

Batteriovervåking

Øystein Andreas Aarflot

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Juli 2009

Hovedveileder: Trond Ytterdal, IET

Biveileder(e): Erik Hardeng, Kitron Development

Oppgavetekst

Moderne elbiler krever et effektivt batteri som gjerne er sammensatt av mange enkeltceller. For å få best mulig effekt og kapasitet må enkeltceller overvåkes, både ved lading og ved bruk for å hindre overlading og utlading samt for å varsle dersom en defekt enkeltcelle ødelegger et helt batteri.

Kitron Development har kontakt med to elbilprodusenter i Norge og ønsker å bygge kompetanse innen aktuell teknologi for slike biler. Oppgaven går ut på å teste et overvåkingssystem for et moderne elbilbatteri, vurdere bruk og se hvordan et slikt system virker ved feilsituasjoner.

Oppgaven gitt: 02. februar 2009
Hovedveileder: Trond Ytterdal, IET

Sammendrag

Denne rapporten presenterer arbeid med avsluttende masteroppgave ved institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved NTNU våren 2009.

Målsetningen ved denne oppgaven har vært å skape økt forståelse for hvorfor overvåkning av batterier i elbiler er viktig, hvordan dette gjøres, samt hvordan bruke overvåkingsdata til å sikre batteriets egenskaper.

Rapporten begynner med å presentere de ulike batteritypene som tidligere har vært i bruk og litium-ion som stadig blir mer aktuell. Selve arbeidet har vært konsentrert rundt litium-nanofosfat batterier. De ulike kildene til feil er presentert. Måleparametere og vanlige metoder for å korrigere avvik og sikre battericellene er vurdert. Teoridelen avsluttes med ett forslag til et overvåkings og korrigerings system for batterier som skal være i stand til å sikre batteriets egenskaper på best mulig måte.

Eget arbeid har videre bestått i å teste ulike egenskaper ved batteriet. Det har gjennom målinger blitt verifisert kilder til feil, og håndtering av disse med krets fra Linear Technology.

Forord

Forskning på elbiler og alternative energikilder for persontransport foregår over hele verden i stor skala. En stor del av denne forskningen går nettopp ut på å utvikle nye batterityper med bedre egenskaper for å lagre store mengder energi med minst mulig vekt og volum mens levetiden må være så god som mulig. Utviklingen går dessverre ikke så raskt at vi venter nye typer superbatterier innen kort tid, derfor må dagens teknologi benyttes på best mulig måte. Alle batterityper som eksisterer i dag har begrenset levetid, men ved smart bruksmønster vil disse vare vesentlig lengre enn ved feil bruksmønster.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	1
Motivasjon for denne oppgaven	1
Problemstilling.....	1
Formålet med denne rapporten.....	2
2. Teori om batterier og overvåkningsteknologi.....	3
2.1 Viktige begreper ved batterier	3
Batteri.....	3
Kapasitet.....	3
Normallading.....	3
Nominell celle spenning	3
Ladenivå	3
Ladefaktor	3
Energitetthet	3
2.2 Krav som stilles til et elbil batteri	4
Sikkerhet.....	4
Driftsikkerhet.....	4
Rekkevidde	4
Levetid	4
2.3 Tilgjengelige batteriteknologier	5
Blybatterier.....	5
Nikkelbaserte batterier.	5
Litium ion.....	5
2.4 Feilkilder for moderne batteriteknologi.....	6
Avvik mellom enkeltceller i en batteripakke.....	6
Overlading og underutlading.....	6
Overoppheting	7
Batterienes begrensede levetid	7
2.5 Hva batterier må sikres mot.....	8
Fysiske skader.....	8
Feil lading av litium ion batterier	8

Ubalanse i ladenivå mellom celler.....	8
Over og underlading.....	10
Høye temperaturer.....	10
2.6 Overvåkning av et driftsbatteri	10
Hva som må overvåkes.....	10
Valg av overvåkningskrets	10
Virkemåte for LTC6802.....	11
Feilkilder for målinger	11
Målte parameterne med LTC6802	11
Metoder for å sikre lengre levetid på batteripakke når man har overvåkningsdata	12
Cellebalansering	12
3. Teoretiske beregninger	13
Tabell for å beregne ladenivå ut fra cellespenning	13
Dimensjonerings i beregninger.....	13
Eksempel for Buddy batteri erstatning med A123systems litium batterier.....	14
Beregnet oppførsel av ubalansert batteripakke under utladning og ladning	14
Hvordan sørge for cellebalansering	15
Beregnet opplade syklus med passiv balansering ved lading	17
Hvordan bruke data fra LTC6801 for å bevare batteriet.....	17
4 Forslag til overvåkningssystem.....	19
4.1 Funksjoner i de ulike blokkene	19
LTC6802	19
MCU – Styringssentral	19
Motorkontroller	20
Batterilader.....	20
Førerinfo.....	20
Temperaturstyring.....	20
5. Måleoppsett	21
Merknader til målinger.....	21
Komponentliste	21
5.1 Generelt måleoppsett	22
Oppkobling av målekrets mot pc	22
Software for pc som kommuniserer med LTC6802.....	23
Last beskrivelse	24

5.2 De ulike målingene	25
Måling med balansert batteripakke	25
Ladenivå og målt spenning.....	25
Måling med ubalansert batteripakke	25
Balansering av batteripakke med LTC6802	25
Ulastet cellespenning og temperatur.....	26
Måling av cellespenning dersom en celle i serien er kjølt ned	26
Polaritetsvending av enkeltcelle som følge av påtrykt strøm.....	26
6. Måleresultater.....	29
6.1 Måling med balansert batteripakke	29
6.2 Ladenivå og målt spenning.....	29
6.3 Måling med ubalansert batteripakke	30
6.4 Balansering av batteripakke med LTC6802	31
6.5 Ulastet cellespenning og temperatur.....	31
6.6 Måling av cellespenning dersom en celle i serien er kjølt ned.....	31
6.7 Polaritetsvending av enkeltcelle som følge av påtrykt strøm.....	32
7. Diskusjon	33
8. Konklusjon	35
9. Kilder.....	37
10. Vedleggsliste.....	37

1. Innledning

Dagens batteriteknologier utvikles stadig med nye teknologier som har høyere energitetthet, raskere lading og lengre levetid som viktige egenskaper. Dette gjør sitt til at elbiler kan kjøre stadig lengre uten å være avhengig av lading. Dette fører videre til at batterier blir en mer aktuell energikilde i biler. Med økende kapasiteten øker sikkerhetsrisikoen ved batteriene, og de blir mer følsomme for feil bruk. Større mengder energi lagret i en liten pakke gjør mer skade dersom det oppstår en brann eller eksplosjon. Å sørge for sikkerheten er altså noe av det aller viktigste når ny teknologi tas i bruk i biler.



Figur 1 – Tesla Roadster benytter i dag litium ion batterier.

Med moderne batterityper har man også fått nye utfordringer som følge av flere og mindre enkeltceller. De har blitt mer følsomme for feil bruk, og selv små avvik kan over relativt kort tid føre til ødelagt batteri. Tesla har f. eks 6800¹ battericeller, og det sier seg selv at å overvåke hver enkelt celle krever et komplisert system.

Motivasjon for denne oppgaven

Forskning på elektrisk drift av biler foregår i stor skala over hele verden. Det forskes og utvikles stadig nye batterier som gir bedre ytelse og levetid. Likevel går ikke denne utviklingen så fort som man skulle ønske. For å kunne produsere elbiler i dag må man velge batteriteknologier som man med sikkerhet vet fungerer selv om ytelse og levetid fortsatt har begrensninger.

Problemstilling

I denne oppgaven er det fokusert på hvorfor man er avhengig av å overvåke enkeltceller i ett større batteri og hvordan man kan oppnå best mulig ytelse og levetid. Dette ønsker man å oppnå ved å overvåke cellespenning og benytte innhentet informasjon fra batteriet til å styre lading og utlading. Med innsamlet informasjon og gode styringsmuligheter kan man sikre forhold for batterier i samsvar med produsentens anbefalinger for batteriet.

¹ "The Tesla Roadster Battery system" av Tesla Motors, er tilgjengelig på : http://www.teslamotors.com/display_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf side 2.

Formålet med denne rapporten

Rapporten tar for seg bruk av litium batterier i elbiler. Hvilke utfordringer man står ovenfor og hvordan løse disse på en hensiktsmessig måte. Det som er ett problem for elbiler i dag er dens begrensede rekkevidde, tidkrevende lading, og begrenset levetid for batteriet. Det å kunne kontrollere batteriene på en slik måte at både levetid og ytelse sikres på best mulig måte vil dermed være med på å gjøre elbiler mer tilgjengelige og attraktive i anskaffelse. Formålet med denne rapporten blir dermed å vise hvorfor det å overvåke og korrigere enkeltcellers ladenivå vil være med på å sikre batteriets egenskaper.

