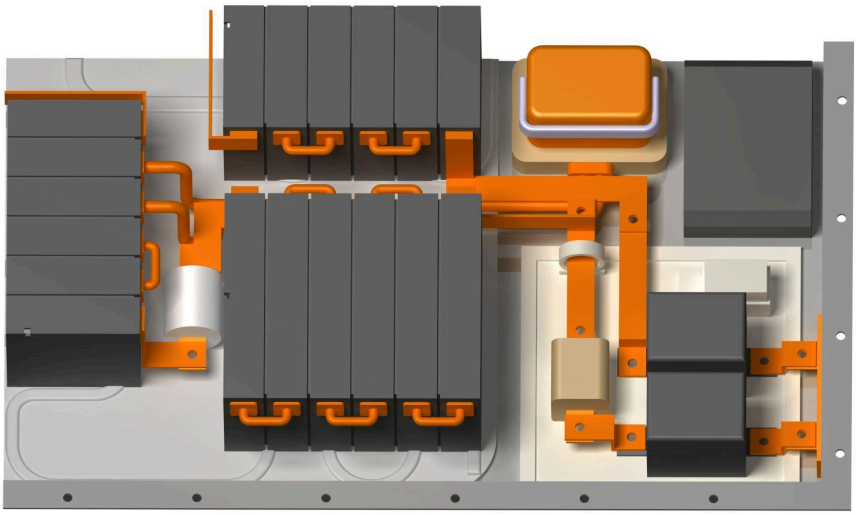
CHALMERS



Utformning av en elbilsbatterisimulator för en säker och effektiv lärandesituation

Undersökning av kritiska komponenter och moment för utvecklingen av ett praktiskt utbildningsverktyg

Design of an Electric Vehicle Battery Simulator to Enable a Safe and Efficient Learning Environment

Defining critical components and procedures for the development of a practical learning tool

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Design och produktutveckling

JOSEFIN AXELSSON
JOEL LUNDGREN

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

Utformning av en elbilsbatterisimulator för en säker och effektiv lärandesituation

Undersökning av kritiska komponenter och moment för utvecklingen av ett praktiskt utbildningsverktyg

Design of an Electric Vehicle Battery Simulator to Enable a Safe and Efficient Learning Environment

Defining critical components and procedures for the development of a practical learning tool

JOSEFIN AXELSSON

JOEL LUNDGREN

Institutionen för Industri- och materialvetenskap

Chalmers tekniska högskola

Göteborg, Sverige 2024

Utformning av en elbilsbatterisimulator för en säker och effektiv lärandesituation
Undersökning av kritiska komponenter och moment för utvecklingen av ett praktiskt utbildningsverktyg

Design of an Electric Vehicle Battery Simulator to Enable a Safe and Efficient Learning Environment
Defining critical components and procedures for the development of a practical learning tool

JOSEFIN AXELSSON
JOEL LUNDGREN

© JOSEFIN AXELSSON, 2024
© JOEL LUNDGREN, 2024

Uppdragsgivare: AdaptFuture AB

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

Erkännanden, dedikationer och liknande personliga uttalanden återspeglar författarens egna åsikter.

Omslag:
Illustration av en elbilsbatterisimulator

Göteborg, 2024

Sammanfattning

Idag finns det en brist på tekniker inom den snabbt växande elbilsindustrin. Den praktiska utbildningssituationen för service av elbilsbatterier är komplicerad på grund av att få säkra möjligheter finns för övning på högspänningskomponenter. Detta projekt utforskar hur en fysisk simulator av ett elbilsbatteri kan utformas för att möjliggöra en säker och effektiv utbildning av elbilstekniker och mekaniker.

Genom att studera olika servicescenarier i ett elbilsbatteri i kombination med att genomföra en litteraturstudie definierades komponenter samt dess funktioner och krav. Utifrån detta identifierades essentiella komponenter som organiserades likt ett typiskt elbilsbatteri för att simulera valda scenarier.

Med den utformade simulatorn kan tekniker öva på att arbeta med svetsade kontaktorer, isolationsfel och trasig säkring i batteriet. De- och remontering av Manual Service Disconnect (MSD) och batterihölje samt funktionalitetskontroll simuleras även av produkten.

Simulatorns layout och specifika mätpunkter definieras för att simulera spänningsvärden och motstånd. Dessa värden tillsammans med serviceprocessen för varje simulation är specificerade för varje scenario. Produktens koncept skiljer simulatorns elektroniska lösning från de komponenter teknikern ska interagera med. Dessa inramas av ett batterihölje som kommunicerar produktens layoutkoncept, där denna speglar en utklippt del av ett större batteri.

Elbilsbatterier är under snabb utveckling och kan därmed påverka de lösningar som definierats i projektet. För att motverka detta har produkten utformats modulärt för att tillåta enkel uppdatering av komponenter och scenarier. Därmed kan simulatorn fortsatt vara ett relevant utbildningsverktyg även vid förändrade villkor.

Nyckelord: Elbilsbatteri, utbildningssimulator, elbilsbatterikomponenter, praktisk simulering, servicesituationer.

Design of an Electric Vehicle Battery Simulator to Enable a Safe and Efficient Learning Environment
Defining critical components and procedures for the development of a practical learning tool

JOSEFIN AXELSSON
JOEL LUNDGREN
Department of Industrial and Materials Science
Chalmers University of Technology

Abstract

There is a lack of technicians in the fast-growing electric vehicle market of today. Furthermore, the technician's first interaction with a battery is in a high-voltage environment. In this thesis, a physical product is designed to simulate an electric vehicle battery. This ensures a safe and effective learning environment for training technicians. To uphold this, the product is to achieve the perception of a substantial scenario. By studying technicians performing the scenarios and completing a literature study of the functioning components the requirements were defined for the product and its components. Thereafter key components were identified and selected as well as their arrangements and functions.

The simulator is designed to allow the technician to practice their actions on welded contactors, loss of isolation and broken fuses. Demounting of the Manual Service Disconnect (MSD) and battery case are also included as well as a simulation to control the functionality of the battery. Together with the layout of the product, the scenarios are achieved by using specific measurements of voltages and relays, with a specified service procedure for each scenario.

The concept divides the functioning of the company-provided electronic solution from the visible battery from the technician. Furthermore, the layout features a framing of the battery, selectively showing the technician the most important components in an arrangement that communicates the continuous modules of the battery.

The electric vehicle market is under a fast development which could impact the solutions made through the project. However, the product is modular and could easily upgrade an individual component as well as a larger amount of components to fit the current market need.

The report is written in Swedish.

Key words: EV-battery, training simulator, EV-battery components, practical simulation, service scenarios.

Förkortningar

EV - Elbil (Electric Vehicle)

AC - Växelström (Alternating Current)

DC - Likström (Direct Current)

HV - Högspänning (High Voltage)

LV - Lågspänning (Low Voltage)

GPIO - General-Purpose Input/Output

Innehållsförteckning

1. Introduktion **1**
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte 1
1.3 Mål 2
1.4 Frågeställning 2
1.4.1 Delfrågeställningar 2
1.4.2 Framflyttning av kunskapsgränsen 2
1.6 Avgränsningar 3
1.7 Introduktion av uppdragsgivaren 3
2. Tidigare forskning **4**
2.1 Undersökning av komponenter 4
2.1.1 Battericeller och cellmoduler 4
2.1.2 BMS - Battery Management System 5
2.1.3 CMU - Cell Monitoring Unit 5
2.1.4 MSD - Manual Service Disconnect 6
2.1.5 BDU - Battery Disconnect Unit 6
2.1.6 Kontaktor 7
2.1.7 Säkring 7
2.1.8 Temperaturreglering 7
2.1.8.1 Kylelement 7
2.1.8.2 Värmeelement 7
2.1.9 Busbars 8
2.1.10 Kommunikationskablar 8
2.1.11 Shunt 8
2.1.12 DC-DC-konverterare 8
2.1.13 Batteriterminal 8
2.1.14 Batterihölje 9
2.1.15 Allmänna upptäckter 9
2.2 Krav och behov för komponenter 10
2.2.1 Allmänna krav på komponenter 10
2.2.2 Krav för celler och cellmoduler 10
2.2.3 Krav för BMS 11
2.2.4 Krav för CMU 11
2.2.5 Krav för MSD 11
2.2.6 Krav för BDU 12
2.2.7 Krav för kontaktor 12
2.2.8 Krav för säkring 12
2.2.9 Krav för temperaturreglering 12
2.2.10 Krav för busbars 13

2.2.11 Krav för kommunikationskablar 13
2.2.12 Krav för shunt 13
2.2.13 Krav för DC-DC-konverterare 13
2.2.14 Krav för batteriterminal 13
2.2.15 Krav för batterihölje 14
2.3 Undersökning av servicesituationer 14
2.3.1 Beskrivning av servicesituation 14
2.3.1.1 Trasig säkring i ett elbilsbatteri 14
2.3.1.2 Svetsad kontaktor i ett elbilsbatteri 15
2.3.1.3 Förlust av isolation i ett elbilsbatteri 16
2.3.1.4 MSD-brytning i ett elbilsbatteri 16
2.3.1.5 De- och remontering av batterilock 17
2.3.1.6 Funktionalitetskontroll i ett elbilsbatteri 17
2.3.2 Identifierade krav för servicesituationerna 17
2.3.2.1 Krav för simulation av trasig säkring 17
2.3.2.2 Krav för simulation av svetsad kontaktor 17
2.3.2.3 Krav för simulation av förlust av isolation 18
2.3.2.4 Krav för brytning av krets med MSD 18
2.3.2.5 Krav för simulation av de- och remontering av batterilock 18
2.3.2.6 Krav för simulation av funktionalitetskontroll 19
2.3.3 Mätvärden hos elbilsbatterier 19
3. Metod **20**
3.1 Genomförande av tidigare forskning 20
3.2 Kravspecifikation 20
3.3 Idégenerering 20
3.3.1 Layout 21
3.3.2 Tekniska lösningar 21
3.3.3 Utformning av komponenter 21
3.3.4 Brainstorming 21
3.3.5 Brainwriting 22
3.3.6 PNI 22
3.4 Utformning av simulering 22
3.4.1 Mätpunkter 22
3.4.2 Beräkning av önskade mätvärden 22
3.5 BOM-lista 23
3.6 Hantering av rekommenderade inköp 23
3.7 CAD-modellering 23
4. Resultat **24**
4.1 Simulatorns layout 24
4.2 Komponenter i simulatorn 28
4.2.1 Material för internt tillverkade komponenter 28

4.2.2 Beskrivning av komponenterna i simulatorn 28
4.2.2.1 Cellmoduler i simulatorn 28
4.2.2.2 Representation av BMS i simulatorn 30
4.2.2.3 Representation av CMU i simulatorn 31
4.2.2.4 MSD i simulatorn 31
4.2.2.5 BDU i simulatorn 31
4.2.2.6 Kontaktorer i simulatorn 32
4.2.2.7 Säkringar i simulatorn 32
4.2.2.8 Klimatelement i simulatorn 33
4.2.2.9 Busbars i simulatorn 33
4.2.2.10 Representation av kommunikationskablar i simulatorn 33
4.2.2.11 Batteriterminaler i simulatorn 34
4.2.2.12 Simulatorns batterihölje 34
4.2.2.13 Skruvförband i simulatorn 35
4.2.2.14 Simulatorns skyddande låda 35
4.3 Presentation av BOM-lista 35
4.4 Simulering av servicesituationer 38
a4.4.1 Mätpunkter i simulatorn 38
4.4.2 De- och remontering av batterilock i simulatorn 39
4.4.3 Simulerad brytning av MSD 40
4.4.4 Simulation av trasig säkring 41
4.4.5 Simulation av svestad kontaktor 42
4.4.6 Simulerad förlust av isolation 43
4.4.7 Funktionalitetskontroll i simulatorn 44
5. Hållbarhetsanalys **46**
6. Diskussion **48**
7. Slutsats **51**
Referenser **52**
Bilagor

1. Introduktion

Här introduceras projektet med beskrivning av elbilsindustrin samt bakgrund för elbilsbatterier som komponent. Projektets syfte, mål och frågeställningar definieras och dess avgränsningar beskrivs. Slutligen presenteras uppdragsgivaren för projektet.

1.1 Bakgrund

Under det senaste decenniet har fordonsindustrin genomgått ett paradigmskifte, det reflekteras i den enorma tillväxten inom elbilsindustrin. Världens största elbilsmarknad, Kina, har år för år ökat med runt 80% mellan 2014 och 2020 och förutspås att fortsätta växa fram till 2030 (Campagnol, 2021). Utvecklingen har lett till att efterfrågan på service av dessa nya elbilar ökat, och behovet av utbildade elbilstekniker och mekaniker har intensifierats. Idag finns det en stor brist på tekniker för elbilsbatterier runt om i världen (Thompson, 2023). Det är väldigt få verksamheter som har de nödvändiga tillgångarna för att genomföra felsökning och reparation (EVfriendly, 2023). EU har tagit initiativ för att åtgärda detta. Bland annat har Eit uttalat målet att utbilda 800 000 tekniker genom EBA-academy innan 2025 (Eit, 2022). Bristen på kompetens gällande service av elbilsbatterier leder till att batterier som skulle kunnat repareras för vidare bruk skrotas i förtid (EVfriendly, 2023).

En anledning till bristen på tekniker och mekaniker inom området är den komplicerade utbildningsprocessen. Ett elbilsbatteri innehåller höga spänningar som innebär en säkerhetsrisk för teknikern (Macholz, 2023; Livewire rEView, 2023). För att få arbeta med ett elbilsbatteri bör en mekaniker vara fullt certifierad, vilket innebär att mekanikern först interagerar med ett fysiskt elbilsbatteri när de är färdigutbildade (N. Ericsson, personlig kommunikation, 27 maj, 2024). För att låta teknikern öva kan problemen idag ibland återskapas i verkliga batterier, men detta är komplicerat och säkerheten är fortfarande en stor risk (H. Larsson, personlig kommunikation, 19 mars, 2024). Många åtgärder vidtas därför för att påminna teknikern om dess farliga situation (Macholz, 2023).

1.2 Syfte

Arbetet syftar till att utveckla en fysisk simulator som ska komma att fungera som utbildningsverktyg för nya elbilstekniker. Produkten ska erbjuda en verklighetstrogen och

säker övningssituation, med en generisk design för att ge teknikern den allmänna kunskapen som krävs för att kunna arbeta med flera typer av elbilsbatterier. Projektet ska undersöka hur miljön som ska efterliknas ser ut idag, vilka av dessa funktioner som är kritiska för en realistisk inlärningsmiljö samt vilka krav dessa ställer på produkten.

1.3 Mål

Målet med projektet är att utforma en lösning som kan simulera olika serviceprocesser av ett elbilsbatteri, från felsökning till genomförd åtgärd.

1.4 Frågeställning

Hur kan en lösning utformas för att verklighetstroget simulera serviceprocessen av ett elbilsbatteri?

1.4.1 Delfrågeställningar

- Vilka komponenter består ett typiskt elbilsbatteri av?
- Vilka situationer är önskvärda att simulera för att komplettera utbildningen av elbilstekniker?
- Hur ser serviceprocessen ut på ett riktigt elbilsbatteri för de önskvärda situationerna?
- Vilka funktioner och egenskaper krävs av produkten för att simulera de önskade situationerna?

1.4.2 Framflyttning av kunskapsgränsen

Genom att formulera ett koncept som konstaterar de viktigaste komponenterna i ett elbilsbatteri kan en utbildningssituation uppnås som berör största möjliga mängd variationer av elbilsbatterier. Därmed minskar säkerhetsrisken för de tekniker som fått möjligheten att öva på relevanta situationer som denne kan exponeras för i arbetslivet. Genom att formulera och återskapa vanliga servicesituationer exponeras teknikern för situationen i en ofarlig kontext samtidigt som denna skapar rutiner för de säkerhetsåtgärder som krävs i en verklig situation. Detta bidrar till ett mer effektivt och säkert arbete för de tekniker som fått genomgå praktisk utbildning, samtidigt som produkten i längden bidrar till fler utbildade tekniker med kompetensen och möjligheten att serva och reparera elbilsbatterier.

1.6 Avgränsningar

Projektet avgränsas till att utforma ett koncept på en fysisk simulator för ett typiskt elbilsbatteri. Detta innefattar de komponenter som är synliga eller kräver interaktion under simulerad utbildningssituation. Lösningen tar hänsyn till samtliga komponenters utrymmeskrav men berör inte utveckling av icke-synliga kopplingar eller funktioner som garanterar den elektroniska lösningens genomförande. Efter projektets slut behöver dessa kopplingar fortsatt undersökas utefter projektets leverabler och utformas för att möjliggöra simulatorns funktion.

Projektet begränsas även till företagets tillgängliga tillverkningsmöjligheter samt anpassas till dess förväntade produktionsvolym. Batchstorleken för produkten väntas vara tre till fem stycken under fasen för pre-production. Senare väntas produkten tillverkas i serie om tio stycken.

1.7 Introduktion av uppdragsgivaren

Uppdragsgivare för projektet är företaget AdaptFuture. AdaptFuture bildades 2020 och har hittills lanserat produkterna TVS-IOT (Traction Voltage Simulation) och TVS-RIG (AdaptFuture, 2024). Företaget utvecklar nu produkten BLS-IOT (Battery Learning System). Denna innefattar en elektronisk simulationsenhet, IOT, och en fysisk förlängning av lösningen, BLS. Projektets arbete syftar till att utforska möjlig utformning för BLS.

IOT har tio utgångar, varav fyra är strömförande med positiv och negativ pol, och övriga sex stycken är av typen GPIO. Produktens möjliga simulationer begränsas till dessa kanaler. IOT kontrolleras med hjälp av en app som tillåter användaren att välja vilket scenario som ska simuleras. Dessutom behöver IOT extern strömförsörjning för att fungera. (N. Ericsson, personlig kommunikation, 16 januari, 2024).

2. Tidigare forskning

I detta avsnitt genomförs en grundlig undersökning av vad som utgör ett typiskt elbilsbatteri, vilka komponenter det består av och hur dessa samverkar med varandra. Undersökningen leder till insikter om vilka krav och behov som ställs på simulatorns komponenter. Simultant undersöks olika servicesituationer för att lägga en grund för de funktioner som krävs för att kunna skapa realistiska simuleringar.

2.1 Undersökning av komponenter

I följande avsnitt undersöks de generella komponenterna i ett elbilsbatteri. Syftet är att få en förståelse över de komponenter som ett elbilsbatteri består av för att ligga till grund för vilka komponenter simulatorn bör innehålla.

2.1.1 Battericeller och cellmoduler

Den fundamentala energikällan i ett elbilsbatteri är battericellerna. Vid stora antal celler, vilket det är i rena elbilar, packas dessa tillsammans i mer lätthanterliga enheter kallade cellmoduler. Cellerna antingen serie- eller parallellkopplas i cellmodulen (Battery Design, u.å. a). Det finns tre etablerade typer av celler: cylindriska, prismatiska eller påsar (Keyence, u.å.). Kapaciteten och storleken på cellerna kan skilja sig markant mellan celltyperna. Cylindriska har vanligtvis en spänning runt 3,5 V, medan den genomsnittliga prismatiska cellen har en spänning på cirka 3,9 V (Lee, 2023). Påsar har liknande kapacitet som cylindriska celler (Keyence, u.å.). Cylindriska är generellt minst och den säregna formen gör att de packas annorlunda från de andra två. Ett batteri kan innehålla tusentals cylindriska celler packade i stora cellmoduler (Lucid Motors, 2022; Munro Live, 2024). Enligt Xie m.fl. (2024) är cylindriska celler den vanligaste celltypen på dagens marknad. Prismatiska och påsformade celler är i praktiken mycket snarlika rent fysiskt, eftersom påsarna behöver packas i skyddande höljen i liknande form som prismatiska celler (Munro Live, 2024). Detta leder till att även cellmodulerna blir snarlika, innehållandes relativt få celler, eftersom de är större och har högre effekt per cell i jämförelse med cylindriska.

De delar som håller ihop cellerna och utgör cellmodulen är olika siddelar som tillsammans bildar ett hölje som håller allting på rätt plats (Livewire rEView, 2023).

I dagsläget är det mycket ovanligt att tekniker arbetar på individuella celler. Cellmoduler är inte konstruerade för att kunna öppnas av tekniker (WeberAuto, 2019a). Även H. Larsson (personlig kommunikation, 15 april, 2024) menar att cellmoduler är den lägsta nivån av en batterikomponent som en tekniker arbetar med. Däremot tillägger Larsson att det kan vara värdefullt för tekniker att öva på att identifiera exakt vilken cell som felar. Genom detta ges teknikern möjligheten att mer detaljerat diagnostisera felet.

2.1.2 BMS - Battery Management System

Elbilsbatteriets Battery Management System (BMS) övervakar, skyddar och optimerar batteriet (Cao m.fl, 2023). Bland annat ström, spänning och temperatur övervakas av BMS (Recom, 2024). Denna information skickas sedan vidare till en felkodsläsare där teknikern kan läsa vad som är fel för att kunna åtgärda problemet.

BMS finns i samtliga observerade elbilsbatterier (WeberAuto 2019a; WeberAuto 2018a; Electron Automotive 2022; Livewire rEView, 2023). Enheten varierar i storlek, färg och form men samtliga har ett lågt rektangulärt hölje. Komponenten är antingen i ett svart eller aluminiumutförande.

BMS behöver kopplas bort från de system som den kontrollerar innan service genomförs för att inte påverka dess mätningsförmåga (WeberAuto 2019a; WeberAuto 2018a; Electron Automotive 2022).

