

Joakim Kortgård og Magnar Fossbakken
Lundberg

Utvikling av batteristyringssystem for DNV Fuel Fighter

Bacheloroppgave i Elektroingeniør

Veileder: Rolf Kristian Snilsberg

Mai 2021

Joakim Kortgård og Magnar Fossbakken Lundberg

Utvikling av batteristyringssystem for DNV Fuel Fighter

Bacheloroppgave i Elektroingeniør
Veileder: Rolf Kristian Snilsberg
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elektroniske systemer



Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: Utvikling av batteristyringssystem for DNV Fuel Fighter Project title: Development of battery management system for DNV Fuel Fighter	Gitt dato: 18.01.21
	Innleveringsdato: 20.05.21
	Gradering <input checked="" type="checkbox"/> åpent <input type="checkbox"/> lukket <input type="checkbox"/> åpent fra _____
	Antall sider/bilag: 32 / 8
Gruppedeltakere: Magnar F. Lundberg og Joakim Kortgård	Veileder internt (navn/email/tlf.): Rolf Kristian Snilsberg rolf.k.snilsberg@ntnu.no Tlf: 73559595
Studieretning: Elektroingeniør	Prosjektnummer: 61
Oppdragsgiver: DNV Fuel Fighter	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Magnus Skurseth Aarnes Tlf. 94187118

Sammendrag: Det er utviklet et komplett system for overvåkning og balansering av battericeller og styring av strømvern og temperaturmåler. Systemet tar i bruk et egenlaget fysisk kretskort som binder alle delsystemene sammen og sørger for alle systemets funksjoner. Det blir også brukt en omfattende kode hvor systemet kan bli styrt etter behov.

Abstract in English: We have developed a system for monitoring and balancing of battery cells and management of current protector and temperature measurements. The system uses a self-made circuit board that binds the subsystems together and provides the functionality of the system. There is also a comprehensive code from which the system can be controlled depending on the area of use.



**DNV FUEL
FIGHTER**

Bacheloroppgave 2021

Elektroingeniør

Utvikling av batteristyringssystem for DNV Fuel Fighter

Studenter:

Joakim Kortgård
Magnar F. Lundberg

Utkast nr. 1
20. mai 2021

Forord

Dette bachelorprosjektet er gjennomført som en del av elektroingeniørstudiet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Prosjektet er utført av to studenter ved navn Joakim Kortgård og Magnar Fossbakken Lundberg.

Vi vil rette vår takk til arbeidsgiver DNV Fuel Fighter. De har gitt oss frihet til å løse prosjektet slik vi selv har ønsket samtidig som de har hjulpet oss med sin kompetanse. Videre rettes en takk til veileder som har kommet med gode råd og tilbakemeldinger gjennom dette prosjektet.

Å utvikle og skrive denne oppgaven har vært svært lærerikt på mange måter og har gitt oss erfaringer vi vil ta med videre i livet. Ved å lese denne oppgaven vil du lære mer om hvordan batteristyring fungerer. I tillegg vil du bli bedre kjent med systemet vi har utviklet under prosjektet.

Joakim Kortgård

Dato: 20.05.2021

Magnar Lundberg

Takk til

Takk til Eigil Hjelmstad i DNV Fuel Fighter for hjelp med utvikling av kretskort og komponentvalg

Takk til Magnus Skurseth Aarnes i DNV Fuel Fighter for hjelp med utvikling av kretskort og loding av komponenter

Takk til Ludvik Rønning i DNV Fuel Fighter for hjelp med utvikling av kretskort

Takk til Markus Anthony Dørheim Ho-Yen og Finn Ferdinand Schøll Sandvand i DNV Fuel Fighter for hjelp med utviklingen av kode

Takk til Torbjørn Lundberg og Magni Astrid Fossbakken for korrekturlesing og videre hjelp med bachelorrapporten

Takk til Sigurd Ranheim Henriksveen for hjelp med 3D printing

Takk til Rolf Kristian Snilsberg ved NTNU for veiledning i prosjektet

Takk til Elektra Verkstedet ved NTNU for utstyr til loding, montering og testing av systemet

Takk til Electrical Team i DNV Fuel Fighter for inkludering i Scrum prosessen

Takk til styret i DNV Fuel Fighter for økonomisk støtte og tildeling av prosjektet

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Takk til	II
Oppgavetekst	IV
Sammendrag	IV
Akronymer	V
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Mål med prosjektet	2
1.3.1 Oppdragsgivers mål	2
1.3.2 Gruppens mål	2
1.4 Rapportens oppbygging	3
1.5 Prosjektets utgangspunkt	3
2 Teori	4
2.1 Batteristyringssystem	4
2.2 Systemets oppbygging	4
2.2.1 Integrert krets	4
2.2.2 Balanseringskrets	4
2.2.3 Strømstyringskrets	5
2.2.4 Mikrokontroller	6
2.3 Beskrivelse av deler	6
2.3.1 LTC6811-2	6
2.3.2 Strømmåler	9
2.3.3 Omformer	9
2.3.4 Relè	9
2.3.5 Temperatursensor og andre komponenter	10
2.4 Kode	10
2.4.1 SPI-kommunikasjon	10
2.4.2 Kodens utvikling	11
2.4.3 Kodens oppbygging	12
2.5 Utvikling av kretskort	13
2.5.1 Støy	14
2.5.2 Varmeutvikling	14
2.5.3 Kortets oppbygging	15
2.5.4 Strømføring i kortet	15
2.5.5 Utvikling av deksel	16
2.6 Balanseringsmetoder	16
2.6.1 Passiv balansering	16
2.6.2 Aktiv balansering	17

3 Metode	18
3.1 Utviklingsprosess	18
3.1.1 Planleggingsprosessen	18
3.1.2 Arbeidsprosessen	18
3.2 Kunnskapsbase	19
3.3 Arbeids- og rollefordeling	19
4 Resultat og diskusjon	21
4.1 Testing	21
4.1.1 Testing av testsystem	21
4.1.2 Testing av rev 2	22
4.1.3 Testkode	22
4.1.4 Testing i bil	22
4.2 Alternative løsninger på systemet	22
4.3 Mulige forbedringer i systemet	23
4.4 Ressursbruk	24
4.5 Ingeniørfaglige resultater	24
4.5.1 Mål med produktet	24
4.5.2 Test av komplett system	26
4.6 Brukermanual	26
5 Konklusjon	27
5.1 Funksjonalitet og resultat av prosjekt	27
5.2 Videre arbeid	27
5.3 Planlegging	28
5.3.1 Tidsfrist	28
5.3.2 Budsjett	28
5.3.3 Fremdrift	28
Referanseliste	29

Oppgavetekst

Nedenfor følger oppgaveteksten slik den er beskrevet i oppgavebeskrivelsen:

“Vi skal utvikle en ny og forbedret versjon av bilens batteristyringssystem. Batteristyringssystemet skal fungere i henhold til parametere gitt av reglene i konkurransen: Shell Eco Marathon. Den skal kunne balansere battericellene i batteriet både ved utladning og opplading under kjøring. Den skal være designet på en slik måte at den kan innpasses i batteripakka til bilen. Den skal også kutte både strøm og spenning til bilen automatisk, ved høye spenninger, strømmer og temperaturer. I fjor var det et enkelt ferdigkjøpt batteristyringssystem som ble brukt i bilen, denne passer ikke lenger til parameterne som er gitt.”

Vi har vært tro mot oppgavebeskrivelsen og den står derfor uforandret ved prosjektslutt. Det er derimot foretatt en redaksjonell endring ved at BMS eller Battery Management System er endret til batteristyringssystem. Det ble bestemt av oppdragsgiver at årets bil kun skulle bruke enveis kulelager. Dette vil si at bilen ikke benytter seg av regenerativ bremsing og vårt system vil ikke ha behov for lading av batteriet under kjøring.

Sammendrag

I dette prosjektet er det utviklet et system for å kontrollere og overvåke utladning av celler i et 12 cellers batteri. Systemet tar utgangspunkt i parameterne satt av regelsettet til Shell Eco Marathon(SEM). Løsningen vår har derfor blitt laget i tråd med parameterne, samtidig som vi tar høyde for at det kan bli gjort endringer i regelsettet. På bakgrunn av dette er vårt systems funksjonalitet enkel å endre ved hjelp av kode.

Løsningen vår baserer seg på en integrert krets som heter LTC6811-2. Den er fra Analog Devices og er kjent for å være meget godt egnet til å lage skreddersydde batteristyringssystem. Denne integrerte kretsen blir videre brukt sammen med flere andre delkretser som vi har utviklet og den blir styrt av en kode vi har skrevet.

Koden er en av de viktigste delene av prosjektet fordi den styrer mye av funksjonaliteten til systemet. Konsekvensen av å være avhengig av kode er at alle feil blir kritiske for funksjonaliteten, men til gjengjeld gir koden store muligheter for endringer og tilpasninger underveis, samtidig som det er lett å høste inn data.

Akronymer

NTNU	<i>Norges Teknisk-Naturvitenskaplig Universitet</i>
AON	<i>Activity On Node</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
SEM	<i>Shell Eco Marathon</i>
DC	<i>Direct Current</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
EMI	<i>Elektromagnetisk interferens</i>
EMC	<i>Elektromagnetisk kompatibilitet</i>
OPAMP	<i>Operational Amplifier</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Den siste tiden har det vært stor utvikling innen transportsektoren. Et av utviklingsområdene har vært en dreining fra kjøretøy som benytter fossilt drivstoff til elektriske kjøretøy. Norge har lenge vært en pioner innen denne utviklingen med hele 12% av bilparken elektrifisert^[1] og prosentandelen vokser fort. Med denne utviklingen er det viktig å gjøre bilene mer energieffektive og levedyktige. Et batteristyringssystem har som oppgave å gi batteriet en lengre levetid og forbedre sikkerheten til systemet batteriet forsyner.

I 2008 grunnla en gruppe studenter den tekniske foreningen Fuel Fighter, senere kalt DNV GL Fuel Fighter og nå i dag DNV Fuel Fighter. Denne gruppa hadde som mål å delta i den årlige konkurransen SEM med sin daværende hydrogendrevne bil. I senere tid har organisasjonen gått over til elektriske biler. Målsetningen deres er å lage verdens mest energieffektive bil for å kunne prestere godt i SEM.

SEM er en konkurranse som Shell har arrangert siden 1939. Det er en internasjonal konkurranse som arrangeres en gang per år og har stor deltakelse fra flere lag. Målet med konkurransen er å kjøre lengst mulig på en bane ved hjelp av en gitt mengde energi. I tillegg må bilen inneha egenskaper tilsvarende en moderne passasjerbil. Dette innebærer for eksempel blinklys, bagasjerom, vindusviskere og lignende. Alle lagene får lik mengde energi til å drive kjøretøyet sitt og alle må kjøre samme bane. SEM har et meget utfyllende regelsett som man må tilfredsstille for å kunne delta. Det er her dette prosjektet kommer inn med mål om å tilfredsstille deler av regelsettet med et fungerende batteristyringssystem til bilen. Batteristyringssystemet er en viktig del av både regelsettet til SEM og er med på å øke batteriets levetid. Oppdragsgiver ønsker et nytt batteristyringssystem i bilen ettersom det forrige systemet ikke oppfyller kravene til årets konkurranse. De siste årene har oppdragsgiver kun brukt batteristyringssystem som har blitt kjøpt ferdigbygd. Dette er batteristyringssystem som ikke har vært spesialdesignet for verken bilen eller de parameterne SEM krever. Grunnet COVID-19 ble SEM avlyst i 2021, men til tross for det blir bilen prøvekjørt under et eget arrangement på Halså i regi av DNV Fuel Fighter. Videre satser oppdragsgiver på deltakelse i SEM 2022 med vårt batteristyringssystem i en ny bil.

1.2 Problemstilling

Dette prosjektet ble påbegynt allerede høsten 2020. Her begynte vi med en gradvis utvikling av skjemattegning og konstruksjon av kretskort. Derfor er dette bachelorprosjektet basert på tidligere arbeid. Det vil omhandle montering og testing av et testsystem, utvikling av kode til mikrokontrolleren som skal overvåke tilstanden til systemet og produksjon av en forbedret revisjon 2 og eventuelt 3.

Vår problemstilling er som følger: "Studentene skal utvikle en ny og forbedret versjon av bilens batteristyringssystem. Batteristyringssystemet skal fungere i henhold til parametere gitt av reglene i SEM. Systemet skal først og fremst kunne balansere battericellene under kjøring. Videre skal systemet være konstruert på en slik måte at det kan passe inn i batteripakken til bilen. I tillegg skal det kutte både strøm og spenning til bilen automatisk. Dette skal skje om en eller flere av cellene i batteriet er over- eller underladet, om strømtrekket til bilen er for høyt eller om temperaturen i batteripakken går over ønsket verdi."

Førsteutkastet av problemstillingen tok for seg et segment som sa at systemet skulle forsyne et lydhorn med 12V. Etter nøye gjennomgang av SEM-reglene sammen med oppdragsgiver kom vi frem til at dette ikke var i tråd med regelverket og dette segmentet ble fjernet fra oppgaven. I tillegg ble det bestemt at årets bil ikke skulle ha regenerativ bremsing. Dette førte til at vi ikke lenger trengte å ta høyde for balansering under oppladning.

1.3 Mål med prosjektet

Med et spesialdesignet batterisystem har oppdragsgiver som mål å delta i SEM 2022. Formålet med deltakelsen i SEM er å prestere så godt som mulig og dermed hente inn flere sponsorer. En økning av sponsorer vil ha stor effekt på fremtidige budsjett og utvikling av bilen. Dette kan igjen føre til bedre prestasjoner på sikt. I tillegg ønsker oppdragsgiver å ha et batteristyringssystem som kan brukes flere år på rad, slik at dette kan frigjøre arbeidskraft. En bonuseffekt som DNV GL Fuel Fighter oppnår er et høyere kunnskapsnivå gjennom god dokumentasjon og tilført kompetanse.

1.3.1 Oppdragsgivers mål

Oppdragsgiver ønsker å oppnå flere resultater gjennom dette prosjektet. Det første er økt levetid på batteriet, altså et større antall ladesykluser enn det som ville vært uten vårt system. Videre ønsker oppdragsgiver et godt resultat under SEM 2022. Sist, men ikke minst, ønsker oppdragsgiver å få produsert et batteristyringssystem som er brukervennlig og som kan benyttes i flere ulike versjoner av bilen.

1.3.2 Gruppens mål

Gruppen ønsker å sitte igjen med god og relevant erfaring som kan brukes videre i arbeidslivet. Dette gjelder erfaring innen utvikling av system som skal møte spesifikke, forhåndsbestemte krav. Dette inkluderer blant annet grundig undersøkning og forståelse av innhold i datablad til elektriske komponenter. Erfaring innen mer praktiske oppgaver som utvikling og montering av kretskort, konstruering og utførelse av tester og programmering av mikrokontrollere kan også være relevant senere i livet. Vi ønsker i tillegg å bli i stand til å prestere godt i senere prosjekter eller gruppearbeid, siden dette prosjektet gir oss god veiledning i hvordan alt fra rapporter til referater skal bygges opp. Til sist er det selvsagt et mål for oss i gruppen å få en meget god karakter på det totale bachelorprosjektet.

1.4 Rapportens oppbygging

Denne rapporten vil ha en standard oppbygging for prosjektrapporter.

Rapporten vil først ha et teorikapittel som beskriver systemet, hver enkel del og teorien bak disse delene. Deretter vil rapporten beskrive metoden som er brukt i et nytt kapittel. Her vil de ulike prosessene i prosjektet bli beskrevet, i tillegg til arbeidsfordelingen under prosjektet. I dette kapitlet vil også selve metoden for innhenting av informasjon bli beskrevet.

I den siste halvdel av rapporten vil resultatene legges frem og diskuteres og til slutt vil vi konkludere prosjektet som helhet. I resultat og diskusjonsdelen vil testingen av produktet bli omtalt. I tillegg vil det diskuteres hva som kunne vært gjort annerledes i prosjektet.

I konklusjonen vil det vurderes om prosjektet som helhet var vellykket eller ikke. Det vil også bli omtalt videre arbeid etter prosjektets slutt. Til slutt vil vi konkludere om hvor vellykket planleggingen av prosjektet var.

Etter selve rapporten er ferdig vil det være flere vedlegg som blir referert til ulike steder i rapporten. I tillegg vil det være andre interessante vedlegg som mer detaljert beskriver deler av prosjektet enn det rapporten gjør.

1.5 Prosjektets utgangspunkt

Som tidligere nevnt startet prosjektet allerede før selve prosjektperioden. Likevel er det hensiktsmessig å beskrive prosjektet som helhet siden man som leser vil få et bedre bilde av system og tankegang. Derfor vil det bli beskrevet hva som er gjort før prosjektperioden startet. Arbeidet som ble gjort på systemet tidligere har vi valgt å kalle testsystemet.

Vi har laget en skjemategning over hele systemet. Det ble først delt inn ulike delkretser ut ifra hvilke funksjoner de har. Enkelte kretser ble kjørt i en enkel simulering for å forsikre oss om at de hadde korrekt funksjonalitet. Ideelt sett skulle vi simulert alle delkretsene, men på grunn av mangel på riktige digitale modeller ble ikke dette mulig å gjennomføre. Når alle delkretsene var konstruert begynte utviklingen av kretskortet. Kretskortet ble utviklet med tanke på størrelse, vekt, pris og støy. Deretter ble testsystemet bestilt og selve prosjektperioden begynte.

Selv om en god del vurderinger og avgjørelser ble tatt allerede da vi lagde testsystemet, har vi gått grundig gjennom hele systemet på nytt og tatt flere nye avgjørelser i selve prosjektperioden. Her har vi bestemt hvilke deler av systemet som skulle beholdes, hvilke som skulle endres og hvilke som skulle forkastes.

2 Teori

2.1 Batteristyringssystem

Et batteristyringssystem er en viktig del av alle innretninger som bruker oppladbare batteri med mer enn en celle. Batteristyringssystemet sin oppgave er å balansere cellene i batteriet, slik at de har likt spenningsnivå hele tiden. Dette er for å bedre batteriets levetid. Det er veldig usunt for et batteri å ha celler med ulike spenningsnivåer. Ulike spenningsnivåer kan oppstå ved både utladning og oppladning av batteriet. De fleste battericeller har også et foretrukket spenningsnivå mellom 3 og 4V. Et batteristyringssystem skal også sørge for at battericellene ligger innenfor sitt designerte spenningsområde. I tillegg kan det overvåke andre element som strøm og temperatur.^[21]

2.2 Systemets oppbygging

2.2.1 Integreert krets

Vi valgte å bruke en integrert krets til å overvåke batteriet og andre parametre. Det er mulig å bruke transistorer som kobles sammen til ulike logiske porter for å lage et slikt system. Deretter kan man legge til en ADC som måler spenningen over cellene. Dette er en veldig tungvint metode som tar mye plass og tar lang tid. Vi valgte derfor bort denne metoden.

Den integrerte kretsen vi benytter i vårt system er den anerkjente kretsen utviklet av Analog Devices. I systemet er det denne komponenten som styrer balanseringen av battericellene. I tillegg overvåker den spenningen som ligger over GPIO-pinnene til kretsen. Denne spenningen representerer temperatur og strøm. Den integrerte kretsen har et omfattende datablad som vi har brukt til å innhente mesteparten av informasjonen til prosjektet.

2.2.2 Balanseringskrets

Balanseringskretsen skal kobles til alle cellene i batteriet og vil sørge for utladning av celler dersom det blir oppdaget for høy eller for lav spenningsverdi på en eller flere av cellene. Dette blir gjort ved at cellene som har for høy verdi lades ut over en motstand ved hjelp av P-kanal MOSFET. Disse MOSFET-ene drives ved hjelp av 12 spesifikke pinner fra LTC6811 som kobles til gate på hver MOSFET. Dersom en celle skal lades ut drives spenningen på gate lav som fører til at cellen leder strøm gjennom en motstand. Dermed lades cellen ut og får lavere spenning.

For å kunne vite om en celle skal lades ut må LTC6811 kobles til hver enkelt celle slik at den kan gjennomføre målinger av de. Dette gjøres ved at den positive polen på hver celle tilkobles egne celleinnganger på LTC6811 via lavpassfiltre.

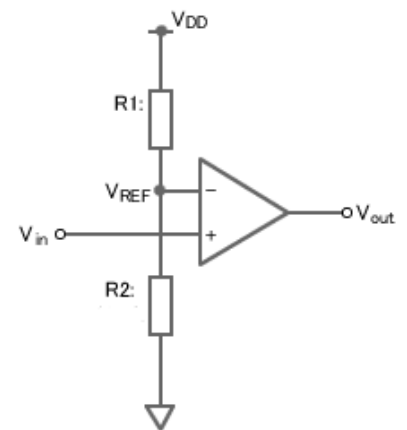
2.2.3 Strømstyringskrets

Strømstyringskretsen som leder strømmen fra batteriet og ut til bilen har to oppgaver. Den skal kunne brytes dersom en eller flere av de ulike grenseverdiene er nådd. I tillegg skal den kunne måle strømmen som går ut av batteriet. For å oppnå den første oppgaven til dette delsystemet blir det brukt releer.

Et relè er bygd opp av to kretser, hvor den ene består av en spole og den andre består av en bryter. Bryteren inne i relèet kan åpnes og lukkes ved at spolen får en viss spenning på inngangen. Denne spenningen driver spolen som lades opp og skaper et magnetisk felt, som tiltrekker seg bryteren til kretsen^[2]. Releer finnes i to ulike typer, normalt åpen relè og normalt lukket relè. Forskjellen på disse er om spenningen på inngangen til spolen slår kretsen av eller på. Et normalt åpent relè fungerer som en åpen krets så lenge spenningen på inngangen til spolen er lav. Dersom spenningen blir høy lukkes kretsen. Et normalt lukket relè fungerer på motsatt måte og har dermed en lukket krets når spenningen på inngangen til spolen er lav. I vårt system skal releene føre opp til 40A. Det er viktig at komponentene tåler denne strømmen, siden de største releene vi fant kun tåler 15A måtte vi bruke tre relè i parallell.

For vårt bruk vil vi bruke et normalt åpent relè. Dette fordi vi ønsker at batteristyringssystemet skal gjennomføre en kontroll på batteriet og temperaturen før kretsen slås på. Dermed vil kretsen være lukket selv om mikrokontrolleren ikke slår seg på når batteriet kobles på. For å drive releene bruker vi en OPAMP i en komparator krets. Denne komparatorkretsen drives av 5V og benytter 3.3V fra mikrokontrolleren som referansespenning.

En komparator fungerer ved at den sammenligner spenningen på positiv inngang, altså V_{in} , med spenningen på negativ inngang, V_{ref} . I vår krets bruker vi FLAG som V_{in} . FLAG er en digital utgang fra mikrokontrolleren på 3.3V og vil bli nærmere forklart i kapittel [2.2.4](#). Ved den negative inngangen til OPAMP-en skjer det en spenningsdeling som deler 3.3V mellom to like motstander. Dermed blir spenningen på negativ inngang på $\sim 1.6V$. Dersom FLAG har en lav verdi, som er 0V, vil utgangsspenningen bli negativ spenningstilførsel, altså jord.^[3] Dersom FLAG har en høy verdi, som er 3.3V, blir utgangsspenningen lik positiv spenningstilførsel som er 5V.