2. Teori om batterier og overvåkningsteknologi

2.1 Viktige begreper ved batterier

Her blir begreper og uttrykk spesifikk for batteriteknologi som er brukt i denne rapporten presentert. De ulike definisjonene er hentet fra boka "Batteriet – Den moderne strømkilde, av Lauritz Holdø"

Batteri

Ett batteri er et lager av elektrisk energi, satt sammen av mange battericeller.

Kapasitet

For sekundærbatterier oppgis dette som $C_a = [Ah]$ hvor a angir utladetid i timer, og $[Ah]$ kapasitet i ampere timer. (1)

For $C_5 = 10 Ah$ betyr dette at last er gitt $\frac{10}{5} = 2 Ah$ for å oppnå 10 Ah kapasitet på batteriet. (2)

Ofte benyttes kun bokstaven C uten indeksering, og da menes C_1 .

Normallading

Anbefalt ladestrøm for ett batteri, oppgis som aC , hvor a er en konstant, og C er batteriets kapasitet.

Nominell celle spenning

Angir en gjennomsnittlig spenning ved normal belastning.

Ladenivå

Angir batteriets gjenværende energi i prosent av fulladet batteri.

75 % ladenivå indikerer at batteriet har lagret tre firedeler av maksimal energi.

Ladefaktor

Virkningsgrad for opplading. $\frac{\text{Tilført Energi}}{\text{Lagret energi i batteriet}}$ Typiske verdier 1,2 - 1,5. (3)

Resterende energi går til varme.

Energitetthet

Ett mål for energi per volum eller per vekt. Benyttes for å vurdere ulike batterityper når man har begrenset plass eller vektbegrensninger med krav til minimums energimengde.

Angis enten i watt timer per kilogram $[Wh/kg]$ eller i Watt timer per liter $[Wh/l]$.

2.2 Krav som stilles til et elbil batteri

Sikkerhet

Store mengder batterier inneholder også store mengder energi samt kjemikalier som kan være skadelige for både brukerne av bilen og miljøet. Det er derfor særdeles viktig at man til enhver tid er sikker på at det ikke medfører fare for verken brukere eller omgivelser. Ved en eventuell ulykke er det og viktig å hindre lekkasje av farlige kjemikalier.

For litiumbatterier er det viktig å sørge for at disse ikke kan overopphetes eller deformeres på en slik måte at de fører til brann eller i verste fall eksplosjon.

Det har i media de siste årene vært flere oppslag hvor datamaskiner og mobiltelefoner har tatt fyr og eksplodert som følge av overoppheting. Senest 14. Mai 2009 kom en melding til berørte HP brukere om tilbakekalling av batterier². Denne annonseringen antas å gjelde 70.000 batterier. Flere leverandører av batterier har tilbakekalt batterier for enorme summer. Om man i en bil i fart får en eksplosjonsartet brann er det lett å se for seg konsekvensene dette vil få – ikke bare for brukere av bilen, men også for hele elbil bransjen.

Driftsikkerhet

Det forventes mye av en ny moderne bil når det kommer til driftsikkerhet. Moderne biler har få stopp, de har sjeldent problemer, og selv slidedeler har fått lang varighet. For nye biler er det omtrent helt utenkelig med motorstopp og akutte driftsfeil.

Man skal ha ett fåtall verkstedbesøk, ideelt sett bare en årlig kontroll med smøring og eventuelt bytte av de mest nødvendige slidedeler. Batteriet må i så måte være vedlikeholdsritt. Det må heller ikke være noen operasjoner utenom å plugge inn laderen når man er ferdig med dagens kjøretur og sørge for at bilen får sin årlige kontroll. Om man ønsker kan man gi brukerne tilgang til å velge ulike innstillinger for lading og påvirke hvor hurtig batteriene skal lades opp.

Rekkevidde

For at en bil skal være attraktiv må rekkevidden dekke brukernes daglige behov for transport. Statistisk sentralbyrå [SSB] har en statistikk for *passasjerkilometer per innbygger per dag*³ som tilsier at nordmenns gjennomsnittlige daglige behov er mer enn 29,05 km. Statistikken tilsier også at dette behovet øker i tiden fremover. Det er derfor rimelig å sette som krav at rekkevidden bør være vesentlig lengre enn dette minimumskravet. De fleste ønsker også å kunne bruke bilen på lengre strekninger engang iblant, så lengre rekkevidde er absolutt ønskelig, ikke minst om man kanskje også kan klare seg med å lade sjeldnere.

Levetid

Gjennomsnittsalder på personbiler i Norge er 10,2⁴ år. Dette i så måte bør brukes som ett minimum av levetid på en batteripakke. I løpet av 10 år med en daglig ladesyklus vil en batteripakke være ladet og utladet 3650 ganger.

Krav: Minimum 3650 opp og nedlade sykluser/10 år.

² <http://www.cpssc.gov/cpscpub/prerel/prhtml09/09221.html>. Se vedlegg.

³ www.ssb.no/transport/Tall_fra_2007. Webservice dato 06-03-2009

⁴ Tall hentet fra SSBs Gjennomsnittsdata om biler

2.3 Tilgjengelige batteriteknologier

Blybatterier

Relativt lav energitetthet, typisk mellom 30 -40 Wh/kg⁵.

Den store fordelen er at en batteripakke er relativt rimelig i anskaffelse.

Ulempene er lav energitetthet, må lades langsomt, har høy selvutlading, og kort levetid. For en større elbiler med høyere krav til ytelse har blybatterier ikke gode nok egenskaper til å kunne benyttes.

Benyttes i dag i små og enkle elbiler som f.eks Buddy⁶, dette i hovedsak grunnet pris.

Nikkelbaserte batterier.

Benyttes i svært liten grad i elbiler i dag, tidligere har blant annet Citroens Berlingo blitt utstyrt med denne batteritypen. Energitetthet er typisk 30 – 80 Wh/kg⁷. Litt høyere enn blybatterier, men fortsatt bare halvparten av litium batterier. Ulemper er både pris, lav energitetthet, og kort levetid. Disse tåler heller ikke gjentatte ganger å lades opp fra halvfullt uten å miste kapasitet, og bør altså lades helt ut for hver gang.

Litium ion

Dagens teknologi som gir høyest energi i forhold til vekt. Finnes i flere ulike varianter med ulik kjemi hvor alle har litium som grunnkomponent. Denne typen batterier har lav selvutlading, og kan stå uten lading i lengre perioder uten å behøve ladning før bruk. Det finnes i dag en rekke forskjellige typer litium ion batterier som benytter ulike katodematerialer. De ulike litium ion batteritypene får dermed ulike egenskaper som gjør at de også får ulike bruksområder. I tabellen nedenfor er de vanligste typene av litium ion batterier presenter med sine egenskaper og bruksområder.

⁵ Wikipedia artikkel http://en.wikipedia.org/wiki/Lead_acid_battery 20.05.2009

⁶ Brukerveiledning Buddy, se vedlegg.

⁷ Wikipedia artikkel http://en.wikipedia.org/wiki/Nimh_battery 20.05.2009

Kjemi	Nominell spenning [V]	Øvre spenningsgrense [V]	Lade og utlade rater Kontinuerlig/stop [C]	Energitetthet [Wh/kg]	Bruksområder i dag	Kommentar
Kobolt (Co)	3.6	4.2	<1	110-190	Mobiltelefoner, datamaskiner og kameraer	Mest benyttet til små bærbare enheter.
Mangan (Mn)	3.7 – 3.8	4.2	10 / 40	110-120	Elektrisk verkøy og medisinsk utstyr	Lav indre motstand gir høy maks strøm, men lavere energitetthet
NCM (Nikkel, Kobolt, Mangan)	3.7	4.1	5/30	95-130	Elektrisk verktøy og medisinsk utstyr	Kompromiss mellom høy strømråde og høy kapasitet
Fosfat (nano phosphate) LifePoe4	3.2-3.3	3.6	70/120	95-140	Elektrisk verktøy, medisinsk utstyr, ELBILER	Høy strømråde, lang levetid, "brann og eksplosjonssikkert"

Verdiene i tabellen er hentet fra <http://www.buchmann.ca/Article27-Page1.asp>. Artikkel av Isidor Buchmann ved Cadex Electronics Inc. Skrevet i 2006, med tillegg hentet fra datablad på LifePoe4.

For drift av elektriske biler er LifePoe4 spesielt interessante på grunn av de særs gode egenskapene i forhold til brann og eksplosjonsfare. Denne teknologien har også veldig god levetid. Videre i oppgaven er det fokusert på denne teknologien som i hovedsak produseres av A123systems.