2.1.3 CMU - Cell Monitoring Unit

Cell Monitoring Unit (CMU) är en komponent som mäter cellernas temperatur och spänning samt balansen mellan cellerna (NXP, u.å.). Genom att kontrollera att cellerna laddas och laddas ur på en jämn nivå kan onödigt slitage på cellerna förhindras (Battery Design, u.å. b). Normalt sett finns det en CMU per cellmodul (Munro Live, 2024). Datan från varje CMU färdas till BMS genom kommunikationskablar där den sedan behandlas.

Konventionellt är CMU en separat enhet som antingen är fastmonterad på sin cellmodul, eller är en centraliserad enhet som alla kommunikationskablar leder till (Amit & Aher, 2019). CMU separeras sällan från sin cellmodul, även om den kan vara monterad på olika sätt. I 2017 Chevrolet Bolt går kommunikationskablarna in i cellmodulen (WeberAuto, 2018a).

Enligt H. Larsson kan CMU vara en inbyggd del av cellmodulerna (personlig kommunikation, 15 april, 2024).

2.1.4 MSD - Manual Service Disconnect

Manual Service Disconnect (MSD) är en strömbrytare som används för att dela batteriets krets och isolera högspänningsbatteriet från resten av högspänningssystemet. Dessutom delar den batteriet i två halvor. Exempelvis delas ett 400 V-batteri i två halvor på 200 V var. MSD plockas därför ut innan en undersökning påbörjas på elbilsbatteriet för att minska risken för farlig elchock. Det finns även MSD med inkluderad säkringsfunktion som tillåter komponenten att bryta strömmen vid elektrisk överbelastning. (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023)

MSD kan ha flera steg av mindre låsningsfunktioner som behöver öppnas för att avlägsna komponenten. Exempelvis kan det vara olika knappar som behöver hållas in för att kunna lyfta på handtaget. Detta implementeras för att säkerställa att teknikern är medveten om sina handlingar. (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023)

Vid arbete med farlig utrustning används hänglås för att säkerställa komponenternas isolering från varandra (Safety House, 2022). Dessa lås används bland annat för att säkerställa att elektriska kontakter, som MSD, hålls separerade från kretsen under service.

2.1.5 BDU - Battery Disconnect Unit

Battery Disconnect Unit (BDU) är en samling av komponenter som kontrolleras av BMS (Cao m.fl., 2023). BDU kontrollerar och distribuerar energin från batteriet till resten av fordonet. Dess huvudsakliga funktion är att bryta strömflödet från batteriet i olika användningssituationer, som att fordonet stängs av eller om ett fel uppstår (Eaton, u.å.).

Komplexiteten och antal funktioner i en BDU kan variera mellan olika bilmodeller. De mest essentiella komponenterna i en BDU är: två terminaler, två huvudkontaktorer, en precharger, en strömavläsare samt säkringar (WeberAuto, 2022; Battery Design, u.å. c; Bratt Svensson & Engelbrektsson, 2017; Cao m.fl., 2023; LS e-Mobility Solutions, u.å.). Komponenterna är placerade i ett lättåtkomligt hölje eftersom dessa komponenter ofta går sönder först i batteriet och behöver service (Battery Design, u.å. c).

2.1.6 Kontaktor

Kontaktorer är en typ av komponent som kopplar samman två kretsar med varandra. I elbilsbatterier används deras funktion i flera olika syften. De två huvudkontaktorerna kopplar samman batteriets totala positiva respektive negativa terminal med alla bilens delar som behöver högspänningsström, och strömsätter på så sätt fordonet. Utöver detta används kontaktorer även i mindre system som snabbladdningsfunktioner, precharger samt eventuella stödkontaktorer. (WeberAuto, 2022)

2.1.7 Säkring

Ett elbilsbatteri innehåller ett flertal säkringar för att skydda batteriet och fordonet från elektriska överbelastningar och kortslutningar (Swe-check, u.å.). I högströmskretsar i bilar kan nedbultade säkringar användas (RS, 2024). I WeberAutos demonstrationsvideo (2022) uppvisas ett exempel på en säkring för bakaxeln på bilmodellen 2021 Ford Mustang Mach E GT.

2.1.8 Temperaturreglering

Ett elbilsbatteri opererar bäst inom temperaturintervallet 15°C till 35°C (Bhosale & Deshmukh, 2023). Temperaturregleringen kontrolleras av BMS (Synopsis, 2024).

2.1.8.1 Kylelement

Litiumcellerna i batteriet producerar värme vid upp- och urladdning (Callahan m. fl., 2024). För att hålla batteriet inom sitt optimala temperaturspann kan någon form av kylelement implementeras för att reglera temperaturen. Det finns flera olika typer av kylelement, bland annat luft, fenor, fasbytande ämnen, och kylarvätska, där kylarvätska är det mest lovande alternativet på marknaden idag, med hög effektivitet och värmekapacitet (Dober, u.å.). Utformningen av kylplattorna som vätskan går igenom anpassas efter utformningen av batteripacket, och skiljer sig därför mellan olika bilmodeller. Detta för att temperaturen hos cellmodulerna bör vara på samma nivå i hela batteripacket (Munro Live, 2024). Samtliga typer av cellmoduler kan också kylas genom en placering av kylplattorna under modulerna.

2.1.8.2 Värmeelement

Alex Knizek, chef för biltestning för Consumer Reports (Becker, 2024), berättar att många elbilar har ett värmesystem för att hålla batteriet inom sitt optimala temperaturspann. Utöver

det kan även värmeelement användas för att förvärma batterierna innan de laddas för att effektivisera uppladdningen och förlänga deras livslängd (Li m.fl., 2020).

2.1.9 Busbars

Busbars används för att koppla samman alla celler och cellmoduler med varandra och sluter batteriets krets (WeberAuto, 2018a). En busbar bör ha låg elektrisk och termisk resistans, hög hållfasthet och korrosionsbeständighet, vara lätt att tillverka, samt ha en konkurrenskraftig första kostnad och högt återvinningsvärde, enligt Chapman och Norris (2014). De presenterar koppar som det lämpligaste materialet för att uppfylla dessa behov.

2.1.10 Kommunikationskablar

Kommunikationen mellan BMS och de olika komponenter den samverkar med sker genom kommunikationskablar (Livewire rEView, 2023). Kablarna gör det möjligt för BMS att styra BDU och kontrollera bland annat cellmodulernas spänning och temperatur. Kablarna går vanligtvis längs med samma krets som energiströmmen går genom batteriet (Livewire rEView, 2023; Electron Automotive, 2022).

2.1.11 Shunt

En shunt används för att mäta energiflödet ut ur ett batteri och installeras direkt utanför batteriet kopplat till dess negativa terminal (Springers, u.å.). H. Larsson bekräftar att shunt normalt sett är placerad utanför batteriet i en servicelåda (personlig kommunikation, 19 mars, 2024).

2.1.12 DC-DC-konverterare

Den höga DC-spänningen från batteriet behövs endast för drivmotorn. Resterande utrustning i fordonet nyttjar DC-ström med låg spänning. DC-DC-konverteraren är den komponent som genomför den nödvändiga konverteringen av högspänningsströmmen ut ur batteriet till den lågspänningsström som bilens utrustning behöver. Konverteraren befinner sig utanför batteriet. (Panasonic, 2023)

2.1.13 Batteriterminal

Elbilsbatterier har en terminalkontakt som tillåter batteriets ström att kopplas till resten av fordonet. I 2017 Chevrolet Bolt sitter exempelvis kontakten av terminalen på utsidan av

batterihöljet. På insidan är komponentens positiva respektive negativa terminal fastkopplad med skruvar till batteriets totala positiva respektive negativa pol. Dessa två terminaler består av ledande metallstycken som går genom batterihöljet. (WeberAuto, 2018a)

2.1.14 Batterihölje

Hela batteriet packas i ett hölje som skyddar batteriet från de externa påfrestningarna som sker under bilen och vid kollisioner (AEC, u.å.). Genom detta ökar säkerheten för såväl batteriet som passagerarna. Höljet behöver även hålla tätt för att förhindra kontamination från exempelvis fukt och smuts (WeberAuto, 2018a). Detta ökar betydelsen av en pålitlig tätning i höljet som försäkrar packningens prestanda (Prostech, u.å.). Om höljet skadas behöver batterierna bli inspekterade och packade i ett nytt hölje (EVfriendly, 2023).

Traditionellt monteras batteriets hölje på fordonets stålram (Truett, 2022). Höljen i ledande metall, som aluminium, används som jord för batteriet (Electron Automotive, 2022; WeberAuto, 2019b). I dessa fall blir inte bara höljet jord, utan alla ledande material det är i kontakt med, inklusive fordonets stålram.

Som referens för de- och remontering av höljet används 2017 Chevrolet Bolt (WeberAuto, 2018a*;* WeberAuto, 2018b). Höljet skruvas samman med bultar (WeberAuto, 2018a). Bultarna de- och remonteras i specifik sekvens anpassad för fordonet (WeberAuto, 2018b). Ordningen skiljer sig mellan de- och remonteringen. Vid demontering skruvar teknikern bort en bult i taget medsols (WeberAuto, 2018a) medan remontering sker växlande mellan sidorna (WeberAuto, 2018b). Vid demonteringen bör de demonterade delarna förvaras organiserat inför remontering (WeberAuto, 2018a). Enligt H. Larsson är det viktigt för tekniker att få öva på att de- och remontera höljet (personlig kommunikation, 15 april, 2024). H. Larsson upplyser om att det inte finns någon standard för vilka skruvar och bultar som används i elbilsbatterier (personlig kommunikation, 2 maj, 2024).

2.1.15 Allmänna upptäckter

Samtliga komponenter som leder högspänningsström, det vill säga ström över 60 Volt (V) DC-ström eller 30 V AC-ström, markeras med orange färg (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Detta innefattar batteriterminalen, MSD, busbars och högspänningskablar. Vid arbete på dessa högspännningskomponenter behöver mekanikern använda isolerande

gummihandskar, med skyddande läderhandskar över, av säkerhetsskäl (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023; Livewire rEView, 2023).

Flera komponenter har olika namn eller förkortning för samma komponent. Exempelvis benämns BMS (Battery Management System) även som BECM (Battery Energy Control Module), ECU (Energy Control Unit) eller Kontrollmodul (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Även vanliga fel i bilen, som förlust av isolation, kan kallas olika saker av olika tillverkare (WeberAuto, 2019b).

2.2 Krav och behov för komponenter

I följande avsnitt definieras de krav och behov som varje komponent behöver uppfylla i simulatorn. Behoven berör i vilken grad komponenten är representerad, vilka funktioner den bör ha och hur den bör se ut.

2.2.1 Allmänna krav på komponenter

Samtliga komponenter som leder högspänningsström markeras med orange färg (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Detta innefattar MSD, batteriterminalen och högspänningskopplingar som busbars. Därför behöver dessa komponenter vara orangea i simulatorn. När man arbetar på högspänningskomponenter måste teknikern använda isolerande gummihandskar med skyddande läderhandskar över (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023; Livewire rEView, 2023). Att använda lämplig skyddsutrustning vid övning är därför nödvändigt.

2.2.2 Krav för celler och cellmoduler

För att inkludera samtliga önskvärda mätpunkter bör cellmodulerna i simulatorn innehålla prismatiska celler. Cylindriska celler är den vanligaste celltypen på marknaden (Xie m.fl., 2024), men cellmoduler med prismatiska celler har en enklare design i jämförelse, samtidigt som den erbjuder samtliga simulationsmöjligheter (*se 2.1.2 Battericeller och cellmoduler*).

Den genomsnittliga prismatiska cellen har en spänning på cirka 3,9 V (Lee, 2023). Av denna anledning bör cellerna i simulatorn vara på 3,9 V. Cellmodulen hålls ihop med hjälp av en hölje bestående av olika siddelar (Livewire rEView, 2023). Därför bör modulerna i simulatorn ha en representation av detta. Cellmoduler är inte konstruerade för att kunna

öppnas av tekniker (WeberAuto, 2019a; H. Larsson, personlig kommunikation, 15 april, 2024), därmed behöver modulerna inte vara demonterbara i simulatorn.

2.2.3 Krav för BMS

Enligt de kravställda och önskade simuleringssituationerna (*se bilaga A*) krävs inte en funktionell BMS i simulatorn. Komponenten finns i samtliga observationer (WeberAuto 2019, *11 december*; WeberAuto 2018a; Electron Automotive 2022; Livewire rEView, 2023) och bör därmed representeras visuellt i lösningen i antingen svart plast eller aluminium.

BMS kopplas bort från systemet innan tester genomförs på komponenter enheten är kopplad till (WeberAuto 2019, *11 december*; WeberAuto 2018a; Electron Automotive 2022; Livewire rEView, 2023). BMS bör därför gå att koppla ur från systemet i simulatorn.

2.2.4 Krav för CMU

Då informationen från CMU behandlas av BMS, som i simulatorn inte replikerar sin funktion (*se 2.2.3 Krav för BMS*), och att CMU saknar nödvändig funktion för de önskade simuleringssituationerna (*se bilaga A*) behöver inte heller CMU vara funktionell i simulatorn. CMU kan vara en inbyggd del av cellmodulerna i simulatorn (H. Larsson, personlig kommunikation, 15 april, 2024; WeberAuto, 2018a) . Det är dock viktigt att teknikern förstår att BMS mäter statusen på cellerna.

2.2.5 Krav för MSD

MSD är en central komponent som teknikern regelbundet interagerar med (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Därmed bör denna representeras i simulatorn. När MSD kopplas bort från simulatorn bör cellmodulerna delas upp i två halvor och kopplas bort från resten av högspänningsystemet (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). I samråd med H. Larsson (personlig kommunikation, 19 mars, 2024) anses det inte nödvändigt att simulera säkringsfel i MSD då service av säkringen kan simuleras på ett mer lättbegripligt sätt i andra delar av simulatorn. Öppningssekvenser i flera steg används för att säkerställa att teknikern är medveten om sina handlingar (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Därmed bör denna funktion finnas för MSD i simulatorn.

Vid arbete med farlig utrustning används hänglås för att säkerställa att komponenten hålls isolerad från systemet (Safety House, 2022). Därför bör ett tillhörande hänglås inkluderas.

2.2.6 Krav för BDU

BDU bör finnas med i simulatorn i form av ett skyddshölje med två terminaler innehållandes två kontaktorer, en precharger, en strömavläsare och en säkring, då dessa är de mest essentiella komponenterna (WeberAuto, 2022; Battery Design, u.å. c; Bratt Svensson & Engelbrektsson, 2017; Cao m.fl., 2023; LS e-Mobility Solutions, u.å.). Säkringen och de båda kontaktorerna bör ha funktioner som tillåter dem att simulera säkringsfel och svetsade kontaktorer (*se 2.3 Undersökning av servicesituationer*). De övriga komponenterna är inte en del av de önskade simuleringarna (*se 2.3 Undersökning av servicesituationer*) och behöver därför endast finnas representerade visuellt för att BDU ska uppfattas som verklighetstrogen.

2.2.7 Krav för kontaktor

Kontaktorer kopplar samman batteriets kretsar (WeberAuto, 2022). De två huvudkontaktorerna behöver därmed vara med i simulatorn. För att simulera kravställd servicesitauation (*se 2.3.1.2 Svetsad kontaktor i ett elbilsbatteri*) bör de även vara individuellt utbytbara. Servicesituationen uppfylls av två utbytbara kontaktorer. Kontaktorer i mindre system behöver därmed endast vara fysiskt representerade för igenkännbarhet.

2.2.8 Krav för säkring

I diskussion med en lärare inom batterielektriska system bör simulatorn innehålla två säkringar som ska kunna simulera säkringsfel; en mellan två cellmoduler och en inuti BDU. Anledningen är att båda dessa är typiska platser där en säkring kan gå sönder och det är därmed värdefullt för teknikern att veta hur båda varianterna av säkringsfel servas. Vid högströmsapplikationer i ett fordon kan nedbultade säkringar användas (RS, 2024). Eftersom att hög ström simuleras genom båda säkringarna bör båda dessa vara av typen nedbultad säkring.

2.2.9 Krav för temperaturreglering

Ett elbilsbatteri fungerar bäst i temperaturintervallet 15°C till 35°C (Bhosale & Deshmukh, 2023). Därmed är ett temperaturregleringssystem bestående av kylelement och värmeelement ett viktigt system i ett elbilsbatteri. H. Larsson (personlig kommunikation, 15 april, 2024)

förklarar att både kyl- och värmeelement kan integreras i ett enda klimatelement. Klimatelementet behöver inte vara funktionellt i simulatorn (H. Larsson, personlig kommunikation, 15 april, 2024).

2.2.10 Krav för busbars

Busbars används för att sluta kretsen i batteriet (WeberAuto, 2018a). De bör därför implementeras med samma funktion i simulatorn som i ett riktigt elbilsbatteri.

2.2.11 Krav för kommunikationskablar

Eftersom BMS inte är funktionell i simulatorn (*se 2.2.3 BMS*) saknas anledning till att kommunikationskablarna bör vara funktionella. De bör dock finnas representerade för att efterlikna det verkliga systemet och återskapa de moment där de interagerar med de olika servicescenarierna.

2.2.12 Krav för shunt

Då shunt placeras utanför batteriet (Springers, u.å.) och saknar nödvändig funktion för att simulera de önskade övningssituationerna (*se bilaga A*), bör komponenten inte representeras i simulatorn.

2.2.13 Krav för DC-DC-konverterare

Konverteraren befinner sig utanför batteriet (Panasonic, 2023) och saknar funktion som behöver simuleras i de önskade övningssituationerna (*se bilaga A*). Därmed bör DC-DC inte vara representerad i simulatorn.

2.2.14 Krav för batteriterminal

Elbilsbatterier har en terminalkontakt som tillåter batteriets ström att kopplas till resten av fordonet (WeberAuto, 2018a). Därför behöver även simulatorn ha en representation av batteriets terminal. Insidan av komponenten består huvudsakligen av två terminaler vilka fäster med skruvar till batteriets totala positiva respektive negativa pol (WeberAuto, 2018a). Batteriterminalen behöver därför vara möjlig att koppla till högspänningssystemet.

2.2.15 Krav för batterihölje

Elbilsbatterier packas i ett skyddande hölje (AEC, u.å.). Enligt Larsson är det viktigt för tekniker att få öva på att de- och remontera höljet (personlig kommunikation, 15 april, 2024). Därför bör en representation av höljet finnas med i simulatorn. Ett riktigt batterihölje behöver hålla tätt för kontaminering (WeberAuto, 2018). Samma tätningskrav som för ett verkligt elbilsbatteri ställs inte på höljet i simulatorn och därmed kan tätning utelämnas från höljet för att minska materialanvändning. Enligt Larsson finns det ingen standard för typ av skruvar och bultar (personlig kommunikation, 2 maj, 2024). Hon rekommenderar att M6 skruvar med brickor ska användas i hela simulatorn, även till höljet. Dessa ska fästas i höljet i en specifik sekvens (WeberAuto, 2018b). Därför bör M6-skruvar med brickor användas som fästen i simulatorn, med en angiven de- och remonteringsordning som efterliknar ordningen i referensen (WeberAuto, 2018b).

2.3 Undersökning av servicesituationer

I följande avsnitt undersöks och definieras de servicesituationer som önskats av uppdragsgivaren samt kompletterande situationer som identifierats. Undersökningen resulterar i en förståelse för varje situation och serviceprocess, som sedan ligger som grund till kraven på simuleringarna.

2.3.1 Beskrivning av servicesituation

Beskrivningen av servicesituationerna består av vilka komponenter som är inblandade, vad felet är, hur det uppstår samt hur en tekniker åtgärdar problemet idag.

2.3.1.1 Trasig säkring i ett elbilsbatteri

Säkringar används i elbilsbatterier för att skydda dess komponenter från elektriska överbelastningar och kortslutningar (Swe-check, u.å.). Ifall en överbelastning skulle passera genom säkringen smälter det ledande elementet, vilket bryter strömmen (Leach, 2019). Denna funktion gör säkringar användbara i flera olika områden i ett elbilsbatteri. Då en kritisk säkring gått kan ett felmeddelande triggas och bilen kan hindras från att starta (Supercheap Auto, u.å.).

Säkringen granskas antingen visuellt eller med multimeter. Då komponenten granskas visuellt plockas denna först ut av teknikern. Vid granskning med multimeter ställs verktyget in på att

genomföra ett kontinuitetstest då komponenten sitter kvar i batteriet. Sedan genomförs mätningen över säkringens två terminaler. En trasig säkring behöver alltid ersättas med en ny säkring av samma storlek och amperetal. (Supercheap Auto, u.å.)

Ifall en säkring går sönder i ett batteri är det ett tecken på att ett allvarligt fel har uppstått, och hela systemet bör kontrolleras för att identifiera och åtgärda orsaken till den trasiga säkringen (H. Larsson, personlig kommunikation, 10 juni, 2024).

2.3.1.2 Svetsad kontaktor i ett elbilsbatteri

En kontaktors funktion är att sammankoppla två kretsar med varandra (WeberAuto, 2022). När kontaktorn är påslagen sluts kretsen, och bryts igen när kontaktorn stängs av. Det finns två huvudkontaktorer som kopplar samman batteriets totala laddning med resten av fordonets högspänningsdelar (WeberAuto, 2022). Huvudkontaktorernas huvudsakliga funktion är att isolera batteriet från resten av fordonet vid avstängning eller vid nödsituationer som innebär säkerhetsrisker (Durakool, u.å.).