Figur 2.1: Komparator

Ved måling av strøm brukes en integrert krets. Denne integrerte kretsen skal sende ut en spenningsverdi som blir målt av den integrerte kretsen sin ADC.

Til slutt har vi montert et feste for en sikring. Dette er for å sikre oss mot potensielle feil ved vårt system.

2.2.4 Mikrokontroller

Vi har valgt å benytte oss av en programmerbar mikrokontroller for å styre systemet. Mikrokontrolleren vi har valgt er av typen teensy 3.2. Denne typen er en USB-basert kontroller som er kompatibel med Arduino software og bibliotek^[4]. Fordelen med å bruke teensy 3.2 er størrelsen. Denne modellen er omtrent 30x18mm stor og kan derfor integreres lett inn på kretskortet. Systemet vårt er også kompatibelt for integrering med teensy 3.6 på grunn av at både 3.2 og 3.6 er 18 mm bred.



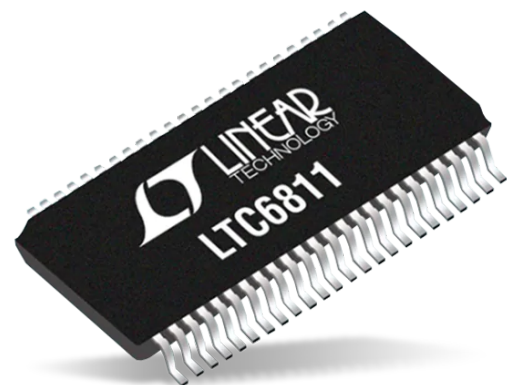
Figur 2.2: Teensy 3.2

Teensy 3.2 har totalt 34 inn- og utganger, hvorav 24 pinner lett kan bli integrert i vårt kretskort. Den støtter også SPI kommunikasjon som er den foretrukne kommunikasjonsmetoden til vårt system. Batteristyringssystemet benytter seg av syv pinner på teensy 3.2. Fire av de blir benyttet til kommunikasjon via SPI. I tillegg bruker vi en digital pinne vi har valgt å kalle FLAG. Denne skal styre releene og dermed bryte kretsen om nødvendig. Av de to siste pinnene er det en 5V forsyning inn til mikrokontrolleren og den andre blir brukt til 3.3V referansespenning til OPAMP-en. Teensy 3.2 er også den foretrukne mikrokontrolleren til oppdragsgiver. Dette gjør det lettere for andre i DNV Fuel Fighter å jobbe videre med vårt system når vi bruker samme mikrokontroller som resten av systemene i bilen.

2.3 Beskrivelse av deler

2.3.1 LTC6811-2

Valg av hovedenhet falt på LTC6811-2 som blir produsert av det amerikanske firmaet Analog Devices. Denne integrerte kretsen er bygd for å overvåke opp til tolv battericeller som er koblet i serie, eller flere om man kobler flere av samme krets i serie. Under overvåking kan kretsen utføre balansering av cellene i batteriet, som vil si å lade ut celler som har for høy spenning over seg.



Figur 2.3: LTC6811-2

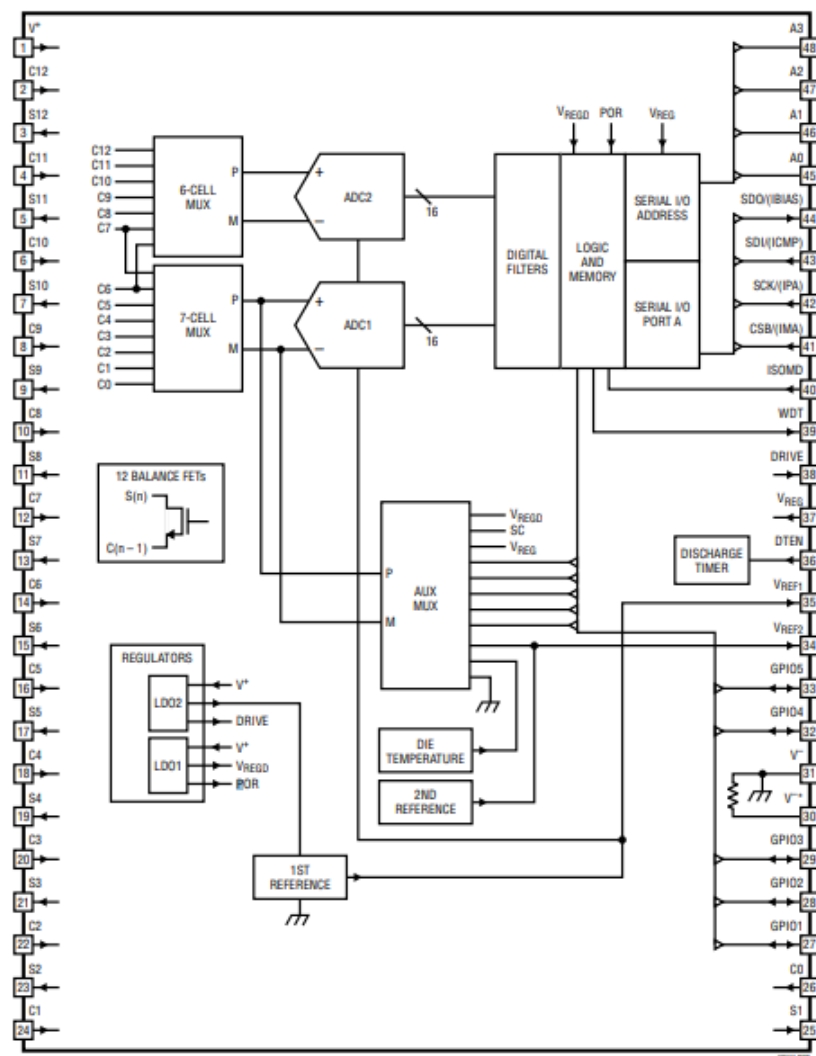
Grunnen til at vi valgte nettopp denne komponenten er flerdelt. For det første er den som nevnt anerkjent og kan gjennomføre nøyaktig målinger av cellene i et batteri. For det andre er den en oppgradert versjon av forgjengeren LTC6804. Databladet beskriver nærmere forskjeller mellom LTC6811 og LTC6804^[5]. I tillegg har den også god dokumentasjon og informasjon å ta utgangspunkt i når man skal lage et system rundt denne komponenten. Analog Devices er kjent for gode datablad og det finnes mye informasjon om komponentene deres på internett. LTC6811 kommer i to versjoner, nemlig 6811-1 og 6811-2. Førstnevnte er

daisy-chainable, det vil si at man ikke trenger å adressere den direkte, men man kan bruke en daisy-chain. Dette er vanlig om man skal balansere flere enn 12 celler og man trenger flere LTC6811. Siden vi bruker kun en integrert krets ble 6811-2 det mest logiske valget. Denne er nemlig adresserbar^[6].

LTC6811-2 har muligheten til å måle spenningen over 12 battericeller og fem analoge spenningsverdier som den får inn på GPIO1-GPIO5. På GPIO1-GPIO5 kan man bruke temperaturmålere og strømmålere. Man kan også bruke de til å kontrollere andre komponenter ved hjelp av SPI eller I2C kommunikasjon.

For å utføre disse målingene er LTC6811-2 utstyrt med to ADC. Disse er av typen sigma-delta, som er den mest nøyaktige typen ADC når det kommer til DC-verdier. Hastigheten man ønsker å måle verdier på kan styres ved hjelp av kode og nøyaktigheten på målingene blir lavere i samsvar med hvor raskt man utfører de. I blokkdiagrammet til LTC6811-2 brukes navnet ADC1 og ADC2. ADC1 brukes til å måle spenningen over celle nummer 1 til og med celle nummer 6. ADC2 brukes til å måle celle nummer 7 til og med nummer 12. I tillegg blir ADC1 brukt til måling av GPIO1-GPIO5 og målinger av interne verdier inne i den integrerte kretsen. Disse interne verdiene er indre temperatur og verdi på den digitale og analoge spenningen. Den skal normalt ligge på 3.3V og 5V. Når en konvertering er ferdig blir de digitale verdiene lagret i ulike register.

For å lese av de digitale verdiene og kontrollere start av ulike målinger og andre funksjoner har LTC6811-2 mulighet til å kommunisere med en ekstern mikrokontroller ved hjelp av SPI-kommunikasjon. Her blir LTC6811-2 slave og mikrokontrolleren blir master.



Figur 2.4: LTC6811-2 blokkdiagram.

LTC6811 har flere ulike tilstander den kan befinne seg i avhengig av hvilke kommandoer den har fått av mikrokontrolleren. Dette beskrives i et tilstandsdiagram i databladet. I vårt prosjekt vil den hovedsakelig befinne seg i det som kalles standby- og measure mode. Dersom man venter for lenge mellom hver kommando vil LTC6811 gå i sleep mode. Dette vil ikke forekomme i vårt system ettersom kommandoene kommer i en loop med under 50 ms intervall.

Databladet beskriver hvordan bruken av den raskeste modusen for ADC fører til økt støy på de seks minst signifikante bit-ene. Den raskeste modusen reduserer den digitale filtreringen og på bakgrunn av dette kan målefeil komme opp i 4mV. Dette er små verdier for oss og er verdt den raske hastigheten vi får ved bruk av denne modusen. En feil på 4mV tilsier en feilmåling på strømmåleren på 0.2A. Fordelen med å bruke en rask ADC er at man lettere kan fange opp feil i batteriet eller bilen ettersom man får gjennomført flere målinger per sekund.

2.3.2 Strømmåler

I kretsen blir strømmåleren ACS758xCB brukt. Dette er en Hall Effect-basert strømmåler som kommer i en integrert krets. Hall Effect går ut på at man måler magnetfeltet som blir dannet rundt et ledende materiale når det leder strøm. Magnetfeltet blir sterkere ved økning av strømmen som blir ledet gjennom materialet. Sensoren leder spenning gjennom en tynn metallstripe. Dette skaper en forskjell i elektrisk potensial mellom sidene av metallstripa. Denne spenningsforskjellen er proporsjonal med styrken på det magnetiske feltet over komponenten. Dette magnetfeltet kan måles av en sensor som leverer en spenning ut i fra hvor sterkt dette magnetfeltet er^[7].

Basert på hvor mye strøm man ønsker å måle og hvilken retning strømmen vil gå, må man velge hvilken modell av denne komponenten man ønsker. Den som blir brukt i dette prosjektet kan måle strøm opp til 100A og strømmen kan måles i begge retninger. Derav er den såkalt bidireksjonal. Oppløsningen på utgangsspenningen er på 20mV/A. Dersom strømmen er på 0A vil utgangsspenningen være 2.5V. Den øker når strømmen går i positiv retning og synker når strømmen går i negativ retning^[8].

Den indre motstanden som strømmen skal gå gjennom er så lav som 0.1mΩ. Dette fører til at effekttapet over komponenten er veldig lavt.

2.3.3 Omformer

Flere av delene på batteristyringssystemet benytter seg av en forsyningsspenning på 5V. På grunn av ingen tilgjengelige 5V kilder, må batteristyringssystemet sørge for egen 5V forsyning. I kretsen brukes omformeren RS3-4805S/H3. Omformeren vi valgte for å konvertere ~48V til 5V er en buck-omformer fra RECOM og er fra RS3 serien. Den måtte vi stille høye krav til på grunn av eventuelle økninger i spenningen. Vi kan lese ut fra databladet^[9] at denne omformeren vil klare å gjøre om spenninger fra 72 volt til 36 volt om til 5V. Etter testing fant vi ut at omformeren kan levere 5V med en forsyningsspenning helt nede i 27V. Dette dekker eventuelle endringer i driftsspenning med god margin. Den kan levere en strøm på opp til 600mA. Dette er nok til å drive både mikrokontroller, releene og diverse andre delsystem som krever 5V.

2.3.4 Relè

Typen relè som ble valgt er G5CA-1A-E. Dette er et normalt åpent relè med en strømgrense på 15A^[10]. Når spolen skal lades opp slik at den slutter kretsen kreves det en spenning på 5V og en strøm på 40mA. Releene blir, som tidligere nevnt, styrt av FLAG fra mikrokontrolleren. Dette relèet kommer i en pakke som gjør den lett å bruke på et kretskort, ved at den er liten og har pinner som kan loddes på.

2.3.5 Temperatursensor og andre komponenter

Temperatursensorene er en enkel type sensor som bryter kretsen ved for høy temperatur. Regelsettet til SEM sier at systemet skal kutte ved temperaturer over 60°C. For å spare både tid og penger valgte vi en enkel løsning. Vi tok temperatursensorer som oppdragsgiver allerede hadde på lager og koblet dem til GPIO-pinnene og 5V. Dette gir oss muligheten til å styre kretsen ut i fra om GPIO-pinnene mottar spenning eller ikke. I tillegg vil temperatursensorene være fleksible og mulig å legge hvor som helst i batteripakka, delvis uavhengig av hvor i batteripakka kortet er. Det vil også være enkelt å bytte temperatursensorer både på verksted og i felt.

Vi har brukt ulike mindre komponenter som motstander, kondensatorer og lysdioder. Begrunnelsene for hvorfor vi har valgt de enkelte av disse komponentene er ganske trivielle, derfor vil omtalen av disse skje på generelt grunnlag.

Verdiene til disse komponentene har vi bestemt enten ved hjelp av datablad til de ulike hovedkomponentene, ved hjelp av simulering eller ved bruk av tidligere tilegnet kunnskap. Typen materiale vi ønsket å bruke på de forskjellige kondensatorene var i hovedsak keramikk. Keramiske kondensatorer er det som blir anbefalt i de aller fleste tilfeller, i tillegg til at de skjermer godt mot støy og har gode termiske egenskaper^[16]. For motstandene ble ulike typer film-resistorer brukt. Disse har mange av de samme gode egenskaper som keramiske kondensatorer, både med tanke på støy og varme^[17]. Størrelsen på motstandene og kondensatorene prøvde vi å holde til minimum 0603. Aller helst ønsket vi 0805 på grunn av montering og varmetransport. I enkelte tilfeller lot dette seg ikke gjøre fordi vi enten hadde plassmangel eller utvalget på komponenter fra digikey ikke tillot dette. Vi har også brukt standard grønne lysdioder for å indikere balansering på hver enkelt celle. I tillegg har vi en rød lysdiode for å indikere når kretsen fra batteriet og ut til bilen er lukket.

2.4 Kode

2.4.1 SPI-kommunikasjon

SPI er en digital, synkron, toveis kommunikasjonslinje. Denne kommunikasjonslinjen går mellom to enheter, hvor den ene kalles master og den andre slave. I en kommunikasjonsbuss kan man ha mer enn en slave, men kun en master. Master kontrollerer slave ved å sende over kommandoer. Ved SPI brukes fire ledninger, CLK er klokken som sørger for at slave og master er synkrone. MOSI er en forkortelse for "Master out slave in" og dette er ledningen som sender data fra master til slave. MISO er en forkortelse for "Master in slave out" og her sendes data fra slave til master. Siste ledningen er ChipSelect eller CS, som styrer når slaven skal lese data fra MOSI. Ved bruk av flere slaver, må man ha flere ledninger som er CS.

Måten ulike enheter ønsker å motta data varierer. Dette inkluderer polariteten og fasen på klokka, hva som skal komme først av minst- eller mest signifikante bit og hvilken frekvens klokka skal ha.^[26]

SPI med arduino

Arduino kommer med et innebygd bibliotek for SPI. Bruker man teensy 3.2 og kaller på en funksjon for å starte en dataoverføring blir pin 13 satt til CLK, 12 til MISO, 11 til MOSI og i vår kode er 10 satt som CS. Ved bruk av biblioteket for SPI kan man stille inn frekvensen på klokka ved å bruke funksjonen `SPI.setClockDivider`. Man kan og endre hvordan data skal bli oppfattet med funksjonen `SPI.setDataMode`, i tillegg til hvordan rekkefølge dataen skal overføres ved hjelp av funksjonen `SPI.setBitOrder`. Overføring av data skjer ved bruk av funksjonen `SPI.transfer` og her sendes det over en byte med data. Skal man sende over eller motta en verdi som er større enn en byte må denne funksjonen repeteres flere ganger.^[25]

Innstillinger for SPI med LTC6811

Ved bruk av SPI med LTC6811 må klokkefrekvensen være satt til maks 1 MHz i følge databladet. Polariteten på klokka og fasen skal være satt til høy. Dermed må man skrive at klokka til teensy skal deles på 16 "`SPI_CLOCK_DIV_16`" og at modusen for SPI skal være `SPI_MODE3`. Dataoverføringen skal skje med den mest signifikante bit først, "`MSBFIRST`" og chip-select skal gå i fra høy til lav ved overføring av data.^[6]

2.4.2 Kodens utvikling

Koden ble påbegynt umiddelbart ved offisiell prosjektstart. Gjennom hele prosjektperioden har koden blitt forbedret og endret. Dette har vært nødvendig som følge av korrigeringer av feil som ble avdekket og optimalisering av både kodestandard og ulike verdier. I tillegg har det blitt laget flere ulike koder med begrenset funksjonalitet for å teste hver funksjon i koden. Etersom koden var mer kompleks enn antatt, startet arbeidet med innhenting av informasjon. Her ble mye av informasjonen hentet fra databladet til LTC6811 og noe fra nett. I tillegg ble det samarbeidet tett med oppdragsgiver for å etablere kodestandarder. Oppdragsgiver hadde også egen software-ansvarlig som kom med råd om hvordan koden kunne optimaliseres.

Det finnes allerede ferdige bibliotek med funksjoner som er utviklet av Analog Devices. Vi valgte å ikke bruke disse og heller lage et eget bibliotek selv. Vi brukte heller aldri de ferdiglagede funksjonene i bibliotekene som mal for noen av våre egne funksjoner. Årsaken til dette var todelt. Den ene grunnen er at en egenlaget kode vil gi mer kontroll og forståelse for hvordan det fungerer. Dette gjør at vi lettere kan kontrollere om ting fungerer og om vi kan gjøre endringer for å forbedre systemet. Den andre grunnen er at vi vil få en mye større læringsprosess om vi skriver koden selv. Det vil gi et mye større innblikk i hvordan digital dataoverføring fungerer og hvordan man skriver en større kode fra bunnen av. Dette passer bra med tanke på et av målene til oppdragsgiver, som er at organisasjonen som helhet skal øke sin kunnskapsbase.

Det ble i starten benyttet pekere som en metode for å flytte en array mellom ulike funksjoner. Denne metoden viste seg å være meget ustabil og medførte ofte feil verdier. Dermed ble det

besluttet at hver array til bruk i flere funksjoner skulle være globale. Med bruk av denne metoden blir hver array oppdatert når en funksjon kjører. Dette var en mye mer krevende prosess med tanke på lagringskapasitet, og kun noen få arrayer ble gjort globale. Denne metoden ga veldig stabile og feilfrie resultater.

2.4.3 Kodens oppbygging

Koden er satt sammen av flere funksjoner med ulike oppgaver. Dette gjør at testing av hver enkelt oppgave blir lettere og koden ser mer ryddig ut. Dermed blir feilsøking og retting av feil lettere. Det gjør også forbedring av koden for senere grupper i DNV Fuel Fighter lettere ettersom man kan kjapt endre på funksjonene i koden. LTC6811 forventer å få en kommando i form av to bytes. Deretter skal det komme to bytes med det som kalles PEC, som blir forklart nærmere under. Koden for hver kommando kan leses i databladet til LTC6811 på side 60. ^[28]

Packet error code

Packet error code (PEC) er en verdi på to byte. Denne verdien blir brukt for å kontrollere at overføringen av data mellom mikrokontrolleren og LTC6811 blir feilfri. For hver datapakke LTC6811 mottar eller sender, regner den ut en PEC på to bytes. Ved overføring av data fra mikrokontroller til LTC6811 må dataoverføring etterfølges av to bytes med PEC. Dersom feil PEC blir overført vil LTC6811 ikke gjennomføre kommandoen eller lagre verdiene som blir overført. Databladet inneholder en eksempelkode man kan bruke for å regne ut PEC, som vi modifiserte og implementerte i vår egen kode. Prosessen for utregning av PEC i vår kode blir gjort i to funksjoner. Den første funksjonen er den modifiserte eksempelkode fra databladet som tar inn datapakken. Datapakken er satt sammen av to eller seks bytes og et tall som sier hvor mange bytes som pakken inneholder. Denne funksjonen returnerer en verdi som består av 16 bit. Denne verdien blir tatt inn i en ny funksjon som deler verdien i to, hvor man ender opp med to byte med PEC. ^[27]

Funksjoner som starter en ADC

De funksjonene som starter en ADC regner ut verdien på to bytes ved å skifte modusen for ADC-hastighet inn i en kommando-kode som databladet til LTC6811 oppgir. Deretter skal PEC regnes ut i fra disse verdiene. Når utregningen av PEC er ferdig skal to bytes med kommandoen sendes over SPI etterfulgt av to bytes med PEC. Til slutt skal man legge inn en pause slik at konverteringen blir ferdig. Denne pausen varierer på hvor rask metode man valgte.

Funksjoner for avlesning av register

Ved avlesning av register for lagring må det sendes over en kommando i form av to bytes etterfulgt av PEC, hvor man etterspør et register man ønsker å lese fra. Deretter sender man over seks tomme bytes med data. Når dette blir sendt over sendes det seks bytes med data fra registeret i fra LTC6811. Dette blir lagret i mikrokontrolleren og senere blir to og to bytes slått sammen til en 16 bit verdi. Grunnen til dette er at verdien til en spenningsverdi ligger i to bytes. Når de er slått sammen til en 16 bit verdi vil denne verdien tilsvare spenningen målt i volt gange med 10000. Dette vil si at den nominelle spenningen på en celle i et lipo-batteri som er 3.8V, tilsvarer 38000.

Funksjoner for kontrollere verdier

For å kunne kontrollere at ingen av verdiene som er lest av fra batteristyringsystemet er utenfor grensene som er bestemt, brukes to funksjoner. Disse tar inn verdiene på spenningen på hver battericelle, hvor mye strøm som trekkes og en eller null avhengig av om temperaturkretsen er brutt. På bakgrunn av disse verdiene skal funksjonene bestemme om releene skal åpnes eller forbli lukket.

Funksjoner for balansering av celler

Ved å skrive til konfigurasjonsregisteret kan man kontrollere utladningen for hver celle. Skrivning til dette registeret gjøres ved at det sendes over to bytes med kommandokode for å skrive, etterfulgt av PEC. Når dette er gjort kan man overføre seks bytes med data, etterfulgt av PEC. Dataene som overføres kan inneholde beskjed om å lade ut en eller flere av de 12 cellene som er koblet til. For å finne ut hvilke celler som skal lades ut bruker funksjonen følgende metode. Først tar den inn alle verdiene på cellene. Når dette er gjort sammenligner den alle med hverandre for å finne den minste verdien. Deretter blir alle cellene sammenlignet med den minste og blir satt til å lades ut dersom den har høyere spenning enn 20mV. Denne verdien kan endres i koden dersom den ikke fungerer optimalt.