2.4 Feilkilder for moderne batteriteknologi

Avvik mellom enkeltceller i en batteripakke

Avvik mellom enkeltceller oppstår vanligvis i produksjonen av batteriene. Avvik mellom enkeltceller kan også oppstå som ett resultat av ulik aldring, samt ulike temperaturer over tid. Ett vanlig problem med litium ion batterier er at en liten indre kortslutning kan gi enkeltceller høyere selvutladning. Effekten av avvik mellom celler kan minimaliseres med kretser som sørger for å balansere ladenivået mellom de ulike cellene.

Overlading og underutlading

Overlading vil si slett at ladingen ikke stopper når batteriet er fullt ladet. Kan gi litt høyere kapasitet når det brukes fra overladet, men forringer batteriets levetid vesentlig. Dersom batteriet overlades for mye vil det medføre stor varmeutvikling i batteriet og det vil ødelegges fullstendig. Dette kan medføre brantilløp i selve batteriene, og i batterienes omgivelser.

Underutlading fører i likhet med overlading til redusert levetid. Dersom enkeltceller har vesentlig lavere kapasitet enn resten av cellene i batteriet vil man også kunne risikere at påtvungen strøm fra de andre cellene fører til at polariteten snus i den dårlige cellen.

For LifePoe4 batterier er det også oppgitt at full utlading ikke bør forekomme de første 30⁸ ladesyklusene for å sikre best mulig levetid på batteriet.

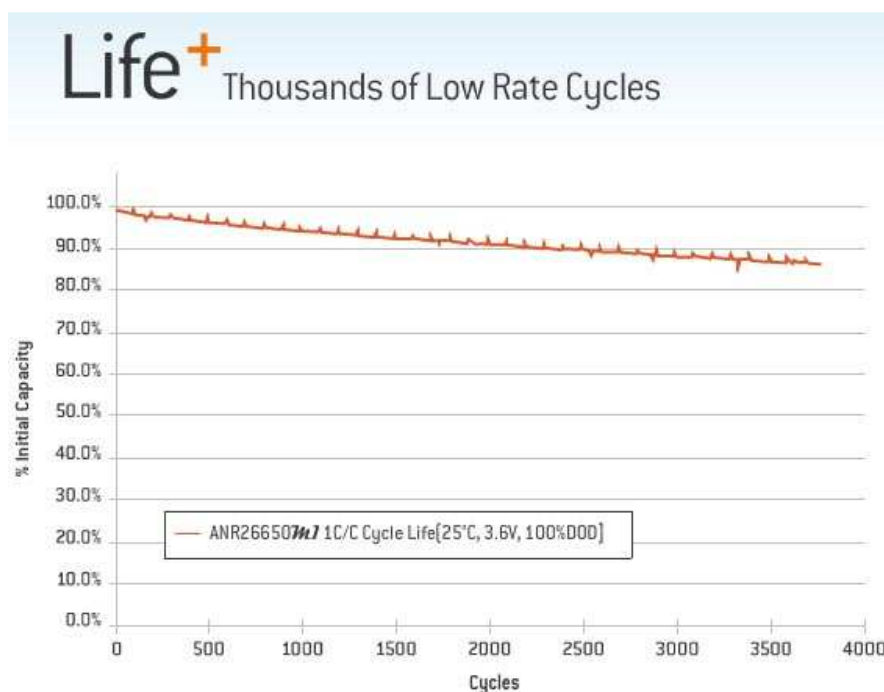
Overoppheting

Overoppheting av battericeller kan føre til at batteriet går i stykker, at levetiden blir vesentlig redusert, samt gi fare for brann og eksplosjon i batteripakken. Lifepo4 batterier er påstått ikke å utgjøre brann eller eksplosjonsfare ved overoppheting, men nærliggende materialer vil fortsatt kunne ta skade av høye temperaturer. Brannsikre materialer rundt batteriet vil altså være en viktig del av passiv sikkerhet.

Batterienes begrensede levetid

A123systems oppgir for LifePoe4 batterier at de degraderes avhengig av antall ladesykluser og aldring. Avhengig av temperatur og gjennomsnittlig lade og utlade strøm oppgis at de etter 1000 sykler har mellom 77 og 95 % av opprinnelig kapasitet⁹. Å unngå for rask lading samt å sørge for riktig temperatur vil dermed være med på å øke batterienes levetid. Ett større batteri vil også dermed få lengre levetid da belastningen på det vil være lavere ved samme effektuttak. Å beregne ett batteri slik at kapasiteten er stor nok til å unngå lange perioder med mer enn 1C last vil altså være en vesentlig faktor for å gi batteriet lengst mulig levetid.

Ved ren batterisykling med 1C belastning har A123systems gitt grafen nedenfor, som angir opptil 4000 sykler uten vesentlig degradering av batteriet.



Figur 2 - Hentet fra ANR26650M1_Datasheet_FEB2007-1

⁸ A123systems datablad for ANR26650

⁹ A123systems datablad for ANR26650

Sammenliknet med andre litium batterier har LifePoe4 litt lavere energitetthet for nye batterier, men de har også bedre levetid. På den måten får de høyere energitetthet enn de andre teknologiene etter hvert som batteriene påvirkes av aldring.

2.5 Hva batterier må sikres mot

Fysiske skader

Ved fysiske skader vil tradisjonelle litium-ion batterier begynne å brenne intenst. Med teknologien LifePo4 er dette problemet delvis løst, batteriene blir fryktelig varme, men flammer og eksplosjon uteblir. Uansett dør batteriene som følge av fysiske skader. En skade vil dermed medføre bytte av batteri uavhengig av hvilken type litiumbatteri som velges. Å sikre batteriet mot skader som følge av støt, kollisjoner og mindre uhell vil dermed være like viktig som elektronisk overvåkning av batteriet. Samtidig er ikke bytte av batteripakke interessant dersom bilen likevel ellers er totalvrak. Da blir det viktigste å hindre brann samt skade på personer som følge av varmeutvikling.

Feil lading av litium ion batterier

Litium ion batterier skal lades med konstant strøm frem til de når toppspenning, for så å lades med konstant spenning frem til ladestrømmen gjennom batteriet er faller under 0,1C. Hvor høy strøm man tillater under selve ladingen er avhengig av batteriet.

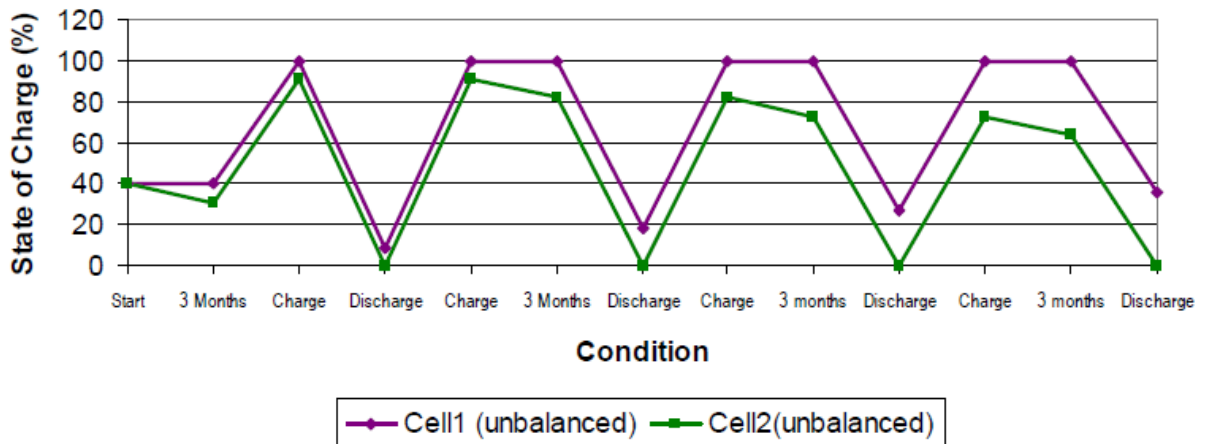
For de fleste typer litium batterier er 1C angitt som normallading. Enkelte batterier tillater også hurtiglading, og da er det gitt i databladet hvor høy ladestrøm som tillates. Avhengig av type litium batteri som benyttes oppgis det i databladene hvor hurtiglading er mulig også at det alltid gir lengre levetid for batteriet dersom man i hovedsak benytter normallading. Dette skyldes i hovedsak at temperaturen i battericellene stiger ved hurtiglading. Annen faktor som er verdt å merke seg er at ladefaktoren stiger, altså må det tilføres mer energi for å lade samme batteriet dersom man lader raskere. Dette skyldes at større del av energien går over til varme.

Ubalanse i ladenivå mellom celler

Ubalanse i ladenivå kan oppstå i alle typer batterier hvor celler er lagt i serie. Det betyr at ladenivået i seriekoblede celler er ulikt. Vanligste årsak er produksjonsavvik og indre kortslutning i enkeltcelle. Det er også sannsynlig at ulik temperatur mellom enkeltceller som lades opp eller ut vil gi utslag.