Svetsade kontakter är en stor orsak till att kontaktorer inte kan öppnas (NHP, u.å.). Mycket arbete har gjorts för att förhindra att kontakterna i kontaktorn svetsar fast, men yttre felfaktorer gör att det fortfarande är ett vanligt problem (NHP, u.å.). En orsak till problematiska svetsningar av kontakter är när kontakten i kontaktorn studsar upp vid stängning (Durakool, u.å.). Samma hastiga kontaktförlust kan uppstå vid kortslutningar (NHP, u.å.). Den höga inkopplingsströmmen kan då generera elektriska ljusbågar som smälter kontaktytorna, som sedan svetsar fast med varandra när de tillslut stängs och svalnar.

BMS skickar en felkod som berättar vilken kontaktor som felar (H. Larsson, personlig kommunikation, 13 februari, 2024). När en kontaktor testas för om den fungerar som den ska börjar teknikern av säkerhetsskäl med att koppla bort den från kretsen (ETEK, 2023). Sedan kan visuella inspektioner genomföras för att identifiera om något är utslitet, kontrollera den funktionella statusen, samt testa spolens resistans med en multimeter. För att kontrollera kontakternas funktionalitet som tänkt läses resistansen mellan kontakterna av med en multimeter (ETEK, 2023). Den generella åtgärden vid en svetsad kontaktor är att ersätta den med en ny (Word of Advice TV, 2019).

2.3.1.3 Förlust av isolation i ett elbilsbatteri

Förlust av isolation sker då resistansen mellan batteriet och de delar av batteriet som inte är tänkt att leda ström blir för låg (Hsu & Toward, 2023). Detta kan ske mellan batteriets positiva och negativa terminal, eller mellan dessa och fordonets chassi (Makermax, u.å.). Batteriets hölje är en del av fordonets chassi, och används därför lämpligtvis som mätpunkt när batteriet är avlägsnat från fordonet (Electron Automotive, 2022). Vid förlust av isolation upptäcks detta av reläer kopplade till BMS som skickar ut en felkod och bryter strömtillförseln (Hsu & Toward, 2023). Om endast en av antingen den positiva eller negativa polen har förlorat sin isolering är situationen ofarlig och fordonet fortsätter att fungera (WeberAuto, 2019).

Exempel på orsaker som kan ligga bakom förlust av isolation är:

- Överbelastning: Att applicera för hög spänning på isoleringsmaterial.
- Förorening: Damm, fukt, vätska eller andra föroreningar kan försämra isoleringsförmågan eller leda ström själva.
- Fysisk skada: Repor eller annan fysisk skada på isoleringsmaterial kan skapa en strömväg och orsaka problem.
- Spänningsbelastning: Med tiden kan AC-elektriska fält få isoleringsmaterial att brytas ned.

(Hsu & Toward, 2023)

För att genomföra en felsökning efter förlust av isolation börjar teknikern med att avlägsna MSD för att bryta batteriets krets på mitten och koppla bort BMS från enheterna. Sedan används en resistansmätare som kopplar mellan batterijord, exempelvis batterihöljet, och den sida av batteriet som ska testas. Mätverktyget mäter resistansen mellan de två mätpunkterna. Om mätaren visar att resistansen har sänkts går ström mellan punkterna och ett isolationsfel har därmed uppstått. Vidare kan teknikern undersöka exakt vilken enhet på den problematiska sidan som det är fel på genom att koppla bort enheterna från varandra och testa med isolationsmätaren på var och en av cellmodulerna. (Electron Automotive, 2022)

2.3.1.4 MSD-brytning i ett elbilsbatteri

När teknikern ska arbeta med högspänningskomponenter bör kretsen alltid först brytas för att minska säkerhetsrisken för en farlig elchock. Detta görs genom att dra ut MSD (*se 2.1.5 MSD*

- *Manual Service Disconnect*). När komponenten dras ur används isolerande skyddshandskar för att skydda teknikern från den höga spänningen. (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023)

2.3.1.5 De- och remontering av batterilock

Innan teknikern kommer åt batteriet behöver dess hölje öppnas. Detta är fastskruvat med skruvar. Dessa de- och remonteras i angiven sekvens specifik för varje fordon (WeberAuto, 2018b). Vid demonteringen bör de demonterade delarna förvaras organiserat inför remontering (WeberAuto, 2018a). Teknikern använder skyddsutrustning från och med att locket ska lyftas av (WeberAuto, 2018a).

2.3.1.6 Funktionalitetskontroll i ett elbilsbatteri

Enligt H. Larsson (personlig kommunikation, 15 april, 2024) genomför BMS en funktionalitetskontroll för att kontrollera batteriets funktion. Detta innefattar bland annat kontroll av batteriets spänningsvärden i olika lägen och av kontaktorernas funktionalitet.

2.3.2 Identifierade krav för servicesituationerna

Utifrån de beskrivna situationerna som önskas simuleras (*se 2.3.1 Beskrivning av servicesituation)* identifieras de mätpunkter och komponenter som krävs för att simulera scenariot.

2.3.2.1 Krav för simulation av trasig säkring

Då en säkring utsätts för en överbelastning bryts strömmen (Leach, 2019). Strömmen behöver därmed kunna brytas mellan två mätpunkter placerade på var sida av säkringen i simulatorn. För att testa en säkring kan ett kontinuitetstest genomföras med en multimeter (Supercheap Auto, u.å.). Mätpunkterna behöver därmed kunna användas för ett kontinuitetstest. En trasig säkring behöver ersättas av en säkring av samma storlek och amperetal (Supercheap Auto, u.å.). Därför bör teknikern ha möjligheten att montera bort säkringen i simulatorn och ersätta den med en säkring med samma specifikationer. Dessa uppgifter behöver därmed vara läsbara på säkringen.

2.3.2.2 Krav för simulation av svetsad kontaktor

BMS skickar felmeddelande om en kontaktor svetsats (H. Larsson, personlig kommunikation, 13 februari, 2024). Vid start av simulationen bör därmed teknikern informeras om att en

kontaktor svetsats. För att testa en kontaktors funktion börjar teknikern att koppla bort denna från kretsen (ETEK, 2023). Därför behöver kontaktorn gå att montera loss från simulatorn. För att kontrollera kontakternas funktion används en multimeter för att genomföra ett kontinuitetstest (ETEK, 2023). Den bortmonterade kontaktorn behöver därmed kunna simulera ett kontinuitetstest av en svetsad kontaktor. Den generella åtgärden vid en svetsad kontaktor är att byta ut den mot en ny (Word of Advice TV, 2019). Därmed bör simulatorn inkludera en kontaktor som kan ersätta den felande komponenten.

2.3.2.3 Krav för simulation av förlust av isolation

För att felsöka efter förlust av isolation behöver teknikern kunna mäta mellan batteriets positiva terminal, negativa terminal och fordonets chassi (Makermax, u.å.; Electron Automotive, 2022). Detta innebär tre separata mätpunkter i simulatorn; en för respektive terminal och en för chassi, som är representerat av batterihöljet. För att simulera felet krävs en tillfällig ström mellan respektive terminal och höljet. För att identifiera den felande cellen mäter teknikern mellan batteriets hölje och respektive cell (Electron Automotive, 2022). Därmed behöver tillfällig ledning av ström även ske mellan någon av cellerna och höljet för att simulera situationen. Dessutom krävs mätpunkt för varje cell fram till den felande cellen.

2.3.2.4 Krav för brytning av krets med MSD

När batteriets krets behöver brytas dras MSD ut (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). För att avlägsna MSD finns det steg med mindre låsfunktioner som behöver öppnas (Inside EV Training - with Daniel and Chris, 2023). Därmed behöver MSD kunna avlägsnas från simulatorn med en serie av upplåsningssteg. När MSD har dragits ur bör strömmen från cellmodulerna till BDU brytas och batteriets spänning delas upp i två halvor.

2.3.2.5 Krav för simulation av de- och remontering av batterilock

För att de- eller remontera locket på batteriet behöver teknikern skruva bort, respektive fast, bultar i en viss sekvens (WeberAuto, 2018a; WeberAuto, 2018b). Simulatorn kräver därmed bultar, skruvhål samt en definierad sekvens för att simulera scenariot. Verktyg för att genomföra momentet samt förvaring kan bidra till simulatorn genom att den omgivande miljön definieras.

2.3.2.6 Krav för simulation av funktionalitetskontroll

Batteriets spänningsvärden och komponenternas funktionalitet kontrolleras i batteriet (H. Larsson, personlig kommunikation, 15 april, 2024). Därför bör det finnas en möjlighet att kunna kontrollera batteriets funktionalitet.

2.3.3 Mätvärden hos elbilsbatterier

Idag är 400-volts-batterier vanligast på marknaden, men 800-volts-varianter blir allt mer populära (Osmanbasic, 2023). Därför bör batteriet kunna uppvisa värden på både 400 V och 800 V. Då prismatiska cellers genomsnittliga spänning är 3,9 V (Lee, 2023) adderas dess värde i och med att cellerna seriekopplas i batteriet.

3. Metod

I det här avsnittet beskrivs samtliga metoder i den ordning de genomförts i projektet. Denna innefattar tidigare forskning, kravspecifikation, idégenereringsprocessens tre steg samt metoderna brainstorming, brainwriting och PNI för bedömning av koncepten.

3.1 Genomförande av tidigare forskning

Projektets informationsinsamling utgick från ett teoretiskt underlag i form av vetenskapliga artiklar, akademiska rapporter, komponentbeskrivningar samt videomaterial från professionella mekaniker som bryter ner elbilsbatterier och dess komponenter i utbildningssyfte. Upptäckterna diskuterades med Li-Ion Battery Trainer H. Larsson för att skapa en ökad förståelse och utreda lämpliga krav på simulatorn. Undersökningen medgav en grundlig förståelse för elbilsbatteriers funktioner, komponenter, komposition och utseende, samt vilka problem som kan uppstå, hur dessa åtgärdas och hur tekniker interagerar med batteriet.

3.2 Kravspecifikation

Studien för tidigare forskning sammanfattades i en kravspecifikation (*se bilaga A*). I kravspecifikationen identifieras, organiseras och viktas de olika behov som lösningen bör uppfylla, med underkategorierna: simulerade situationer, funktioner, komponenter, utformning av komponenter, hållfasthet, hållbarhet och produktion. Simulerade situationer är de moment som simulatorn ska tillåta teknikern att öva på. För att simulera situationerna har nödvändiga funktioner och komponenter definierats samt dess allmänna krav om komponenternas utformning, mekaniska hållfasthet, miljömässiga hållbarhet, och produktionskrav.

3.3 Idégenerering

Under idégenereringsfasen användes metoderna brainstorming och brainwriting som utgångspunkt i samtliga problemlösningssessioner. Metoderna användes för att ohämmat skapa en stor idébredd. Idéerna som lyftes dokumenterades och vidareutvecklades innan alternativen jämfördes med hjälp av PNI-analyser vid behov.

Idégenereringsprocessen bestod av tre steg: layout, tekniska lösningar och utformning av komponenter. Det första steget, layout, agerar grund för hur kommande steg implementeras. Steg två, de tekniska lösningarna påverkar i sin tur hur steg tre, komponenterna, kan utformas för att alla krav ska uppfyllas. Stegens beroende av varandra förstärker behovet av att arbeta iterativt eftersom insikter som görs i ett steg kan påverka och förändra kraven på de föregående. Däremot baserades idéerna i stegen på de tidigare lösningarna i successiv ordning för att säkerställa slutresultatets funktion inom samtliga områden.

3.3.1 Layout

Komponenternas placering i simulatorn utforskades främst med hjälp av CATIA V5 genom att skapa en låda för varje komponent med dess generella huvudmått. Dessa placerades sedan i olika konstellationer för att undersöka möjliga komponentlayouter. Koncepten utvärderades med PNI (*se 3.3.4 PNI*). Tillsammans med PNI utvärderades koncepten även i samråd med företaget samt H. Larsson innan slutgiltigt koncept för layout valdes.

3.3.2 Tekniska lösningar

Tekniska lösningar avser de kopplingar och mekaniska egenskaper som krävs av lösningarna för att simulera den önskade situationen.

3.3.3 Utformning av komponenter

Slutligen utformades komponenternas form och färg. Dessa behöver vara anpassade efter layouten och de tekniska lösningarna samtidigt som de är igenkännbara som typiska representationer av varje komponent. Lösningen tar även hänsyn till tillverkning och montering av komponenterna.

3.3.4 Brainstorming

Brainstorming genomfördes för att skapa en stor idébredd för produktens lösningar enligt Kenneth Österlin (2016). Metoden genomfördes i omgångar för att iterativt utveckla lösningarna.

3.3.5 Brainwriting

För att vidareutveckla de olika koncepten användes metoden för brainwriting. Denna låter varje idé itereras individuellt för att sedan presenteras (Österlin, 2016). Metoden användes ett upprepat antal gånger för att skapa en oberoende och innovativ idébredd.

3.3.6 PNI

PNI analys utfördes för att bedöma likvärdiga lösningar enligt positivt, negativt och intressant. Dessa listas enligt kategorierna i en tabell för att skapa en översikt för de aktuella koncepten (Österlin, 2016). Metoden skapar underlag för grundande beslut i flertalet steg av idégenereringsprocessen vid eliminering eller vidaretagande av koncept.

3.4 Utformning av simulering

De önskade simuleringarna definierades genom faktainsamling av vilka komponenter situationen berör, hur situationen uppstår, hur problemet felsökes och vilka åtgärder som vidtas. Utifrån detta identifierades de element som är kritiska för att simulera serviceprocessen.

3.4.1 Mätpunkter

För att identifiera de nödvändiga mätpunkterna i simulatorn genomfördes en litteraturstudie för hur mätningar i de olika servicesituationerna går till. Samtliga tänkvärda mätpunkter listades. Punkterna med direkt interaktion till IOT valdes med hänsyn till antalet GPIO-kanaler och spänningsförande utgångar. Därefter beräknades önskade mätvärden för de olika mätpunkterna.

3.4.2 Beräkning av önskade mätvärden

För att ta fram de mätvärden som de olika mätpunkterna i simulatorn ska generera genomfördes en litteraturstudie. Undersökningen resulterade i de värden som motsvarande komponent typiskt sett har i ett verkligt elbilsbatteri. Dessa värden adderas i systemet enligt principen för seriekoppling för att återskapa samma korrekta mätvärden mellan simulatorns olika mätpunkter.

3.5 BOM-lista

En BOM-lista (Bill of Materials) skapades med grund i resultaten av komponentundersökningen och lösningarna som tagits fram. Denna listar simulatorns samtliga komponenter och dess respektive specifikationer. Utifrån de krav som ställs på varje komponent avgjordes och motiverades ifall komponenten kunde beställas som externt tillverkad standardkomponent eller om denna bör tillverkas internt. Därefter identifierades material lämpliga för de tillverkningstekniker som kan tillämpas med avseende på planerad produktion (*se 1.5 Avgränsningar*). Lämpliga material undersöktes genom en kompletterande litteraturstudie. Identifierade materialalternativ jämfördes därefter i Granta EduPack 2023 R1.

3.6 Hantering av rekommenderade inköp

Uppdragsgivaren efterfrågade en lista av specifika, rekommenderade produkter att köpa in för standardkomponenterna i simulatorn. Rekommendationerna baseras de krav som ställs på respektive produkt (*se 2.2 Krav och behov för komponenter*). Länkar till dessa rekommenderade komponenter är samlade som en bilaga (*se bilaga B*).

3.7 CAD-modellering

En CAD-modell skapades i CATIA V5 för att utveckla och verifiera simulatorns layout samt illustrera slutkonceptet. Samtliga komponenter representeras med konceptuell form och yta i en Assembly. I denna visas komponenternas interaktion och koppling till varandra.

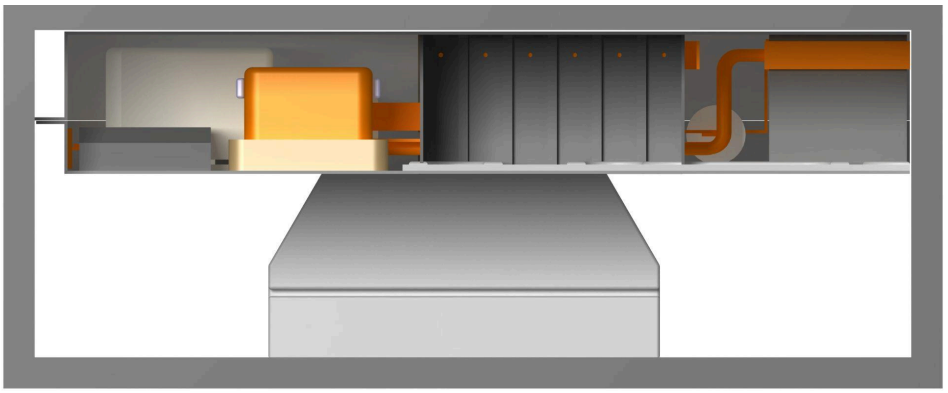
4. Resultat

I följande kapitel presenteras de slutliga lösningarna på de krav och behov som ställts på konceptet. Simulatorns slutgiltiga koncept innefattar leveranser av en layout, komponentlista, BOM-lista, samt simuleringssituationer. Konceptets layout presenterar simulatorns inredning i två lager. De olika lagrens komponenter presenteras i detalj för att sedan sammanfattas i en BOM-lista tillsammans med dess material och tillverkningsteknik. De simulerade situationerna beskriver övningsledarens och teknikerns roll samt interaktioner med simulatorn under övningen. Här beskrivs även de mätpunkter som teknikern interagerar med under de olika simulationerna.

4.1 Simulatorns layout

Idébredden för layoutkoncepten jämfördes med hjälp av en PNI-analys (*se bilaga C*). Det koncept som valdes för vidareutveckling är bäst lämpat utefter de krav som ställs av servicesituationen *2.3.1.3 Förlust av isolation i ett elbilsbatteri*. Med en komplett cellmodul kan teknikern montera bort busbars från modulens båda sidor, vilket är nödvändigt vid service. Dessutom är konceptet det alternativ som anses efterlikna ett verkligt elbilsbatteri till högst grad. Detta koncept uppdaterades och anpassades efter de nya upptäckter under arbetets progression för att slutligen resultera i följande layoutkoncept.

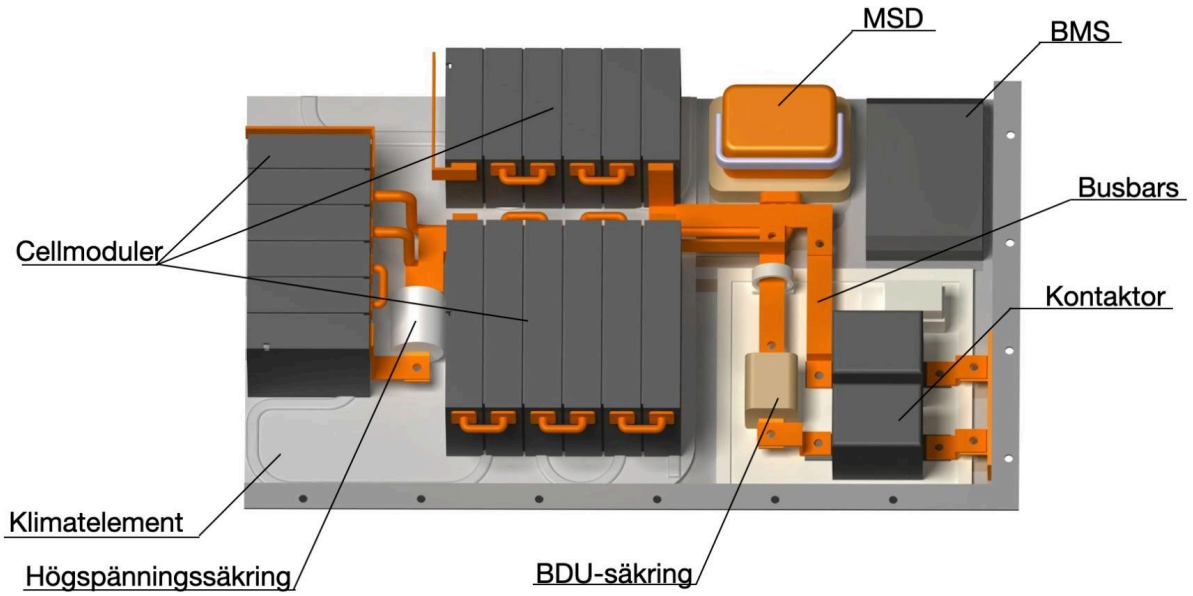
Slutkonceptet presenterar en komponentplacering i två huvudsakliga lager (*se figur 1*). I det nedre lagret befinner sig IOT med tillhörande kablar. Detta lager är dolt för teknikern. I det övre, synliga lagret befinner sig samtliga komponenter som utgör det batteri som teknikern ska interagera med.



Figur 1. *Illustration av konceptets övre och undre lager, utan kablar.*

De icke-funktionella komponenterna består av skal som efterliknar komponentens färg, form och material. Dessa ihåliga komponenter utgör en möjlighet att dra funktionsnödvändiga kopplingar och placera komponenter övningsledaren behöver kunna nå, utan att vara synliga för teknikern. I simulatorn placeras en powerbank för strömförsörjning i skalet av BMS.