Selvtesting

Hver gang vårt system starter opp vil den gjennomgå en prosess med selvtesting på de digitale filtre og lagring som brukes under ADC. Dette blir gjort ved å sende over kommandokode for å starte en selvtest etterfulgt av PEC. Når man starter en selvtest vil utgangen fra ADC bli koblet fra det digitale filteret og det blir i stedet kloknet inn en fast verdi inn i filteret og deretter i registeret for lagring. Deretter kan man lese av disse verdiene fra enten registrene for cellespenning eller GPIO. Verdiene som blir lest av blir deretter sammenlignet med en verdi som avhenger av hvilken modus for adc man bruker og hvilken av to tester som blir gjort. Disse verdiene blir oppgitt i databladet og denne funksjonen kan kjøre tester for 27 kHz, 7 kHz, 422 Hz og 26 Hz. Om en test ikke går som forventet stopper koden og venter på restart.

2.5 Utvikling av kretskort

Ved utviklingen av kretskortet er det lagt vekt på størrelse, vekt, støy og pris. I tillegg er det tatt hensyn til montering av kortet, at det blir gjort med minst mulig risiko. Dette for å unngå at komponenter blir ødelagt ved eksponering av for høy varme, og kortslutning mellom komponenter. Valg av utformingen av kretskortet og plassering av komponenter ble gjort basert på kunnskap hentet fra ulike datablad og gjennom studiet.

Størrelsen på kortet var en viktig faktor under utviklingen siden kortet skulle plasseres inne i batteripakka. I tillegg vil et mindre kort være billigere i produksjon. Derfor lagde vi kortet vårt omtrent 10x10 cm stort. Dette ga oss muligheten til å lage banene i kortet så bred som vi ville, i tillegg til å gjøre det enkelt med tanke på lodding og montering.

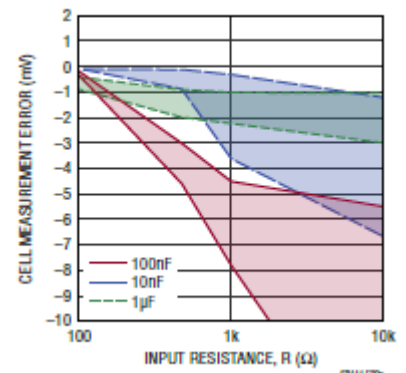
Plasseringen av visse komponenter har vært vesentlig når det kommer til både varmeutvikling og støyskjerming. Derfor er kretskortet delt inn i deler hvor komponenter som

skal lede høy strøm er plassert helt til høyre på kretskortet. Dette for å skape avstand til balanseringskretsen, den integrerte kretsen og mikrokontrolleren.

2.5.1 Støy

Støy er et ganske komplisert tema. Likevel er det enkle tiltak man kan gjøre for å styrke EMC og beskytte mot EMI. De ulike databladene viser også til filtreringsmetoder for støyreduisering.

For å sikre inngangene for måling av spenning på battericellene og strømmåleren for støy brukes det lavpassfilter. Disse består av en kondensator som er i parallell med inngangen og en motstand i serie. I databladet til LTC6811 beskrives to metoder å koble kondensatoren på^[23]. Den ene måten kalles differensial kondensatorfilter, som går ut på at kondensatoren kobles mellom pluss og minus på hver celle. Den andre metoden kalles jorda kondensatorfilter, hvor man kobler kondensatoren til jord. Denne metoden bruker også en zenerdiode i parallell med hver battericelle. Databladet anbefaler bruk av jordede kondensatorfilter om man forventer mye støy, men påpeker at dette er den mest kostbare metoden, ettersom man må kjøpe zenerdioder i tillegg. Vi valgte å bruke den første metoden og kunne endre til jordede kondensatorer om konverteringene av cellespenningen fikk mye feil. Verdien på motstanden og kondensatoren man bør bruke blir forklart med en graf. Grafen viser at bruk av høyere motstand enn 100Ω fører til ekstra feilmålinger. Kapasitansen skal være 10nF ved bruk av differensial kondensatorfilter i følge databladet.



Figur 2.5: Cellemålingsfeil

For å øke EMC til omformeren brukes et lavpassfilter som blir beskrevet i databladet^[22]. Lavpassfilteret består av en spole i serie og en kondensator i parallell med inngangen til omformeren, verdiene på disse komponentene er også oppgitt i databladet. Filteret er plassert så nærme selve omformeren som mulig.

For å holde induktansen lav og kontrollere støy er som oftest korte og tykke baner den beste løsningen^[11]. I vårt system har alle baner som leder 5V eller mer en tykkelse på minst 0.5mm. Disse banene er også så korte som mulig, selv om det har vært utfordrende ettersom 5V kilden ligger langt unna enkelte komponenter. En annen metode vi har brukt for å redusere impedansen er å begrense bruken av via på kortet ettersom et stort antall via kan føre til økt impedans.

Vi har benyttet oss av et separert jordplan som er nesten helt uavbrutt. Dette fører til at alle komponentene på kortet får en rask vei til jord som reduserer potensiell støy^[12].

2.5.2 Varmeutvikling

Plasseringen av visse komponenter har vært vesentlig når det kommer til både varmeutvikling og støyskjerming. Derfor er kretskortet delt inn i deler hvor komponenter som

skal lede høy strøm er plassert helt til høyre på kretskortet siden høy strøm er forbundet med høy varme. Dette gjøres for å skape avstand til balanseringskretsen, den integrerte kretsen og mikrokontrolleren. I tillegg vil det kunne skje varmeutvikling i releene. Derfor er disse komponentene plassert fra hverandre i henhold til minstekravet i databladet^[13]. Det vil også skje varmeutvikling i utladningsmotstandene og dermed hele balanseringskretsen. Måten vi har adressert dette på er ved å plassere komponentene i balanseringskretsen med god avstand fra hverandre.

2.5.3 Kortets oppbygging

Et mindre synlig designvalg vi gjorde var å velge et 4 lags 2oz kretskort. Oz, eller "ounce", refererer til tykkelsen på kobberlagene til kortet. Dette påvirker størrelsen i minimal grad, derfor gikk vi for den løsningen som var mest praktisk og kostnadseffektiv. Oz er et mål på vekt, det vil si at til mer oz man har, jo tyngre blir kortet. Selv om vekt også er viktig å få så lav som mulig er det relativt minimal forskjell mellom 1 og 2 oz. Grunnen til at vi valgte 2oz er at til mer kobber, altså oz, man har per lag, desto mer strøm kan man lede i det laget^[14]. Det øverste laget er brukt til plassering av de fleste komponenter. Dette for å kunne ha god oversikt over alle komponenter under testing og i tillegg holde kortet så lite som mulig i vertikal retning. I dette laget går også majoriteten av spenningen i kortet. Derfor er disse banene gjort i underkant av 0.5 mm tykke for å forsikre oss om at signalspenninger ikke taper seg på grunn av motstand i banene^[15].

Lag to er brukt til jordlag fordi det alltid er mest gunstig med et uavbrutt jordlag. Derfor går det ingen baner i dette laget. Jordlaget dekker hele kortet med unntak av releene. Her brukes lag to til føring av strøm. Lag tre blir kun brukt til strømføring ved releene. Bunnlaget blir brukt til enkelte baner og komponenter som ble ansett som gunstig å legge der. Dette ble i hovedsak gjort på grunn av plassmangel på topplaget.

2.5.4 Strømføring i kortet

Et teknisk krav til dette systemet er toleransen når det kommer til strøm. Det forventes at strømmen fra batteriet og ut til bilen er på omtrent 40A. Derfor er det utformet en egen del på kortet ment for å transportere denne mengden strøm. Dette i form av tykke baner på kortet for å kunne kutte strømmen om nødvendig. Dermed må både relè og banene tåle opptil 40A. Relèet vi valgte (som utdypes om i [2.3.4](#)) hadde en øvre strømgrense på 15A, dermed måtte vi ha tre slike i parallell slik at strømmen kunne fordele seg over disse tre. Banene som brukes i denne delen må også tåle like mye strøm. Om man har baner som ikke tåler strømmen som skal passere vil man få mye effektutvikling og varmen vil ødelegge kortet. Dette øker også effekttapet på kretskortet, noe vi vil unngå. Måten dette blir unngått på er ved å gjøre banene tykkere. Dette er på grunn av at strømmen vil ha mer plass til å passere og motstanden i banene synker. For vårt kort ble det gjort beregninger for hvor tykke banene måtte være. Beregningene ble gjort ved hjelp av en kalkulator på nettsiden: <https://www.7pcb.com/trace-width-calculator.php>. Tykkelsen på banene viste seg å være ganske signifikante, derfor valgte vi å legge banene gjennom alle de fire lagene.

2.5.5 Utvikling av deksel

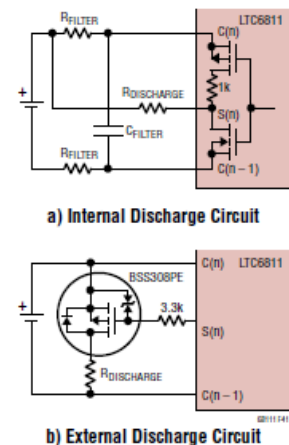
For at batteristyringssystemet ikke skal ligge løst i pakken og bli utsatt for press, kortslutninger og uheldig aktivering av mikrokontrolleren sin restartknapp, har vi laget et deksel til kretskortet. Dette dekselet er konstruert i Fusion 360, som er et dataprogram for 3D modellering.

2.6 Balanseringsmetoder

En viktig oppgave til batteristyringssystemet er balansering av celler som har for høy spenning. Dette blir gjort ved at det sendes en kommando fra mikrokontrolleren for at LTC6811 skal starte en balanseringsprosess. Det finnes noen ulike metoder for balansering, disse blir forklart her ut i fra databladet^[18].

2.6.1 Passiv balansering

Ved passiv balansering vil S-pinnen på LTC6811 koble positiv og negativ pol på den overladede cellen til en motstand. Dette skjer ved hjelp av en P-kanal MOSFET som har sin "gate" koblet til S. Det er mulig å bruke interne MOSFET-transistorer som er innebygd i LTC6811 eller eksterne MOSFET-transistorer. Denne balanseringsmetoden fører til at all energien som frigjøres under balansering blir gjort om til varme når balanseringsstrømmen går fra positiv pol til negativ pol på cellen. Dette er derfor en lite effektiv metode og anbefales ikke om man ønsker et så effektivt system som mulig. Man kan også risikere høy varmeutvikling om man bruker denne metoden med høy balaseringsstrøm. For å finne verdien på utladningsmotstanden legger databladet til LTC6811 ved to formler som kan brukes.



Figur 2.6: Utladningskrets

$$\text{Balance Current} = \frac{\%SOC_Imbalance \cdot \text{Battery Capacity}}{\text{Number of Hours to Balance}}$$
$$\text{Balance Resistor} = \frac{\text{Nominal Cell Voltage}}{\text{Balance Current}}$$

Figur 2.7: Formel for utladningsmotstander

Interne transistorer

Bruker man de interne transistorene for utladning kobler man en utladningsmotstand ved inngangen til S-pinnen. Utladningsstrømmen vil dermed gå fra positiv pol på cellen gjennom utladningsmotstanden og den interne transistoren og tilslutt til negativ pol. Som følge av at balanseringsstrømmen må gå igjennom den interne transistoren, vil for høy strøm skape for

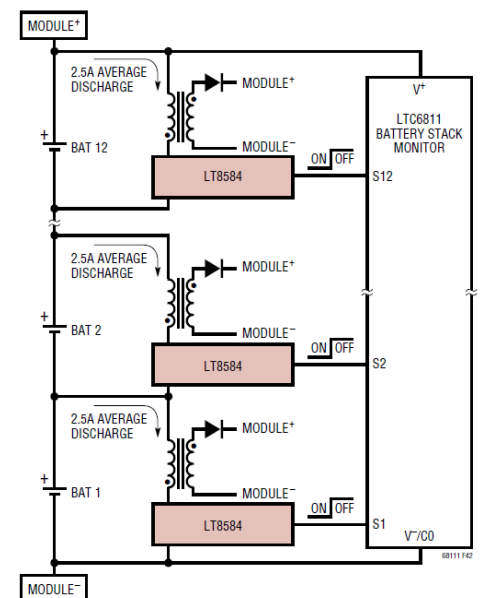
høy varmeutvikling inne i den integrerte kretsen til LTC6811. I følge databladet er det ikke anbefalt å ha høyere enn 60mA balanseringsstrøm. Det anbefales også å følge med på den interne temperaturen ved utladning. Dette gjøres ved å gjennomføre en status-ADC ved å bruke kommandoen “ADSTAT” og lese fra “Status Register Group A”.

Eksterne transistorer

Bruker man eksterne transistorer kobler man S-pinnen til gate på en P-kanal MOSFET som ligger utenfor LTC6811. Her slipper man problemet med varmeutvikling inne i den integrerte kretsen til LTC6811 ettersom balanseringsstrømmen ikke går i gjennom den integrerte kretsen. Dermed tillates det en høyere balanseringsstrøm enn ved interne transistorer. Her kan man bruke en så lav utladningsmotstand som man ønsker, så lenge transistoren og motstanden tåler den effekten som blir produsert ved utladning.

2.6.2 Aktiv balansering

Ved bruk av utladningsstrøm som er høyere enn 1A anbefaler databladet til LTC6811 en balanseringsmetode kalt aktiv balansering. Denne metoden tillater balanseringsstrøm som er mye høyere enn ved passiv balansering uten varmeutvikling. Det brukes noen ekstra komponenter ved bruk av denne metoden. Dette inkluderer en integrert krets som kalles LT8584 og en transformator. Ved balansering av en celle blir balanseringsstrømmen fordelt ut til resten av batteriet ved hjelp av transformerer, dermed vil forskjellen i spenning mellom hver celle bli jevnet ut ved at de cellene som har for høy spenning blir ladet ut og de med for lav spenning blir ladet opp. Ulempen med denne metoden er prisen og størrelsen som kretskortet får. Denne metoden krever en LT8584 og en transformator for hver celle i batteriet. Dermed øker prisen til omtrent tre ganger av hva et kort med passiv balansering koster.



Figur 2.8: Aktiv balansering

3 Metode

3.1 Utviklingsprosess

3.1.1 Planleggingsprosessen

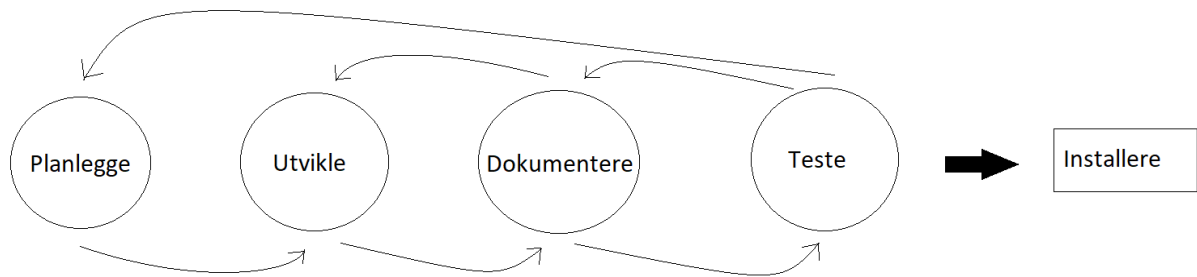
Prosjektets utviklingsprosess har i hovedsak bestått av to forskjellige faser, hvor vi har brukt ulike arbeidsmetoder. Først ble Critical Path Method (CPM) brukt. Dette er en metode for tidsplanlegging og kan lett oversettes til et Gantt diagram som vi skulle ta nytte av. Vi satte opp et AON - nettverk etter CPM metoden for å kunne beregne varigheten til aktivitetene som ble satt opp. CPM går ut på å sette aktivitetene opp i rekkefølge og deretter finne aktivitetene som er mest kritiske for fullføringen av prosjektet. Ut i fra disse aktivitetene kan man beregne tidsforbruket til prosjektet^[19]. På bakgrunn av CPM metoden konstruerte vi et Gantt diagram.

Videre i prosjektet ble det ikke lagt mye vekt på tidsrammen som ble planlagt med CPM og Gantt diagrammet. Dette på grunn av forsinkelser i leveranser som gjorde at det planlagte tidsforbruket ble kraftig oversteget. Derfor ble fokuset flyttet til å produsere en god kode og få en generell høy kvalitet på prosjektet som helhet, i stedet for å revidere tidligere planlegging. Dette var et klokt valg siden vi var kommet godt i gang med arbeidet og fremdriften gikk av seg selv, uten at vi trengte et nøyaktig diagram for å være effektive.

3.1.2 Arbeidsprosessen

Videre gjennom prosjektet samarbeidet vi tett med oppdragsgivers elektriske gruppe. Her var vi en del av en prosess kalt Scrum. Scrum er en metode for å jobbe med prosjekter både systematisk og effektivt^[20]. Siden Scrum er lite egnet med kun to medlemmer i bachelorgruppa var det naturlig at vi ble integrert i oppdragsgiver sin Scrum-prosess. Scrum fungerer ved at man lager ulike oppgaver som skal være gjennomført innen en to-ukers periode, også kalt en sprint. I tillegg blir man godt oppdatert på resten av prosjektet siden man får innsyn i de andre systemene medlemmene i Scrumgruppa jobber med. I Scrum har vi også en prosess kalt retrospective. Dette er en prosess der man ser tilbake på den tidligere sprinten, vurderer hva som gikk godt og hva som kunne vært forbedret. På denne måten kan man sørge for kontinuerlig forbedring gjennom hele prosjektfasen.

I tillegg til Scrum jobbet vi i bachelorgruppa tett sammen og hadde vår egen iterative utviklingsprosess. Her tok vi deler fra Scrum og tillot oss å jobbe litt friere, men samtidig med større hyppighet av planlegging enn ved Scrum.



Figur 3.1: Den iterative utviklingsprosessen

3.2 Kunnskapsbase

Vi startet prosjektfasen med en god del planlegging og innhenting av informasjon. Prosjektet gikk ut på å fortsette tidligere arbeid vi hadde gjort, men selv om vi hadde laget et testsystem tidligere, hadde vi fremdeles ikke så god oversikt over systemet. Derfor gikk første fasen i prosjektet ut på å undersøke og sette seg dypt inn i systemet. For å gjøre nettopp dette måtte databladet leses og studeres grundig. LTC6811 er en avansert krets og har mange funksjoner og bruksområder. Derfor tok det mye tid å forstå hva den kan gjøre og hvordan det kan bli gjort.

Noe systemet bærer preg av er originalitet. For utenom databladet er det brukt lite kilder og lignende. Derfor er systemet relativt unikt fordi det er ikke tar utgangspunkt i andre kretser i utviklingsfasen. Her er det kun innhentet informasjon gjennom studiene, i tillegg til datablad for de forskjellige komponentene som er valgt. Når det gjelder standarder har vi i samarbeid med oppdragsgiver fått vite hvilke standarder de ønsker i både kode og på kretskortet.

Vi har fått god bruk for egen kunnskap tilegnet i løpet av studiet. Dette har vært nyttig både i prosjektstyringsdelen og den tekniske utviklingsdelen. Det har krevd god teknisk forståelse for å sette seg dypt inn i databladene for å forstå hvordan de ulike delene fungerer. Her har god kunnskap om ulike komponenter og hvordan de er bygd opp kommet til god nytte. I prosjektstyringsdelen har faget prosjektledelse vært svært hjelpsomt. Vi har også dratt nytte av organisering og prosjektstyringsarbeid gjennom ulike prosjekter og gruppearbeid vi har hatt tidligere i ingeniørstudiet.

3.3 Arbeids- og rollefordeling

På grunn av koronasituasjonen har det vært naturlig for oss å fordele oppgavene siden det å jobbe sammen fysisk til tider har vært vanskelig. Her ble det gjort en fordeling basert på styrkene våre. Selv om det ble gjort en arbeidsfordeling har begge god oversikt på systemet som helhet og begge har vært delaktig i alle arbeidsoppgavene gjennom prosjektet. Enkelte arbeidsoppgaver og roller i prosjektfasen har ikke blitt definert siden vår gruppe kun består av to personer. Dette gjør planleggingen enklere og rollene mer dynamisk.

Joakim har tatt prosjektledelse som fag og er flink til å lage strukturer og dokumentasjon. Derfor var det naturlig at han fikk ansvar for prosjektplanleggingen og alt av dokumenter tilhørende prosjektet. Han har også god kjennskap til altium og har god forståelse for denne typen digitale hjelpemiddel. Derfor fikk han også ansvaret for utviklingen av kretskortet. Magnar er god på det tekniske og fikk derfor ansvar for teknisk oversikt i prosjektet. Dette innebærer god oversikt over de ulike komponentene og konstruksjon av skjemategningen for systemet. Videre ble det for arbeidsfordelingens skyld bestemt at Magnar også skulle få ansvar for koden til systemet.

Andre arbeidsoppgaver som lodding og ansvar for deler og lignende har vært fordelt likt mellom oss. Dette har fungert godt, og også vært nødvendig siden arbeidet med koden har vist seg å være mer krevende enn forventet. Det å ha en viss fleksibilitet i fordeling av arbeidsoppgavene har gitt oss en lik arbeidsbelastning som har vært en stor fordel gjennom prosjektet.

4 Resultat og diskusjon

4.1 Testing

4.1.1 Testing av testsystem

Testplan

Hensikten bak første testperiode og testing av testsystemet var å få en større forståelse for hvordan LTC6811-2 fungerte og hvordan hver enkel delkrets kunne testes og hvordan de burde fungere.

Før testingen startet ble det laget en testplan. Det skulle vise seg at denne testplanen ikke fungerte veldig bra. Testplanen var delt i to hoveddeler, hvor første del gikk ut på å finne feil som kortslutninger eller brudd i kretskortet. Disse feilene kunne komme som følge av monteringen av kortet eller feil i skjemategningen. Dette skulle bli gjort ved å måle resistansen over baner som hadde motstander i seg med et multimeter. Om verdien vi målte med multimeteret stemte med verdien på motstanden i banen kunne vi konstatere at det ikke var brudd i den banen. Det skulle også bli målt etter kortslutning med multimeter over inngangen til batterispenningen. Kortslutning kunne føre til skade på kretskortet og batteriet om det ikke ble oppdaget. Like målinger ble også gjennomført mellom inngangen til hver celle i balanseringskretsen. Om det ikke ble funnet feil i denne delen kunne man forsøke å koble i batteriet og balanseringsledningene til cellene. Dersom dette gikk bra skulle man gå videre til andre del.