Ubalanse i ladenivå fører til at brukbar effekt i pakken aldri blir mer enn kapasiteten i den lavest ladede cellen. Over tid er det også sannsynlig at den dårligst ladede cellen vil få degradert ytelse i forhold til de andre som følge av at den blir helt utladet hver gang.

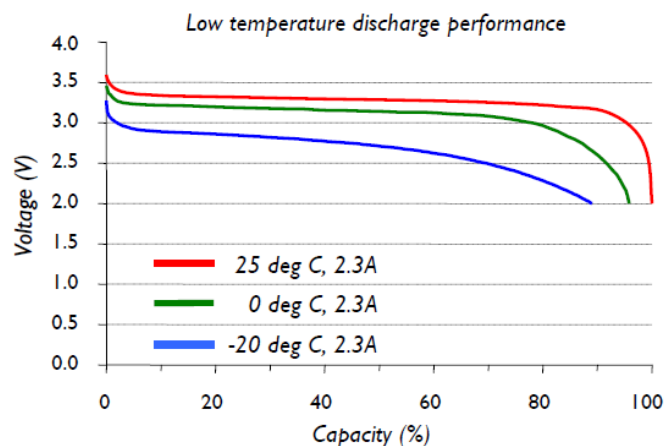
Dersom man ser på ett avvik i ladenivå som øker over tid, og dette ikke korrigeres, vil man få følgende kapasitetskurve i de ulike cellene.



Figur 3 – Hentet fra "Cell balancing maximizes the capacity of multi-cell Li-Ion battery packs – Av Carlos Martinez, Intersil, Inc."

I dette eksempelet er det satt at den ene cellen har 3 % selvutladning per måned som følge av indre kortslutning i enkeltcelle. Batteriene har 3mnd lagring mellom hver ladesyklus. Her er det i tillegg gitt at utladingen stoppes når første celle måler laveste anbefalte spenning og at ladingen stoppes når første celle når høyeste spenning. Når man vet at kapasiteten til hele batteriet er begrenset til laveste cellekapasitet medfører dette at avvik i celler uten balanseringskretser raskt vil gi redusert kapasitet og få behov for balansering og eventuelt bytte av hele batteriet dersom det ikke avdekkes i tide.

Ubalanse i batterier kan også oppstå dersom cellene i batteriet har ulik temperatur under bruk. Ser man på grafer for "lav temperatur utlading" gitt av A123systems ser man at en celle som holder lavere temperatur raskere får spenningsfall, og går tom for energi tidligere enn en celle som holder høyere temperatur. I et scenario der bilen står innendørs, og at man kjører ut om vinteren synker temperaturen i de ytterste cellene raskere enn i de innerste. På den måten vil de kaldeste cellene få lavere ladenivå enn de varmeste. Denne effekten kan ikke forhindres uten temperatur regulering av batteriet, men det vil være viktig å korrigere den så raskt som mulig ved balansering.



Figur 4 – Hentet fra ANR26650M1_Datasheet_FEB2007-1

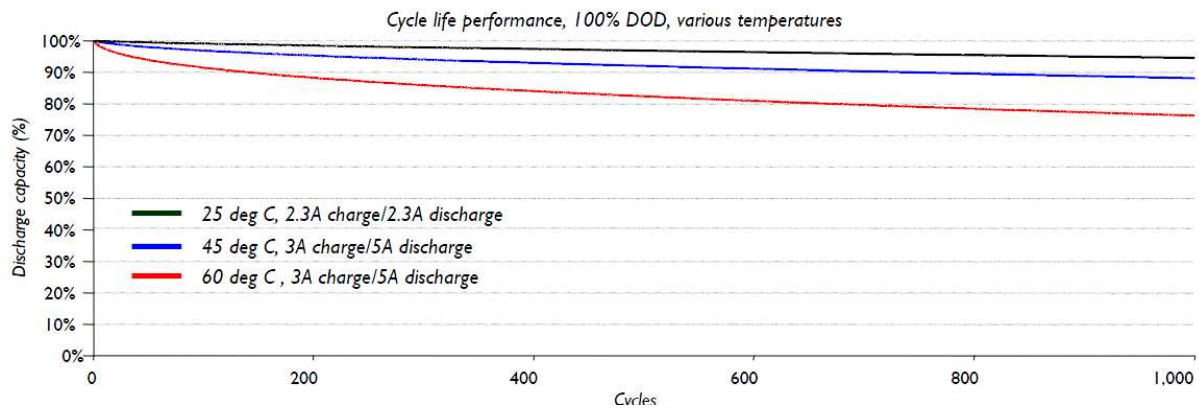
Over og underlading

Både over og underlading påvirker batteriets levetid i negativ retning samt at det kan ødelegges umiddelbart dersom prosessen ikke stoppes.

Den eneste måten å unngå over og underlading på er å overvåke battericellenes spenning slik at utlading og lading alltid stopper idet første celle i batteriet når toleransegrensen.

Høye temperaturer

Dersom batteriet benyttes med celle temperatur over 25 grader C degraderes batteriet vesentlig raskere.



Figur 5 – Hentet fra ANR26650M1_Datasheet_FEB2007-1

Ifølge databladet er forskjellen ganske stor ved testsykling ved ulike temperaturer. Mens det forventes ca 5 % degradering etter 1000 sykluser ved 25°C er det ved 60°C mer enn 20 %. Dette tilsier at batteriene degraderes 4 ganger så fort når temperaturen øker fra 25 til 60°C.

2.6 Overvåkning av et driftsbatteri

Hva som må overvåkes

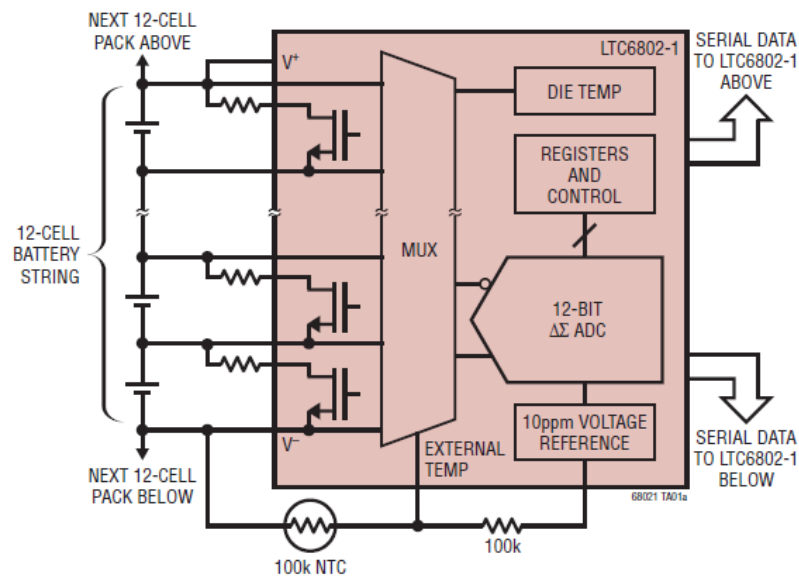
For å oppnå lengst mulig levetid for litium batteripakker er de vesentlige faktorene som oppgis temperatur, riktig spenningsområde, samt å unngå for høy belastning. Disse faktorene kan kontrolleres dersom man til enhver tid foretar de nødvendige målingene i hele systemet.

Valg av overvåkningskrets

Det finnes i dag ett utall ferdige integrerte kretser (IC) for overvåkning av litium batterier. De fleste har begrensning på antall battericeller i serie. Linear Technology produserer en IC som er spesielt beregnet på overvåkning av større batteripakker i kraftkrevende elektriske applikasjoner. I dag er dette den eneste integrerte kretsen som kan seriekobles og på den måten overvåke enkeltceller i batteripakker med spenning opp til 1KV. I tillegg til spenning har denne kretsen intern temperaturmåling, samt tilkoblinger for 2 eksterne temperatursensorer. For å kommunisere med sentralt datasystem har kretsen har et serielt grensesnitt. Dette grensesnittet benyttes også for seriekobling av målekretsene.

Virkemåte for LTC6802

LTC6802 har en inngang, og en balanseringsutgang for hver enkeltcelle, innganger for inntil to temperatursensorer og kommunikasjonsgrensesnitt for seriekobling av flere enheter samt for systemet som bruker innhentet informasjon. Kretsen må kontinuerlig mates med konfigurering for målinger fra sentral styringsenhet for å fungere. Enklere forklart sender sentralt system en henvendelse til LTC6802, som returnerer innhentet data. Når det sentrale systemet har samlet inn nødvendig data kan det igjen sendes konfigurering tilbake som iverksetter tiltak som sikrer batteriets egenskaper.



Figur 6 – Hentet fra Datablad LTC6802-1

I tillegg til seriellkommunikasjon for konfigurering har LTC6802 også et sett med konfigureringsspinner som avgjør modus for kretsen. Disse er spesielt viktige å sette riktig når man skal skrive konfigurering til registre i ulike seriekoblede kretsene.

