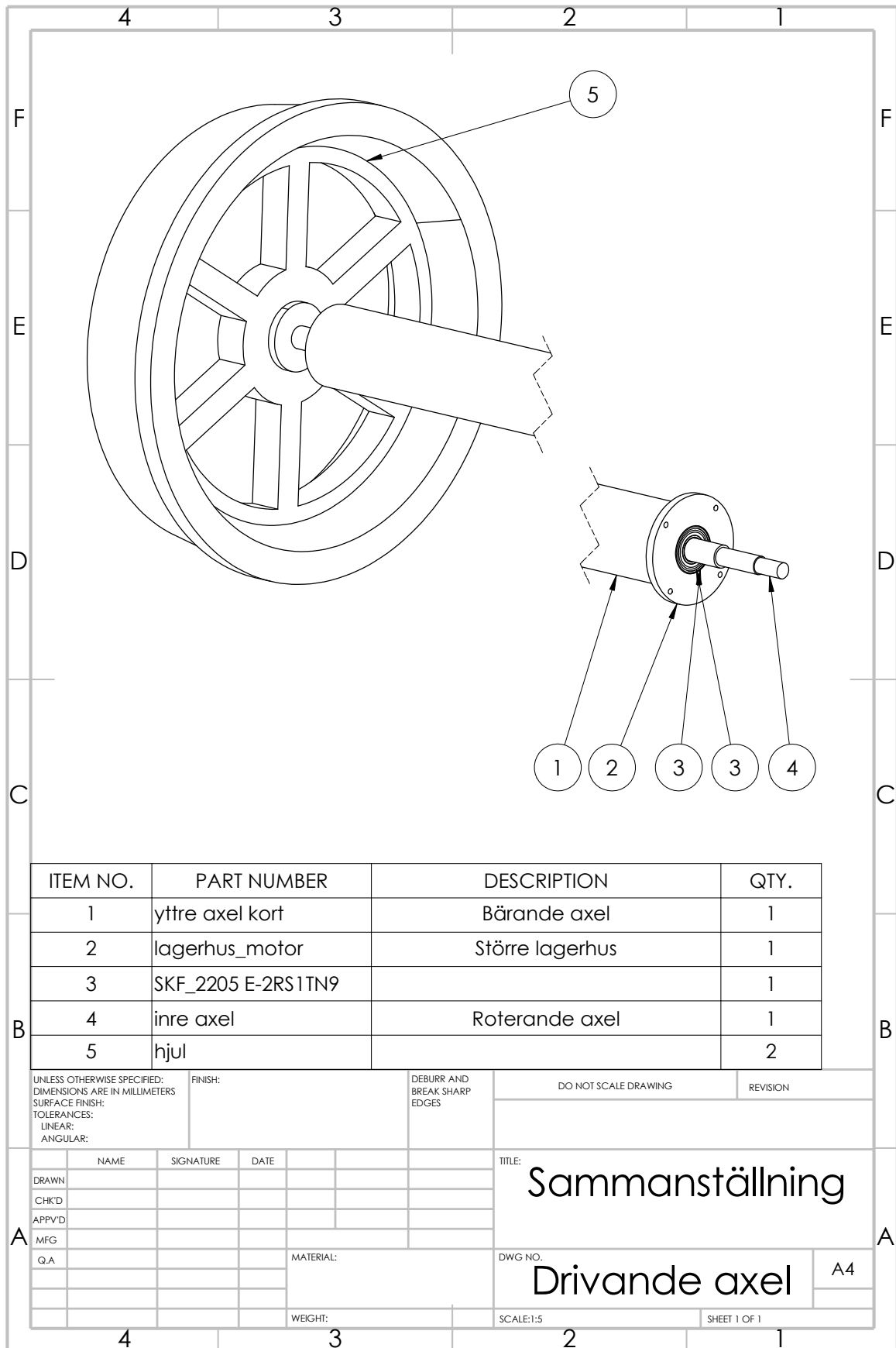
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