Andre del av testingen gikk ut på kontrollere om systemet fungerte sammen. Her skulle man studere om det ble gjennomført balansering av cellene ved å se om diodene i balanseringskretsen lyste opp. Her skulle også koden testes sammen med resten av systemet. Dette ble gjort ved å gjennomføre konverteringer av spenningen til hver celle og lese av disse med mikrokontrolleren.

Problemer og endinger på testplanen

Et generelt problem med testplanen var at den tok for seg hele systemet. Dette førte til at når det ble funnet en feil, så var det vanskelig å kunne vite årsaken til feilen. Siden mange deler av systemet var avhengig av hverandre så kunne en feil ha mange årsaker. Konklusjonen er at testplanen var veldig god til å oppdage feil, men var veldig dårlig til å finne årsaken bak feilen. Svakheten med testplanen kan skyldes en litt for høy optimisme når det kom til funksjonaliteten til systemet og lite erfaring når det kom til testplaner. Derfor ble testplanen for revisjon 2 laget ut i fra erfaringen vi hadde med testsystemet. Begge testplanene ligger vedlagt rapporten i vedlegg [E.1](#) og [E.3](#).

Et eksempel på en feil som ble funnet, hvor det var vanskelig å finne årsaken var ved kommunikasjonen mellom mikrokontrolleren og LTC6811-2. Når en kommando for konvertering av verdiene på spenningen til hver celle ble sendt over og disse verdiene skulle leses av, fikk vi 0 volt. Denne feilen hadde flere potensielle årsaker, blant annet feil i koden, skade på LTC6811-2, koblingsfeil i cellekretsene eller andre ting.

Etter flere at feil ble funnet og årsaken ikke var mulig å finne, bestemte vi oss for å montere et nytt kretskort for testsystemet og teste enkeltkomponenter i kortet, før vi testet hele systemet. Her fant vi dermed ut at LTC6811-2 var ødelagt.

4.1.2 Testing av rev 2

Under testing av revisjon 2 ble den nye testplanen nøye fulgt. Den nye testplanen og systemet fungerte godt og derfor ble det en raskere testperiode enn ved testsystemet. Her fungerte alle testpunkt godt og vi hadde få problemer. Mer om testingen kan leses i vedlegg [E](#).

4.1.3 Testkode

For viktige funksjoner i koden ble det skrevet testkoder. Disse testkodene simulerer hver funksjon og forsikrer at hver funksjon fungerer som ønsket, selv under unormale situasjoner. En unormal situasjon kunne være at det ble lest av målinger som var mye høyere eller lavere enn det som var forventet. Under slike situasjoner kan programvaren gjøre ting som kan være alvorlig.

Algoritmen som ble brukt i testkoden gikk ut på å sende inn verdier til funksjonen som ble testet og dermed undersøke om verdiene som den leverte ut igjen stemte med forventningen. Verdiene som ble sendt inn var bestemt på forhånd og burde inneholde et bredt spekter, både av sannsynlige og usannsynlige verdier.

4.1.4 Testing i bil

Under dette prosjektet blir det ikke gjennomført en test av vårt system i bilen. Dette kommer av en del forsinkelser når det kommer til utvikling av bilen. Det vil bli gjennomført en test av bilen, men dette skjer i juli og er dermed etter innleveringsfristen av dette prosjektet. Vi har fremdeles laget en plan for hvordan vi vil gjennomføre en av vårt system i bilen.

Denne testen vil gå ut på å lagre de verdiene som blir avlest under bruk. Disse verdiene vil være spenningen på hver celle og strømmtrekket. Lagringen vil bli gjort på et SD-kort og kommer til å bruke et eget bibliotek som kan brukes i arduino for å lagre verdiene på SD-kortet.

Årsaken til at vi ønsker å lagre verdiene fra testkjøringen er at det er usikkert hvor godt systemet vårt tåler støyen som er i bilen. Dette er kun mulig å teste i bilen under kjøring. Vi er også usikre på nøyaktigheten til strømmåleren under mye støy. Denne testen vil gi oss et godt innblikk i hvor god EMC systemet vårt har.

4.2 Alternative løsninger på systemet

I selve systemet vårt gikk vi for to grunnleggende løsninger som vi tidligere har nevnt. Det er et system som benytter seg av en integrert krets og passiv balansering. Vi kunne selvsagt

valgt andre løsninger og i planleggingsfasen av prosjektet ble disse andre løsningene nøye vurdert.

Den største endring som kunne vært gjort i vårt system er å gå fra passiv til aktiv balansering. Når det gjelder aktiv og passiv balansering er det ingen tvil om at den aktive metoden er den mest energieffektive metoden når det gjelder selve balanseringen. Disse balanseringsmetodene beskrives bedre i kapittel [2.6](#).

Grunnlaget for at aktiv balansering ikke ble valgt var rent økonomisk. Prisen på et system med aktiv balansering er mye høyere prisen for et passivt system. I tillegg ville et aktivt system vært både fysisk større og en del tyngre. Det aktive systemet hadde selvsagt vært foretrukket om budsjettet hadde vært større, og vekt og størrelse på systemet var ubetydelig.

4.3 Mulige forbedringer i systemet

For videre forbedring av systemet er det en vesentlig endring som kan bli gjort for å optimalisere balanseringskretsen. Man kan velge å bytte ut utladningsmotstandene til motstander som kan få en høyere utladningsstrøm. Dette fordi man vil få en kortere balanseringstid og et mer effektivt system. I det nåværende systemet har motstandene maksimal utladningsstrøm for motstander på størrelsen 0805. Skal utladningsmotstandene byttes ut til motstander som kan takle mer effekt enn 0.5W, må også MOSFETene i blanseringskretsen byttes til en komponent som takler tilsvarende effekt. Man kan lese mer om dette i kapittel [2.6.1](#).

Siden testing i bil ikke vil skje før etter endt prosjektperiode kan kun endringer gjort på bakgrunn av testing i bil planlegges. I bilen kan det forekomme mer støy enn ved normal isolert testing av systemet. Ved et vesentlig høyere støynivå som påvirker målinger og verdier i systemet vårt kan det være hensiktsmessig å foreta små endringer for å filtrere mer støy. Disse endringene innebærer lavere ADC-mode for digital filtrering. Dette er en liten endring i koden som vil føre til lavere hastighet til ADC, men også mindre feil i verdiene som leses av.^[24] I selve kretskortet kan man endre på flere faktorer for å få et mer støyresistent system. Man kan optimalisere lavpass-filterene som vil redusere støy og man kan bruke en annen oppkobling av cellekretsene med jorda kondensatorer. I det tilfelle hvor det kan skje mye feil ved dataoverføring kan man benytte seg av et digitalt jordplan. Her har man eget jordplan som kun kobles til digital dataoverføring.^[12] Man kan også velge å pakke inn dataledninger i jord. Dette gjør man ved at man legger ekstra jordlag i det planet man har dataledninger i. Dette vil isolere og beskytte data mot støy.

Under testing av systemet har vi ikke opplevd tap av datapakker eller støy. Siden dataoverføring gikk bra både på testsystemet og i revisjon 2, har vi vurdert at vi ikke trenger verken ekstra jordlag i systemet, eller flere tiltak for støyskjerming. Dette kan som nevnt endres etter første test i bil.

4.4 Ressursbruk

Siden prosjektet har bestått av en stor fysisk del, har vi trengt en del ressurser i form av både økonomi og materialer.

Vi har disponert flere forskjellige rom, både via oppdragsgiver og via andre instanser. Oppdragsgiver har hatt et kontor som har blitt aktivt brukt når vi har hatt fysisk samarbeid med teamleder. Til montering og testing av kortet har vi hatt behov for et større verksted med loddeutstyr, strømforsyninger og diverse annet utstyr. Her har vi fått disponert verkstedet til linjeforeningen Elektra.

Økonomisk sett har vi hatt et samlet budsjett på rundt 3500 kr. Dette har gått til bestilling av deler fra digikey.com og printing av kretskort fra pcbway.com. Disse bestillingene ble gjort av oppdragsgiver.

Til programvare brukte vi flere forskjellige program til ulike typer bruk. Til utviklingen av kretskort og skjematikk brukte vi Altium Designer. Dette programmet er lisensbasert og alle studenter ved NTNU kan få gratis lisens. Til programmering ble det brukt både Arduino IDE og Visual Studio. I tillegg ble thinkercad brukt til enkel testing av kode. Disse programvarene er gratis og lett tilgjengelige på nett. Vi har også brukt Fusion360 for å lage enkelte 3D modeller av komponenter på kortet vårt i tillegg til dekslet til systemet.

4.5 Ingeniørfaglige resultater

4.5.1 Mål med produktet

Det ferdige produktet har flere målsettinger. Produktet og prosjektet som sådan har mål knyttet til både selve funksjonene i produktet, og andre konkrete mål knyttet til oppdragsgivers organisasjon som helhet. Målene er nummerert fra 1-6 og blir omtalt i dette kapittelet, og det vil diskuteres om disse ble nådd. Det vil bli gitt en statuskarakter for hvert enkelt mål som beskriver i hvilken grad det innfris. Statuskarakterene varierer fra 1-10.

1. *Et fungerende batteristyringssystem som balanserer celler*

Noe av det mest åpenbare målet er selve essensen i systemet. Systemet skal kunne balansere celler i et batteri. Systemet har vist under testing at det er i stand til å balansere alle 12 cellene i bilbatteriet. Hvor effektivt den gjør dette kan videre diskuteres. Per i dag er ikke systemet utstyrt med de komponentene som gir best utladningsstrøm og dermed mest effektiv balansering. Dette har vi derfor beskrevet godt i rapporten og er en enkel men effektiv forbedring av systemet som oppdragsgiver kan foreta om ønskelig. I all hovedsak er balanseringssystemet som ligger til grunn for denne rapporten funksjonelt, men uten optimal effekt.

Statuskarakter: 7.

2. *Strømkutt ved ulike kriterier*

Systemet har som mål å bryte kretsen fra batteriet og ut til bilen ved ulike kriterier. Ved testing har vi klart å styre releene med kode uten problemer. Under testing av hele systemet brytes kretsen ut til bilen når en eller flere av grenseverdiene blir nådd. Dette har kun blitt testet på temperaturkretsene ettersom disse lar seg lettest kontrollere. Vi kan si med nokså høy sikkerhet at dette vil fungere på cellev verdier og strøm fordi de styres av samme logikk i koden. Det har blitt testet om kretsen brytes ved kortslutning. Testing i bil åpner for høyere strømtrekk og dermed får vi testet logikken rundt strøm i koden.

Statuskarakter: 8.

3. *Fungerende og justerbar kode*

Koden til systemet har blitt jobbet kontinuerlig på for å skape en så god kode som mulig med flere justerbare valg man lett kan foreta i koden. Koden er sammensatt og består av flere forskjellige funksjoner som styrer systemet slik vi selv vil.

Statuskarakter: 8.

4. *Enkelhet i bruk*

Ved utvikling av systemet har enkelhet i bruk vært viktig. Derfor er det få inn og utganger på kortet. Mikrokontrolleren er enkel å installere. Det trengs ingen kunnskap om hva som skal kobles hvor for å installere den på kortet siden den lett kobles til to rader med pinheadere med god markering på hvilken vei den skal settes.

Statuskarakter: 10.

5. *Økt kunnskapsnivå om systemet*

Gjennom denne rapporten, brukermanual og annen dokumentasjon over systemet har oppdragsgiver økt sin kunnskapsbase betraktelig når det gjelder batteristyringssystem. Statuskarakter: 9.

6. *Gjenbrukbarhet*

Selv om systemet er spesialdesignet til en spesifikk bil og et spesifikt regelsett, er det høyst mulig å bruke systemet om igjen. Systemet takler et relativt bredt spekter av spenning for å fungere. Om enkelte parametre i konkurransen endres, eller vesentlige ting ved bilen endres, kan det lett gjøres små endringer på vårt system for å tilpasse til parameterne. Man kan enkelt bytte ut noen av komponentene for å gjøre endringer, eller man kan endre på koden ved å bytte enkelte parametre. Om det skal gjøres større endringer har oppdragsgiver alt av skjematikk og kretskortutlegg tilgjengelig.

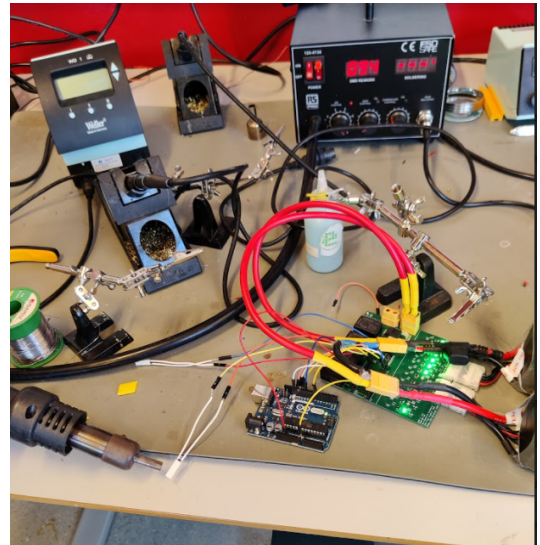
Statuskarakter: 8.

4.5.2 Test av komplett system

Under full systemtest ble noen få utvalgte egenskaper testet. Her var testingen og utviklingen av kretskortet kommet så langt at vi ikke testet de grunnleggende egenskapene slik som i testplanen i vedlegg [E.3](#).

Testingen ble utført med en komplett kode i Visual Studio og et komplett kretskort. Her ble det først testet selve balanseringen av cellene. Testingen ble gjort ved at 6 celler ble ladet opp for å få en vesentlig spenningsforskjell slik at balanseringen ble aktivert. Dette var vellykket siden koden leste celleverdier og startet utladning av de cellene med for høy spenning.

Videre ble temperatursensorene testet. Her ble sensorene montert og deretter varmet opp. Når sensorene passerte 60 grader ble kretsen brutt ved at releene åpnet seg. Etter sensorene var nedkjølte funket systemet som normalt etter restart.



Figur 4.1: Test av temperatursensor

Til slutt ble strømvernet testet. For å teste dette måtte vi kortslutte hovedstrømmen til systemet. Dette gjorde vi ved å ta en ledning fra pluss til minus på utgangen av kortet. Her fikk vi gnist, men releene brøt umiddelbart kretsen. Grunnen til at det oppsto gnist var på grunn av kodens syklus. Siden koden har en loop på ~12ms vil strømmen gå i systemet i maksimalt ~12ms ved kortslutning. Under testing ble det konkludert med at dette verken er skadelig for systemet eller batteriene. Likevel kan man si at strømvernet fungerer, men er uoptimalt. Dette kan endres i koden ved å aktivere referansespenningen før en ADC blir gjort, dermed reduseres tiden som brukes på hver ADC, dette vil bli gjort til testing i bil.

4.6 Brukermanual

Vi har utarbeidet en grunnleggende brukermanual for vårt system. Manualen omhandler hvilke endringer av kode som er aktuelle å gjøre for å korrigere eller justere funksjonalitet. Den omtaler også hvordan systemet skal bli brukt og håndtert. Brukermanualen er skrevet på engelsk etter oppdragsgivers ønske, og ligger vedlagt rapporten i vedlegg [B](#).

5 Konklusjon

5.1 Funksjonalitet og resultat av prosjekt

Sluttresultatet vårt ble et fungerende system med ønskede og riktige funksjoner. Systemet er grundig testet og vår konklusjon er at det i sin helhet fungerer sammen med koden. Vi konkluderer også med at systemet enkelt kan effektiviseres ved å bytte ut enkelte komponenter.

For å vurdere om prosjektet ble vellykket må vi se på målene for prosjektet nevnt i kapittel [1.3](#). Her vil man se de aller fleste målene som oppnådd. Oppdragsgiver har fått en system som er lett tilpasselig for ulike kriterier. De har også fått en mye større kunnskapsbase innen batteristyringssystem i denne rapporten og vedleggene. Det må også nevnes at vi i bachelorgruppe 61 har opplevd prosjektet som meget lærerikt. Dessverre fikk ikke SEM godkjent systemet vårt siden konkurransen ble avlyst, så det var umulig å finne ut som dette målet ble nådd.

Alt i alt ser vi både prosjektet og batteristyringssystemet som vellykket.

5.2 Videre arbeid

Siden DNV Fuel Fighter er en organisasjon som kontinuerlig jobber med å utvikle en best mulig versjon av de ulike systemene i bilen er det naturlig at det vil skje videre arbeid med systemet vårt. Dette delkapittelet vil omhandle hvilket videre arbeid vi anbefaler på systemet. Den mest optimale balanseringsmetoden, aktiv balansering, viser seg å være for dyr for et delsystem siden denne tar utgangspunkt i flere regulatorer og transformatorer som er svært kostbare. Derfor bør det bli tatt utgangspunkt i den passive balanseringsmetoden. Denne metoden kan forbedres med en enkel endring av kretskortet hvor transistorer og utladningsmotstander byttes ut.

Videre kan man også se på ulik optimalisering av komponenter. Her kan enkelte komponenter byttes ut for et mer optimalisert system. Dette kan for eksempel være releene. Disse kan byttes ut til bare et eller to releer. Dette er ikke gjort i nåværende revisjon på grunn av mangel på tilgjengelige komponenter. Andre komponenter som kan byttes ut må skje i takt med ny teknologi og nye og forbedrede komponenter på markedet.

Vi skal senere i år teste systemet i bil, på det nevnte arrangementet på Halså. Testing i bil vil være en del av arbeidet med systemet, men vil ikke inngå i bachelorprosjektet. Dette på grunn av forsinkelser i andre delsystem, noe som fører til at bilen ikke vil være klar for kjøring før etter prosjektperioden. Grunnet det overnevnte har vi utarbeidet et eget kapittel som omhandler testingen som vil bli utført under arrangementet på Halså. Dette er kapittel [4.1.4](#).

5.3 Planlegging

5.3.1 Tidsfrist

I følge Gantt-diagrammet som ble utarbeidet ved prosjektstart ble ikke tidsfristene overholdt. Dette er først og fremst på grunn av komponentmangel som følge av hendelser utenfor vår påvirkningsevne. I tillegg ble alle fristene satt av oppdragsgiver annullert på grunn av den pågående pandemien. Likevel har vi prøvd å følge oppbyggingen i Gantt-diagrammet så langt det har vært mulig gjennom hele prosjektperioden.

Prosjektet ble ferdig til innlevering av denne bachelorrapporten i uke 20. Det vil si at prosjektet også er innenfor siste tidsfrist for oppdragsgiver som skal teste bilen i midten av juli.

5.3.2 Budsjett

Vi har oversteget de estimerte kostnadene som lå i vårt budsjett. Dette fordi komponenter vi har kjøpt har hatt en høyere pris enn antatt. Vi har ikke brukt alle komponentene, og har derfor et restlager. Dette kan brukes av oppdragsgiver senere. Vi har også flere umonterte kretskort på grunn av en minstebestilling av kretskort på 5 stk, som er mer enn hva vi har montert.

Vi vil anslå en total kostnad på prosjektet til ~5000 kr, som gir en kostnad pr kort på kr ~1000,-. Dette viser at batteristyringssystemet er et meget rimelig delsystem i bilen.

5.3.3 Fremdrift

Fremdriften i prosjektet kan lett gjenspeiles i grafen fra timeloggen i vedlegg [E](#). Fremgangen har vært jevn og vi har hatt få hindringer i prosjektet. Det som har hindret fremgang har i hovedsak vært forsinkede leveranser av komponenter. Dette er også hovedgrunnen til at tidsplanleggingen gjennom Gantt-diagrammet ble feil tidlig i prosjektperioden.

En annen årsak til forsinkelse i fremdriften har vært koden. Mye tid har blitt brukt på å få koden funksjonell og optimal. Den har også som tidligere nevnt vært mer sammensatt enn antatt. Dette har hatt en medvirkende årsak til en forsinket fremdrift i forhold til opprinnelig plan.

Utover dette har prosjektet gått som planlagt og har generelt hatt god fremdrift gjennom hele prosjektperioden.

Referanseliste

- [1] SSB (2021). *Bilparken*. [online] SSB. Available at: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken> [Accessed 14 May 2021].
- [2] Bidragsytere til Wikimedia-prosjektene (2006). *Relé*. [online] Wikipedia.org. Available at: <https://no.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A9> [Accessed 14 May 2021].
- [3] Wikipedia Contributors (2019). *Comparator*. [online] Wikipedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Comparator> [Accessed 14 May 2021].
- [4] www.pjrc.com. (n.d.). *Teensy® 3.2*. [online] Available at: <https://www.pjrc.com/store/teensy32.html> [Accessed 14 May 2021].
- [5] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2. p. 19*. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 14 May 2021].
- [6] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2. p. 44*. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 14 May 2021].
- [7] Wikipedia Contributors (2019b). *Hall effect sensor*. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor [Accessed 14 May 2021].
- [8] Allegro microsystems (2020). *ACS758xCB*. [online] Available at: <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1602928/0/0/1/acs758lcb-050b-pff-t.html> [Accessed 14 May 2021].
- [9] Recom-power (2019). *RS3*. [online] Available at: <https://recom-power.com/pdf/Econline/RS3.pdf> [Accessed 14 May 2021].
- [10] Omron Electronics (n.d.) *G5CA*. [online] Available at: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5ca.pdf [Accessed 14 May 2021].
- [11] Cadence PCB solutions (n.d.). *Tips on PCB Design for Noise Reduction*. [online] resources.pcb.cadence.com. Available at:

<https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-tips-on-pcb-design-for-noise-reduction>

[Accessed 14 May 2021].

[12] Sattel, S. (2018). *8 PCB Grounding Rules to Live By*. [online] Eagle Blog. Available at:

<https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/8-pcb-grounding-rules/> [Accessed 14 May

2021].

[13] Omron Electronics (n.d.) G5CA. p. 4. [online] Available at:

https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5ca.pdf [Accessed 14 May 2021].

[14] www.pcbuniverse.com. (n.d.). Technical Tips for PCBs - Copper Thickness, Controlled Impedance, and more! | PCB Universe. [online] Available at:

<https://www.pcbuniverse.com/pcb-tech-tips.php?a=4> [Accessed 14 May 2021].

[15] Milne, A. (2014). *Reduce Wireless Signal Loss and Get the Most Out of Your Cable*.

[online] www.rfvenue.com. Available at:

<https://www.rfvenue.com/blog/2014/12/13/reduce-wireless-signal-loss-and-get-the-most-out-of-your-cable> [Accessed 14 May 2021].

[16] Wikipedia Contributors (2019a). *Ceramic capacitor*. [online] Wikipedia. Available at:

https://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_capacitor [Accessed 14 May 2021].

[17] www.sciencedirect.com. (n.d.). *Film Resistor - an overview* | ScienceDirect Topics.

[online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/film-resistor>

[Accessed 14 May 2021].

[18] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 71-72. [online] Available at:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 14 May 2021].

[19] Asbjørn Rolstadås, Nils Olsson, Agnar Johansen and Jan Alexander Langlo (2020).

Praktisk prosjektledelse : fra idé til gevinst. 2nd ed. Bergen: Fagbokforlaget, p.179–204.

[20] Wikipedia. (2021). *Scrum*. [online] Available at: <https://no.wikipedia.org/wiki/Scrum>

[Accessed 15 May 2021].