Feilkilder for målinger

Presisjon i måleinstrumenter er den mest vesentlige for eventuelle måleavvik for spenningen. Linear Technology oppgir en presisjon på 0,1 %, noe som ved 3.2V (nominell celledspenning LifePoe4) tilsier ett maksimalt avvik på 3,2mV. Selv om det er et lite avvik i spenning kan utslaget i målt ladenivå bli ganske stort for batterier som har flat utladekurve.

Målte parameterne med LTC6802

Spenning på ulastet batteri kan benyttes temmelig presist til å angi gjenværende energi i batteripakken. Dette brukes til å fastslå resterende kjørelengde, og om det er ubalanse i lagret energi mellom enkeltceller i batteriet. For å bruke dette forutsettes nøyaktige målinger av spenning, samt at man kjenner batteriets egenskaper godt. Her vil man for batterier med flat utladekurve få upresise restkapasitets beregninger selv med små feilmarginer.

Målt spenning over battericellene må også benyttes for å styre lading og batterikutt når spenningen går mot grensene for anbefalt spenning. På den måten sikrer man at batteriet ikke blir utsatt for

degradering og gir skade eller forringelse av levetiden på grunn av feil ladenivå. Uten slik beskyttelse vil man ikke være sikret at brukere strekker kjørelengden lengre enn batteriene faktisk tåler.

Metoder for å sikre lengre levetid på batteripakke når man har overvåkningsdata

Unngå overlading og dyp utlading av enkeltceller i tillegg til å unngå høye temperaturer.

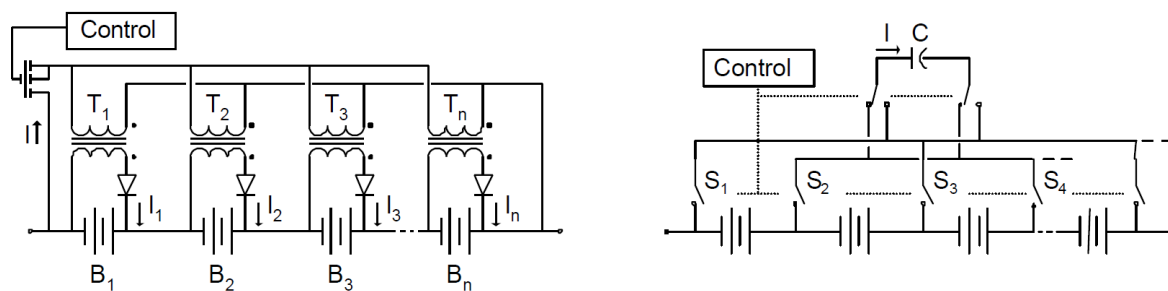
Overvåkning benyttes til å fastslå behovet for balansering, samt at den bør brukes til å kutte lading og utlading ved riktig tidspunkt. Dersom batteripakken ofte lastes hardt vil det kunne indikeres med varsling om at batteriet tømmes for raskt og at dette påvirker batteriets levetid i negativ retning. En tilbakemelding til føreren om at det er en uøkonomisk kjørestil.

Det er viktig å merke seg at LTC6801 ikke alene sørger for batteriets levetid. Kretsen er bare ett bindeledd mellom batteriene og selve styringen av batteriene. Laderegulering og balansering må i så måte skje på grunnlag av batteristatus som samles inn og bearbeides av sentral styringsenhet.

Cellebalansering

Det benyttes i hovedsak 2 metoder for balansering av celler i en batteripakke, aktiv og passiv.

Aktiv cellebalansering benytter seg av muligheten til å lade de cellene med minst energi med energi fra celler som har mer energi. Med kompliserte kretser får man dermed utnyttet all energi i batteripakken. Dette gjøres i dag i på to ulike måter. Den ene metoden benytter en kondensator som fortløpende kobles inn på en og en battericelle i en evig løkke. På den måten flyttes energi fra høyest ladet til lavest ladet battericelle. Den store ulempen med denne metoden er at den er relativt lite effektiv. Den andre metoden går ut på å benytte en liten spole for hver celle, samt stor primærspole for hele batteriet. Da pulser man primærspolen og kobler inn sekundærspoler på cellene som har lavest spenning slik at disse blir ladet opp. Begge disse metodene for aktiv balansering krever relativt kompleks og kostbar elektronikk.



Figur 7 - Aktiv balansering, induktiv og kapasitiv, hentet fra "Battery Cell Balancing : What to balance and how – av Yevgen Barsukov (TI).

Passiv balansering baserer seg på å lade ut cellene med høyest ladenivå til samme ladenivå som de med minst energi. Benytter en motstand og transistor som bryter for å lade ut cellene.

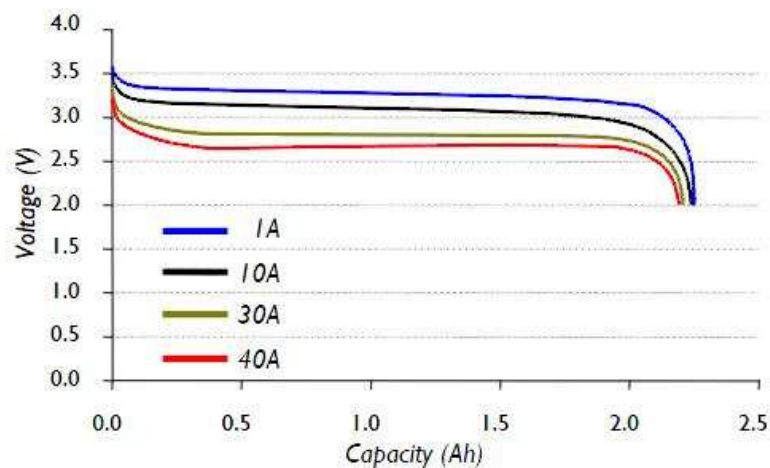
Passiv balansering ved lading benytter samme krets som passiv balansering, bare at det utføres med påtrykt ladestrøm. Når denne metoden benyttes er det viktig at motstand og transistor er i stand til å tilsidesette hele ladestrømmen for å unngå overlading av cellene med høyest ladenivå.

3. Teoretiske beregninger

Alle beregninger er basert på tilgjengelig informasjon om A123systems LifePoe4 batterier og Linear Technology's LTC6802 krets for batteriovervåkning.

Tabell for å beregne ladenivå ut fra celledspenning

Fra datablad A123 systems er det oppgitt en utladekurve som følger



Figur 8 – Hentet fra ANR26650M1_Datasheet_FEB2007-1

Grafen ovenfor kan ikke brukes til å gi nøyaktige tall for ladenivå på grunn av ulik spenning ved belastning. For å kunne måle ladenivå presist er man avhengig av å kunne måle på ulastet spenning, og ha egen tabell for dette.

Tabellen nedenfor er lest av grafen og gjengitt ved 25 grader Celsius og 1A last.

Ladenivå (90 %)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Spenning (V)	3,60	3,45	3,36	3,35	3,32	3,30	3,25	3,25	3,22	3,20	2

Tabell 2

Denne tabellen kan gi en god indikasjon på celledspenningen man forventer når det måles på ulastet batteri og vil derfor bli sammenliknet med målte verdier for ulastet spenning under målinger av ladenivå.

Dimensjoner i beregninger

Der det har vært hensiktsmessig har det blitt benyttet Elbilen Buddy sitt batteri til effekt og kapasitets beregninger.

Data for ett Buddy batteri hentet fra Buddy brukerveiledning:

Spenning 72V

Kapasitet 182Ah

Maks utladrøm: 300A

Effekt ved ladning opp til 2200w

Eksempel for Buddy batteri erstatning med A123systems litium batterier

Dagens Buddy batteri er 72V og har en kapasitet på 182Ah.

De ulike batteriene har fra datablader følgende kapasitet:

Aktuelt batteri	Kapasitet [Ah]
A123 ANR16650	1,1
A123 ANR26650	2,3
A123 32157	8

Dette gir tabell for antall celler i serie, parallell og totalt antall

Celletype	Antall i serie	Antall i parallell	Totalt antall
A123 ANR16650	22	166	3652
A123 ANR26650	22	80	1760
A123 32157	22	23	506

Maksimal last på 300A gir utladrøm opp til 1,64C. Anbefalt maksimal utladrøm for best mulig levetid er 1C, altså vil man oppnå lengre levetid for batteriet dersom kapasiteten økes med en faktor 1,64. Ved å øke batteriets størrelse vil man også øke kjørelengde mellom hver lading tilsvarende.

Med 1760 enkeltceller har man 3500 loddepunkter på battericellene alene, noe som er ett stort antall med mulighet for dårlig kontakt som følge av produksjonsavvik på loddinger. Dersom en celle i parallellblokken skulle miste kontakten ved en kobling vil dette likevel kunne avdekkes ved at kapasiteten på denne blokken brått faller med 1.25 %. En slik feil vil bare avdekkes dersom cellespenninger og kapasitet loggføres over tid.