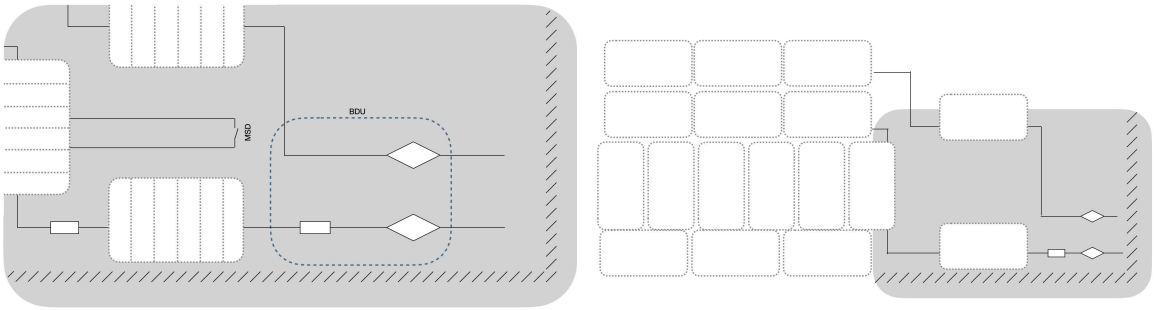
Det övre lagret består av ett omslutande batterihölje som innehåller cellmoduler, säkringar, MSD, BDU med kontaktorer, BMS, insidan av batteriterminalen, klimatelement samt busbars som kopplar samman komponenterna. De synliga komponenterna är huvudsakligen placerade ovanpå klimatelementet eller visuellt skilda från det undre lagret genom batterihöljets botten (*se figur 2*).



Figur 2. *Illustration av det övre lagret med namngivna komponenter.*

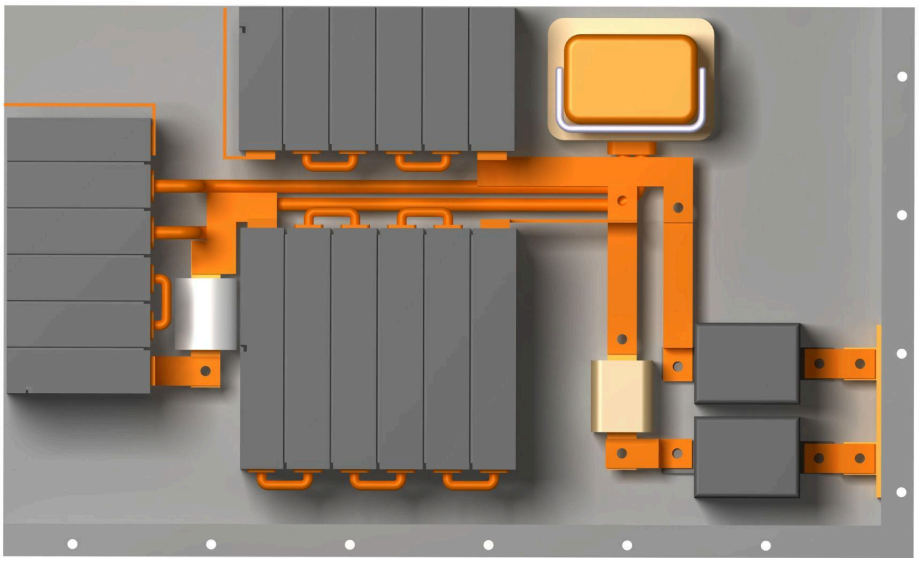
I det synliga lagret finns totalt tre cellmoduler, varav en representeras i sin helhet medan de andra två cellmodulerna presenteras i delar genom en “urklippning”. Denna beskärning av batteriets komponenter har gjorts för att kommunicera att simulatorn utgör en mindre del av batteriets verkliga storlek (*se figur 3*). Batteriet består av ytterligare 14 stycken cellmoduler utanför lådans gränser. Detta för att möjliggöra realistiska mätvärden på cellerna i simulatorn.

Antalet dolda cellmoduler kan varieras genom justering av mätvärden för att simulera olika batteristorlekar. Denna lösning presenteras ytterligare i *4.3 BOM-lista* samt *4.4.7 Funktionalitetskontroll*.



Figur 3. *Illustration av batteriets utklippta cellmoduler.*

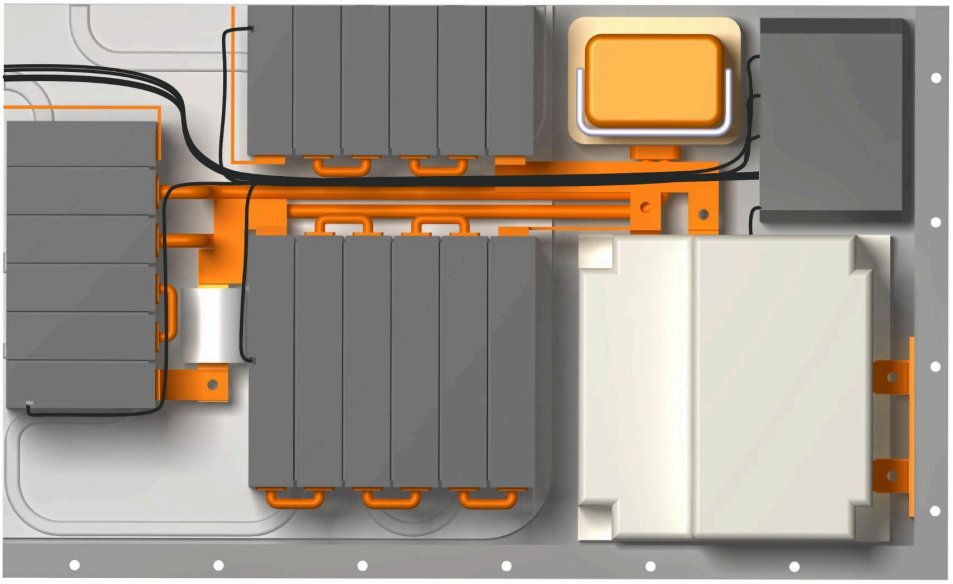
De funktionella komponenterna utgör simulatorns högspänningssystem och är kopplade med busbars enligt följande ordning, med start i renderingens nedre högra hörn: positiv batteriterminal, positiv kontaktor, BDU-säkring, cellmodul 1, högspänningssäkring, cellmodul 2, batteriets icke synliga cellmoduler, cellmodul 3, negativ kontaktor, och slutligen negativ batteriterminal (*se figur 4*).



Figur 4. *Högspänningssystemet.*

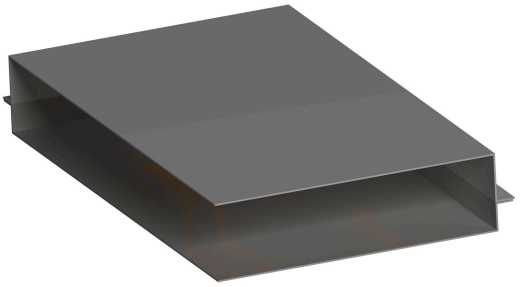
BMS samt övriga komponenter i BDU är visuellt representerade i lösningen men saknar funktion. Detsamma gäller kommunikationen i batteriet, som representeras av

kommunikationskablar kopplade mellan BMS och berörda komponenter (*se figur 5*). Tre kablar är anslutna till de tre synliga cellmodulerna, en kabel går till BDU, och 14 kablar leds in i lådans vägg mellan cellmodul 2 och 3 för att ge intrycket av att BMS även kopplar till batteriets övriga cellmoduler utanför simulatorns gränser.



Figur 5. *Illustration över kommunikationskablaget i svart.*

Lösningen ramas in av ett halvt batterihölje med lock (*se figur 6)*. Detta utformades genom att utvärdera lösningens idébredd med PNI (*se bilaga D*). Analysen visade att ett hölje med både lock och botten tillför funktioner i simulatorn utöver att uppfylla den önskvärda situationen att de- och remontera locket (*se bilaga A*). Botten på höljet utgör en naturlig botten av det övre lagret i simulatorns layout. Höljet begränsar batteriets nedre långsida och högra kortsida. De övriga öppna sidorna tillåter de utstickande modulerna och komponenterna att behålla och eventuellt förstärka uppfattningen om att simulatorn är en utklippt del av ett större batteri. Höljets två kanter tillåter en kontext för vart locket fäster samt fästpunkter för detta.



Figur 6. *Batterihöljets öppna sida.*

Cellmodulernas kopplingar i kombination med det halva höljet skapar en uppfattning om att fler komponenter finns i batteriet och att batteriets storlek i verkligheten täcker en större yta. Sidorna som är öppna speglar genom detta en del av den omgivande miljö som situationen yrkesmässigt kommer att befinna sig inom. Konceptet skapar även mer plats för samtliga av simulatorns kritiska komponenter och möjliggör att de kan vara presenterade i verklig skala.

4.2 Komponenter i simulatorn

Följande presenteras simulatorns komponenter. Här beskrivs i vilken grad varje komponent är representerad, vilka funktioner den har i simulatorn och hur denna är utformad. Även dess material beskrivs samt om komponenten är tillverkad internt eller externt.

4.2.1 Material för internt tillverkade komponenter

Intern tillverkning av komponenter innebär begränsade val av tillverkningstekniker enligt *1.5 Avgränsningar*. Materialval beror därmed på dessa.

Samtliga ledande element i komponenterna tillverkas av koppar på grund av sin goda elektriska ledningsförmåga och låga CO2-avtryck (*se bilaga E*). För de komponenter som tillverkas internt används PLA-plast för sina goda hållfasthetsegenskaper och låga CO2-avtryck (*se bilaga E*). Övriga delar 3D-printas därför med PLA-filament. Både PLA och koppar är dock dyrare än jämförda material, men båda dessa har kvaliteter som gör dem lämpliga för sina applikationer enligt ovan nämnda kvaliteter (*se bilaga E*).

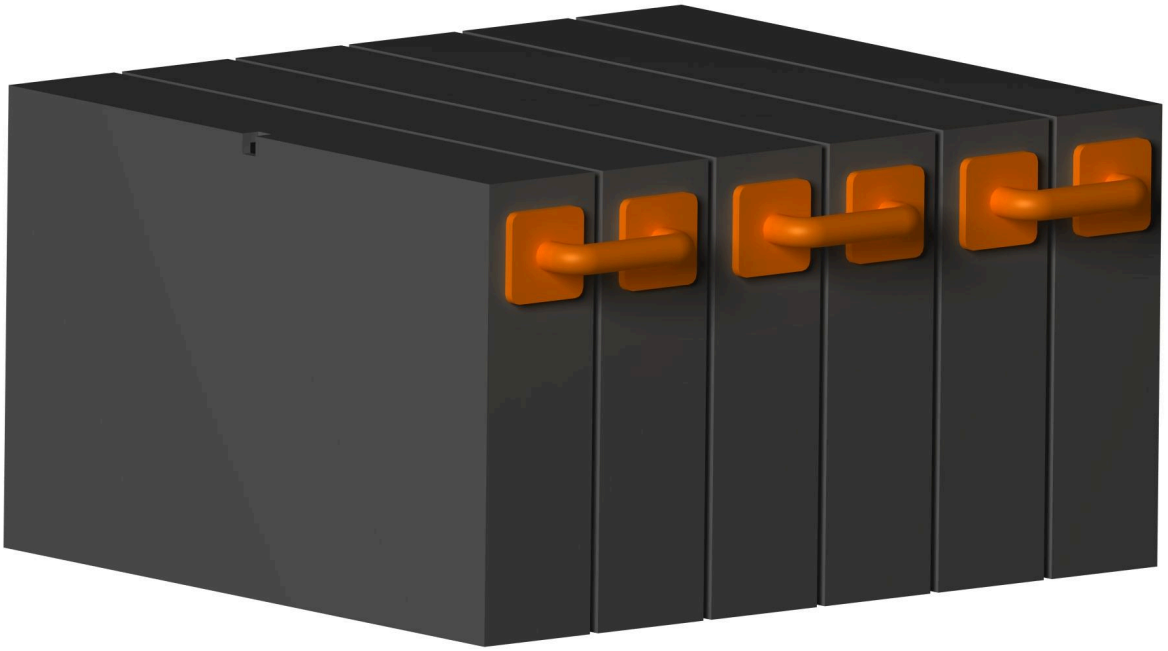
4.2.2 Beskrivning av komponenterna i simulatorn

Nedan presenteras simulatorns komponenter tillsammans med dess funktion och antal i simulatorn. Även dess material och tillverkningsteknik motiveras. Lösningens renderingar är skapade i CATIA V5 och visar även komponenternas interaktion med varandra.

4.2.2.1 Cellmoduler i simulatorn

Simulatorn innehåller tre stycken synliga cellmoduler som efterliknar formen av sex stycken prismatiska celler var (*se figur 7*). En cellmodul består av en ihålig 3D-printad plastdel med en yta som kommunicerar antalet celler och cellmodulens hölje. På cellernas insida är ledande kopparelement placerade för att uppfylla de funktionella krav som konceptet kräver av dem. Cellerna kopplas samman med hjälp av busbars som skruvas fast genom plasthöljet

in till ledningarna. Cellmodulens hölje är inte illustrerat för att belysa infästningen av modulens busbars samt dess input för kommunikationskabel på ena kortsidans övre kant.

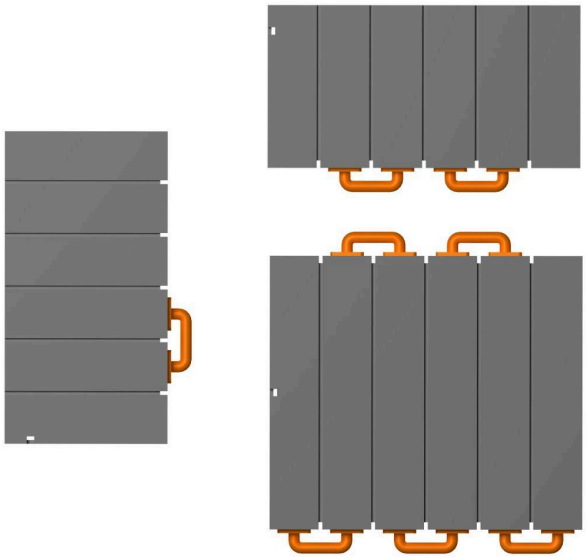


Figur 7. *Cellmodul.*

Varje enskild cell simulerar 3,9 V, vilket innebär en simulerad spänning på 23,4 V per cellmodul. För hela batteriet används spänningen 397,8 V motsvarande totalt 17 cellmoduler eller 795,6 V motsvarande 34 cellmoduler. Dessa två lägen möjliggör simulering av olika storlekar på batteriet. Vid bortmontering av cellernas busbars kan individuella mätningar göras på cellens spänning med en resistansmätare för att kontrollera dessa värden.

Förutom de visuella skillnaderna mellan cellmodul 1, som visar samtliga delar av komponenten, och cellmodul 2 och 3, som visar en halverad del, beskrivet i *4.1 Layout*, finns det funktionella skillnader mellan modulerna (*se figur 8*). Cellmodul 1 och 3 används vid simulation av isolationsfel (*se 4.4.6 Simulerad förlust av isolation*) och behöver därför kunna

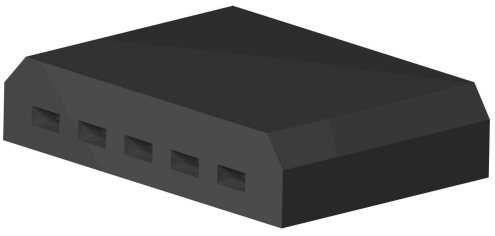
uppvisa individuella mätvärden för varje cell. För att växla cell för vilken felet ska uppstå i används en positionsbrytare. Cellmodul 2 simulerar inget isolationsfel och kan därmed ha enklare och färre inre kopplingar än de andra modulerna.



Figur 8. *Illustration av de visuella skillnaderna mellan cellmodulerna. Den nedersta i bilden kallas cellmodul 1, den vänstra är cellmodul 2, och den översta är cellmodul 3.*

4.2.2.2 Representation av BMS i simulatorn

BMS i simulatorn består av ett 3D-printat lågt rektangulärt hölje i svart plast (*se figur 9*). Eftersom BMS saknar funktion i simulatorn kan materialanvändningen minimeras genom intern tillverkning av en representation av komponenten. Komponentens hålighet skapar ett lämpligt utrymme att nyttja för placering av simulatorns strömförsörjning i form av en powerbank. Denna placering av powerbanken tillåter övningsledaren att kontrollera simulatorns kvarvarande laddning genom en transparent öppning i BMS. För enkel åtkomst till laddning har BMS ett lock som övningsledaren kan öppna. Varken locket eller den transparenta öppningen är märkbar för teknikern. BMS är möjlig att koppla bort från kommunikationskablarna.



Figur 9. *BMS.*

4.2.2.3 Representation av CMU i simulatorn

CMU representeras i simulatorn av kommunikationskablar från BMS till de olika cellmodulerna. Detta skapar intrycket av att komponenten är inkluderad under cellmodulens hölje och visar på BMS kopplingar och funktion.

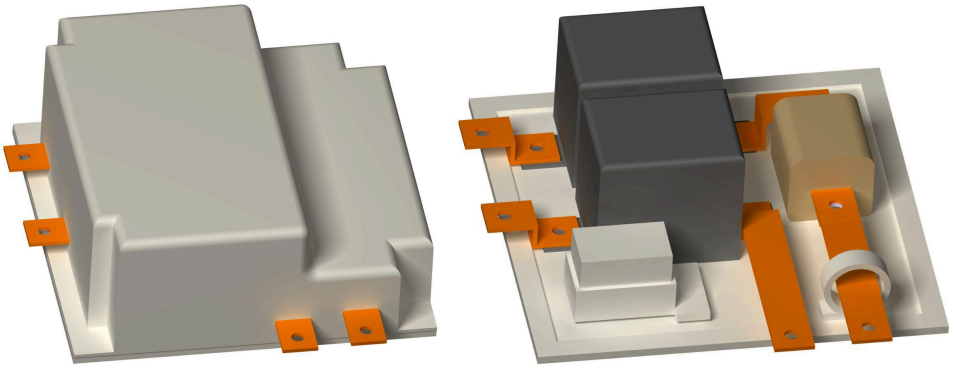
4.2.2.4 MSD i simulatorn

MSD-enheten införskaffas som standardkomponent eftersom den har samma strömbrytande funktion i simulatorn som i ett verkligt elbilsbatteri. Den rekommenderade komponenten (*se bilaga B*) består av en orange kopplingsenhet med en spak. Spaken har två tillhörande orangea knappar som bildar den stegvisa öppningsprocessen som bidrar till en säker arbetsprocess.

Ett tillhörande hänglås finns tillgängligt i simulatorn för att teknikern ska lära sig att låsa undan MSD vid service.

4.2.2.5 BDU i simulatorn

Simulatorns BDU (*se figur 10*) består av ett 3D-printat plasthölje anpassat för de innehållande komponenterna. Höljet har två terminaler på vardera sida där positiva och negativa busbars kopplas till vardera sida och sedan vidare till cellmodulerna respektive batteriterminalen. Under locket av BDU finns två funktionella kontaktorer, presenterade i svart, samt en BDU-säkring. Dessa är sammankopplade med busbars. Förutom de funktionella komponenterna finns även en fysisk representation av en precharger samt en strömavläsare, för att efterlikna en riktig BDU. Eftersom dessa två komponenter inte skall demonteras av teknikern tillverkas dessa som en del av BDU-höljets botten för att minska komponentens komplexitet.



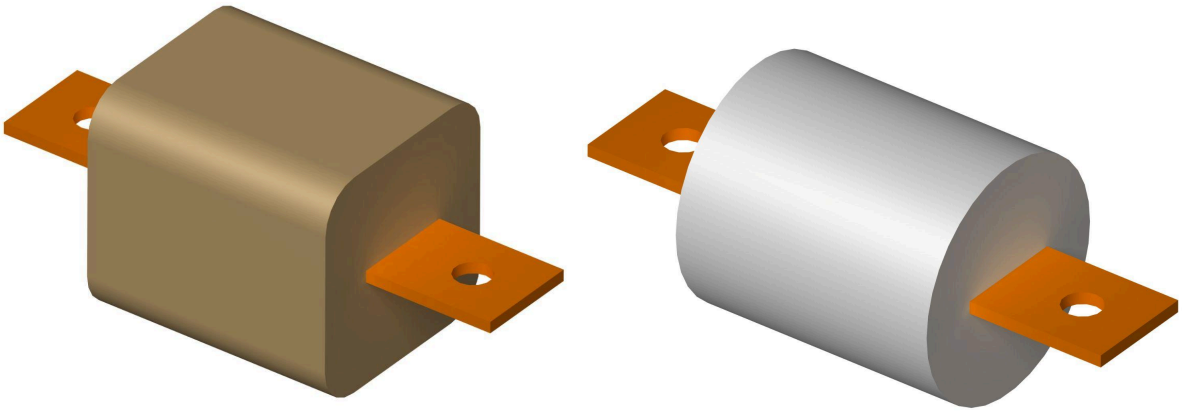
Figur 10. *BDU, med och utan lock.*

4.2.2.6 Kontaktorer i simulatorn

De två kontaktorerna i BDU tillverkas internt för att repetitivt kunna simulera att de svetsat i stängt läge. Komponenten består av en plastkropp med ledande element, innehållande en kontakt och ett relä med minne, som kan hålla kontakten stängd även efter att kontaktorn monteras ut ur simulatorn. Kontaktorerna är kopplade till en positionsbrytare som kan växla mellan att fel uppstår i antingen positiv eller negativ kontaktor. För att erbjuda möjligheten att byta ut den felande komponenten i en simulation finns en extra kontaktor tillgänglig som ersättningskomponent.