[21] Wikipedia. (2020). *Battery management system*. [online] Available at:

https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system. [Accessed 15 May. 2020].

[22] Recom-power (2019). RS3. p. 5 [online] Available at:

<https://recom-power.com/pdf/Econoline/RS3.pdf> [Accessed 15 May 2021].

[23] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 69-70. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 17 May 2021].

[24] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 23-24. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[25] www.arduino.cc. (2019). *Arduino - SPI*. [online] Available at: <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>.

[26] Rajewski, J. (2018). *Serial Peripheral Interface (SPI)*. [online] Alchitry. Available at: <https://alchitry.com/blogs/tutorials/serial-peripheral-interface-spi> [Accessed 19 May 2021].

[27] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 76. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[28] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 59-60. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

Figurer:

[Figur 2.1] Renesas. (n.d.). *Op-Amps, Comparator Circuit*. [online] Available at: <https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/electronic-circuits-03-op-amps-comparator-circuit> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.2] opencircuit.shop. (n.d.). *TEENSY 3.2*. [online] Available at: <https://opencircuit.shop/Product/Teensy-3.2> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.3] no.mouser.com. (n.d.). *Analog Devices Inc. LTC6811 12-Channel Multi-Cell Battery Monitor*. [online] Available at: <https://no.mouser.com/new/analog-devices/adi-ltc6811-battery-monitor/> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.4] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 17. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.5] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 70. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.6] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 71. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.7] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 72. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

[Figur 2.8] Analog Devices (C 2019). *LTC6811-1/LC6811-2*. p. 72. [online] Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf> [Accessed 19 May 2021].

Vedlegg

Vedlegg A: Populærvitenskapelig artikkel

Vedlegg B: Brukermanual

Vedlegg C: Revisjonsbeskrivelse

Vedlegg D: SEM regler for batteristyringssystem

Vedlegg E: Testlogg og testplan

E.1: Testplan for testsystem

E.2: Testlogg for testsystem

E.3: Testplan for revisjon 2

E.4: Testrapport for revisjon 2

Vedlegg F: Timeliste

Vedlegg G: Kode

Vedlegg H: Delebestilling

H.1: Deler til testrevisjon

H.2: Deler til testrevisjon (etterbestilling)

H.3: Deler til revisjon 2

Vedlegg A: Populærvitenskapelig artikkel

En balansekunst mellom battericeller

En populærvitenskapelig artikkel om et lite batteristyringssystem med et stort hjerte.

I prosjektet vårt har vi laget et fungerende batteristyringssystem for 12 celler. Dette lille systemet har den store oppgaven med å balansere disse uforutsigbare cellene i tillegg til å kontrollere både strømtrekk, temperatur og celledier. Vårt prosjekt viser at dette lille strømstyringssystemet, med det store hjertet, evner å utføre denne komplekse oppgaven.

Som starten av artikkelen påpeker, er systemet fungerende. Nå som det er ute av veien skal vi sammen gjennomføre et lite dykk ned i hvor funksjonelt systemet faktisk er. Det er ikke slik at alt er svart-hvitt, et system kan fungere i varierende grad.

I vårt benyttede system fungerer noen ting godt og andre ting mindre godt. Delen av systemet som sørger for at battericellene har samme spenningsnivå fungerer. Den har derimot en negativ egenskap; den er noe ineffektiv. Ved balansering må battericeller naturligvis lades ut og dette gjøres ved hjelp av en utladningsmotstand. I denne prosessen skapes varme som et resultat av effekttapet som oppstår når battericellene lades ut. Utladningsmotstandene som benyttes av vårt system er små noe som gjør at de bruker lang tid på å få endret spenningsverdien i cellene. Denne tiden kan ses på som for lang og systemet er derfor lite effektivt.

Når det gjelder de resterende delene av systemet kan man for enkelhetens skyld si at de fungerer. I hvilken grad de ulike delene av systemet fungerer blir nærmere forklart i selve rapporten.

Uansett hvor bra systemet viste seg å bli, er det ikke til å stikke under en stol hvilken påvirkning dette prosjektet har hatt på det teknologiske fremskrittet til oppdragsgiver innen batteristyringssystem. For utenom et fungerende system har informasjonen og det gravende forskningsarbeidet utgjort en stor forskjell. Oppdragsgiver DNV Fuel Fighter har lenge vært på jakt etter den fremste batteristyringsteknologien. Dette har de fått gjennom god dokumentasjon, hele tre ulike rapporter og mye tett samarbeid med bachelorgruppa. Oppdragsgiver har nå kunnskapen de trenger for å bygge videre på det nåværende systemet eller bygge et helt nytt og forbedret system om de ønsker.



Organisasjonen vi har gjennomført prosjektet for heter DNV Fuel Fighter. Dette er en spennende og innovativ studentorganisasjon ved NTNU som siden 2008 har hatt som mål å utvikle verdens mest energieffektive bil. Bilen skal delta i den årlige konkurransen Shell Eco Marathon, en konkurranse for energieffektive biler.

Nå som vi har snakket kort om hvordan selve systemet fungerer og det fremragende forskningsarbeidet vil vi gi deg den unike forklaringen på hva og hvorfor. Hva er et batteristyringssystem og hvorfor trenger vi det?

Hva?

Dette avsnittet retter seg kanskje best mot mannen, eller kvinnen, i gata som aldri har hørt om verken batteristyringssystem, BMS eller battery management system (kjært barn, mange navn). Et batteristyringssystem er i hovedsak et system som ligger mellom selve batteriet og systemet batteriet skal forsyne med strøm. Hovedoppgaven til batteristyringssystemet er å balansere disse nevnte uforutsigbare cellene i et batteri. Dette er en balansekunst vi skal komme nærmere inn på i neste avsnitt.

Hvorfor?

I de fleste husholdningsartikler som mobiltelefon, barbermaskin og kvinnenens favoritt; håndholdt støvsuger, inneholder alle minst to battericeller. Under bruk har disse battericellene en tendens til å lades både opp og ned med ulikt tempo. Her vil man kunne risikere å få en celle med en mye større eller lavere spenning enn den andre cellen. Dette er meget skadelig for batteriet. Battericeller liker seg best mellom 3 og 4 volt. Derfor kan man se på batteristyringssystemet som en slags termostat som holder spenningen mellom 3 og 4 volt. (NB! Volt er det samme som spenning, men må ikke forveksles med varme.)

Nå som du som leser har nådd artikkelens slutt har du forhåpentligvis fått en større forståelse for batteristyringssystem. Denne artikkelen baserer seg på prosjektrapporten "Utvikling av batteristyringssystem for DNV Fuel Fighter".

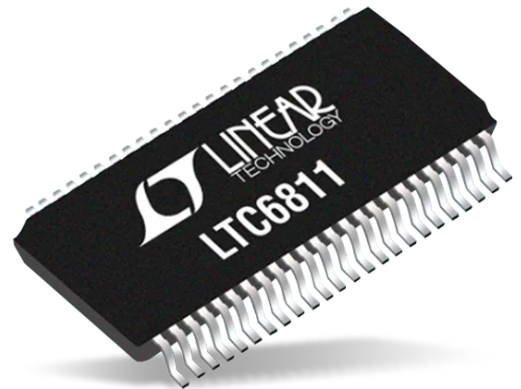
Vedlegg B: Brukermanual

Battery Management System based on LTC6811-2

For monitoring and balancing of 12 cells battery

Functions

- Balancing and monitoring of 12 battery cells
- Compatible with teensy 3.2 and teensy 3.6
- Current and voltage protection
- Temperature monitoring



Areas of use

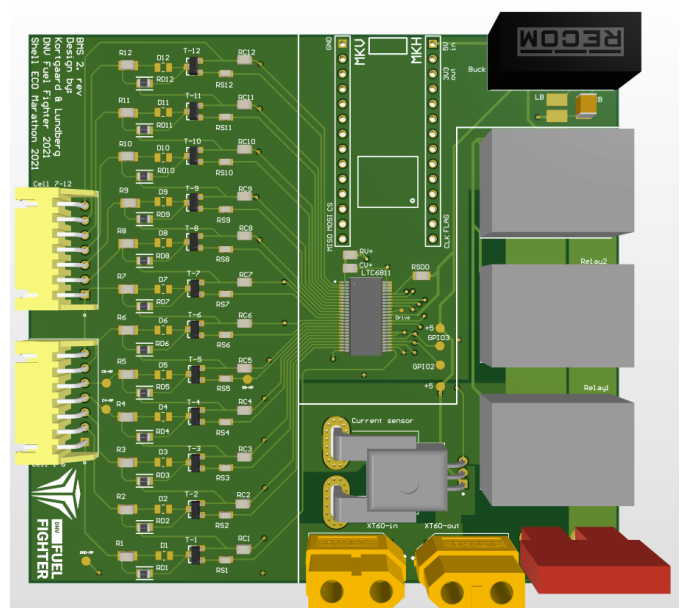
- Electric and hybrid cars
- All 12 cells Lipo and Li ion batteries



Description

This battery management system or BMS is developed for DNV Fuel Fighter to be used in an electrical car which uses a 12 cells lipo battery with voltages between ~38V to ~50V. The BMS monitors and balances the cells and at the same time it monitors the temperature and the current. The system can measure cell values between 0V to 5V.

The system uses code written in C/C++ for Teensy or Arduino. This code is customizable for easy adjusting of several system requirements.



Connection points on the board

The card has a total of three connection points. This is the connection for the balancing traces for each cell, the microcontroller, and the battery voltage. These connections make sure the system can connect to the different sources and control modules.

Cell connection: Consists of two JST-7 connectors. This is where the cells are connected for balancing and monitoring.

Microcontroller connection: The microcontroller connection supports a connection for a total of 28 pins. The connector consists of two pin headers (2.54mm). The connection is designed for integration of a Teensy 3.2 or 3.6 directly on the board. The pins in use on a Teensy are GND, 10, 11, 12, 13, 14, 3.3V og Vin. These are responsible for the communication between the system and the microcontroller.

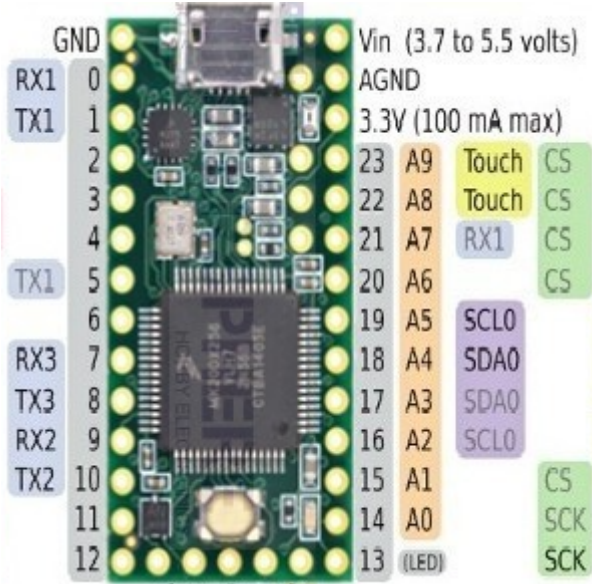


Figure 1: Teensy 3.2

Battery voltage connection: The battery voltage is connected using XT60 connectors and has both a male and a female connector for receiving the power from the battery and distributing it to the car. This is the main connector to the system as it turns the system on when it is connected. The connection requires at least 27V because of a converter that has a minimum voltage of 27V, this converter supplies the whole system with 5V.

Indications with in the system

Balancing indication

For each individual cell circuit there is a diode in parallel with the discharge resistors. This diode indicates with green lights when each cell is being balanced. In addition all diodes are programmed to light up when the system starts. To make sure the balancing works as intended the microcontroller can be resetted, then all the diodes should light up again.

System light

In the down right corner is a red diode. This diode indicates when the system is connected to the battery supply and the relays are closed. When this is lit it means the BMS is delivering power to the main system.

Relay indication

Under testing of the system it might be beneficial to open and close the relays. When doing this one will notice a synchronous ticking sound from all relays. In addition the relays will tick when the battery is connected since the relays are normally open. The relays will also tick when the battery is disconnected. This tick can appear asynchronous.

Heat development

Normally there will not be much of a heat development in the system while it is being used. There will however be a small heat development in the converter. To check if the system is connected to the main battery voltage one should feel some heat increase in the converter. The discharge resistors will also develop some heat, but this is harder to detect because of the small amount and the size of the component. Lastly there can be heat development during high current through the main traces for the relays.

Possible adaptations to the code

The code is written using Visual Studio Code in the language C/C++ for the microcontroller Teensy 3.2 or 3.6. The code consists of multiple functions which depending on the input given by the user, will change how they perform certain tasks. The different adaptations include which speed the ADC should use, under- and over voltage of each cell, maximum current for the system and how many GPIOs are in use. Depending on which ADC the user chooses the duration of the conversion and the accuracy will change. Faster modes can produce less accurate measurements. From testing there has not been found any serious measurement errors when using the fastest mode, so therefore we suggest keeping the ADC mode to fast mode. Here is an example of how to change the ADC mode and how the change manifests itself throughout the code.

```
int adc_mode = 0b01; //ADC fast mode.  
float under_voltage_value = 2.7;
```

```
start_cell_voltage_adc_conversion(adc_mode);
```

```
void start_cell_voltage_adc_conversion(int mode){
```

MODE	-3dB FILTER BW	-40dB FILTER BW	TME SPEC AT 3.3V, 25°C	TME SPEC AT 3.3V, -40°C, 125°C
27kHz (Fast Mode)	27kHz	84kHz	±4.7mV	±4.7mV
7kHz (Normal Mode)	6.8kHz	21kHz	±1.2mV	±2.2mV
422Hz	422Hz	1.3kHz	±1.2mV	±2.2mV
26Hz (Filtered Mode)	26Hz	82Hz	±1.2mV	±2.2mV

Note: TME is the total measurement error.

Value limitations

Within different parts of the system there are different value limitations when it comes to such as power, current and voltage. Different parts of the system have different limitations and it is important to not exceed the limitations.

The balancing part of the system has a maximum discharge current of ~125mA. This is because of the discharge resistor and the MOSFET who both have a 0.5W limitation. The cell inputs also have a maximum voltage of 6.2V, however it can only measure up to 5V. The LTC6811 has a limitation of 75V, and the converter has a limitation of 72V. Therefore the maximum voltage the system can handle is ~72V. For the relays and current sensor circuit the maximum current is 45A. This is because both the relays and the traces are limited to this current.

If the recommended batteries are used these limitations should, by default, not be exceeded.

Tattu 7000mAh 6S1P 25C 22.2V Lipo Battery Pack with XT60 plug

Unofficial datasheet by Sondre Ninive Andersen

Information sourced from:

<http://www.genstattu.com/tattu-7000mah-6s1p-25c-22-2v-lipo-battery-pack-with-xt60-plug.html>

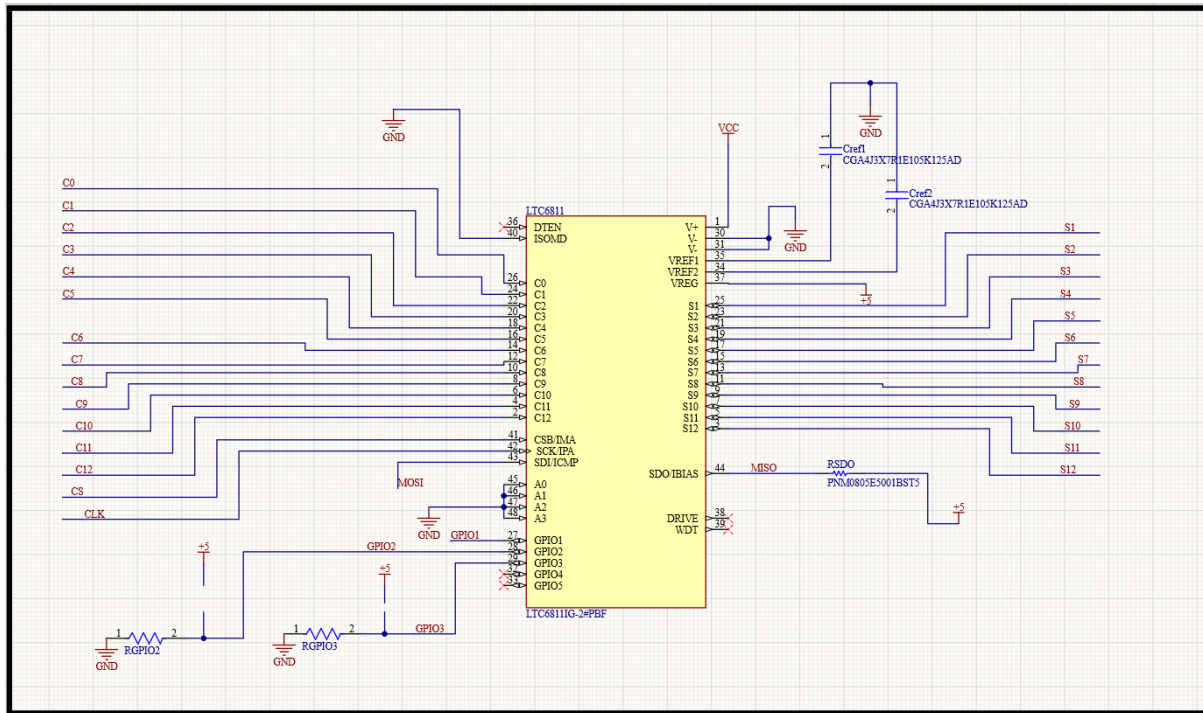


Brand	Tattu
Capacity(mAh)	7000
Voltage(V)	22.2
Discharge Rate (C)	25
Max Burst discharge Rate (C)	50
Configuration	6S1P
Net Weight(±20g)	870
Length(±5mm)	138
Width(±2mm)	42
Height(±2mm)	65
Connector Type	XT-60
Wire Gauge	AWG10#
Wire Length(mm)	120
Balancer Connector Type	JST-XHR

Figure 2: Recommended battery

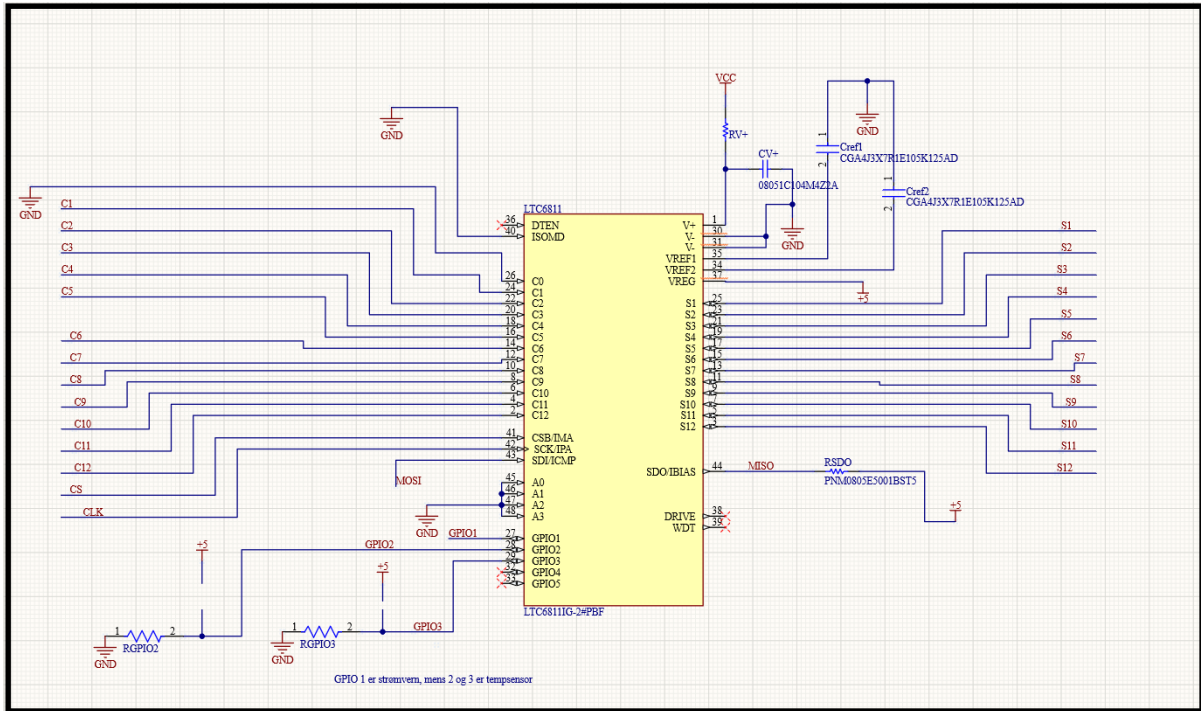
Vedlegg C: Revisjonsbeskrivelse

Dette vedlegget inneholder og forklarer alle endringer gjort i hver enkelt delkrets fra testsystemet til revisjon 2 og revisjon 2 til revisjon 3. Delkretser som ikke har noen endringer gjennom disse revisjonene er ikke nevnt i dette vedlegget. Mer om hver enkelt delkrets og de ulike komponentene står i hovedrapporten.



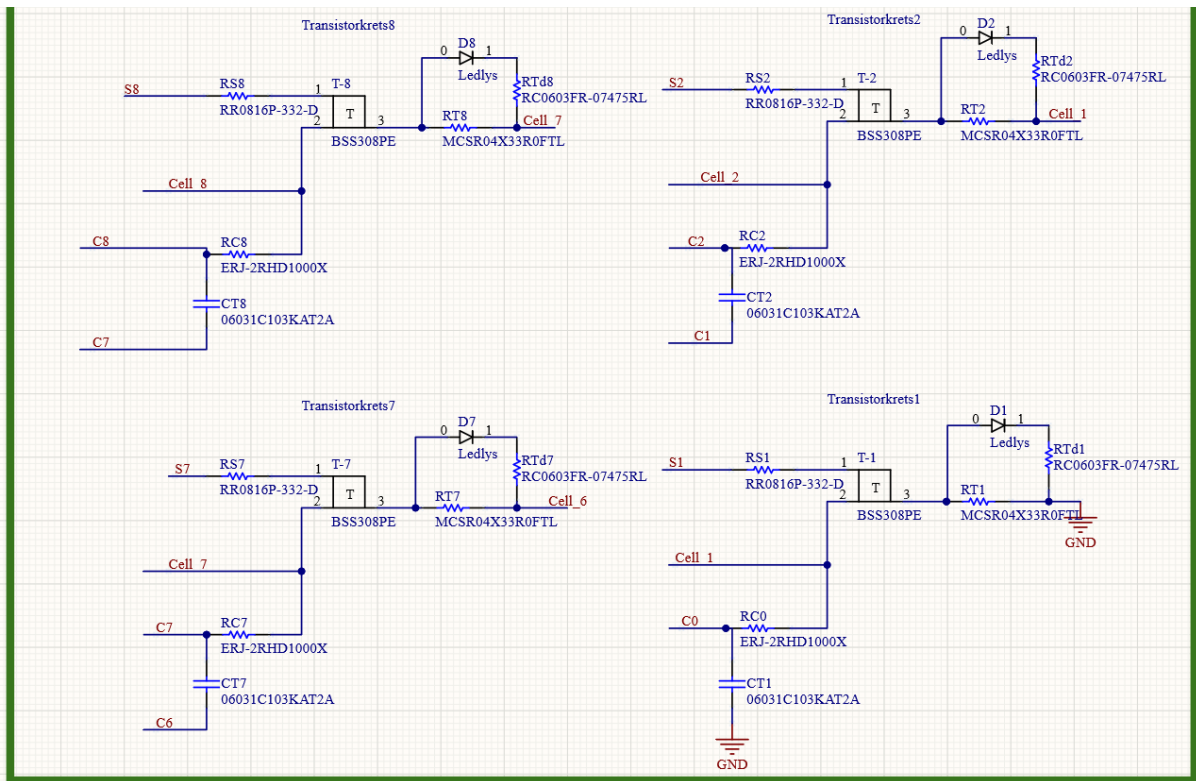
Skjemategning: 1

Dette er hvordan oppkoblingen av den integrerte kretsen ble gjort i testsystemet. Oppkoblingen er ikke veldig kompleks og består av relativt lite komponenter. Selve temperatursensorene er ikke inkludert i skjemaet på grunn av ikke eksisterende "footprint" til komponenten. Derfor har vi valgt å tegne det på denne måten i skjematikken og på kretskortet bruker vi pads hvor vi skulle lodde på ledningene til temperatursensoren.