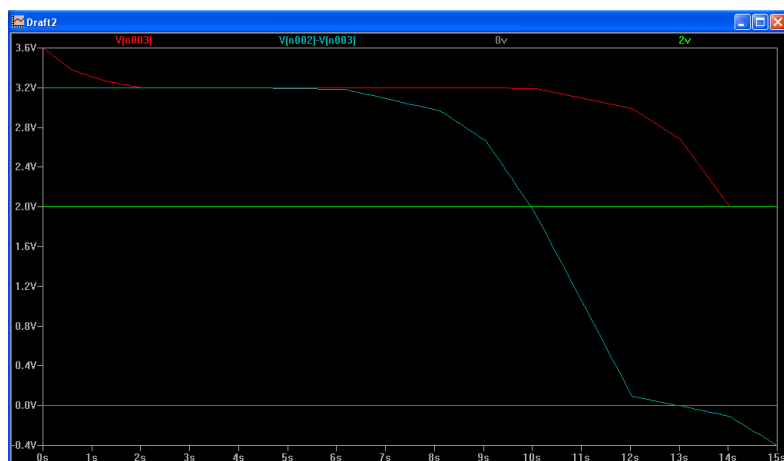
Av hensyn til driftssikkerhet vil det være gunstig å dele opp cellene i flere parallele blokker som overvåkes uavhengig. På den måten kan en blokk med feil kobles bort og man kan kjøre videre uten fare for å skade enkeltceller og med mulighet til å rette feil på enkeltstrenger. Blokker med redusert kapasitet kan da også byttes uavhengig av de andre.

For å minske kompleksiteten av batteriovervåkingen kan man velge å benytte battericeller med større kapasitet. I prototype produksjon har A123systems også større battericeller med kapasiteter opp til 60Wh¹⁰ beregnet for Hybrid Electric Vehicles (HEV) og Plug-in Hybrid Electrical Vehicles (PHEV). Med større celler minker kompleksiteten for overvåkingen da antallet celler minker.

Beregnet oppførsel av ubalansert batteripakke under utladning og ladning

Basert på utladekurver for A123 celler vil spenningen over to celler i serie hvor det ene er fullt ladet mens det andre er 80 % ladet bli som i figur.

¹⁰ <http://www.greencarcongress.com/2009/05/a123-prismatic-20090519.html> , Kilde: a123systems.



Figur 9 – Beregnet oppførsel for to battericeller i serie hvor den ene har lavere ladenivå enn den andre.

Når man ser på spenning for å se når enkeltceller er helt utladet (2v) ser man at det fortsatt er energi igjen i cellen som var fullt ladet før bruk. Uten enkeltcelle overvåkning vil den med minst energi bli underladet før den andre er utladet.

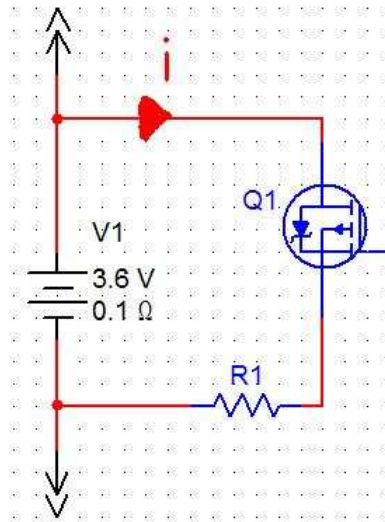
Tilsvarende blir det under ladning uten balansering, den cellen med mest energi blir ladet normalt, mens den med minst aldri blir fullt ladet. Uten enkeltcelle overvåkning vil den med mest energi bli overladet mens den med minst ikke blir fullt ladet.

Hvordan sørge for cellebalansering

Passiv cellebalansering har færrest mulige kilder til feil, det er robust og rimelig. Ulempen er at en svakere celle ikke kan lades når den nærmer seg tom for energi. I en elektrisk bil som lades hver dag, og batteripakken består av mange små celler i parallell vil man oppleve at sannsynligheten er liten for at enkelt blokk skal ha mye lavere kapasitet. At batteriet i tillegg kan balanseres ved hver lading minimerer også avvik som oppstår over tid. Dette gjør at behovet for aktivt å fylle på en svakere celle kan sies å være lite, og at dersom en parallell blokk med celler er svekket så mye at det gir store utslag bør man vurdere bytte av batteri. Med passiv balansering har man også muligheten til å balansere batteriet ved å tappe batterier underveis. Slik kan man sørge for at alle cellene til enhver tid har likt ladenivå.

Dersom batteriet skal balanseres ved lading er det viktig at kretsene som tilsidesetter strøm er dimensjonert slik at de cellene som allerede er fulladet ikke overlades. Altså må kretsen være i stand til å håndtere en strøm lik ladestrømmen. Her kan man innføre en tilstand som kalles vedlikeholdslading hvor man reduserer ladestrømmen. Fordelen ved å balansere batterier ved vedlikeholdslading er at overvåkningselektronikken i bilen hele tiden får tilført energi ifra ladekontakten, og man unngår unødig opp og nedlading av cellene. En annen fordel er at elektronikken ikke tapper energi fra batteriet hvis alt kan skrues av når den er parkert uten lader.

Kretsen for hver enkelt celle blir da som i figuren nedenfor og styres direkte fra utgangen på LTC6802 inn på Q1.



Figur 10 - Krets for passiv cellebalansering

Ser man på figuren er strømmen I lik strømmen som tilføres fra laderen for å unngå overlading. Kretsen må dersom man benytter 1A lade strøm ved balansering være i stand til å avlede 1A.

$$P_{Avledes} = I_{Vedlikeholdsladestrøm} \cdot V_{Celle} \quad (4)$$

$$P_{Avledes} = 1A \cdot 3,6V = 3,6W \quad (5)$$

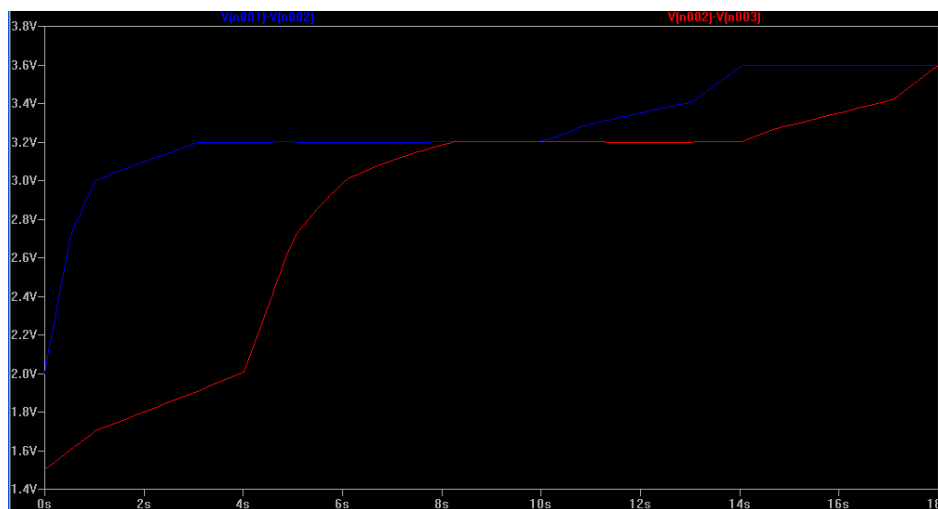
Nå må effekten fra alle cellene avledes dersom kun en blokk er svakere, noe som på 22 celler blir

$$P_{Avlede\ total} = P_{Avledes} \cdot (A_{Antall\ Celler} - 1) \quad (6)$$

$$P_{Avlede\ total} = 3,6W \cdot (22 - 1) = 75,6W \quad (7)$$

Beregnet opplade syklus med passiv balansering ved lading

Figur 11 viser hvordan spenningen fordeler seg over to celler som lades fra ulikt ladenivå og opp til 3,6V med passiv balansering som tilsidesetter ladestrømmen i den først fulladede cellen.



Figur 11 – Spenningskurve av ubalanserte celler med passiv balansering ved lading.

Grafen viser tydelig hvordan den første cellen får flat spenningskurve idet spenningen når 3,6V, og dermed unngår overlading mens den som hadde lavest ladenivå i utgangspunktet fortsetter å lade til cellespenning på 3,6V oppnåes.