4.2.2.7 Säkringar i simulatorn

Det finns två säkringar i simulatorn, en placerad i BDU och en högspänningssäkring placerad mellan cellmodul 1 och 2. De två typerna har olika storlek och specifikationer som skiljer dem åt. Inspirerat av säkringarna som studerades under tidigare forskning (*se 2.1.7 Säkring*) har BDU-säkringen ett mer rektangulärt utförande, medan högspänningssäkringen är cylindrisk (*se figur 11)*.



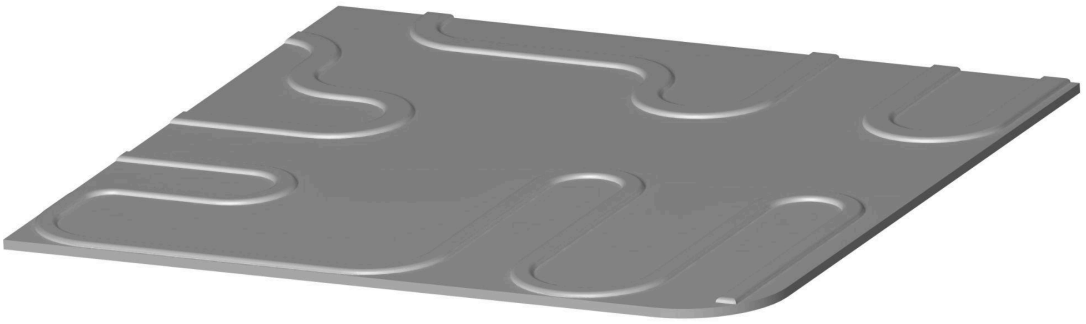
Figur 11. *BDU-säkring och högspänningssäkring.*

För att kunna simulera att säkringen gått sönder tillverkas komponenten internt med ett inbyggt relä med minne. Simuleringen triggas av en input från IOT via en GPIO-kabel, och reläet håller situationen aktiv även efter att säkringen monterats ur simulatorn. Själva kroppen på säkringen 3D-printas i plast och innehåller både reläet och ett lågresistent kopparelement. Båda säkringarna är av typen nedbultad säkring, vilket innebär att de kopplas med skruvförband till busbars.

För att erbjuda möjligheten att byta ut den felande komponenten vid övning finns en extra säkring av varje typ tillgänglig som ersättningskomponent. Detta skapar även momentet att teknikern behöver göra ett medvetet val att välja rätt typ av säkring, vilket är kritiskt vid en verklig reparation.

4.2.2.8 Klimatelement i simulatorn

Simulatorn innehåller en representation av ett klimatelement placerat under cellmodulerna. Elementet tillverkas i plast med hjälp av 3D-printing för att anpassa det efter layoutkonceptet och dess modulplacering. Under modulerna finns en koncentrerad mängd av elementets upphöjda struktur som simulerar ledningen av dess temperaturreglerande vätska (*se figur 12*). Klimatelementet inkluderar även fästpunkter för de komponenter som placeras ovanpå denna i simulatorn.



Figur 12. *Klimatelement.*

4.2.2.9 Busbars i simulatorn

Simulatorn innehåller ett flertal busbars som kopplar samman samtliga högspänningskomponenter och sluter batteriets krets. De nio busbars som kopplar samman två intilliggande celler har samma form. Resterande busbars anpassas specifikt för att passa mellan sina två komponenter. För att producera dessa köps därför ett längre kopparstycke, tillverkat för busbars, in (*se bilaga B*). Detta kan kapas och anpassas efter den form som krävs.

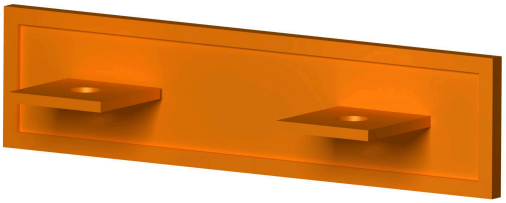
4.2.2.10 Representation av kommunikationskablar i simulatorn

Kommunikationskablar köps in som standardkomponent med liten tjocklek för att minimera materialåtgång (*se bilaga B*). Totalt finns 18 stycken: en kopplar BMS till BDU, och resten går från BMS till batteriets olika cellmoduler. Kablaget presenteras i *figur 5* samt i avsnittet

4.1 Simulatorns layout. För de synliga cellmodulerna ansluter kommunikationskablarna genom cellmodulernas hölje för att kommunicera en placering av CMU under varje cellmodul.

4.2.2.11 Batteriterminaler i simulatorn

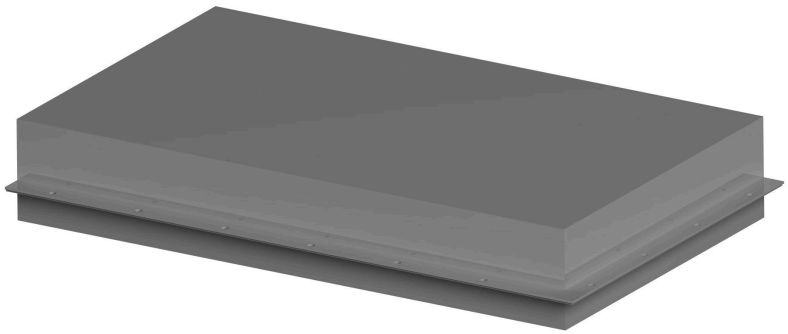
Två stycken batteriterminaler placeras i simulatorns batterihölje, en positiv och en negativ. Komponenterna är synliga från höljets insida, därmed tillverkas endast denna sida av komponenten. Terminalerna kopplas till kontaktorerna via busbars i BDU. Batteriterminalerna tillverkas internt av koppar som ledande element med ett 3d-printat hölje i orange plast (*se figur 13)*.



Figur 13. *Batteriterminal.*

4.2.2.12 Simulatorns batterihölje

Simulatorbatteriets hölje består av två delar; en undre och en övre, där den övre delen fungerar som ett lock. Höljet består av aluminium (*se 2.1.15 Batterihölje*), ett ledande material som tillåter att simulationen isolationsfel (*se 4.4.6 Simulerad förlust av isolation*) kan mätas från valfri del av komponenten. Höljet följer konceptet för layouten (*se 4.1 Simulatorns layout*) och ramar in halva simulatorn med sammanlagt två väggar, en botten och ett lock. Övre och undre del placeras med delarnas flänsar mot varandra för att agera som stängt hölje (*se figur 14*). För PNI för höljets idébredd, se bilaga *D*.



Figur 14. *Batterihöljet i stängt läge.*

4.2.2.13 Skruvförband i simulatorn

Höljets delar fäster med skruvförband bestående av skruv, bricka och mutter av storlek M6. För varje skruvförband är muttern placerad under flänsen för höljets undre del och tillåter skruven att gänga i denna. Detta tillåter löpande hål genom höljets flänsar som skapar mindre slitage på de internt tillverkade komponenterna vid upprepad de- och remontering av höljets lock.

4.2.2.14 Simulatorns skyddande låda

Simulatorn begränsas av en skyddande låda som möjliggör transport av simulatorn av en enskild individ. För att skydda simulatorn och möjliggöra dess transport används en certifierad fukttät och stöttålig låda, med handtag och hjul för enkel transport. Lådan har godkänts av uppdragsgivaren (N. Ericsson, personlig kommunikation, 16 januari, 2024) som en lämplig låda för simulatorn. Lådans skyddande egenskaper möjliggör lägre krav för de komponenter som förvaras inuti denna. Dessutom erbjuder lådans lock förvaring av ersättningskomponenter för simulationerna. Dessa inkluderar kontaktor, högspänningssäkring samt en BDU-säkring.

4.3 Presentation av BOM-lista

BOM-listan (Bill of Materials) listar samtliga komponenter som krävs för den mekaniska lösningen (*se 1.5 Avgränsningar*). Därmed tas ingen hänsyn till det antal kopplingar, ingångar och utgångar som krävs för att IOT ska ansluta till lösningen.

I BOM-listan (*se tabell 1*) kan komponenternas material, tillverkningsteknik, antal, samt extern eller intern tillverkning utläsas.

Tabell 1. *BOM-lista.*

Nr	Komponent	Intern/ Extern tillverkning	Material	Tillverknings-teknik	Antal	Beskrivning
1	Cellmodul, hel	Intern			1	
1.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	1	
1.2	Lock		Plast, PLA	3D-printing	1	
1.3	Ledande element		Koppar	Plåtskärning,	*	Leder ström genom

				bockning och borrning		komponenten. Ändarna fungerar som komponentens terminaler
3	Cellmodul, beskuren	Intern			2	
3.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	2	Efterliknar långsidan av en cellmodul
3.2	Ledande element, cellmodul 2		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	*	Ett för cellerna på vänster sida av MSD-brytningen, och en på höger sida
3.3	Ledande element, cellmodul 3		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	*	Kopplar ihop cellerna parvis
4	BMS	Intern			1	
4.1	Låda		Plast, PLA	3D-printing	1	
4.2	Lock		Plast, PLA	3D-printing	1	
5	MSD	Extern			1	
5.1	Kopplingsenhet		-	-	1	
5.2	Hänglås	Extern	-	-	1	
6	BDU	Intern			1	
6.1	Botten		Plast, PLA	3D-printing	1	
6.2	Lock		Plast, PLA	3D-printing	1	
6.3	BDU-Säkring				2	
6.3.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	2	
6.3.2	Ledande element		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	2	Leder ström genom komponenten
6.3.3	Relä med minne		-	-	2	
6.4	Kontaktor				3	
6.4.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	3	
6.4.2	Kontakt		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	3	
6.4.3	Fjädrar		Fjädertråd	Lindas runt stång	6	Två små fjädrar var för kontakten i varje kontaktor
6.4.4	Relä med minne		-	-	3	
6.5	Interna busbars		Koppar	Plåtskärning,	5	Kopplar samman de inre i

				bockning och borrning		BDU komponenterna med högspänningssystemet
7	Batteriterminal	Intern	Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	2	
7.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	1	
7.2	Terminaler		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	2	Ledande metallstycken som sitter fast i höljet och kan kopplas till busbars
8	Högspännings-säkring	Intern			2	
8.1	Kropp		Plast, PLA	3D-printing	2	
8.2	Ledande element		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	2	
8.3	Relä med minne		-	-	2	
9	Klimatsystem	Intern	Plast, PLA	3D-printing	1	
10	Busbar	Extern				Behöver anpassas till simulatorn
10.1	Busbar mellan celler		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	11	
10.2	Busbar mellan cellmoduler		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	3	
10.3	Busbar mellan övriga komponenter		Koppar	Plåtskärning, bockning och borrning	4	Mellan batteriterminalen, BDU, och cellmoduler
11	Kommunikations kablar	Intern	-	-	18	Går till de tre cellmodulerna samt utanförliggande cellmoduler och BDU.
12	Batterihölje	Intern	Aluminium	Plåtpressning	1	
13	Låda	Extern	-	-	1	
14	Powerbank	Extern	-	-	1	
15	Micro-USB-sladd (Laddsladd)	Extern	-	-	1	
16	IOT	Intern	-	-	1	
17	Skruvförband	Extern			76	
17.1	Skruv, M6		Rostfritt stål	-	76	

17.2	Bricka, M6		Rostfritt stål	-	76	
17.3	Sexkantsmutter, M6		Rostfritt stål	-	76	
18	Positionsbrytare	Extern	-	-	3	

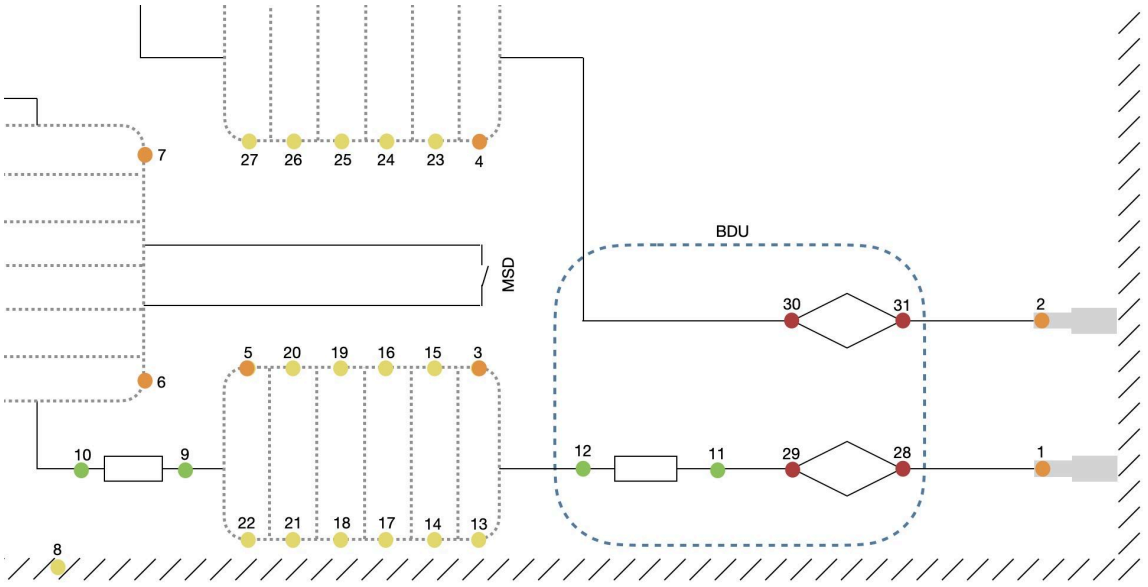
* Antalet kräver vidare undersökning för att definieras

4.4 Simulering av servicesituationer

Situationerna simuleras i koppling till IOT genom att uppnå ett visst resultat vid definierade mätpunkter. Simulatorns fel aktiveras av IOT med en app framtagen av uppdragsgivaren. Följande presenteras hur trasig säkring, svetsad kontaktor, förlust av isolation, brytning med MSD samt de- och remontering av batterilock simuleras. Även funktionalitetskontroll för simulatorn presenteras. För samtliga simulationers start monteras höljets lock bort av teknikern enligt *4.4.2 De- och remontering av batterilock i simulatorn*.

a4.4.1 Mätpunkter i simulatorn

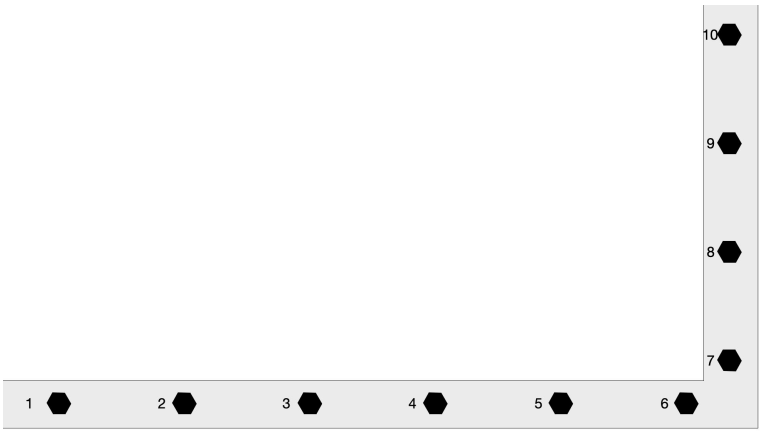
I simulatorn finns totalt 31 mätpunkter (*se figur 15*). Dessa illustreras med tilldelad färg enligt dess simulationsanvändning. Orange presenterar funktionalitetskontroll, gul i kombination med orange isolationsfel, grön trasig säkring och röd svetsad kontaktor.



Figur 15. *Mätpunkter i simulatorn.*

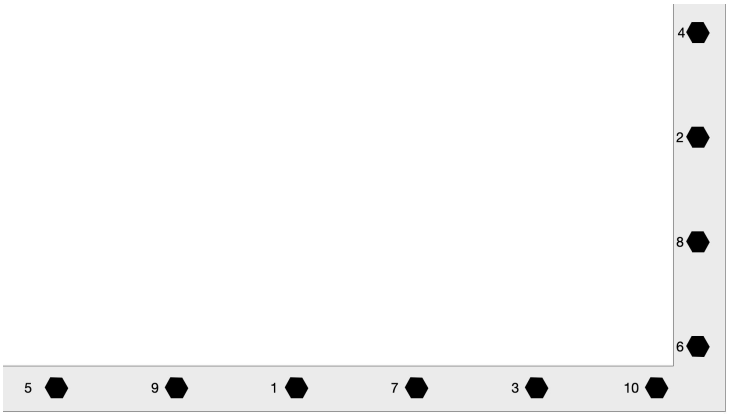
4.4.2 De- och remontering av batterilock i simulatorn

Simulatorns komponenter ramas in av en halv inre låda med tillhörande lock som innan simulationens start är fastskruvat. Lämpligt verktyg används för att lossa skruvarna i ordning successivt längs locket, med start vid lådans vänstra långsida (*se figur 20*). En skruv hanteras i taget. Skruvarna och dess tillhörande bricka placeras organiserat och uppmärkt. Teknikern tar på sig lämplig skyddsutrustning och lyfter av lådans lock.



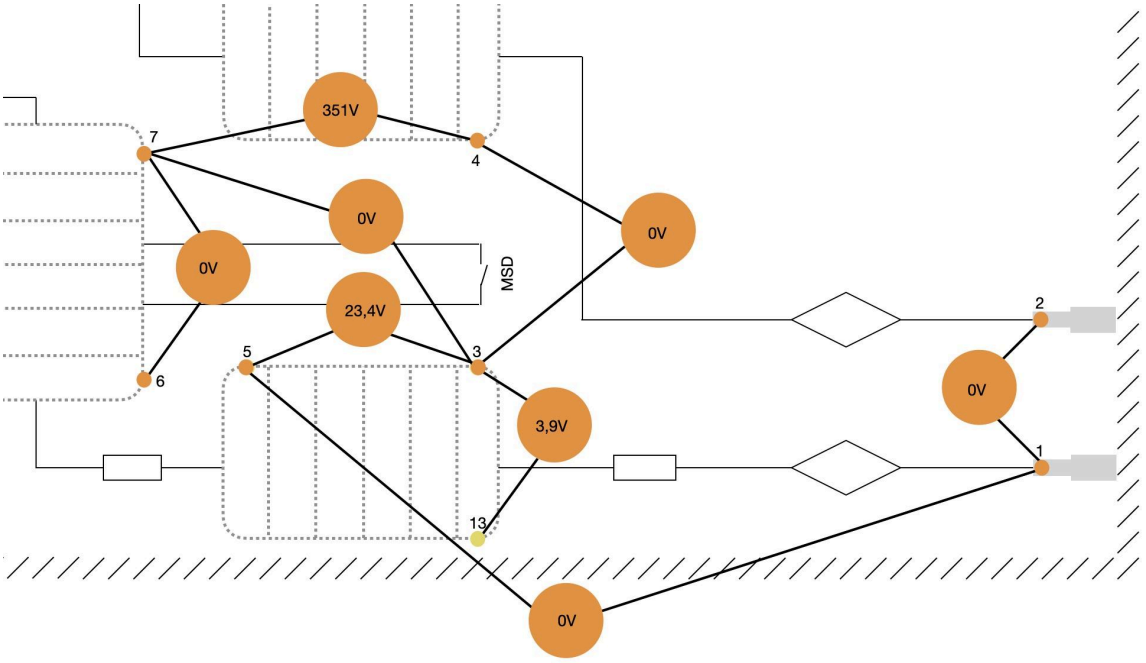
Figur 20. *Demontering av batterilock.*

Vid montering av batterilock placeras lådans lock ovanpå den lådans undre del. Teknikern tar sedan av sig skyddsutrustningen, hämtar de välplacerade skruvarna respektive brickorna från förvaring och skruvar fast en skruv i taget, med lämpligt verktyg, enligt anvisad ordning (*se figur 21*). Ordningen skiftar mellan lådans sidor och varieras för att hänvisa teknikern till att följa manualens instruerade ordning.



Figur 21. *Remontering av batterilock.*

4.4.3 Simulerad brytning av MSD

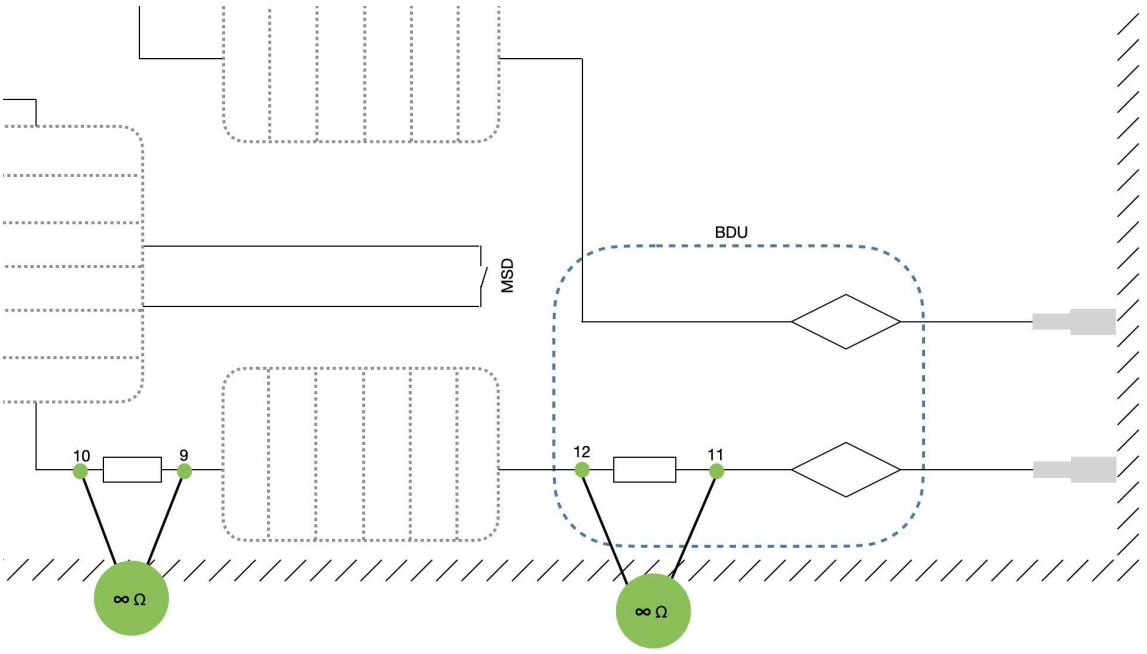


Figur 16. *Bruten MSD.*

Teknikern tar på sig lämplig säkerhetsutrustning. MSD dras ut genom att först vinkla komponentens spak och samtidigt hålla in en knapp på handtaget för att lyfta det halvvägs. Sedan behöver ytterligare en knapp hållas in placerad under handtaget. Därefter kan handtaget lyftas hela vägen upp och MSD kan dras ut. Den urmonterade komponenten förvaras på säker plats separat från batteriet och låses undan. Teknikern mäter sedan exempelvis mellan punkt 1 och punkt 5 samt mellan punkt 3 och punkt 4 (*se figur 16*). Om samtliga mätresultat visar 0 V är MSD korrekt bruten.