J Ritningar

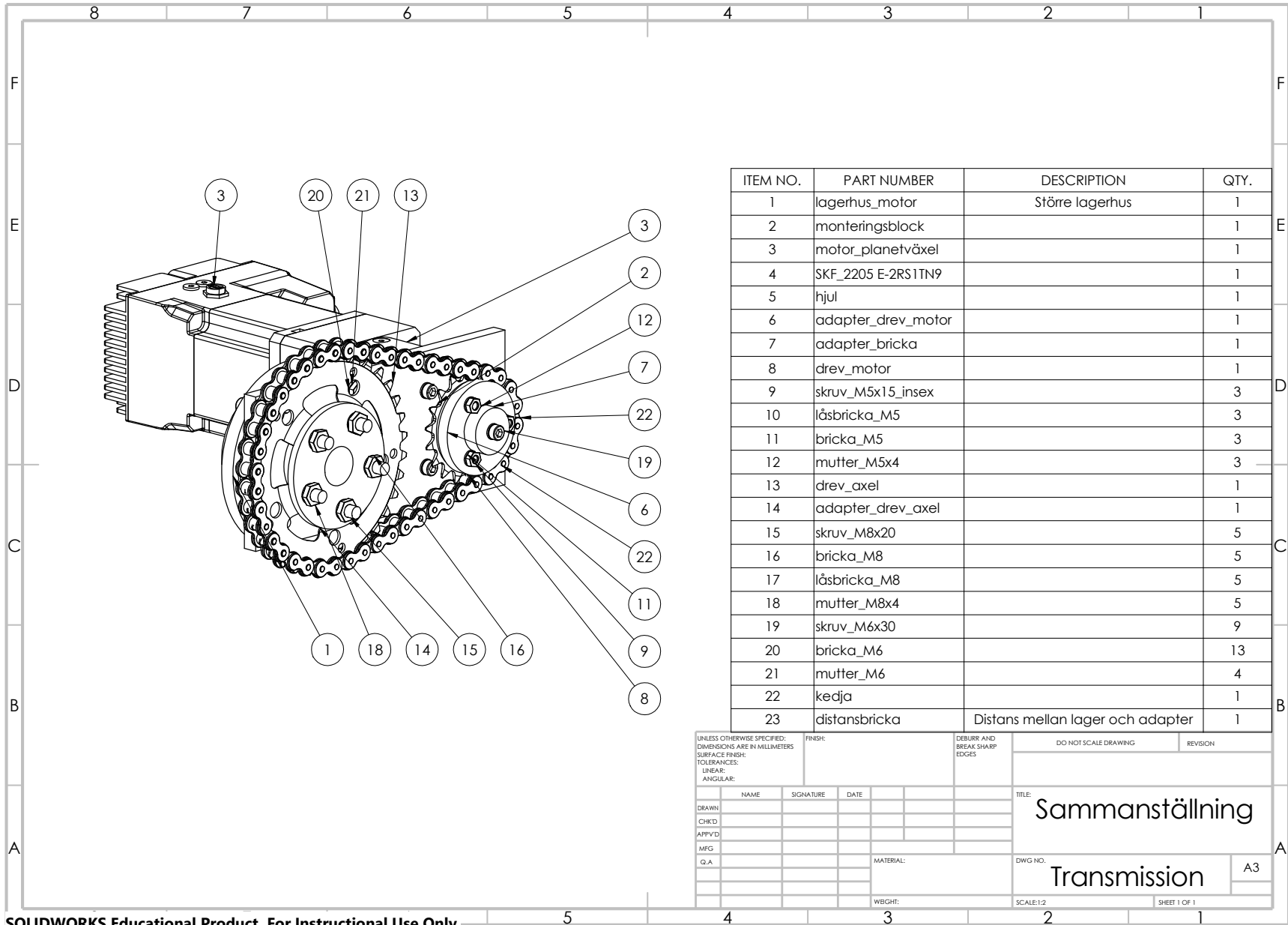


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	yttre axel lång	Bakre axel	1
2	inre axel	Roterande axel	1
3	lagerhus	Lilla lagerhuset	2
4	SKF_2205 E-2RS1TN9		2
5	hjul		2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Sammanställning	
DRAWN				DWG NO. Bakre axel	
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A			MATERIAL:	SCALE:1:20	SHEET 1 OF 1
			WEIGHT:		A4



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	lagerhus_motor	Större lagerhus	1
2	monteringsblock		1
3	motor_planetväxel		1
4	SKF_2205 E-2RS1TN9		1
5	hjul		1
6	adapter_drev_motor		1
7	adapter_bricka		1
8	drev_motor		1
9	skruv_M5x15_insex		3
10	låsbricka_M5		3
11	bricka_M5		3
12	mutter_M5x4		3
13	drev_axel		1
14	adapter_drev_axel		1
15	skruv_M8x20		5
16	bricka_M8		5
17	låsbricka_M8		5
18	mutter_M8x4		5
19	skruv_M6x30		9
20	bricka_M6		13
21	mutter_M6		4
22	kedja		1
23	distansbricka	Distans mellan lager och adapter	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