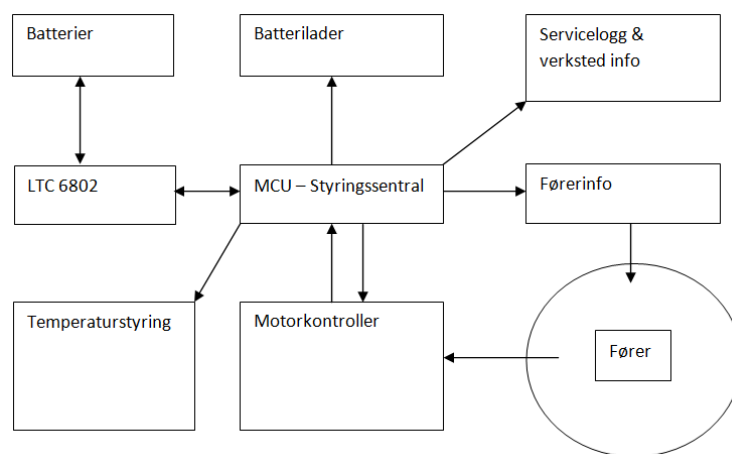
Hvordan bruke data fra LTC6801 for å bevare batteriet

Ved å bruke kretsen til å holde alle celler innenfor aksepterte spenningsnivåer og sørge for balansering ved behov sørger man for at ikke celler dør som følge av overlading eller at celler lades ut lengre enn de tåler. Videre kan man ved å vite typisk bruksmønster for batteriene dimensjonere batteriet slik at det har de nødvendige kapasitetene til å hindre for rask opp og utlading.

Ved å overvåke temperaturen kan man for å øke ytelse tilføre varme i kuldeperioder eller kjøle ned batteriet om det er så varmt at det påvirker levetiden i negativ retning. Ved høye temperaturer i batteripakken kan også energiuttaket reduseres slik at temperaturen ikke fortsetter å stige.

4 Forslag til overvåkningsystem

For å kunne overvåke de nødvendige parametrene, samt ha muligheten til å maksimere ytelsen i ett system er det viktig med ett system som tar hensyn til alle feilkilder og er i stand til å korrigere. I denne sammenhengen kreves det ikke bare å lese spenningen over battericellene men ett komplett system for alle tenkelige feilsituasjoner. I skjemaet nedenfor er det skissert ett forslag til system som skal være i stand til å kontinuerlig overvåke batteriet, samt ved lading og bruk gjøre sitt til at batteriet varer lengst mulig.



Figur 12 - Forslag til strømstyrings system i elbil

4.1 Funksjoner i de ulike blokkene

LTC6802

Linear Technology's bindeledd mellom batterier og styrekretser.

Informasjon inn til denne er hvilke celler som skal tappes for cellebalansering, samt hvilke celler og hvor ofte spenning skal måles.

Informasjon ut er temperaturer og spenninger over enkeltceller.

MCU - Styringsentral

Ett integrert system som overvåker og regulerer strøm inn og ut av batteriet.

Informasjon som kommer inn er temperatur, spenning og energi inn og ut av batteriet.

Informasjon ut vil være styring av motorkontrolleren, styring av laderen for å lade optimalt, styring av cellebalansering ved behov, føre logg over avvik og energibruk, gi tilbakemeldinger til fører om ladenivå, gjenværende kjørelengde, og effektuttak slik at fører kan tilpasse seg en penere kjørestil.

Motorkontroller

Styring av motoren, både gasspådrag og bremsing med regenerering av energi. Må altså være i stand til å lade batteriene.

Informasjon inn er gasspådrag, bremsekraft og effektbegrensning ved feilsituasjoner.

Informasjon ut er benyttet effekt, regenerert effekt og temperatur i styresystemet.

Batterilader

Lader batteriet.

Informasjon inn er ønsket ladestrøm.

Man kan her velge hurtiglading, eller langsommere lading om man har god tid. Valg for vedlikeholdslading må implementeres for å benytte passiv balansering ved lading på en effektiv måte.

Førerinfo

Bør inneholde data som kan påvirke føreren til å trække varsommere på gasspedalen og på den måten spare energi samt oppnå bedre kjørelengde. Føreren bør også alltid vite hvor mye lengre bilen kan kjøre før lading trengs. Å kombinere dette med GPS, kart og informasjon om ladestasjoner kan man også bidra til økt bevissthet rundt muligheter for lengre turer med elbil.

Temperaturstyring

Ettersom temperaturdifferanser i batteriet vil gi ulik utlading kan man utstyre bilen med regulering av batteritemperaturen for å kunne motvirke ubalanse som følge av temperatur. Enklest mulig og minst mulig kraftkrevende vil være det ideelle, jo mer energi man velger å bruke på å holde konstant temperatur, jo mindre får man faktisk kjørt, så ideelt sett skal dette bruke minst mulig effekt.

5. Måleoppsett

Merknader til målinger

De fleste målinger er foretatt på A123systems sine ANR186500 batterier og med LTC6802 demokort. Av praktiske årsaker ble målinger med nedkjøling av enkeltcelle og polaritetsvending gjort med multimeter. Ved måling av polaritetsvending ble det benyttet en ordinær litium-ion battericelle, LGR18500, da den var vesentlig rimeligere i anskaffelse og ikke var en del av en større batteripakke.

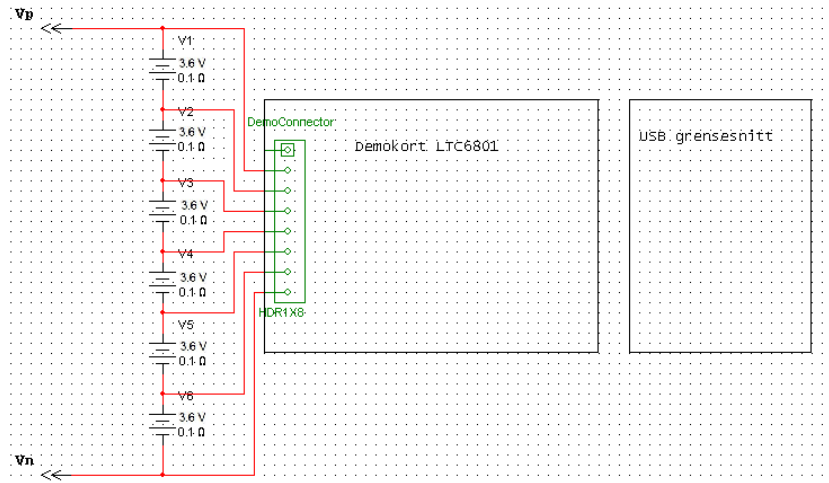
Komponentliste

- Batteri med 6 A123systems ANR18650 i serie.
- Litium Ion batterier LGR18500p
- Utviklingskort DC1331 + ltc6801
- Motstander for hurtigere å lade ut enkeltceller ($4,7\Omega/5W$)
- Strømforsyning med spenningsregulering og strømbegrensning til opplading av batteripakken, Mascot Type 719.
- Diverse kabler (bananplugg, klyper.)
- Krets som trekker konstant effekt (5w/10w). Egen konstruksjon med buck-regulator for konstant strøm, endrer effekt ved å endre dioder.
- Multimeter type Fluke 175
- Kjøleplate for å kjøle ned batteriet, laget selv med 2x90W peltierelementer.
- Termometer, for å ha en indikasjon, vanlig inne/ute termometer med sensor på ledning.

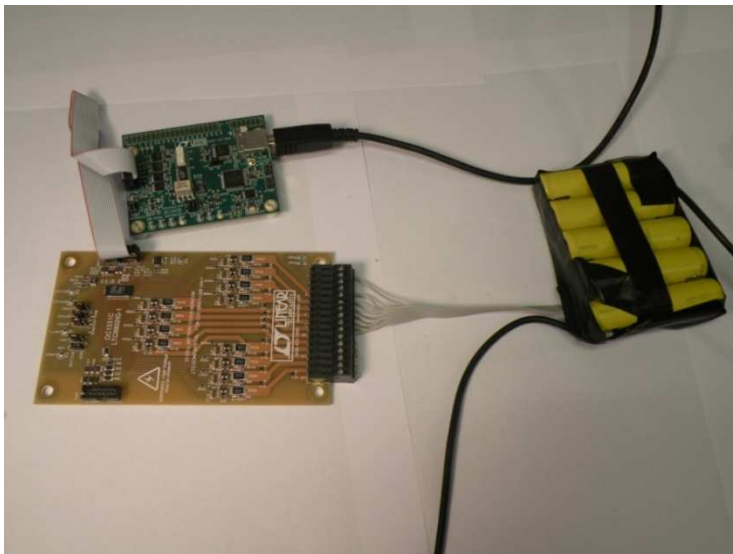
5.1 Generelt måleoppsett

Oppkobling av målekrets mot pc

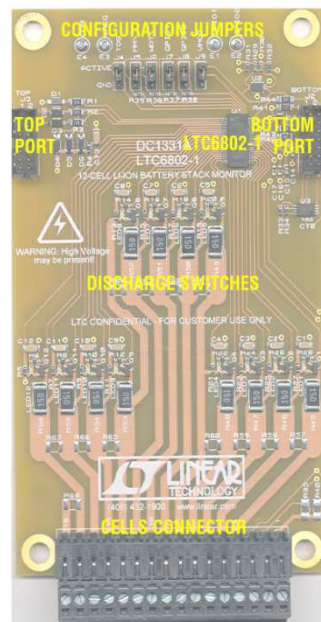
LTC6802-1 kobles til batterier og pc med USB grensesnitt. Hver av de 6 cellene i batteriet kobles til riktig inngang på demokortet. Seriellkabel benyttes videre til USB kontrolleren, som igjen kobles til datamaskin som har programvaren for demokortet installert.