Genom att inkludera scenariot för att montera bort MSD ur simulatorn skapar detta en rutin för teknikern att genomföra detta i början av arbetet.

4.4.4 Simulation av trasig säkring



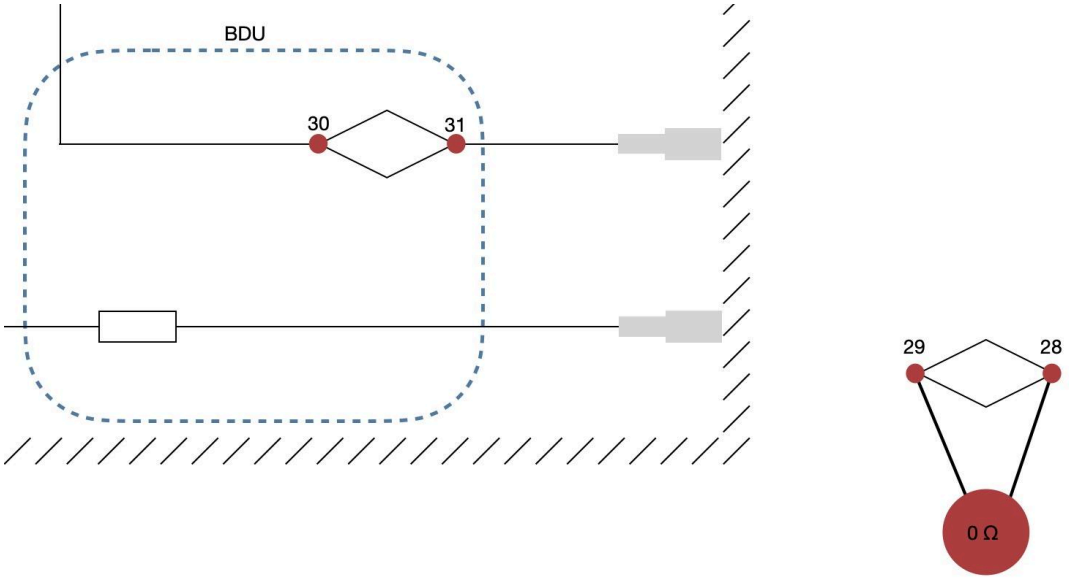
Figur 17. *Trasig säkring.*

Övningsledaren ställer in positionsbrytaren till att skapa fel hos antingen högspänningssäkringen (punkt 9 och 10) eller BDU-säkringen (punkt 11 och 12) (*se figur 17*). Övningen börjar med att teknikern tar på sig lämplig säkerhetsutrustning. Teknikern börjar därefter undersökningen genom att koppla loss MSD enligt *4.4.3 Simulerad brytning av MSD*. Teknikern genomför sedan ett kontinuitetstest för den valda säkringen genom att placera mätverktyget på var sida om säkringen (punkt 9 och 10 alternativt punkt 11 och 12). Då mätvärdet visar försumbar kontinuitet är säkringen trasig. Teknikern skruvar då loss säkringen och ersätter denna med en säkring av samma storlek och amperetal. Den ersättande säkringen är placerad bredvid simulatorns låda tillsammans med övriga reservkomponenter. Då två olika typer av säkringar används i simulatorn och reserver för båda dessa finns att välja i lösningen gör teknikern ett medvetet beslut av ersättningskomponent. Teknikern kontrollerar sedan den nya säkringens installation genom att utföra ytterligare en mätning över komponenten. Mätverktyget visar då på kontinuitet. Slutligen kopplas MSD tillbaka i simulatorn.

Säkringarnas funktionalitet kontrolleras av IOT och använder sig av minne efter att felet skapas. Detta för att ett byte mellan en trasig och en ny säkring ska kunna ske samtidigt som

deras funktion ska kunna särskiljas. Efter genomförd övning nollställer övningsledaren den utplockade säkringens läge. Denna används sedan som fungerande ersättningskomponent i nästa simulation. Felet skapas av IOT hos högspänningsäkringen och replikeras till lösningens andra säkring genom positionsbrytare.

4.4.5 Simulation av svestad kontaktor



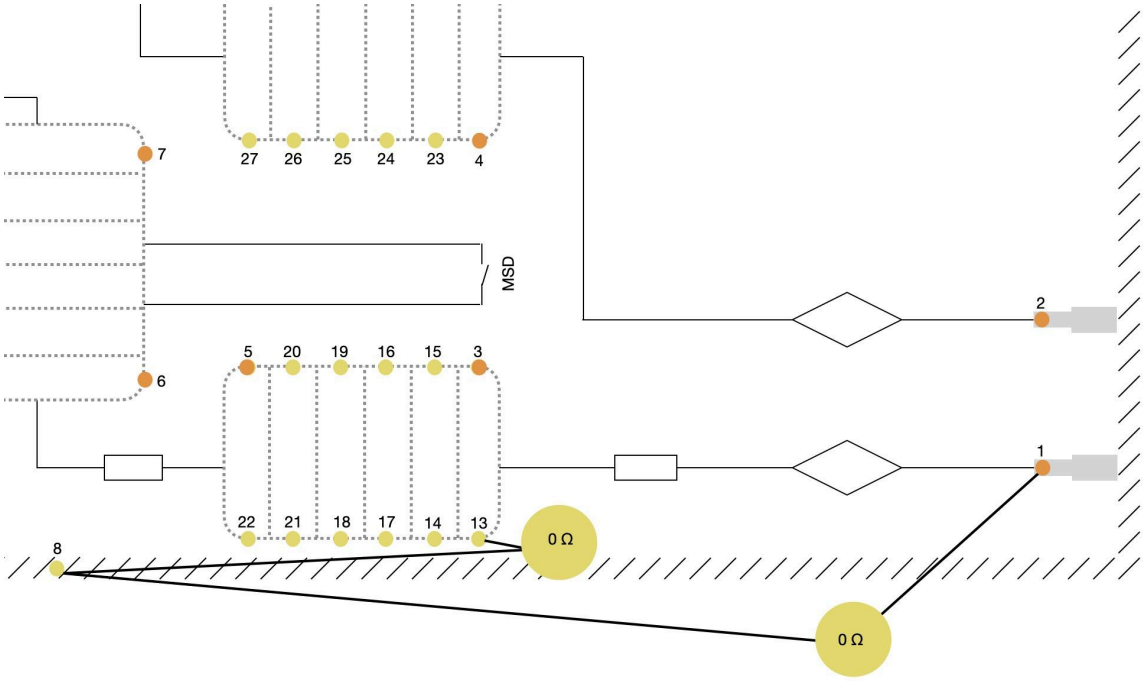
Figur 18. *Svetsad kontaktor, där positiv kontaktor urmonterats för kontinuitetstest.*

Övningsledaren ställer in positionsbrytaren till att skapa fel i vald kontaktor. Övningsledaren informerar teknikern om att den av övningsledaren aktiverade kontaktorn svetsats. Teknikern tar på sig lämplig säkerhetsutrustning och kopplar loss MSD enligt *4.4.3 Simulerad brytning av MSD*. Sedan kopplar teknikern ur den svetsade kontaktorn för att utföra ett kontinuitetstest. Därefter mäter teknikern resistansen mellan kontaktorns två sidor (punkt 28 och 29, alternativt punkt 30 och 31) (*se figur 18*). Då mätaren visar 0 Ohm är kontaktorn svetsad. Komponenten byts då ut mot en fungerande kontaktor placerad vid sidan av simulatorn. Teknikern kontrollerar sedan batteriets funktion enligt *4.4.7 Funktionalitetskontroll*.

Kontaktorn använder sig av minne för att kunna simulera felet även efter att kontaktorn plockats ut från simulatorn. När övningen är över nollställer övningsledaren den utbytta kontaktorn för att denna ska kunna användas som en fungerande ersättningskomponent vid

nästa simulation. Genom att använda positionsbrytare simuleras felet av IOT i den positiva kontaktorn och replikerar simulationen till att ske vid den negativa kontaktorn.

4.4.6 Simulerad förlust av isolation



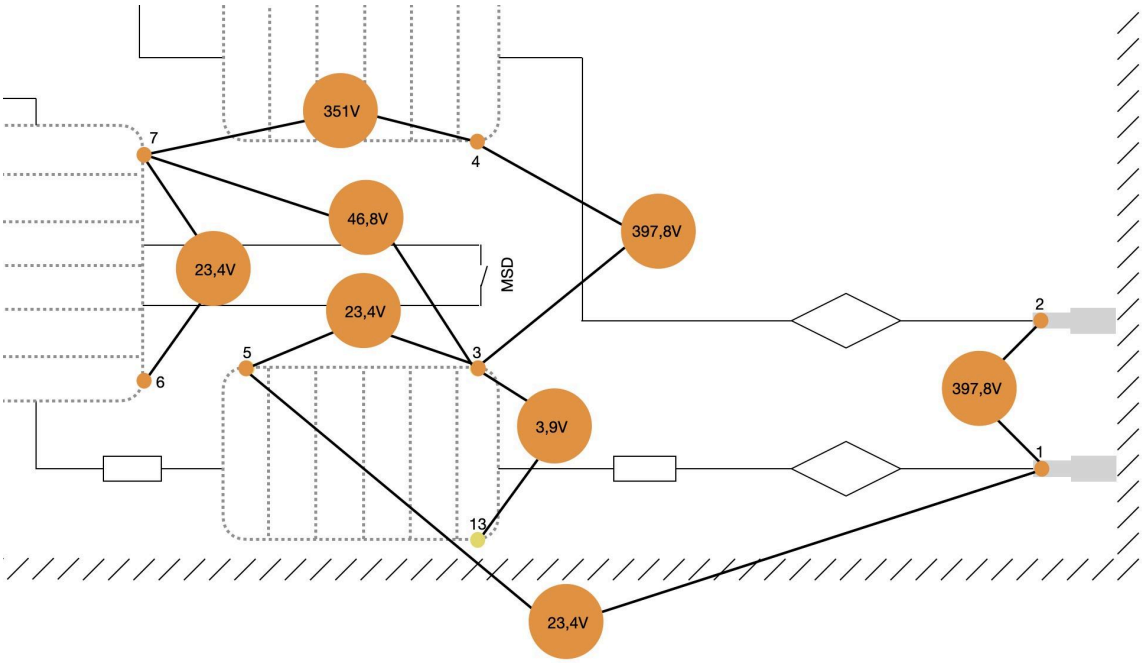
Figur 19. *Isolationsfel.*

Teknikern tar på sig lämplig säkerhetsutrustning och börjar undersökningen med att koppla loss MSD enligt *4.4.3 Simulerad brytning av MSD* för att dela batteriet och dess spänning i två halvor. Även BMS kopplas ur för att skydda komponenten och förhindra att denna tar emot felaktiga värden. Vid förlust av isolation mäter teknikern mellan hölje (punkt 8) och positiv terminal (punkt 1) eller negativ terminal (punkt 2) (*se figur 19*). Den terminal som visar 0 Ohm resistans som mätvärde indikerar att denna sida om MSD brytningen av kretsen innefattar isolationsfelet. Teknikern kan därefter identifiera den felande cellen genom att fortsatt mäta mellan cellerna och höljet. Vid resultat av 0 Ohm mellan positiv terminal (punkt 1) och hölje (punkt 8) kopplar teknikern loss de busbars som sammankopplar modulen på dess ena sida. Därefter mäter teknikern först mellan punkt 8 och 13 (*se figur 18)* för att sedan fortsätta successivt mellan nästa cell (punkt 14) och hölje (punkt 8) tills resultatet förändras. Vid senaste resultat av 0 Ohm har teknikern identifierat två celler varav den ena förlorat sin isolation. Teknikern kopplar då loss den busbar som sammankopplar de två cellerna på motsatt sida modulen för att därefter utföra samma mätning mellan de individuella cellerna

och höljet (punkt 8). Vid mätvärde 0 Ohm har den felande cellen identifierats. Busbars, BMS och MSD återinstalleras i simulatorn för att förbereda nästa simulation.

Isolationsfel hos en cell använder en GPIO kanal men replikeras i resterande celler med användning av positionsbrytare. Detta för att möjliggöra att det simulerade felet uppstår på olika platser vid samma typ av simulation för att tydliggöra för teknikern att felet kan uppstå i olika celler. Det fel som simuleras mellan punkt 8 och 13 replikeras alltså för punkt 3-5 samt 14-27.

4.4.7 Funktionalitetskontroll i simulatorn



Figur 22. *Funktionalitetskontroll.*

Samtliga mätningar för funktionalitetskontrollen presenterar ett spänningsvärde. Genom att mäta mellan punkterna 1 till 7 samt punkt 13 presenterade i figur 22 kan teknikern bekräfta att batteriet fungerar. Värdet för modul 1 och 2 visar spänningen proportionellt för de innehållande cellerna. Vid mätningen mellan punkt 7 och 4 finns däremot en markant ökning. Detta för att visa på att konceptets urklippning (*se 4.1 Simulatorns layout*) inkluderar flera moduler som inte är synliga i simulatorn. I och med detta kan varje cell och dess modul ha en realistisk spänning.

Batteriets totala spänning, som i exemplet (*se figur 22*) uppmätts till 397,8 V, kan varieras för att tillåta simulationen att illustrera flertalet storlekar av elbilsbatterier. Exempelvis 795,6 V

för att efterlikna ett 800 V-batteri. Då bör även mätvärdet mellan punkt 7 och 4 justeras till 748,8 V för att exkludera de två modulerna i lösningen som mätvärdet inte omfattar.

5. Hållbarhetsanalys

Projektets resulterande koncept har för syfte att bidra till att tekniker får en säker möjlighet att fysiskt öva på att serva elbilsbatterier. Förbättrade utbildningsmöjligheter gör att fler kan arbeta med elbilsservice och tillfredsställa den redan omättade och fortsatt växande efterfrågan inom området. Dessutom bidrar indirekt den förbättrade servicemöjligheten till att de elbilar som tillverkas kan användas så länge som möjligt. Ett ökat antal tekniker på marknaden som kan serva batterierna förlänger dess användningsfas och sänker i sin tur dess miljöpåverkan över batteriets livscykel.

Ett ökat antal utbildade tekniker kan även indirekt bidra till arbetskraften inom återvinning av batterier ökar. Lieskoski m.fl (2024) undersöker möjligheten och lönsamheten i att återvinna elbilsbatterier genom att ge dem ett andra liv. Detta med resultatet att en återvinningsprocess kan vara lönsam inom en femårsperiod om denna sker för batteripack eller cellmodul. För celler bedöms processen inte ännu vara lönsam (Lieskoski, 2024). Projektets lösning presenterar samma nivå för teknikern att arbeta på, med skillnaden att denna gäller prismatiska celler. Detta visar på att simulatorn presenterar en realistisk detaljnivå för att agera på dagens marknad. Slutkonceptet kan därmed vara en del av rörelsen mot en ökad återvinning av utslitna elbilsbatterier. Undersökningen visar även att lönsamheten till stor del beror på att en ökad detaljnivå leder till en långsam de- och remontering och i sin tur skapar en kostsam process (Lieskoski, 2024). Därmed skulle ett scenario i simulatorn då teknikern får möjligheten att öva på de- och remontering av cellerna kunna förbättra detta resultat.

Simulatorn består av flertalet komponenter som i olika grad efterliknar en verklig komponent i ett elbilsbatteri. Genom intern tillverkning av komponenter som inte kräver samma komplexitet i simulatorn kan användning av flertalet miljöbelastande material och elektronik undvikas. Att arbeta med en simulator i övningssyfte minskar dessutom den mängd verkliga komponenter som krävs för en övningssituation. Med möjligheten att upprepat simulera felen kan simulatorns komponenter användas många gånger under dess livslängd.

För de komponenter som har samma funktionalitet i simulatorn som i ett verkligt batteri används standardkomponenter. Komponenter som är tillgängliga för hela den marknad som simulatorn ska komma att verka i ger korta leveranssträckor och leveranstider som i sin tur minimerar tid då simulatorn inte kan användas vid behov av reparation. På grund av

produktens planerade låga batchstorlek (*se 1.5 Avgränsningar*) är en intern produktion inte lönsamt för dessa komponenter. Att nyttja standardkomponenter möjliggör därmed en lättillgänglig ersättningskomponent för reparation av simulatorn då komponenten går sönder. Detta förlänger produktens användarfas och bidrar till lägre kostnader för både användaren och företaget.

Ytterligare undersökning är nödvändig inom dessa områden för att vidare definiera miljöpåverkan under produktens livslängd.

6. Diskussion

Ett elbilsbatteri innehåller många komplexa komponenter som behövde tas hänsyn till i utvecklandet av simulatorn. Komponenternas verkliga funktion, roll i önskad simulering, placering och utseende har varit avgörande för om och hur dessa ska befinna sig i simulatorn. Detta har krävt både detalj- och helhetsperspektiv i kombination med avgränsningar för att möjliggöra arbetets färdigställande samtidigt som en relevant och grundlig lösning utvecklats. Att repetitivt zooma in och ut på lösningens komponenter och dellösningar har skapat en ökad helhetsförståelse för både elbilsbatterier, reparationsprocessen av dessa samt hur en simulator kan fungera för att spegla situationen på ett korrekt och lärorikt sätt. Detta innebär också att simulatorn har flera områden som skulle kunna undersökas ytterligare med en rikare detaljnivå samt att lösningarna kan utvecklas med möjlighet till mer idégenerering för konceptet. Lösningen är utvecklad efter den tidsram som begränsat projektet.

Projektets fas för tidigare forskning växte allteftersom omfattningen av kunskap och fakta, som krävdes för att fatta informerade beslut kring simulatorns innehåll, blev större än förväntat. Denna omprioritering av tid missgynnade idégenererings- och konceptutvecklingsfasen av projektet. Intentionen var att iterera och uppdatera lösningar allteftersom nya upptäckter gjordes under idégenereringens tre steg (*se 3.3.1 Tre steg*). Utifrån det arbetssättet togs ett första layout-koncept fram för att kunna utforska steg 2 och 3. Detta koncept kunde justeras tillsammans med lösningarna som utformades, men det fanns ingen möjlighet att genomföra mer drastiska förändringar i layouten. Därför skulle slutkonceptet gynnas av ytterligare utvärdering från tekniker och experter verksamma inom området för att utvärdera konceptets begriplighet.

Ett alternativ för konceptets layout kan vara att inkludera samtliga komponenter helt innanför simulatorns gränser. Detta skulle innebära att ett komplett högspänningssystem kan vara synligt för teknikern, med fullständiga cellmoduler. Simulatorns transportkrav (*se 4.2.2.14 Simulatorns skyddande låda)* medför ett begränsat utrymme som skulle kräva att cellmodulerna behöver vara av mindre storlek, innehållandes färre celler. Den alternativa layouten skulle kunna upplevas som mer intuitiv och begriplig för teknikern då det visar alla systemets kopplingar. En sådan ovanlig storlek på cellmodulerna skiljer sig dock markant från verkliga cellmoduler. Även detta behöver verifieras med industriexperter. En layout utan avskurna komponenter skulle kunna ha lägre produktionskostnader eftersom färre unika delar

behöver designas av företaget. Fler standardkomponenter i lösningen kan också minska produktens ekonomiska kostnad. Implementering av standardkomponenter kan bortse från de krav och begränsningar som internt tillverkade komponenter behöver förhålla sig till med avseende på den låga batchstorleken. Detta avser även tillverkningstekniker och material för komponenterna.

Ett svårhanterat problem för båda layout-varianter berör spänningsfördelningen i batteriet. I slutkonceptet delar MSD de synliga cellmodulerna på mitten, men eftersom det finns många fler osynliga cellmoduler i den bortre halvan blir det en extrem skillnad i spänning mellan sidorna. Detta kan eventuellt vara förvirrande för teknikern. Ett koncept med totalt tre cellmoduler får andra problem. För att simulera ett 400 V-batteri skulle varje modul behöva ha ungefär 130 V var, vilket skulle innebära orimliga mätvärden på de individuella cellerna.