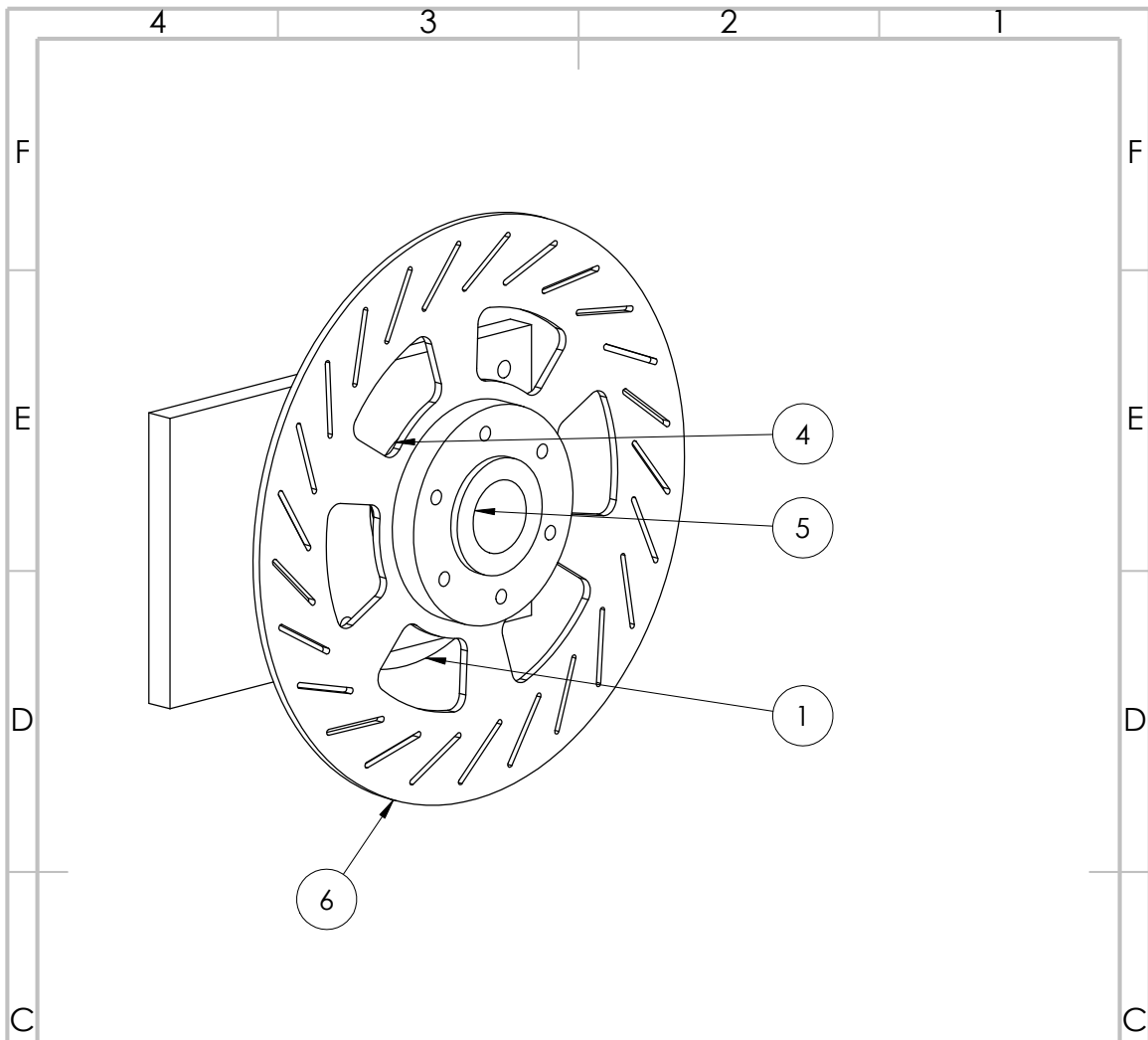
REVISION

TITLE:
Sammanställning
Transmission

DWG NO. A3

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	lagerhus_motor	Större lagerhus	1
2	SKF_2205 E-2RS1TN9		1
3	hjul		2
4	bricka_broms		1
5	bromsadapter		1
6	bromsskiva		1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Sammanställning	
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.	A4
			WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

K Fordonets specifikationer

Dimensioner och vikt	Storhet	Enhet
Längd	4,00	m
Bredd	1,62	m
Höjd	1,05	m
Vikt	104	kg
Medelhjulradie	0,25	m
Motor		
Märkeffekt	534	W
Märkmoment	1,7	N m
Maxmoment	5	N m
Märkström	14	A
Märkvarvtal	3000	rpm
Batterispänning	48	V DC
Utväxling	18,89:1	
Maxhastighet	~15	km/h
Övrigt		
Max antal personer	6	stycken

**INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se



CHALMERS