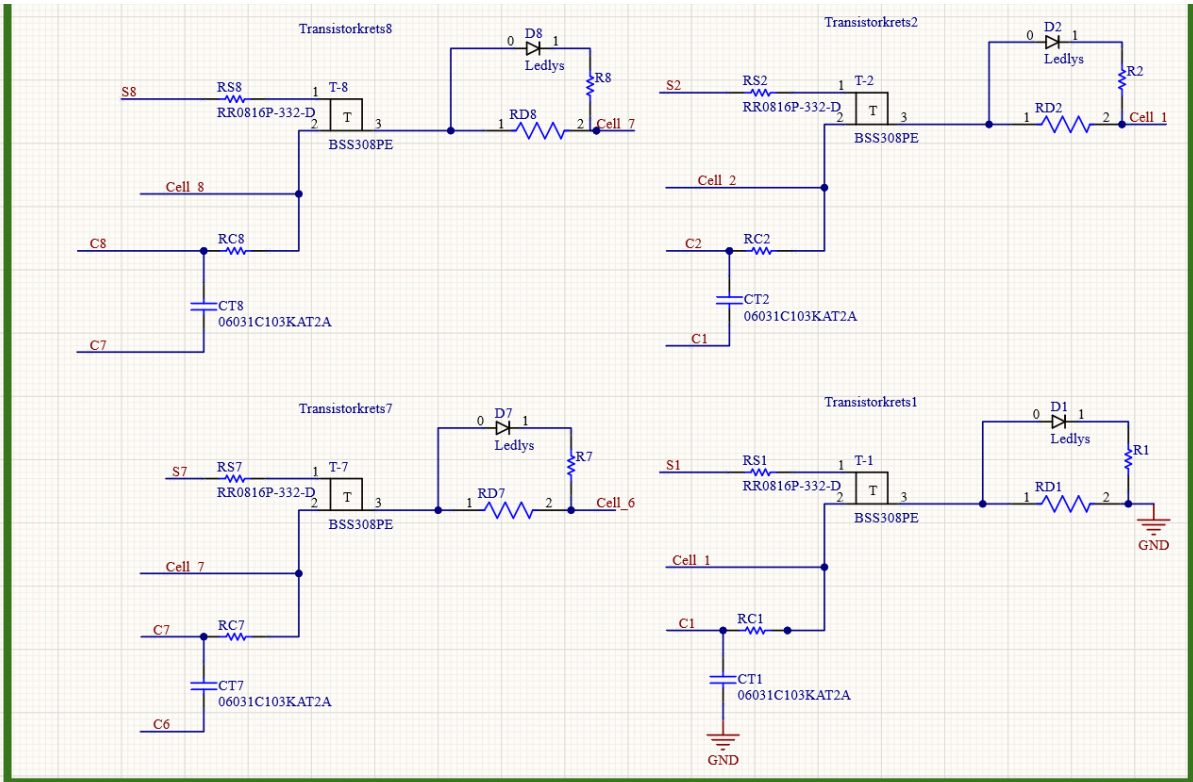
Skjemategning: 2

Få endringer ble gjort på denne delen av systemet fra testsystemet til revisjon 2. Delkretsen har fått to ekstra komponenter, nemlig en filtermotstand og kondensator til V+. Denne endringen ble gjort ettersom vi fant det hensiktsmessig å legge på filtering inn på den integrerte kretsen for sikkerhets skyld. C0 ble også endret fra å gå til C0 i balanseringskretsen til å bli jordet. Mer om dette under skjemategning: 4.



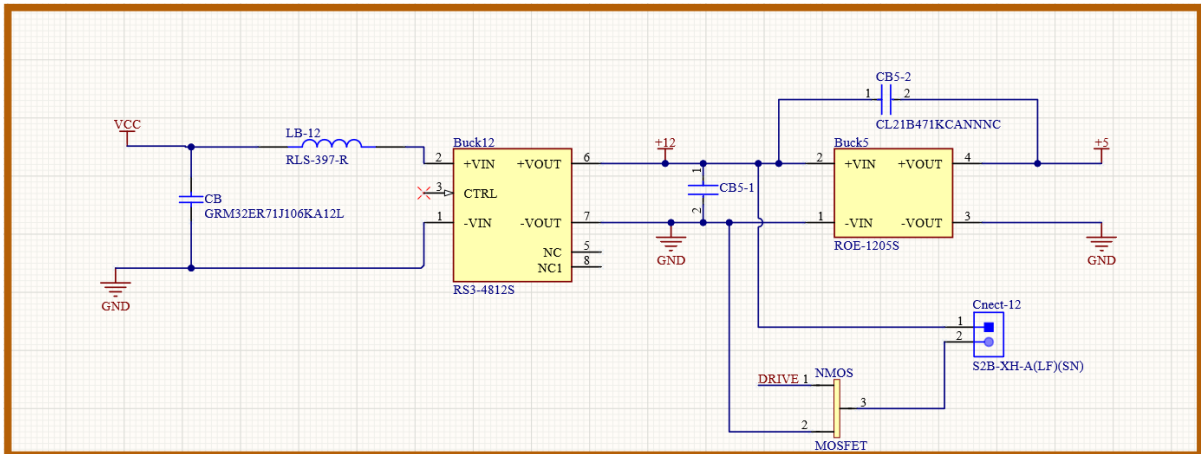
Skjemategning: 3

Dette er måten vi valgte å koble opp balanseringskretsen i testsystemet. Alle de individuelle transistorkretsene er bygd opp på samme måte og det er totalt 12 stk. Alle ledningene går enten til battericellen, eller til en egen pinne på den integrerte kretsen. Dioden er der kun som en indikator på når det skjer balansering over cellen.



Skjemategning: 4

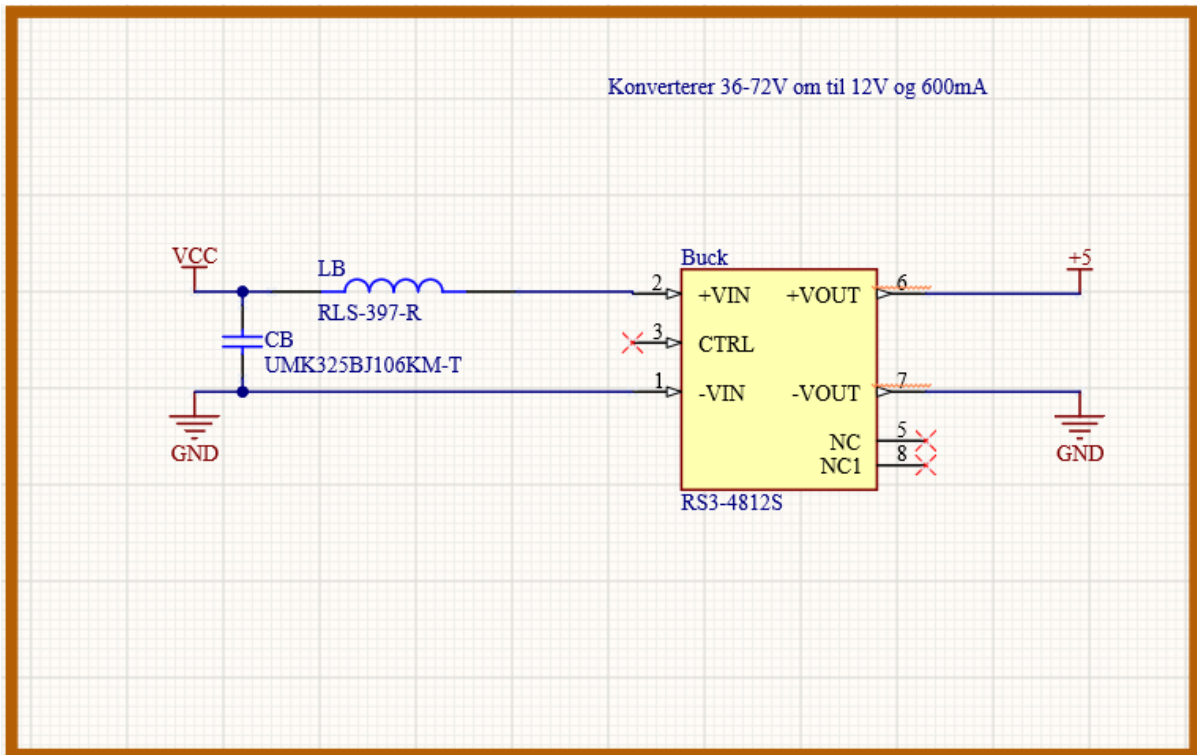
Under testing av testsystemet oppdaget vi en feil ved transistorkrets 1. Her hadde vi koblet transistorkretsen til C0 i stedet for C1. Dette ble rettet opp i til revisjon 2. I tillegg hadde vi utfordringer med loding av testrevisjon. Derfor byttet vi ut flere komponenter fra størrelse 0402 til 0805. Dette ble enklere å lodde samtidig som det ble estetisk bedre. I tillegg gir større komponenter bedre varmetransportering.



Skjemategning: 5

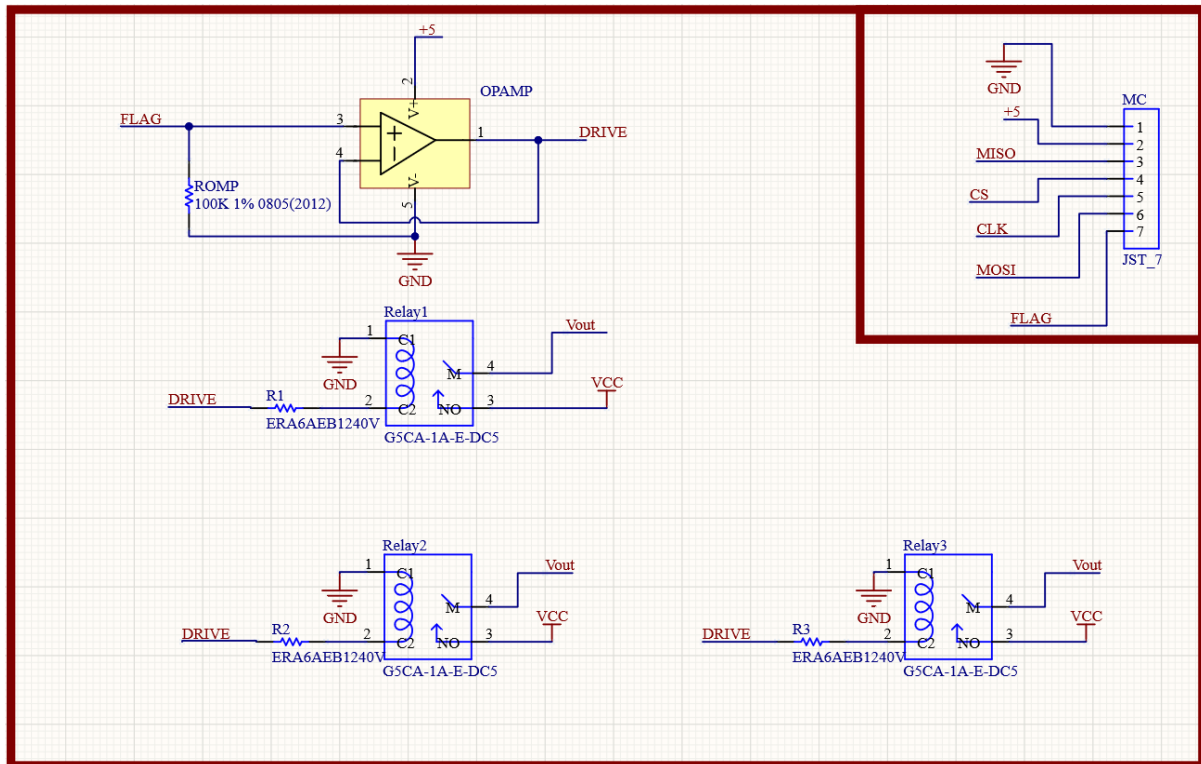
Dette er en delkrets som ble endret mye fra testsystemet til revisjon 2. Dette på grunn av revurdering til reglene fra Shell. Kretsen består av to buck konvertere med tilhørende filtreringskomponenter. Den har i tillegg en MOSFET for å styre spenningen til et enkelt tilkoblingspunkt. Dette tilkoblingspunktet var ment til lydhorner på bilen. Den første

omformeren tar inn hovedspenningen fra batteriet og sender ut 12V. Denne 12V spenningen var ment å forsyne lydhornet, men på grunn av en revurdering av reglene sammen med oppdragsgiver ble vi enige om at lydhornet ikke kunne få spenning fra batteristyringssystemet. Videre sender 12V omformeren spenningen til en 5V omformer. Denne omformeren forsyner resten av systemet med 5V for å drive mikrokontroller og mer.



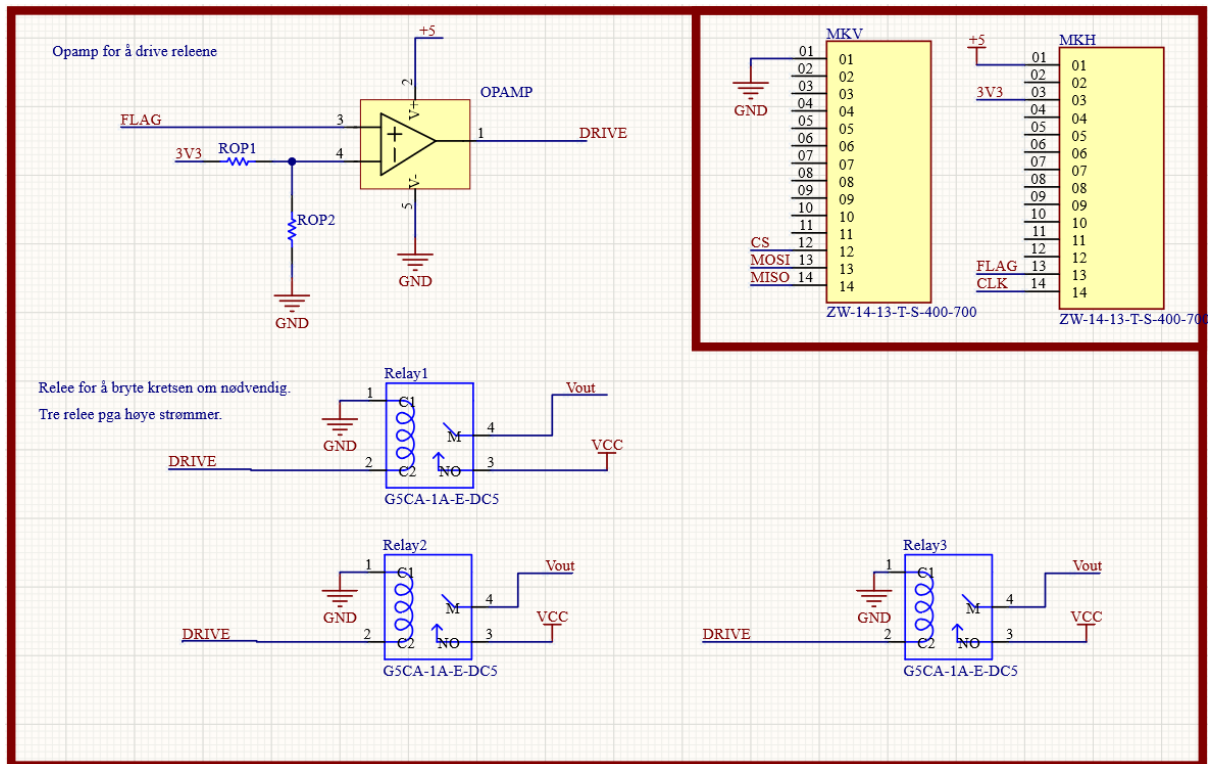
Skjemategning: 6

I revisjon 2 ble denne delkretsen veldig forenklet fra testrevisjonen. Her er omtrent hele kretsen byttet ut siden systemet ikke lenger trengte 12V forsyning. Her ble det i stedet brukt en omformer som gjør om hovedspenningen til 5V og driver resten av systemet. Denne har et lik filter som 12V omformeren i testrevisjonen.



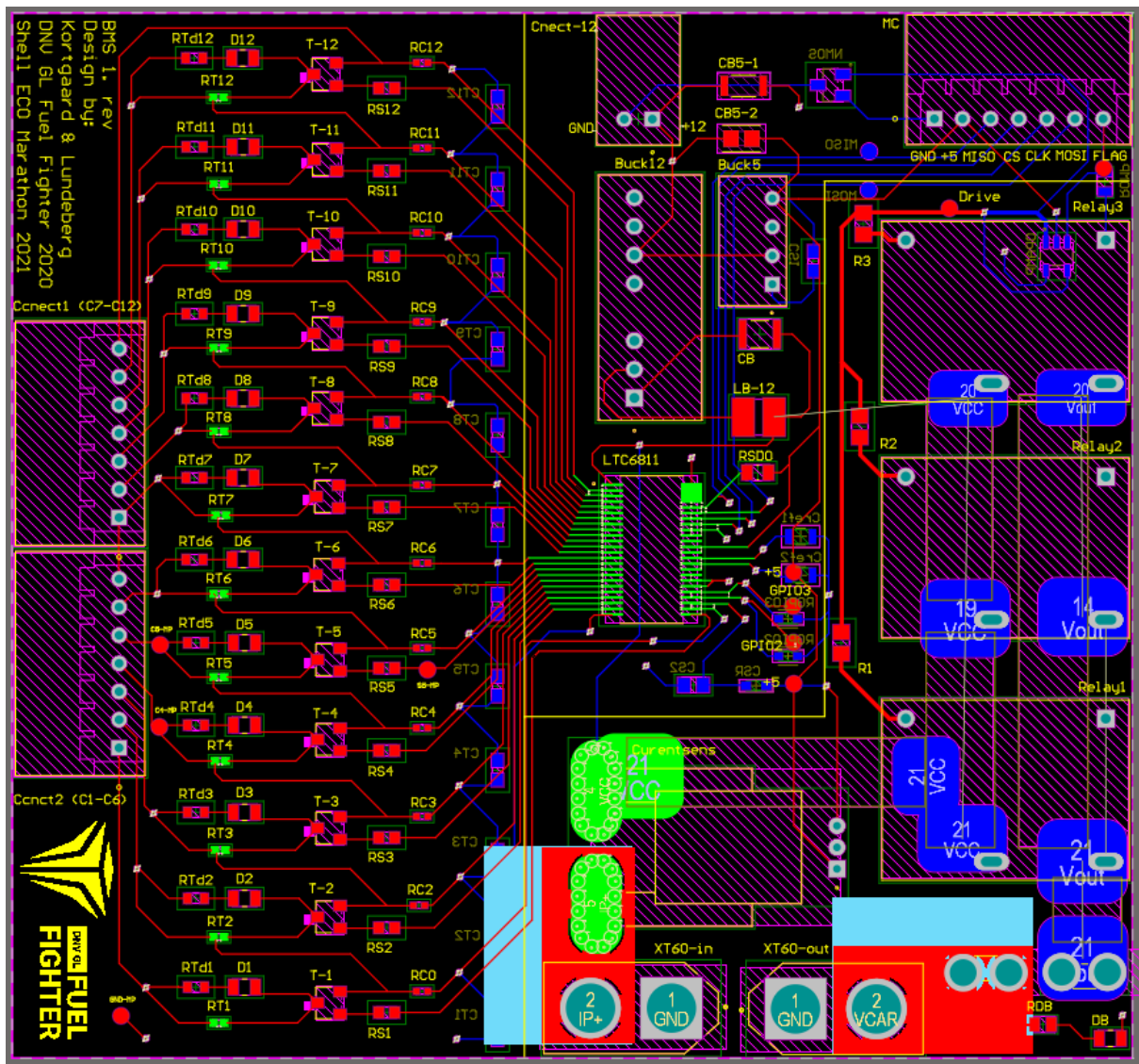
Skjemategning: 7

Denne delkretsen ble nøye testet i starten. Det på grunn av manglende funksjonalitet og lite kunnskap om kretsen. Planen for denne delen av systemet var å bryte hovedstrømmen med de tre releene som hver tåler 15A. Disse styres av DRIVE som blir sendt fra en forsterker styrt av mikrokontrolleren. Mikrokontrollertilkoblingen er av en enkel JST-7 tilkobling, lik de som blir brukt for battericellene.