I och med den tillförda möjligheten som positionsbrytare innebär för att replikera fel till flera delar av simulatorn har flertalet mätpunkter införts i ett sent skede av produktutvecklingsprocessen. Detta innebär att några av dessa kan vara redundanta. Exempelvis har cellmodul 3 i konceptet möjligheten att simulera isolationsfel (*se 4.4.6 Simulerad förlust av isolation*) i individuella celler, men denna process kan felaktigt ha implementerats då busbars inte kan monteras av på båda sidor av den halverade modulen; vilket innebär att en individuell cell inte kan identifieras enligt krav för simulationen. Problematiken gäller även implementering av ledande element för de funktionella lösningarna på modulernas insida. Då projektet fokuserat på synliga kopplingar krävs vidare undersökning för att validera dess funktion, antal och tillverkningsprocess.

För att verifiera att produkten är producerbar och hållbar över tid krävs ytterligare utvärdering av komponenternas konstruktion och material. Många komponenter i simulatorn kräver ett stort antal interaktioner som de- och remontering under dess livslängd. Standardkomponenter för elbilsbatterier har andra krav än dessa för att uppfylla sin funktion, och de egentillverkade komponenterna behöver detaljkonstrueras och anpassas efter sin funktion i simulatorn. Undersökningar som beräkningar och hållfasthetstester behöver genomföras för samtliga komponenter som riskerar slitageskador vid långsiktig användning av simulatorn. Slutkonceptet bör även diskuteras och utvärderas tillsammans med ett flertal olika industriexperter för att ge återkoppling för hur väl konceptet simulerar ett elbilsbatteri

och dess servicesituationer. Detta skulle kunna resultera i värdefulla insikter om hur konceptet kan förbättras som utbildningsverktyg.

Marknaden för elbilsbatterier är under snabb utveckling. Sedan arbetets start har flertalet undersökningar och ny information tillkommit. Detta innebär att delar av simulatorn riskerar att bli utdaterade. För att anpassa lösningen till detta faktum har modularitet implementerats för konceptet. Arbetets lösningar är oberoende av varandra på den nivå att ett visst antal delar kan bytas ut enligt preferens utan att markant påverka den övriga lösningen i sin helhet. Exempelvis kan batteriterminalen väljas som standardkomponent istället för att tillverkas internt, medan övriga komponenter fortfarande kan ha samma premisser och lösning. Lösningen kan därmed även uppdateras enligt marknadens villkor. Exempelvis gäller även detta möjligheten att införa funktionella kommunikationskablar för att tillföra en funktion hos BMS. Användning av standardkomponenter underlättar dessutom reparation av simulatorn. Då komponenterna är lättillgängliga för kunden skapas en förenklad reparationsprocess som i sin tur kan förlänga simulatorns användningsfas.

Bristen av standardiserade namn på komponenter med samma funktion inom branschen är viktigt att påpeka vid lärandesituationen. Olika namn för samma komponent kan även leda till missförstånd i kommunikationen, vilket i sin tur försvårar samarbete inom industrin och saktar ner projekt.

Informationsinsamlingen har skett teoretiskt för arbetet. Trots intervjuer och observation av videor där övningssituationerna genomförts har ingen fysisk interaktion skett med ett elbilsbatteri. Detta kan ha påverkat lösningens utformning. Att tillverka en prototyp av lösningen skulle också kunna bidra till att bekräfta om denna uppfattas som verklighetstrogen.

7. Slutsats

Arbetet har undersökt, definierat och implementerat samtliga serviceprocesser för önskade scenarier. Detta har uppnåtts för arbetet genom att definiera elbilsbatterikomponenter tillsammans med dess egenskaper och funktioner. De essentiella komponenterna har implementerats tillsammans med nödvändiga lösningar för att uppfylla sin funktion i simulatorn.

Arbetets slutkoncept inkluderar lösningar i de led som krävs för att simulera samtliga scenarier. Detta innefattar komponenter, dess egenskaper och funktion, mätpunkter, layout och implementering av dessa i varje enskilt scenario. En BOM-lista sammanfattar konceptets material och tillverkningsmetod. Konceptet presenteras visuellt av en CAD-modell, skapad i CATIA V5, som bekräftar komponenternas förhållande till varandra i simulatorn.

Vid användning av produkten kan utbildning av tekniker och mekaniker ske på ett säkert och effektivt sätt. Produkten kompletterar företagets simulationsenhet genom att tillföra en verklighetstrogen fysisk produkt som ger teknikern möjlighet att öva på verkliga moment i en verklig skala.

Det formulerade konceptet har genom att inkludera projektets samlade kunskap sammanfattat reparationsprocessen för vanliga servicesituationer. En fysisk produkt som implementerar dessa kan minska säkerhetsrisken för teknikern vid arbete med ett verkligt elbilsbatteri då teknikern upprepat övat på processen samt skapat en rutin för säkerhetskritiska moment. Upprepad övning kan effektivisera arbetet hos den utbildade teknikern och i längden öka tillgängligheten till reparation som i sin tur förlänger elbilsbatteriets livslängd.

Referenser

AdaptFuture. (2024). *OUR PRODUCTS.* Hämtad 20 maj, 2024, från https://www.adaptfuture.com/products

AEC. (u.å.). *Electric Vehicle Battery Box.* Hämtad 23/4 2024 från https://aec.org/page/electric-vehicle-battery-box

Amit, K., & Aher, M. (2019). *Integrated Battery Module with CMU (Cell Monitoring Unit) for EV's.* 2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Transportation Electrification Conference (ITEC-India), 2019 IEEE, 1–3. https://doi.org/10.1109/ITEC-India48457.2019.ITECINDIA2019-131

Battery Design. (u.å. a) *Module*. Hämtad 17 april, 2024, från https://www.batterydesign.net/module/

Battery Design (u.å. b) *Cell Balancing.* Hämtad 16 april, 2024, från https://www.batterydesign.net/cell-balancing/

Battery Design. (u.å. c). *Battery Disconnect Unit*. Hämtad 12 april, 2024, från https://www.batterydesign.net/high-voltage-system/battery-disconnect-unit/

Becker, S. (2024). *4 Tips to Avoid the EV Battery Issues That Icy Chicago Just Had*. CNET. https://www.cnet.com/roadshow/news/4-tips-to-avoid-ev-battery-issues-icy-chicago-just-had/

Bhosale, A. J., & Deshmukh, V. N. (2023). *Efficient ways of thermal management of an EV battery.* Materials Today: Proceedings, 72(Part 3), 1434–1445. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.343

Bratt Svensson, M., & Engelbrektsson, A. (2017). *An Optimised Packaging Solution of a Battery Disconnect Unit.* https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/253637/253637.pdf

Callaghan, D., Confrey, T., Culliton, D., Hwang, F. S., Nolan, C., Picovici, D., & Reidy, C. (2024). *Review of battery thermal management systems in electric vehicles.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171

Campagnol, N., Erriquez, M., Schwedhelm, D., Wu, J., & Wu, T. (2021). *Building better batteries: Insights on chemistry and design from China.* McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/building-better-batteries-insights-on-chemistry-and-design-from-china

Cao, Y, Gu, C, & Zhang, Y. (2023). *Automated and Electric Vehicle: Design, Informatics and Sustainability.* Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-5751-2_2

Chapman, D. & Norris, T. (2014). *Copper for Busbars - Guidance for Design and Installation.* Copper Development Association, 22, 6. https://p537794.webspaceconfig.de/wp-content/uploads/2019/11/Copper-for-Busbars.pdf

Dober. (u.å.). *Cooling Lithium-Ion Battery Packs*. Dober. Hämtad 26 mars, 2024, från https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems

Durakool. (u.å.). *HVDC Contactors and Failure Modules*. Hämtad 22 april, 2024, från https://www.durakool.com/media/wqej3oyj/hvdc-contactors-failure-modes.pdf

Eaton. (u.å.). *Battery disconnect unit*. Hämtad 11 april, 2024, från https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/emobility/battery-disconnect-unit.html

Electron Automotive. (2022, 3 juni). *How to perform an isolation/insulation test on a hybrid battery* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=apFEk8xsYas

ETEK Electric. (2023, 14 augusti). *How to test a contactor?*. https://www.etek-china.com/blog/how-to-test-a-contactor

Hsu, R., & Toward, B. (2023). *Insulation Failure Detection in EV Batteries*. EE Power. https://eepower.com/industry-articles/insulation-failure-detection-in-ev-batteries/

Inside EV Training - with Daniel and Chris (2023, 13 november). *Interlock in Electric and Hybrid Vehicles - A Deep Dive into Manual Service Disconnects (MSD)* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=1_whh3CzrAg

Keyence. (u.å.). *Comparison of Different Types of Electric Vehicle Battery Cells*. Hämtad 26 mars, 2024, från https://www.keyence.eu/products/marker/laser-marker/resources/laser-marking-resources/comparison-of-different-types-of-electric-vehicle-battery-cells.jsp

Leach, J. G. (u.å.). *A High-Voltage Fuse Tutorial and Application Guide*. IEEE. Hämtad 22 april, 2024, från https://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp_files/2019-1_Leach_HV_Fuse_Tutorial.pdf

Lee, C. (2023, 5 juni). *Comparison Between Three Types of Lithium Ion Battery Cell - Cylindrical Cell, Prismatic Cell, Pouch Cell.* Linkedin. https://www.linkedin.com/pulse/comparison-between-three-types-lithium-ion-battery-cell-cliff-lee/

Li, W., Fan, W., Sauer, D. U. , Wang, Z., & Zhang, L. (2020). *Battery heating for lithium-ion batteries based on multi-stage alternative currents*. Journal of Energy Storage, Volume 32. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101885

Lieskoski, S., Tuuf, J., & Björklund-Sänkiaho, M. (2024). *Techno-Economic Analysis of the Business Potential of Second-Life Batteries in Ostrobothnia, Finland*. Batteries, 10(1), 36. https://doi.org/10.3390/batteries10010036

Livewire rEView. (2023, 28 maj). *Electric Vehicle EV Battery Rebuild* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=AIPkRR4Hv-w

LS e-Mobility Solutions. (u.å.). *BDU.* Hämtad 11 april, 2024, från https://www.lsems.com/en/business/bdu/

Lucid Motors. (2022, 10 mars). *Battery Pack | Tech Talks | Lucid Motors* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=2aDyjJ5wj64&t=876s

Macholz, D. (2023). *Paving the Road for Ev Maintenance and General Service*. Motor Age, 142(8), 24–32. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bsu&AN=172937909&site=eds-live&scope=site

Makermax. (u.å.) *Importance of Isolation.* Hämtad 22 april, 2024, från https://makermax.ca/articles/importance-of-isolation/

Munro Live. (2024, 20 februari). *Electric Vehicle Battery Breakdown: Cells to Modules to Packs!* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=hBbhevHZZ5E

NHP. (u.å.). *Contactor Failure.* Technical News, 3. https://www.nhp.com.au/-/media/Project/NHP/Sites/Shared/White-Papers/Files/TNL-3.pdf

NXP. (u.å.) *HVBMS Cell Monitoring Unit (CMU).* Hämtad 16 april, 2024, från https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/analog-toolbox/high-voltage-battery-management-system-hvbms/hvbms-cell-monitoring-unit-cmu:HVBMS-CMU

Osmanbasic, E. (2023, 14 augusti). *High Voltage Vehicles: Why 800-Volt EVs are on the Rise*. Engineering. https://www.engineering.com/story/high-voltage-vehicles-why-800-volt-evs-are-on-the-rise

Panasonic. (2023, 22 september). *What Is a DC/DC converter in an Electric Vehicle (EV)?* https://industrial.panasonic.com/ww/ss/technical/ap7

Prostech. (u.å.). *Sealing Battery Pack between Upper Case and Lower Case.* Hämtad 26 april, 2024, från https://prostech.vn/sealing-battery-pack/#Why_Battery_Pack_Sealing

Recom. (2024, 12 januari). *Isolated Battery Management Systems (BMS)*. Recom. https://recom-power.com/en/rec-n-isolated-battery-management-systems-%28bms%29-300.html?0

RS. (2024, 8 februari). *A Complete Guide to Fuses*. Hämtad 3 maj, 2024, från https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/fuses-guide

Safety House. (2022, 27 januari). *What is a Lockout Kit And Why is it Used For?*. https://www.lockoutindia.com/blog/what-is-a-lockout-kit-and-why-is-it-used-for/

Sisson, P. (2023). *How does an EV battery actually work?*. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2023/02/17/1068037/how-do-ev-batteries-work/

Springers. (u.å.). *Why Shunts And Battery Monitors Are Critical To Your Off-Grid System.* Hämtad 12 april, 2024, från https://www.springers.com.au/blog/springers-workshop-3/why-shunts-and-battery-monitors-are-critical-to-your-off-grid-system-88

Supercheap Auto. (u.å.). *How to Tell if a Car Fuse is Blown.* Hämtad 23/4, 2024, från https://www.supercheapauto.com.au/blog/batteries-electrical/how-to-tell-if-a-car-fuse-is-blown.html

Swe-check. (u.å.). *Understanding Electric Vehicle Fuse Applications.* Hämtad 22 april, 2024, från https://www.swe-check.com.au/editorials/ev_fuse_applications.php

Synopsys. (2024). *What is a battery management system?*. Hämtad 20 maj, 2024, från https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html

Thompson, M. (2023). *EV infrastructure investments continue as industry tech shortage continues*. RDN. https://www.repairerdrivennews.com/2023/09/15/ev-infrastructure-investments-continue-as-industry-braces-for-worker-shortage/

Truett, R. (2022, September 5). *HISTORY OF THE INDUSTRY'S FUTURE; How the EV skateboard chassis came to be, and what this engineering feat means to the industry going forward.* Automotive News, 97(7054).

WeberAuto. (2018, 20 februari a). *Chevrolet Bolt EV Battery Disassembly* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=ssU2mjiNi_Q

WeberAuto. (2018, 17 mars b). *Chevrolet Bolt EV Battery Smoke Test and Installation* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=VUvAW6skwrA&t=498s

WeberAuto. (2019, 10 december, a). *2011 Nissan LEAF Battery - Deep Dive* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=vYQJatWpBXY&t=5957s

WeberAuto. (2019, 20 december, b). *Megohmmeter - Loss of Isolation Diagnostics* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=00eEj_EgMas&t=603s

WeberAuto. (2022, 5 augusti). *Mach E GT Battery Contactors* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=sZHN3fjDtpc

Westking Fuse. (2024, 23 januari). *Electric Vehicle Fuse Replacement Tutorial.* https://www.westking-fuse.com/news-show-3.html

Word of Advice TV (2019, 26 september). *How to Replace a Contactor* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=qHZc9wWAF4c

Xie, Y., Li, L., Xu, Q., Li, X., Huang, H., Huang, Y., Bei, S., Zhang, L., & Zheng, K. (2024). *Effects of module size on the heat dissipation performance of the thermal management system for the battery module with cylindrical cells*. Applied Thermal Engineering, 238. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121958

Österlin, K. (2016). *Design i fokus* (4:1. uppl.) Liber AB.

Bilagor

Bilaga A: Kravspecifikation

Chalmers			***Projekt*** *Utformning av en elbilsbatterisimulator*	**Kravspecifikation**		
				Elbilsbatterisimulator		
Utfärdare: Josefin Axelsson och Joel Lundgren				***Skapad: 2024-02-05***		
				Modifierad: 2024-05-27		
	Kriterier			***K/N/Ö/T***	***Viktning***	***Referens***
					1-5	
	Verklighetstroget simulera felsökningsprocessen av ett elbilsbatteri			K		Uppdragsgivare
	Verklighetstroget simulera reparationsprocessen av ett elbilsbatteri			K		Uppdragsgivare
1.	**Simulerade situationer**					
1.1	**Krav från företaget**					
1.1.1	Isolationsfel i vänster halva			K		Uppdragsgivare
1.1.2	Isolationsfel i höger halva			K		Uppdragsgivare
1.1.3	Ledande vätska i batteriet			T		Uppdragsgivare
1.1.4	Svetsad positiv kontaktor			K		Uppdragsgivare
1.1.5	Svetsad negativ kontaktor			K		Uppdragsgivare
1.1.6	Trasig säkring mellan cellmoduler			K		Uppdragsgivare
1.2	**Identifierat av oss**					
1.2.1	Felande laddning i individuella celler			N	4	
1.2.2	Löst fästförband på busbar			Ö	2	
1.2.3	Upp- och urladdningstest av batteriet			Ö	5	
1.2.4	Kommunikationsfel - Kopplingsfel mellan cell och BMS			Ö	2	
1.2.5	State of Health - Kontrollera batterihälsa			T		
1.2.6	Trasig säkring i BDU			Ö	3	
1.2.7	De- och remontering av batterihölje			Ö	5	
2.	**Funktioner**					
2.1	Kunna manipulera spänningen i individuella celler			N	4	
2.2	Möjliggöra spänningsmätning av individuella celler	Mätverktyg ska kunna användas		N	3	
2.3	Mätpunkter som är listade i scheman från kund			N	4	
2.4	Simulera ledande ämne som läckt i batteriet			T		
2.5	Leda ström mellan fordonschassi och cellmodul	Av och på		N	5	

2.6	Simulera svetsning av kontaktorer			N	5	
2.7	Möjliggöra de-/remontering av kontaktor			Ö	3	
2.8	Bryta ström i kretsen mellan cellmodulerna			N	5	
2.9	Möjliggöra de-/remontering av säkring			Ö	3	
2.10	Möjliggöra transport	Flyttbar av en person utan assistans		N	4	
2.10.1	Tillåta transport som handbagage på flygplan			Ö	2	
2.11	Underlätta transport			Ö	2	
2.12	Möjliggöra spårning av kommunikationen			N	4	
2.13	Möjliggöra upprepad de-/remontering av komponenter	Hållfasta materialval		N	5	
2.14	Minimera risk för elektrisk chock			Ö	2	
2.15	Skydda innehåll	Yttre/externa faktorer		N	2	
2.16	Tåla slitage	Normal användning i utbildningssituation		N	2	
2.17	Tillåta underhåll	Reparerbar och rengöringsbar		N	1	
2.18	Underlätta underhåll			Ö	1	
2.19	Möjliggöra uppgradering	Begränsa inte funktioner		Ö	2	
2.	**Komponenter**					
2.1	Cellmodul		Minst 2 st	K		
2.2	BMS (Battery Management System)		1 st	K		
2.3	BDU (Battery Distribution Unit)		1 st - antagande	K		
2.4	Tejp mellan cellmodulerna			T		
2.5	Inre case			Ö	3	
2.6	Aluminiumprofil			T		
2.7	Busbar	Orange		N	5	
2.8	Kretskort (CMU)	Anpassad för modulexpansion	1 st per cellmodul	T		
2.9	Subpack			T		
2.9.1	Spännband			T		
2.9.2	Sidoplatta		2 st per subpack	T		
2.10	Kylelement		1 st	Ö	3	
2.10.1	Cooling pads (vit)			Ö	2	
2.10.2	Sticky pads (relaterade till kylelementet)			T		

2.11	Värmeelement		1 st	Ö	2	
2.11.1	Heat transfer matt			Ö	1	
2.12	Isolation till temperatursystem			Ö	1	
2.13	Kommunikationskablar			N	4	
2.14	Kontaktor		Minst 2 st	K		
2.15	MSD		1 st	K		
2.15.1	Hållfast MSD			N	3	
2.16	Shunt			T		
2.17	Säkring		Minst 1 st	K		
2.18	Lyftpunkter			T		
2.19	Nivåer av indikation			T		
2.20	DC-DC-konverterare			T		
2.21	IOT			K		
2.22	Powerbank			N	5	
2.23	Batterihölje			Ö	5	
3.	**Utformning av komponenter**					
3.1	Efterlikna verklig motsvarighet	Storlek, färg och form. Gäller samtliga komponenter.		K		
3.1.1	Liknande färgsättning	Exempelvis orange högspänningsfärg		N	5	
3.1.2	Liknande form			N	4	
3.1.3	Liknande vikt			Ö	2	
3.1.4	Liknande storlek			N	3	
3.1.5	Samma typ av infästning			Ö	1	
3.2	Uppfattas intuitiv			Ö	3	
4.	**Hållfasthet**					
4.1	Tillåta upprepad de- och remontering av komponenter			N	4	
4.2	Bibehålla komponentplacering			Ö	2	
4.3	Skydda innehåll	Väder, vind, utomstående faktorer		Ö	3	
4.4	Tåla slitage	Slitage från normal användning i utbildningssituation		N	4	
5.	**Hållbarhet**					
5.1	Lokal tillverkning	Minimera Transporter		Ö	1	

5.2	Resurssnåla tillverkningsmetoder			Ö	1	
5.3	Hållbara materialval			Ö	1	
5.3.1	Resurssnåla material			Ö	1	
5.3.2	Förnybara material	Då funktionellt möjligt		Ö	1	
5.3.3	Hållfasta materal			N	4	
5.3.4	Återvinningsbara material			Ö	1	
5.4	Återanvändbara komponenter			Ö	1	
5.5	Möljliggöra demontering	För service		Ö	1	
5.6	Möljliggöra reparation			Ö	3	
5.7	Minimera materialspill	Tillverkningsteknik		Ö	1	
6.	**Produktion**					
6.1	DFA			N	4	
6.2	DFM			N	4	
6.3	Tillverkningsmetoder anpassade efter produktionsvolym			N	2	Uppdragsgivare

Bilaga B: Inköpta komponenter

MSD

Rekommenderad produkt att köpa in:

https://www.amphenol-industrial.de/en/products/xev-connectors/mimsd/msd-plug-minimsdm400

Denna rekommenderas eftersom den klarar 690 V, vilket är mellan de 400 och 800 V simulatorn ska efterlikna. På så sätt blir storleken på komponenten rimlig för båda fallen. Dessutom har den två mindre låsfunktioner i form av knappar som teknikern behöver hålla in när de ska dra ur MSD. Detta är ett viktigt steg i hanteringen av komponenten.

Hänglås

Rekommenderad produkt att köpa in:
https://www.amazon.se/Lockout-Isolering-Engineering-H%C3%A4ngl%C3%A5s-Maskintillverkning/dp/B09BQ59T8G/ref=asc_df_B09BQ59T8G/?tag=shpngadsglede-21&linkCode=df0&hvadid=476599374711&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=10447995334932593271&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1012511&hvtargid=pla-1732876224617&psc=1&mcid=b9a3607582c03479a1b291294fa44daa

Detta är den produkt som uppdragsgivaren använder i sina andra produkter.

Busbars

Rekommenderad produkt att köpa in: https://se.rs-online.com/web/p/busbars/2368449

Denna föreslås då det var det mest kostnadseffektiva, anpassningsbara alternativet som hittades.1241 mm långt band som behöver processeras till rätt längd och form.

Kommunikationskablar

Rekommenderad produkt att köpa in:
https://www.digikey.gr/en/products/detail/amphenol-icc-fci/10162767-M0030YYLF/16164687

Att köpa in kablar är billigare än att göra egna. Behöver bara vara lik de riktiga kablarna, funktionen spelar ingen roll då de inte ska användas i simulatorn. Den länkade komponenten anses vara ett alternativ på en riktig BMS-kabel av generell storlek. På 1,27 mm diameter är den på den tunnare sidan, vilket borde innebära en lägre miljöpåverkan vid tillverkning än genomsnittet. Generellt sammanstrålar de från cellmodulerna i en svart kabelslang bort till BMS.

Annars ta bara det billigaste liknande alternativet. Ifall det finns funktionella kablar till ett överkomligt pris kan det vara värt, eftersom då blir det enklare att uppgradera till en funktionell BMS i framtiden om så önskas.

Låda

Rekommenderad produkt att köpa in:
https://www.fuertecases.com/mm5/merchant.mvc?Screen=PROD&Product_Code=SE-920&Session_ID=fc4901aebd1cf1d6ba4de2e281935181

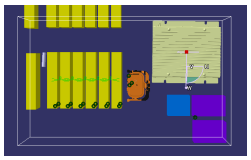
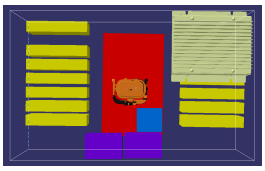
Denna är föreslagen av uppdragsgivaren. Certifierad fukttät och stöttålig, med handtag och hjul för enkel transport.

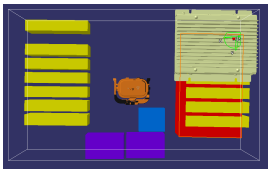
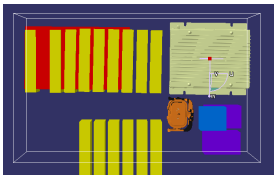
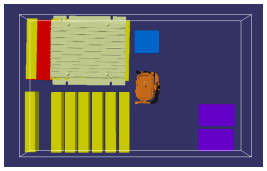
Powerbank

Rekommenderad produkt att köpa in:
https://www.kjell.com/se/produkter/hem-fritid/resetillbehor/powerbank/linocell-powerbank-10000-mah-p89256

Denna föreslås då den uppfyller kraven på portar och kapacitet.

Bilaga C: PNI för de fem olika layouterna och tre vidaretagna koncept

Koncept	Definition	Positivt	Negativt	Intressant
#1 	Subpack - utanför ramen	Uppfattning av flera subpack Kontaktorernas placering i utkant MSDS placering* Centrerad BLS möjlig Kan se båda sidor av modulerna Inga nedskalningar Möjliggör ett plant cooling plate	Mycket fokus i utkanterna av caset BMS placering - ej ovanpå moduler Kontaktorerna långt ifrån subpacken	Outnyttjat utrymme - möjligheter att välja full storlek på komponenter Färre moduler per subpack
#2 	Fyra subpack med sex moduler i varje Två pack sticker ut ur ramen Placering i lager/nivåer	Symmetriska subpack BMS uppepå subpack Centrerad BLS möjlig Centrerad MSDS* Två kompletta subpack	Olika nivåer, sänkta subpack pga BMS och BLS Subpacken långt ifrån varandra Kräver separata kylelement	Färre moduler per subpack
#3	BLS i dold låda av subpack	Symmetriska subpack	BLS ej central placering Subpacken långt	Dött subpack - BLS utnyttjar dött utrymme

		BMS uppepå subpack Jämnt översta plan Centrerad MSDS* Två kompletta subpack	ifrån varandra kylelement separat Cooling plate problematisk vid dött subpack	
#4 	Fyra subpack 8 cellmoduler per subpack Avstånd mellan subpack	Uppfattning av att batteriet känns stort - verkligt MSDS placering* Kontaktorerna placering nära MSDS och subpacken	Cooling plate problematisk vid dött subpack BMS placering - ej ovanpå moduler Trångt Trångt för kablar från BLS	Dött subpack - BLS utnyttjar dött utrymme Fler cellmoduler
#5 	Subpack döljer BLS Ett fåtal "fungerande" cellmoduler skapar ett intryck av ett nät med flera subpack	BMS ovanpå subpack MSDS placering* Kontaktorernas placering i utkant Uppfattning av flera moduler Två kompletta subpack	Trångt att se mellan subpack Trångt för BLS-kablar Cooling plate problematisk vid dött subpack	Dött subpack - BLS utnyttjar dött utrymme Outnyttjat utrymme - möjligheter att välja full storlek på komponenter

PNI sammanfattas enligt tre koncept:

1. Subpack utanför ramen

Ett komplett subpack där båda sidor syns
Centrerad IOT i eget lager
Kylelement under samtliga moduler, behöver inte kunna plockas ut

2. Två hela subpack med delad placering längs kortsidorna
Centrerad IOT- varierande nivåer för komponenterna
BMS placerad ovanpå subpack
Separata kylelement

3. Två parallella subpack längs långsidorna
Ett dött subpack med placerad IOT inuti
MSD central placering

Koncept 1 väljs för vidareutveckling

Vidareutveckling - Idéer
1.
Visa en större del av de utstickande subpacken för att förenkla förståelsen av att de är subpack.
Förtydliga ramkonceptet för användaren.
Visuellt ser kylelementet helt ut - montering av subpack på kylelement
2.
Justera längden L på modulerna för att minska glappet mellan subpacken.
Förflytta det fungerande subpacket mot mitten för att skapa sikt av kopplingar på båda långsidorna.
BMS i lägre höjd för att inte skapa nivåskillnader genom sin placering ovanpå subpack.
Placera Shunt (blå) längs subpackets kortsida för att utnyttja utrymme.
Flytta shunt (blå) till sidan av kontaktorerna för att förenkla strömmens gång.
3.
BLS skjuts helt åt höger enligt bild -> placering under BMS och två cellmoduler. Resulterar i 1,5 opåverkade subpack.
Visuellt ser kylelementet helt ut - montering av subpack på kylelement
BMS dimensioneras för att passa det lediga utrymmet i konceptet.

Bilaga D: PNI för hölje

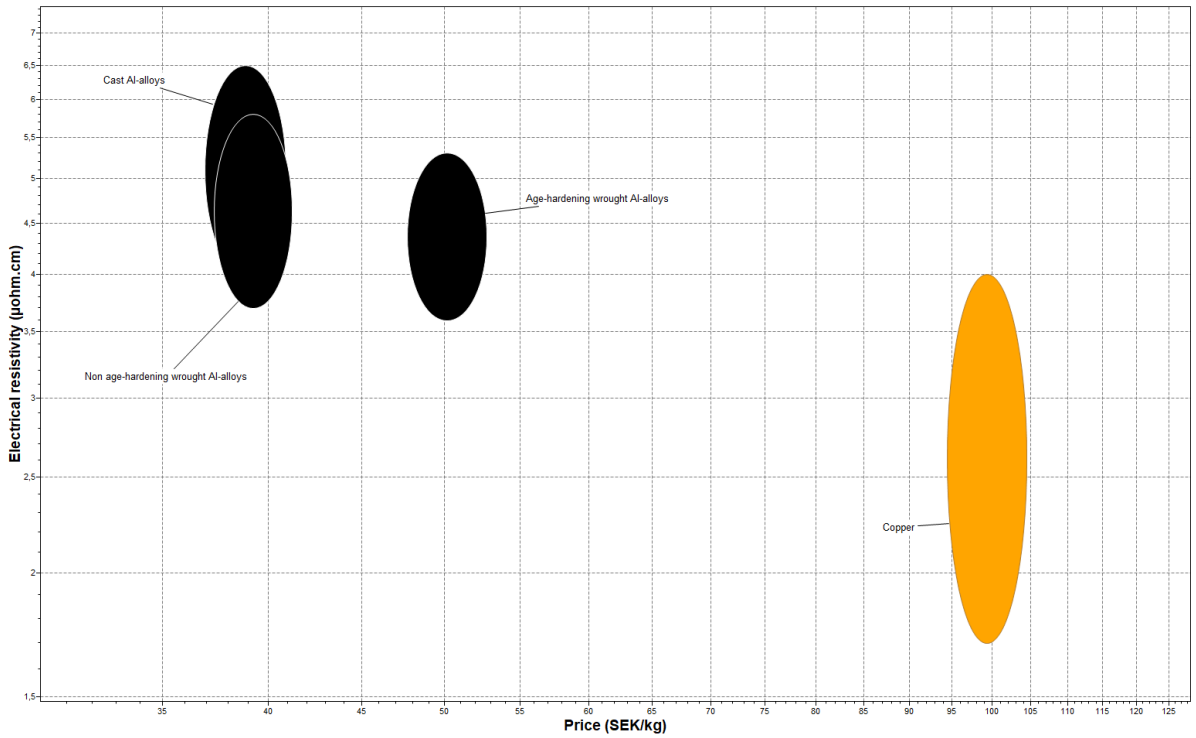
1. En låda avskiljer batteriet från alla håll inuti caset.
2. Lock som täcker för batteriet som behöver skruvas av för att komma in i batteriet/ se batteriet. Det är troligtvis ett tunnare aluminium lock med bockning.
3. Batteriet åtkoms efter direkt öppning av lådan / caset.

Lösning	Positivt	Negativt	Intressant
1. Inre låda	Finns alltid där. Momentet att lyfta av och skruva bort den. Rätt (säkerhetsrutiner) rutiner i korrekt ordning behöver genomföras. Insidan ser mer verklig ut. Infästning kan underlättas och form påverkas.	Tar plats. Kostar ännu mer. Påverkar övrig lösning. Fler element kan behöva tillföras med samma avgränsning. Fler komponenter kan verkligt finnas påvägen bort från kärnan av batteriet. Krävs inte för att simulera nuvarande krav för scenarios. Kräver övrig interagering med omgivningen för att uppfylla sin funktion.	Inte ett kritiskt moment. Skapar ett innanför och utanför batteriet.
2. Bara lock	Finns alltid där. Momentet att lyfta av och skruva bort den. Rätt (säkerhetsrutiner) rutiner i korrekt ordning behöver genomföras. Lösning tar liten plats.	Tar plats, främst från sidorna. Kostar mer. Påverkar övrig lösning. Fler element kan behöva tillföras med samma avgränsning. Fler komponenter kan verkligt finnas påvägen bort från kärnan av batteriet. Krävs inte för att simulera nuvarande krav för scenarios.	Inte ett kritiskt moment.

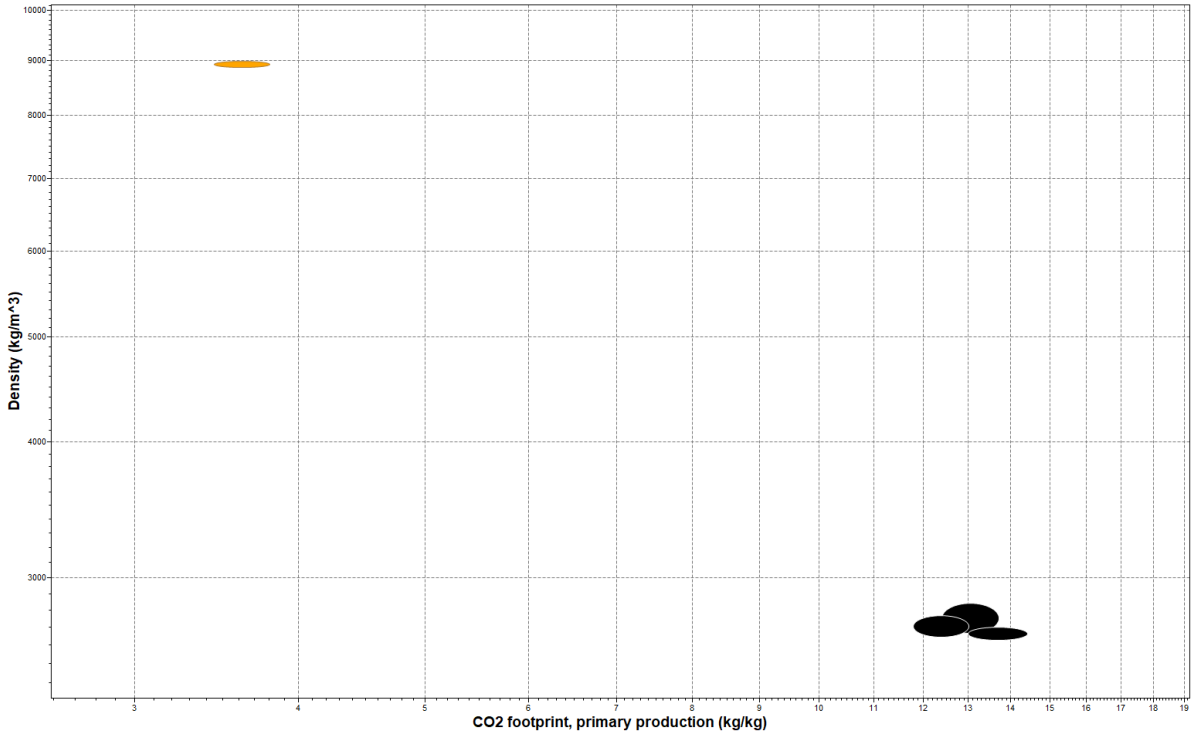
		Kräver övrig interagering med omgivningen för att uppfylla sin funktion.	
3. Endast case	En komponent mindre att tillverka. Väger lite mindre. Billigare. Mer plats för andra komponenter.	Lådan som begränsar lösningen är inte anpassningsbar. Saknar momentet att skruva bort ett lock som alltid annars görs. Insidan (väggarna) av simulatorn ser inte ut som i verkligheten.	

Halv inre låda
Begränsar lådans undre långsida och högra kortsida. De övrigt öppna sidorna tillåter de utstickande modulerna och komponenterna ha samma och eventuellt förstärkta uppfattning om att batteriet är "inzoomat". Väggar tillåter en kontext för vart locket fäster samt fästpunkter för detta. *Väggarna kan skapa ytterligare fästpunkter för komponenter om nödvändigt.* Väggarna skapar även möjligheten för en mer naturlig botten av batteriet, som oavsett variant behöver avgränsa det övre lagret från det undre där ett kylelement inte naturligt placeras. En inre låda kan också formas fritt utefter hur ett riktigt case ser ut.
Nackdelar är att ytterligare komponent behöver tillverkas vilken kräver ytterligare material och process -> dyrare. Den tillagda komponenten av en låda tar också mer plats i det begränsade utrymmet.

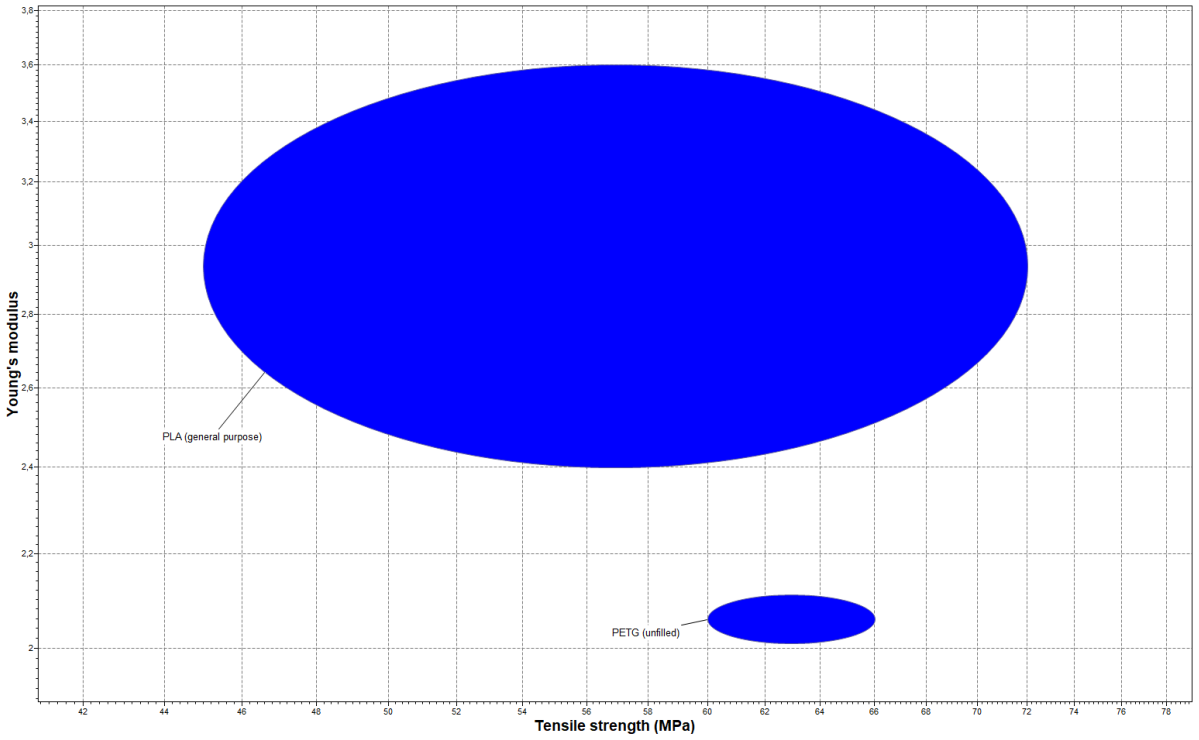
Bilaga E: Jämförelse av materialalternativ i Granta EduPack 2023 R1



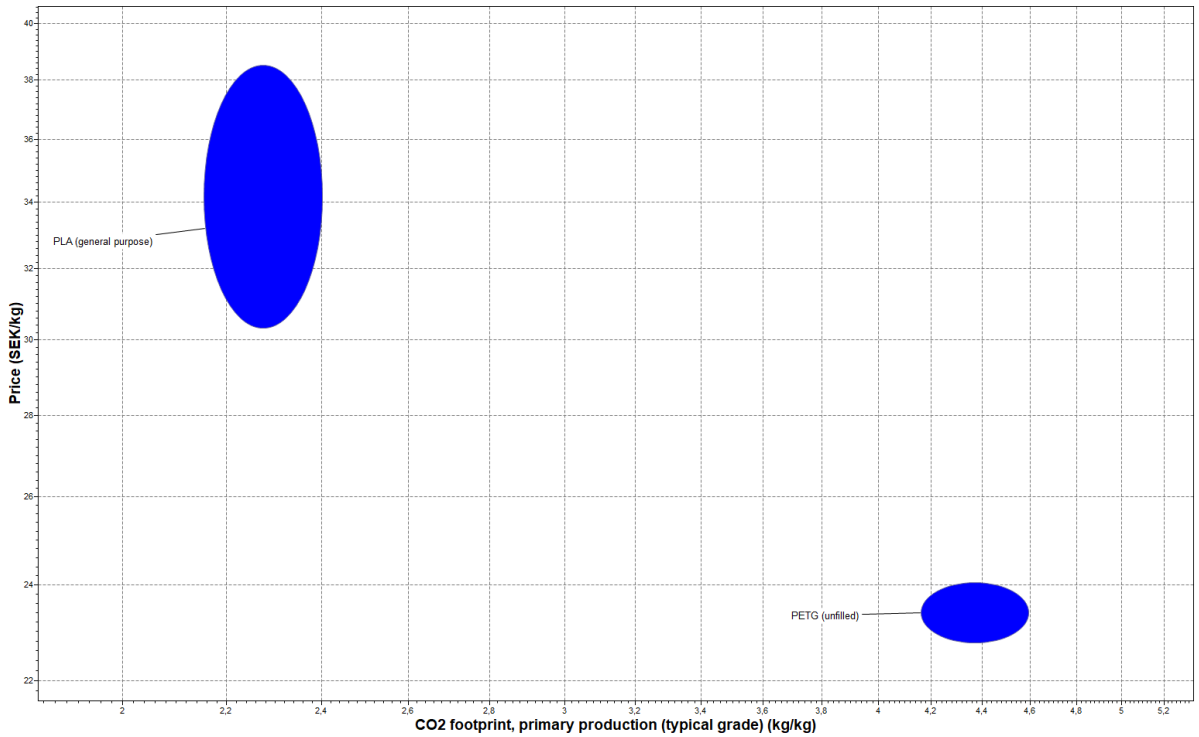
Jämförelse av Cu (orange) och Al (svart) vad gäller pris och elektisk ledningsförmåga.



Jämförelse av Cu (orange) och Al (svart) vad gäller densitet och CO2-avtryck.



Jämförelse mellan PLA och PETG vad gäller E-modul och brottgräns.



Jämförelse mellan PLA och PETG vad gäller CO2-avtryck och pris.