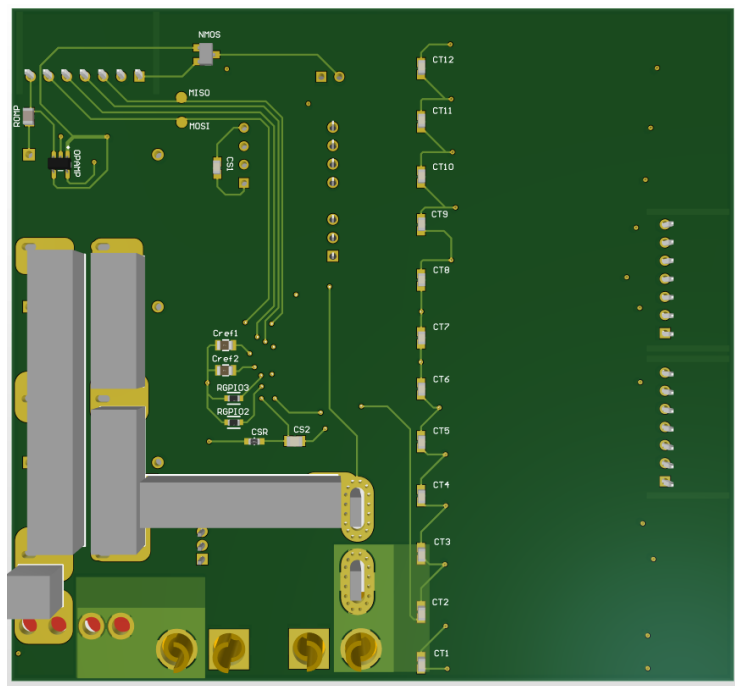
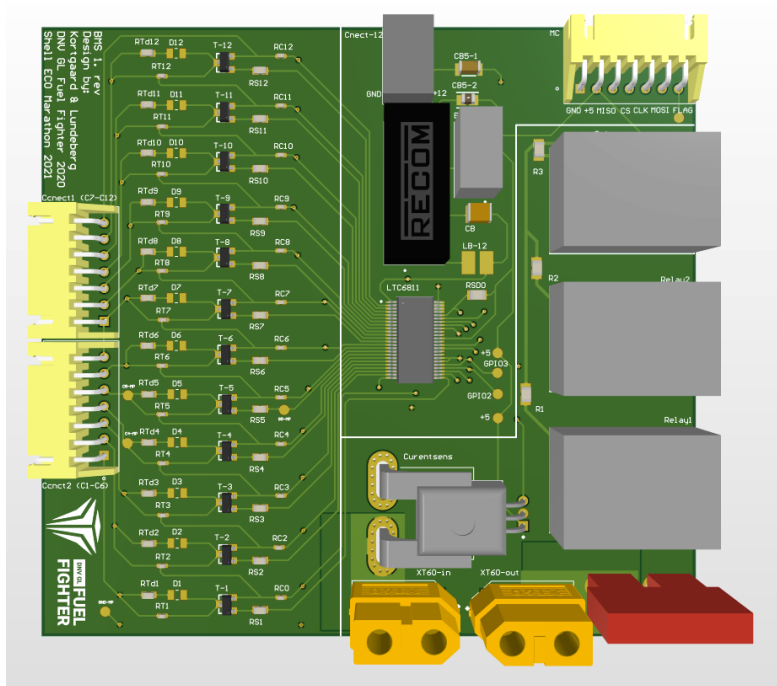
Skjemategning: 8

I revisjon 2 måtte vi endre hele forsterkerkretsen til en komparatorkrets, ettersom denne delen ikke fungerte i testsystemet. Denne komparatorkretsen får inn 5V fra omformeren og 3.3V fra mikrokontrolleren. Motstanden mellom DRIVE og releene er fjernet, grunnet en indre motstand i releet vi hadde oversett. Vi forsikret oss om riktig strømtrekk over releene ved testing slik at det ikke skulle være tvil om at relèmotstanden fra testsystemet var overflødig. I tillegg gikk vi fra en enkel mikrokontrolltilkobling med ledning, til en integrert løsning. Her ble JST-7 tilkoblingen erstattet til fordel for to "pin headere" (2.54mm). Ved å bruke disse vil vi kunne montere mikrokontrolleren direkte på kortet uten bruk av ekstra ledninger. Mikrokontrolleren bruker fremdeles de samme navnene og har samme funksjon.



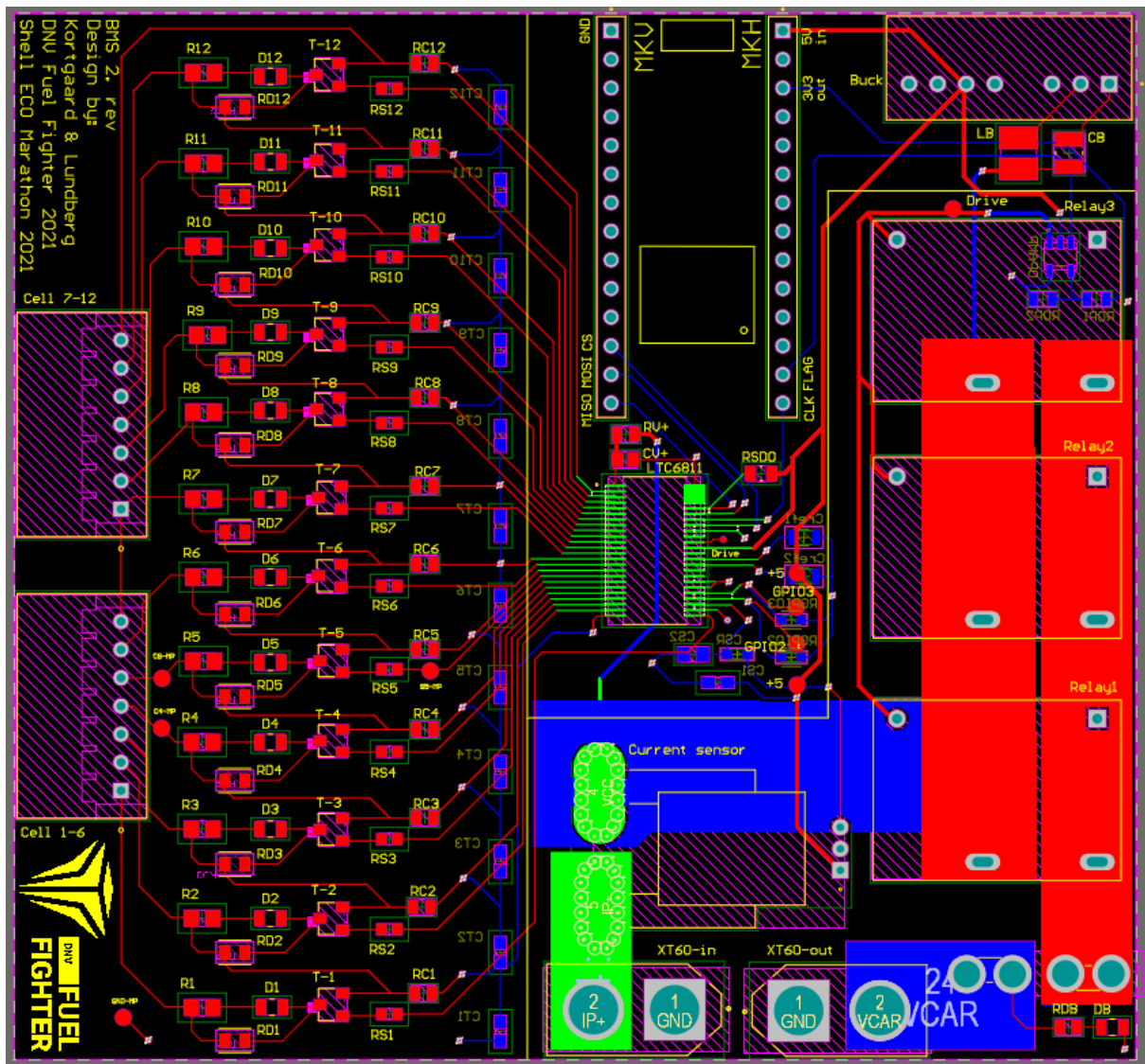
Kretskortutlegg: 1

Dette er måten vi valgte å koble kretsen på i testrevisjonen. Denne består av tre hoveddeler markert ved de gule strekene. Delen helt til venstre på kortet er balanseringsdelen. Her er de fleste komponentene på fremsiden, med unntak av kondensatorene på baksiden. Komponentene på baksiden er i blå, mens fremsiden er rød. Den neste delen består av den integrerte kretsen, med omformerne og tilkobling til mikrokontrolleren. Den siste delen med tilkobling til batterispennning og relè er hvor det går mest strøm i kretsen. Derfor er den plassert så isolert som mulig. Her har vi brukt såkalte "busbars" på baksiden for å lede den høye strømmen. Ved XT60 tilkoblingene har vi ikke brukt busbars men heller laget brede baner på tvers av tre lag. Dette var mulig grunnet korte avstander og mulighet for ekstra bredde.



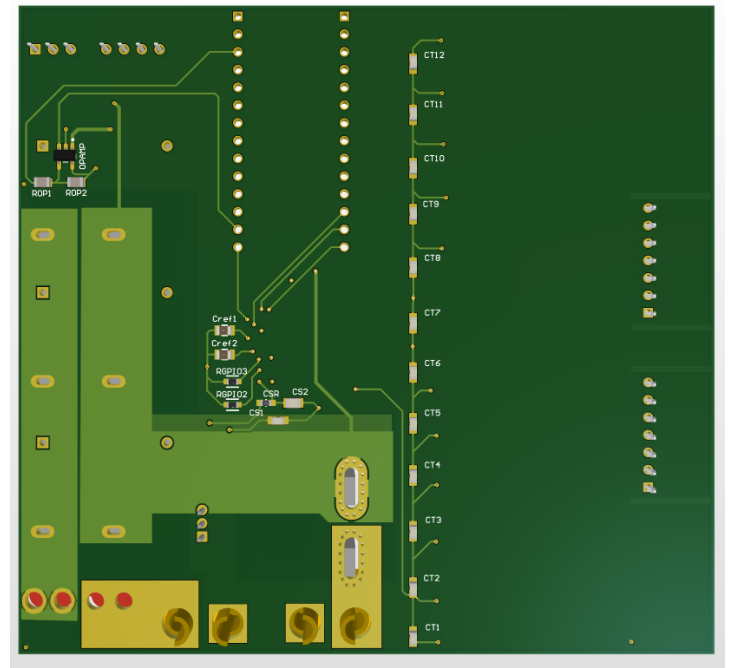
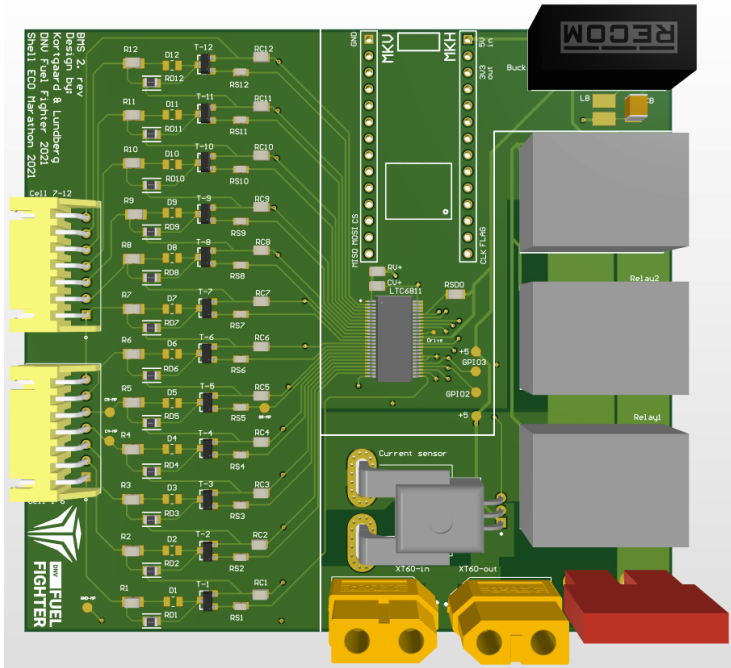
Kretskortutlegg: 2 - 3D modell

Dette er 3D modellen av testvisjonen. Her ser man tydelig de ulike komponentene som er brukt og hvordan de passer inn på kortet. Man ser også godt hvordan busbar blir tatt i bruk.



Kretskortutlegg: 3

I revisjon to kan man se at vi har beholdt de samme hovedelementene i kretsen. De to største endringene kan man se relativt raskt. Den første endringen er i hoveddelen med den interne kretsen. Her er omformerene og tilkoblingen til hornet fjernet og byttet ut med en integrert tilkobling for mikrokontrolleren. Der den forrige tilkoblingen til mikrokontrolleren var, har vi satt inn den nye omformeren. Dette fører selvsagt til nye baner i kortet og disse er optimalisert med tanke på støy og lengde. Den andre store endringen er at løsningen med busbars ble forkastet. De ble byttet ut mot å lage brede nok baner i alle lagene. Måten vi løste dette på var ved å dele opp jordlaget slik at det dekket alle hoveddelene unntatt hoveddelen med releene.



Kretskortutlegg: 4 - 3D modell

I 3D modellen for revisjon 2 vil man først og fremst se praktikabiliteten i å ha mulighet for å integrere mikrokontrolleren på kortet. Man vil også se en stor forbedring på baksiden av kortet siden fjerning av busbars har fjernet vekt, gjort kortet totalt lavere og er mer estetisk.

Vedlegg D: SEM regler for batteristyringsystem

Practical requirements

(...)

d) If Lithium-based batteries are used,

i. Battery Management Systems (BMS) must be tailored to the lithium chemistry to control and protect the battery against risk of fire.

1. The BMS must provide cell balancing and overvoltage protection during off-track charging.

2. For battery electric vehicles, the additional requirement of cell level over-discharge, cell level overcurrent and battery over-temperature must be provided as part of the on-vehicle system.

The BMS must AUTOMATICALLY isolate the battery, without operator intervention, if a limit or out of range condition is reached on any of the above parameters.

3. For battery electric vehicles, the on-vehicle BMS must be located in the physical battery package (See Article 57:b)ii above.)

ii. For all self-built batteries, the following applies (note: a battery with a separately purchased BMS is also considered a self-built battery).

1. If there are one or more cells or modules, the overcurrent protection value for cells in parallel must be selected such that under normal operating or expected failure conditions, no single cell will be exposed to current beyond its rating.

2. All cells or modules must be identical in configuration. (i.e. a battery constructed from cells of different capacities is not allowed).

If the BMS is purchased separate from the battery, ensure it is compatible with battery chemistry.

Battery/BMS: (For Lithium-based batteries only) Provide battery/BMS manufacturer component specifications at the lowest level of purchased components. At minimum, the battery documentation should include cell chemistry, cell electrical characteristics, cell series or parallel configurations, battery voltage, and current ratings.

The BMS data MUST include:

1. Cell over-voltage and under-voltage protection limits
2. Battery over-current limit (not required for accessory battery)
3. Operation of cell balancing (how and when)
4. Battery over-temperature limit (not required for accessory battery)
5. How the BMS will protect the battery when an over-voltage, under-voltage, over-current or over-temperature condition is reached, i.e. how will the BMS protect or isolate the battery, in the case of Battery Electric Vehicles, when these limits are reached?

Any BMS for propulsion batteries must provide an AUTOMATIC isolation of this battery in the event of any measured parameters getting out of their designed range.

(...)

Vedlegg E: Testlogg og testplan

Denne testrapporten inneholder både testplan og testrapport. Testplanen er hvordan vi planla testingen før testingen begynte. Testrapporten er en logg som gjengir alle interessante hendelser under testing. Ikke alle dager er loggført ettersom det ikke har blitt gjort interessante observasjoner.

E.1: Testplan for testsystem

1. Generell testing, for å finne fatale feil som kan i verste fall ødelegge kretsen:
Måle med multimeter for å se etter kortslutning, på inngangen og utgangen, mellom hver celle og til jord, på omformerne til jord, mellom power og signal(fra og til mikrokontroller)
2. Koble i batteri og balanseringsledninger. Om alt går bra, mål spenning over 5V. Koble 5V rett på inngangen til rele og se om det fungerer.
3. På denne delen av testingen kan det være lurt å bruke en spennings-/strømkilde i stedet for batteri. om dette lar seg gjøre, må ha riktig verdi på cellene og spenning på inngangen samtidig som riktig strøm. koble i mikrokontroller. se om verdier som føres over på monitor er riktig, om riktig gå videre. koble på en motstand som gir et bestemt strømtrekk (2 ohm = 24 A, ved 48V), lurt å dobbeltsjekke med multimeter i serie). om riktig verdi vises gå videre. koble på en motstand som gir for høyt strømtrekk(0.7 ohm = 65A, ved 48V). samme må gjøres på celleverdier (4.25V og 3.2V), temperatur (varm opp til for høy temperatur)
Mål temperatur over deler som har mye strøm i seg. følg med på flag ut fra mikrokontroller. Sjekke om det blir overslag når kretsen brytes
La en kontinuerlig strøm på 40A gå i gjennom kretsen. mål utgangen fra Current sens. Hvilken spenning er SPI fra LTC på? test med oscilloskop.
4. Lodd av en tempmåler og mål spenningen mellom GPIO2/3 og jord
5. Mål med oscilloskop hvordan SPI-kommunikasjonen fungerer, bra til oppgave.
Trenger MSO skop
6. Sjekke om SPI kan sende mer enn 8bits
7. Legge til pullup til miso mosi osv
8. Sjekke vekking av ic via CS og drive
9. Write/Read koden
10. Mål over pullup

E.2: Testlogg for testsystem

Test rele 11.02.2021

Vi testet om relet vi skal bruke sammen med en 120 ohms motstand. I følge databladet skal vi ved 5V få 40mA. Grunnen til denne testen var for å finne ut om vi trengte en ekstern motstand som vi først hadde tenkt.

Resultatene vi fikk var at ved 5V og en ekstern motstand gikk det 20mA gjennom. Når vi testet uten motstand fikk vi ønsket verdi på 40mA. Vi kunne også høre at relet åpnet og lukket seg med påtrykt strøm.

Generell test 15. og 16.03.2021

Lite fungerte. Testet systemet med 6 celler koblet i, men fant ut at strømføringsdelen av kretsen ikke fungerte siden det alltid var kontakt gjennom releene. Etter grundig testing av delkretsen fant vi ut at releene var defekte. Siden lodding av rele og busbar er meget utfordrende ble det bestemt at vi kun skulle teste funksjonaliteten til koden på releene. Siden alle releene bruker samme flag, slutter vi bare kretsen via et rele. Nedsiden med en slik løsning er at vi ikke får testet delsystemet som helhet. Vi får blant annet ikke testet funksjonaliteten til opampen fordi strømtrekket til det ene releet blir mye mindre enn de tre samlet.

Strømmåler gir ut ca. 2.5V ved 0A. og går opp og ned ut i fra hvilken retning strømmen har. strømmåler på kortet har kanskje feil ved seg. trenger mer testing.

Vet ikke om IC slo seg på.

Kontinuasjon av testing 18.03.2021

Testet spenning mellom gpio og gnd uten tilkobling av tempsensor. Her ligger det konstant 5 volt over. Må undersøkes nærmere.

Spørsmål:

- 5V på gpio, meningen eller ikke?
- Må SPI kommunikasjon startes manuelt i kode eller vil det skje av seg selv?
- Må vi adressere ICen når vi kun bruker 1.
- Hva er normal driftstemp på IC
- Er det nødvendig med pec for at koden skal fungere

Feilsøking 19.03.2021 →

Sliter med å få mye til å fungere. Står derfor fast i testing og velger derfor å begynne testing på nytt kort med kun ICen. Vi prøver en såkalt wakeup test der vi setter CS til høy. Når vi gjør dette måler vi 5V på Vdrive i 2 sekunder. Dette tyder på at ICen slår seg på. Ved testing av gammelt kort gjør vi samme wakeup test. Her er ikke ICen responsiv som tyder på at den er

ødelagt. Har mest sannsynlig skjedd for en stund siden og mye av testingen som er tidligere gjort er ikke lenger gyldig. Vi vil fortsette testing på ny komponent steg for steg.

Testing 06.04.2021

Avdekket feil i hardware. Vi hadde en alvorlig koblingsfeil ved C1 hvor den ikke var koblet til noe. Se skjematikk rev 1 og den endrede skjematikken i rev2 evt datablad. Feil ble avdekket da vi fikk feil cellederdi og fant feil etter nærmere undersøkelser i skjematikk og PCB.

Testet også OPAMP, men uten hell. Kode og rele funket, men ingen tikking av rele når den ble brukt sammen med OPAMP. Dette på grunn av uendelig motstand over utgang. Dvs at IN = OUT og derfor tikker ikke rele annet en ved av-og påkobling av 5V forsyning.

Testing 08.04.2021

Testet om vi kunne styre S som er koblet til gate på Pmosene som lader ut cellene. Dette ble gjort ved å sette DCC = 1 for de cellene vi ville lade ut. For å kunne bevise at vi har kontakt med S så forventet vi å få spenningsfall over cellen.

Vi fant ut at cellene hadde et fall på 0,002 volt med dioden i parallell og enda mindre med dioden i serie, derfor ønsker vi dioden i parallell. Her fikk vi testet om vi skulle ha dioden i serie eller parallell med utladningsmotstanden på 33 ohm.

E.3: Testplan for revisjon 2

Testplan for revisjon 2 (steg for steg)

Testutgangspunkt begynner med kun mikrokontroller og integrert krets (IC) koblet til. Mikrokontrolleren skal ha en ekstern 5V forsyning. Kun de komponentene som er nødvendige for hvert punkt skal være loddet på. Dette for å gjøre det lettere å finne feil. Alle tilkoblingspunkt kan loddet på ved teststart om ønskelig.

1. Strømforsyningstest
 - Strømforsyningen måles
 - Den bør være innenfor minimum og maks-kriteriene for testing av IC (11-55V)
2. Wakeup test
 - Sett CS (chipselect) til 1, slik at IC går i standby mode
 - Mål over Vdrive, den burde bli 5V i 2 sekunder etter CS blir 0
3. Intern 5V test
 - Gjennomfør testing på omformeren eksternt
 - Ekstern 5V forsyning blir koblet fra
 - Test 2. gjennomføres på nytt med intern 5V forsyning (buck converter)
 - Kan måle med oscilloskop for å se på svingninger i 5V.
4. Kommunikasjonstest
 - Send og motta konfig register.
 - Send gyldig ADC kommando til IC via mikrokontroller
 - Mål over Vref1 og Vref2, disse burde bli ~3.3V (må evt måles med oscilloskop)
5. Balanseringstest
 - Monter balanseringskretsene på kortet
 - Motta korrekte verdier for alle celler
 - Sett DCC = 1 for de aktuelle cellene
 - Mål over aktuell celle, den burde få et fall på ~0.002V
 - I tillegg bør dioden i kretsen lyse for hele balanseringsperioden
6. Relestyringstest
 - Monter kun ett rele, i tillegg til opamp og tilhørende krets
 - Send kommando via FLAG for å tikke rele
 - Deretter lodd på hele kretsen og sett FLAG = 1 for å tikke alle rele
7. Strømstyringstest
 - Lodd på strømsensor og tilhørende komponenter
 - *Sjekk at det fungerer*?
8. Temperaturtest
 - Lodd på temperatursensor og tilhørende komponenter

- Varm sensorer til grenseverdi og observer systemet
9. Komplett test av hele systemet i loop
- Kan benytte Serial.print for å lese av ulike verdier

E.4: Testrapport for revisjon 2

Testing 26.04.2021

Test gjennomført fra punkt 1 til 4. Testene har vært vellykkede og en interessant observasjon ble gjort. Buck konverteren ble observert til 5V siden den hadde på det minste 27V over seg. Dette til tross for at databladet spesifiserer en minimum spenning på 36V. Det vil si at systemet kan drives på lavere spenning enn antatt.

Testing 27.04.2021

Etter gårsdagens vellykkede testingsperiode hvor vi hadde fulgt en steg for steg testplan møtte vi på problemer i dag. Vi var kommet til punkt fem i testplanen og var klar for å teste balanseringsdelen. Dette var vellykket og vi fikk kontakt med alle cellene. Problemet kom da vi loddet på ett rele og tilhørende komparator krets. Vi fikk testet releet og dette var vellykket siden vi tikket releet slik vi ville. Når vi skulle ta en ny ADC register test fikk vi ikke kontakt med ICen. Vi fikk heller ikke kontakt når vi prøvde å ta en wakeup test. Her antar vi at ICen har blitt ødelagt av ukjent grunn.

Gjennomførte testen på nytt med en annen kraftforsyning. Dette virket siden vi fikk ønsket reaksjon fra ICen på wakeup testen. Det vi også fant ut var at FLAG, som brukes for å tikke releet også påvirket Vdrive. Når FLAG var i bruk var Vdrive høy. Mistenker at Vdrive også tikker samtidig med FLAG, men dette kan foreløpig ikke måles ettersom FLAG tikker for fort til å utløse forskjell på multimeter.

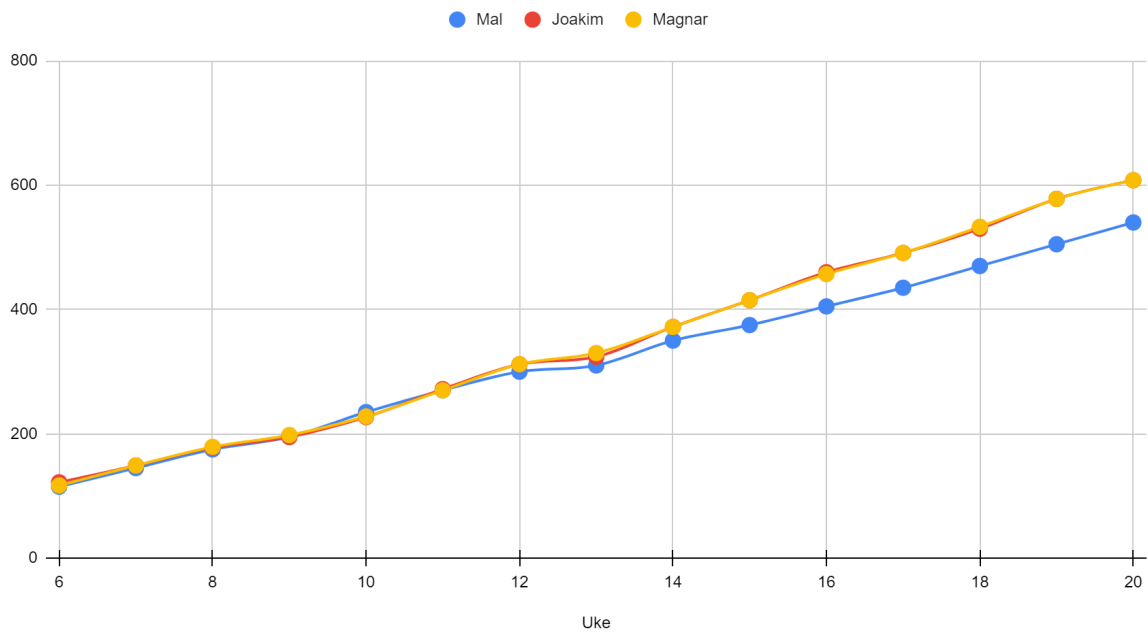
Vi testet på nytt en ADC konvertering og fikk kun verdier på 255 ut, eller en byte med enere. Denne feilen hadde vi ikke møtt på før og vi hadde heller ikke gjort endringer i verken oppkobling eller kode fra sist vellykkede test. Derfor byttet vi ut mikrokontrolleren til en ny en. Da fikk vi ønskede verdier i testen. Her kan vi konkludere med at mikrokontrolleren var defekt, av ukjent grunn. Dette kan også være grunnen til at wakeup testen tidligere var meget ustabil.

Vi har prøvd å undersøke feilene vi har opplevd med bruk av pekere i koden. Vi har tidligere brukt kode i arduino uten pekere som har vært suksessfullt. Derfor har vi gjort en konklusjon på at pekere muligens er feil. For å videre undersøke dette koder vi pekere i arduino for å forsikre oss om pekerfeil. I arduino får vi ut pekerverdier da vi gjorde en liten endring i koden.

Vedlegg F: Timeliste

Estimert		UKE 6	UKE 7	UKE 8	UKE 9	UKE 10	UKE 11	UKE 12	UKE 13	UKE 14	UKE 15	UKE 16	UKE 17	UKE 18	UKE 19	UKE 20
	Mal		32	30	30	20	40	35	30	10	40	25	30	30	35	35
Akkumulert	Joakim	39	27	29	17	32	45	40	12	48	43	45	31	39	48	30
	Magnar	34	32	30	19	30	42	42	18	42	43	42	34	42	45	30
Totalt i perioden	Mal	92			95			80			85			105		
	Joakim	95			94			100			119			117		
	Magnar	96			91			102			119			117		
Akkumulert over tid	Mal	115	145	175	195	235	270	300	310	350	375	405	435	470	505	540
	Joakim	122	149	178	195	227	272	312	324	372	415	460	491	530	578	608
	Magnar	117	149	179	198	228	270	312	330	372	415	457	491	533	578	608

Timer akkumulert over tid



Vedlegg G: Kode

```
#include <SPI.h>
#include "functions_for_LTC6811_2.h"
#include <stdint.h>

int flag = 7;

/*
 * This part is for customizing the BMS. Here you can change the speed of the
 * ADC, the under voltage, the over voltage, the max current in Ampere and the
 * amount of GPIOs in use.
 * The ADC modes to choose from are 422Hz = 0b00, 27kHz = 0b01, 7kHz = 0b10
 * and 26Hz = 11. Which mode you choose will determine the speed of the ADC.
 * Faster modes complete the conversion in a shorter time.
 */

int adc_mode = 0b01; //ADC fast mode. Please do not change the mode without
talking with one of the producers of the code.
float under_voltage_value = 3.2;
float over_voltage_value = 4.2;
unsigned int under_voltage_value_as_an_interger;
unsigned int over_voltage_value_as_an_interger;
int max_value_current = 50;
int amount_of_gpios = 3;

void setup() {

    int self_test_model = 0b01;
    bool self_test_fail;
    Serial.begin(9600);

    Serial.begin(9600); //we can monitor the results from the serial monitor
during testing
    pinMode (chip_select, OUTPUT);
    pinMode (flag, OUTPUT);
    SPI.begin();
    under_voltage_value_as_an_interger = under_voltage_value * 10000;
    over_voltage_value_as_an_interger = over_voltage_value * 10000;

    /*
     * setting up the clk speed as 1MHz, data order as MSB (most significant
bit first) and SPI_mode (CPOL = 1 and CPHA = 1, getting output edge as
```



```

FALLING and Data capture as RISING) when communicating with LTC6811.
Documentation on clk speed can be found in datasheet on
    * page 77. And documentation on dataorder can be found on page 57.
SPI_mode can be found on page 44. Please double check before testing.
    */
    SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
    SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
    SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
    init_PEC15_Table();

    wake_up_ic(); //waking up the ic

    start_self_test_cell_voltage_conversion(self_test_model, adc_mode);
    self_test_fail =
checking_if_self_test_cell_voltage_conversion_was_successful(self_test_model,
adc_mode);

    while(self_test_fail){
        digitalWrite(flag, LOW);
    }

    start_self_test_gpios_conversion(self_test_model, adc_mode);
    self_test_fail =
checking_if_self_test_cell_voltage_conversion_was_successful(self_test_model,
adc_mode);

    while(self_test_fail){
        digitalWrite(flag, LOW);
    }

    write_to_configuration_register(amount_of_gpios, 0xFFF);

    start_cell_voltage_adc_conversion(adc_mode);

    start_gpio_adc_conversion(adc_mode);
}

void loop() {
    int current_value;
    int discharge_cell_as_an_integer = 0;
    bool warning;

    start_cell_voltage_adc_conversion(adc_mode);

```

```
reading_cell_values_from_registers();

start_gpio_adc_conversion(adc_mode);

reading_gpio1_3_values_from_registers();

current_value = converting_gpio1_values_to_ampere();

discharge_cell_as_an_integer = discharge_control();

write_to_configuration_register(amount_of_gpios,
discharge_cell_as_an_integer);

warning = checking_values(current_value,
under_voltage_value_as_an_integer, over_voltage_value_as_an_integer,
max_value_current);
while(warning){
    digitalWrite(flag, LOW);
}

digitalWrite(flag, HIGH);
}
```

Vedlegg H: Delebestilling

H.1: Deler til testrevisjon

Article number:	Description	Price	Quantity	Total price	Link to site
ROE-1205S-ND	Isolated Module DC DC Converter 1 Output 5V 200mA 10.8V - 13.2V Input	26,2	3	78,6	https://www.digikey.no/product-detail/en/recom-power/ROE-1205S/ROE-1205S-ND/5684100?utm_adgroup=Power%20Supplies&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dynamic%20Search_EN_Product&utm_term=&productid=&gclid=Cj0KCQiAwf39BRCCARIsALXWETxZf6_392I2RrzsxwlgTb58gf0NwLLDNQkW3cluH9NqKBZtvYJzEHgaAir3EALw_wcB
945-2000-5-ND	Isolated Module DC DC Converter 1 Output 12V 250mA 36V - 72V Input	141,96	3	425,88	https://www.digikey.com/en/products/detail/recom-power/RS3-4812S/2321509
490-9970-1-ND	10µF ±10% 63V Ceramic Capacitor X7R 1210 (3225 Metric)	8,45	3	25,35	https://www.digikey.no/product-detail/en/murata-electronics-north-america/GRM32ER71J106KA12L/490-9970-1-ND/5026475?utm_adgroup=Capacitors&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dynamic%20Search_EN_Product&utm_term=&productid=&gclid=Cj0KCQiAwf39BRCCARIsALXWETzdnE4O9-8gcV-p98eyH6RfIWR8jKJlrzRjRoKypRQU6esapZH150aArOXEALw_wcB
445-8867-1-ND	10µF ±10% 25V Ceramic Capacitor X7R 1206 (3216 Metric)	9,33	3	27,99	https://www.digikey.no/product-detail/en/cga5L1X7R1E106K160AD/445-8867-1-ND/3248219
1276-2517-1-ND - Cut Tape (CT)	470pF ±10% 200V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric)	0,89	3	2,67	https://www.digikey.com/en/products/detail/samsung-electro-mechanics/CL21B471KDCNFNC/3890603
455-2257-ND	Male connector Header Through Hole, Right Angle 2 position 0.098" (2.50mm)	1,51	3	4,53	https://www.digikey.no/products/en?keywords=S2B-XH-A(LF)(SN)
445-8811-1-ND	1µF ±10% 25V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric)	3,2	6	19,2	https://www.digikey.no/product-detail/en/tdk-corporation/CGA4J3X7R1E105K125AD/445-8811-1-ND/3248259
478-353	0.1µF ±10% 16V Ceramic	1,51	3	4,53	https://www.digikey.no/product-detail/en/

8-1-ND	Capacitor X7R 0603 (1608 Metric)				avx-corporation/0603YC104KAZ2A/478-3538-1-ND/1024891
490-331 9-1-ND	4300pF ±5% 50V Ceramic Capacitor C0G, NP0 0805 (2012 Metric)	2,4	3	7,2	https://www.digikey.com/en/products/detail/murata-electronics/GRM2165C1H432JA01D/490-3319-1-ND/702860
A10997 5CT-ND	41.2 Ohms ±0.1% 0.167W, 1/6W Chip Resistor 0603 (1608 Metric) Thin Film	6,13	3	18,39	https://www.digikey.com/en/products/detail/te-connectivity-passive-product/RP73PF1J41R2BTF/A109975CT-ND/4034330
478-120 5-1-ND	10000pF ±10% 100V Ceramic Capacitor X7R 0603 (1608 Metric)	2,58	36	92,88	https://www.digikey.com/en/products/detail/avx-corporation/06031C103KAT2A/478-1205-1-ND/564237
ACS758 LCB-10 0B-PFF -T	Current Sensor 100A 1 Channel Hall Effect, Open Loop Bidirectional 5-CB Formed Leads, PFF	63,7 9	3	191,37	https://www.digikey.com/en/products/en?keywords=ACS758LCB-100B-PFF-T
945-300 04967- ND	3.9µH Unshielded Wirewound Inductor 1.32A 140mOhm Max 1812 (4532 Metric)	6,21	3	18,63	https://www.digikey.com/en/products/detail/recom-power/RLS-397/9920568
LTC681 11G-2#P BF-ND	Battery Battery Monitor IC Multi-Chemistry 48-SSOP	176, 26	6	1057,56	https://www.digikey.com/en/products/en?keywords=LTC6811G-2%23PBF
SSM3K 344RLF CT-ND	SMALL LOW ON RESISTANCE MOSFET	3,73	3	11,19	https://www.digikey.com/en/products/detail/toshiba-semiconductor-and-storage/SSM3K344R-LF/SSM3K344RLFCT-ND/7394091
P124DA CT-ND	RES 124 OHM 0.1% 1/8W 0805	2,75	9	24,75	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB1240V/P124DACT-ND/3074938
P15983 CT-ND	RES SMD 100 OHM 0.5% 1/16W 0402	0,89	36	32,04	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB1240V/P124DACT-ND/3074938
P24KD ACT-ND	RES 24K OHM 0.1% 1/8W 0805	2,75	3	8,25	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB243V/1465782?s=N4lgTCBcDaIApGcwGkAiBBawgFQLQDIUQBdAXyA
Z2161- ND	RELAY GEN PURPOSE SPST 15A 5V	38,6 4	9	347,76	https://www.digikey.com/en/products/detail/omron-electronics-inc-emc-div/G5CA-1A-E-DC5/699988?s=N4lgTCBcDaIFpqlwDZEFoByAREBdAvkA
311-620 KHRCT-	RES SMD 620K OHM 0.1% 1/10W 0603	2,67	6	16,02	https://www.digikey.com/en/products/detail/yageo/RT0603BRD07620KL/59279

ND					87?s=N4lgTCBcDalEoBUAMA2JBmAQnAlkg7CmEgNIAylAugL5A
RR08P 3.3KDC T-ND	RES SMD 3.3K OHM 0.5% 1/16W 0603	0,89	36	32,04	https://www.digikey.com/en/products/detail/susumu/RR0816P-332-D/432197
PNM08 05-5.0K BCT-ND	RES SMD 5K OHM 0.1% 1/5W 0805	21,2 3	3	63,69	https://www.digikey.com/en/products/detail/vishay-thin-film/PNM0805E5001BST5/2120328?s=N4lgTCBcDalAoDkCyAGAHCgrAWkwOhQGkAhAYQBVSEAREAXQF8g
A12960 9CT-ND	CRGCQ 0402 33R 1%	0,89	36	32,04	https://www.digikey.com/en/products/detail/te-connectivity-passive-product/CRGCQ0402F33R/8576211
311-475 HRCT- ND	RES SMD 475 OHM 1% 1/10W 0603	0,89	36	32,04	https://www.digikey.com/en/products/detail/yageo/RC0603FR-07475RL/727258?s=N4lgTCBcDalMwEYEFoAsB2ArACQEOGEAVZAOQBEBdAXyA
BSS308 PEH632 7XTSA1 CT-ND	MOSFET P-CH 30V 2A SOT23	3,11	36	111,96	https://www.digikey.com/en/products/detail/infineon-technologies/BSS308PEH6327XTSA1/2783466?s=N4lgTCBcDalEIGUEGYAMAOCgUQBIDZkwB2ADQBU EBBARgGFyBaAOQBEBdAXyA
277-106 31-ND	Busbar for high current. 6mm * 6mm * 1000mm	262, 16	1	262,16	https://www.digikey.com/en/products/detail/phoenix-contact/0402161/3608305?s=N4lgTCBcDa4OxwLQEYAMA2AzMxA5AliALoC%2BQA
576-257 4-1-ND			295	2948,72	

H.2: Deler til testrevisjon (etterbestilling)

Article number:	Description	Price	Quantity	Total price	Link to site
478-1324 -1-ND	470pF ±5% 50V Ceramic Capacitor C0G, NP0 0805 (2012 Metric)	1,2	3	3,6	https://www.digikey.com/en/products/detail/avx-corporation/08055A471JAT2A/563434
445-8811 -1-ND	1µF ±10% 25V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric)	3,2	6	19,2	https://www.digikey.no/product-detail/en/tdk-corporation/CGA4J3X7R1E105K125AD/445-8811-1-ND/3248259
490-3319 -1-ND	4300pF ±5% 50V Ceramic Capacitor C0G, NP0 0805 (2012 Metric)	2,4	3	7,2	https://www.digikey.no/product-detail/en/murata-electronics/GRM2165C1H432JA01D/490-3319-1-ND/702860
620-1320 -ND	Current Sensor 50A 1 Channel Hall Effect, Open Loop Bidirectional 5-CB Formed Leads, PFF	50,11	2	100,22	https://www.digikey.no/product-detail/en/allegro-microsystems/ACS770LCB-100U-PFF-T/620-1543-5-ND/4473982
P24KDA CT-ND	RES 24K OHM 0.1% 1/8W 0805	2,75	3	8,25	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB243V/1465782?s=N4lgTCBcDaIAPgCwGkAiBBAwgFQLQDIUQBdAXyA
A129609 CT-ND	CRGCQ 0402 33R 1%	0,89	36	32,04	https://www.digikey.com/en/products/detail/te-connectivity-passive-product/CRGCQ0402F33R/8576211
1727-114 8-1-ND	P-Channel 20V 2A (Ta) 400mW (Ta), 2.8W (Tc) Surface Mount TO-236AB	3,17	36	114,12	https://www.digikey.com/en/products/detail/nexperia-usa-inc/NX2301P215/2779960
576-2574 -1-ND	General Purpose Amplifier 1 Circuit Rail-to-Rail SOT-23-5	5,31	3	15,93	https://www.digikey.com/en/products/detail/microchip-technology/LMC7101AYM5-TR/1027706?s=N4lgTCBcDaIDIFkDCB2AjABjQQQJolFYBaAFQCUQBdAXyA
			92	300,56	

H.3: Deler til revisjon 2

Article number:	Description	Price	Quantity	Total price	Link to site
945-2901-ND	DC DC CONVERTER 5V 3W	18,47	2	36,94	https://www.digikey.com/en/products/detail/recom-power/RS3-4805S-H3/2321488
587-2247-1-ND - Cut Tape (CT)	CAP CER 10UF 50V X5R 1210	0,71	2	1,42	https://www.digikey.com/en/products/detail/taiyo-yuden/UMK325BJ106KM-T/1971961?s=N4lgTCBcDalKoFkDSBmMBWAQgKQlwAYA2JBAWgBUQBdAXyA
445-8811-1-ND - Cut Tape (CT)	CAP CER 1UF 25V X7R 0805 EPOXY	0,37	4	1,48	https://www.digikey.com/en/products/detail/tdk-corporation/CGA4J3X7R1E105K125AD/3248134?s=N4lgTCBcDalMIHECCAUAUgZgBoHYBKAjAKIEAMArANIFjIAilAugL5A
478-3538-1-ND - Cut Tape (CT)	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	0,18	2	0,36	https://www.digikey.com/en/products/detail/avx-corporation/0603YC104KAZ2A/1024795?s=N4lgTCBcDalAwDY4GYCaBhAjHALAaQEEAtMAkAXQF8g
620-1321-ND	SENSOR CURRENT HALL 100AAC/DC	9,7	2	19,4	https://www.digikey.com/en/products/detail/allegro-microsystems/ACS758LCB-100B-PFF-T/2042746?s=N4lgTCBcDalIIGEDKB2ArADgDIIIFoBGABmIIAUAxS-AFRAF0BfIA
118-CR0805-JW-330 ELFCT-ND - Cut Tape (CT)	RES SMD 33 OHM 5% 1/8W 0805	0,1	24	2,4	https://www.digikey.com/en/products/detail/bourns-inc/CR0805-JW-330ELF/3785297?s=N4lgTCBcDalMICUAMAOJBWAtAKQOqYGYCkBRAGQDEQBdAXyA
P24KDACT-ND - Cut Tape (CT)	RES 24K OHM 0.1% 1/8W 0805	0,31	2	0,62	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB243V/1465782?s=N4lgTCBcDalKICUCCA2JcBCYAsBmAaiALoC%2BQA
13-RT0603BRD0762 0KLCT-ND - Cut Tape (CT)	RES SMD 620K OHM 0.1% 1/10W 0603	0,3	4	1,2	https://www.digikey.com/en/products/detail/yageo/RT0603BRD07620KL/5927987?s=N4lgTCBcDalEoBUAMA2JBm

					AQnAlkg7CmEgNIAylAugL5A
RR08P3.3KDCT-ND - Cut Tape (CT)	RES SMD 3.3K OHM 0.5% 1/16W 0603	0,1	12	1,2	https://www.digikey.com/en/products/detail/susumu/RR0816P-332-D/432197?s=N4lgTCBcDalEpwAwA4CMA2ACgWgMy7GwBEQBdAXyA
Z2161-ND	RELAY GEN PURPOSE SPST 15A 5V	4,4	6	26,4	https://www.digikey.com/en/products/detail/omron-electronics-inc-emc-div/G5CA-1A-E-DC5/699988
P475DACT-ND - Cut Tape (CT)	RES 475 OHM 0.1% 1/8W 0805	0,31	24	7,44	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB4750V/2025634?s=N4lgTCBcDalKICUCCBaAbEuAhALAdgFYAGANRAFOBfIA
P100DACT-ND - Cut Tape (CT)	RES 100 OHM 0.1% 1/8W 0805	0,31	26	8,06	https://www.digikey.com/en/products/detail/panasonic-electronic-components/ERA-6AEB101V/1465724
455-2240-ND	CONN HEADER R/A 7POS 2.5MM	0,45	6	2,7	https://www.digikey.com/en/products/detail/jst-sales-america-inc/S7B-XH-A-LF-SN/1651038?s=N4lgTCBcDalCwFYEFoxjgBmQOQCIB0AXEAXQF8g
ZW-14-13-T-S-400-700-ND	CONN BRD STACK .100" 14POS	1,91	6	11,46	https://www.digikey.com/en/products/detail/samtec-inc/ZW-14-13-T-S-400-700/9802236?s=N4lgTCBcDalFoHUC0BGALKgzEgKkgykmgAzFIDsplAugL5A
478-7432-1-ND - Cut Tape (CT)	CAP CER 0.1UF 100V X7R 0805	0,21	2	0,42	https://www.digikey.com/en/products/detail/avx-corporation/08051C104M4Z2A/3660845?s=N4lgTCBcDalAwA44FYCMBhVcAsBZbAWmAllgC6AvkA
CR0805-FX-1003ELF CT-ND - Cut Tape (CT)	RES SMD 100K OHM 1% 1/8W 0805	0,1	4	0,4	https://www.digikey.com/en/products/detail/bourns-inc/CR0805-FX-1003ELF/3740947?s=N4lgTCBcDalIMICUAMA0JBWAtAMQBqYEYkkBmA UQBIs4AVTAOQBAdAFxAFOBfIA
Total			128	121,9	