Figur 13 – Hvordan batteriet kobles via LTC6802-1 til pc.



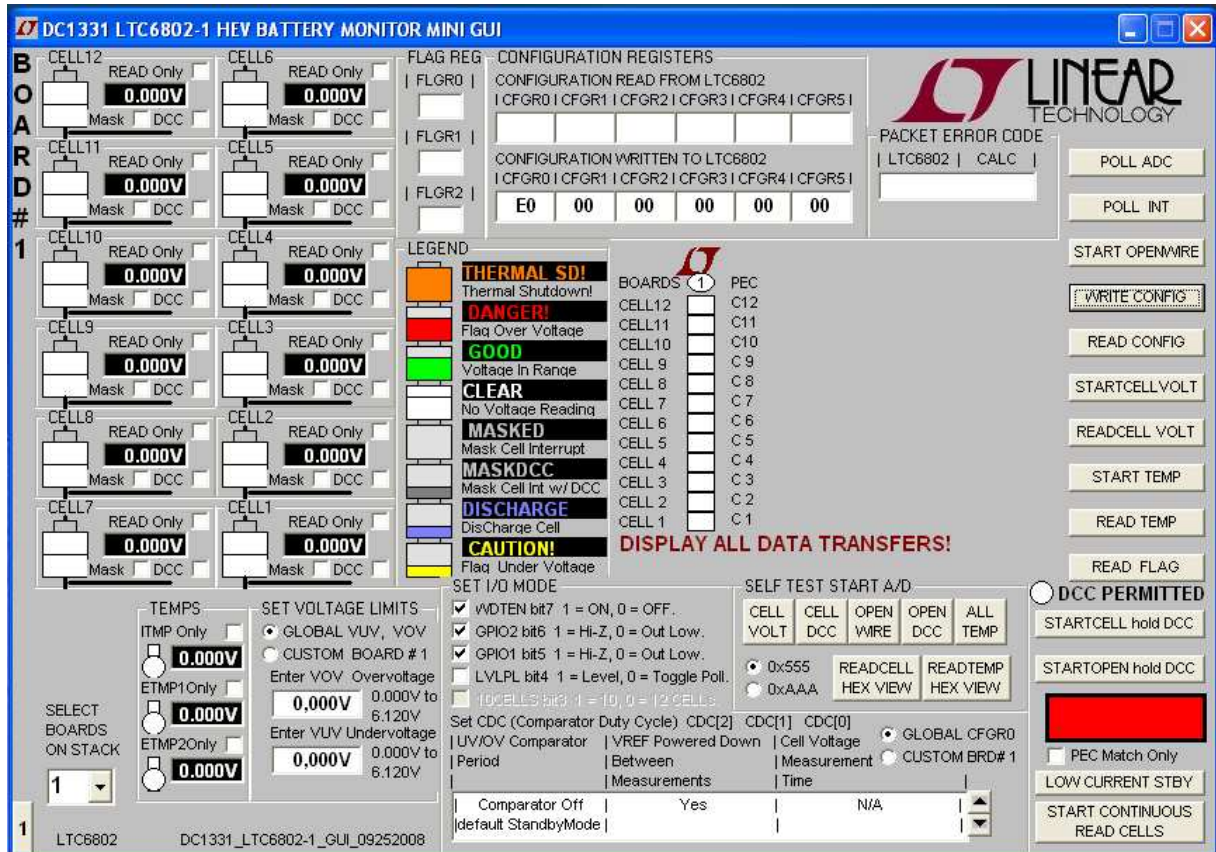
Figur 14 – Bilde av kretsene som har vært i bruk



Figur 15 – Demokort fra Linear

Software for pc som kommuniserer med LTC6802.

Softwaren for demokortet står for styringen av overvåking og regulering av batteriet ved målingene som er utført.

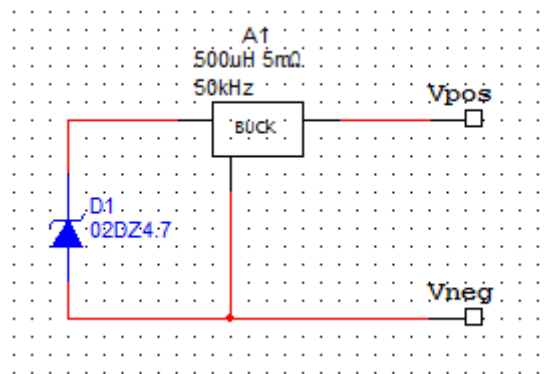


Figur 16 – Brukergrensesnittet for demobruk av LTC6802-1

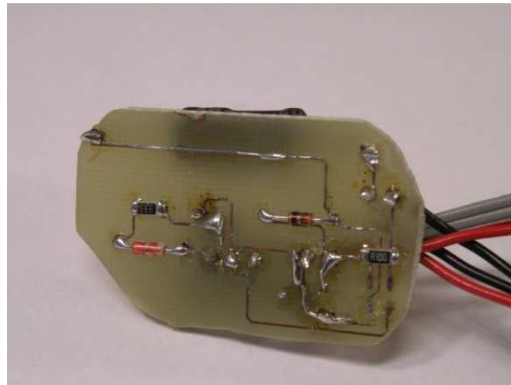
I brukergrensesnittet som vises i figur 16 får man tilgang til alle funksjoner som kretsen innehar. Hver enkeltcelle har statusindikator i tillegg til avmålt spenning. Passiv regulering av celler kan styres manuelt for hver enkelt celle. Konfigurasjonsregisteret kan settes manuelt, og på den måten avgjøre hyppigheten av målinger og hvilke celler som skal måles.

Last beskrivelse

Batteriet belastes under målinger med en konstant effekt. Dette oppnås ved å benytte en krets som vist i figur 15.



Figur 17 - Krets for å belaste batteriet med konstant effekt ved målinger.



Figur 18 – Bilde av kretsen.

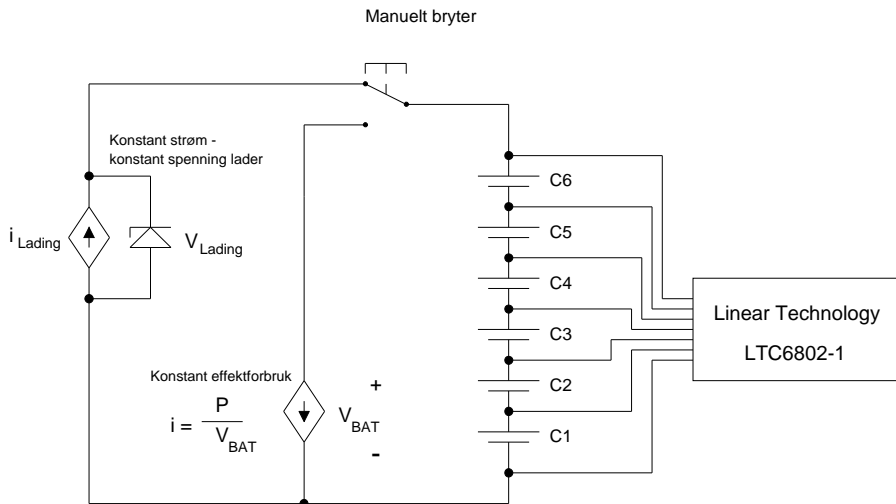
Enkel konstant effekt utlader som benytter en buck regulator for konstant strøm og dropper spenning over en zener diode. Ved å bytte diode endrer man effekten som trekkes.

5.2 De ulike målingene

Måling med balansert batteripakke

Hensikten med denne målingen er å forsøke å avdekke avvik mellom enkeltceller.

Utgangspunktet er et fulladet og balansert batteri med 6 celler, lastet med 10w kontinuerlig, og så ladet opp igjen. Spenningen er logget ved ulastet batteri hvert 10 minutt.



Figur 19 - Måleoppsett for utlading med timer

Ladenivå og målt spenning

Fulladet balansert batteri med konstant belastning. For hver måling er lasten koblet bort. Spenning over enkeltceller logget hvert 10 minutt inntil celledspenning falt til 2,0v. Måleoppsettet er identisk med "Måling med balansert batteripakke"

Måling med ubalansert batteripakke

Utgangspunkt balansert batteripakke med 6 celler.

Lastet enkeltcelle (C6) med en 4,7ohm motstand i 12 minutter. C6 måler da 3,32V ulastet spenning, noe som tilsier 90 % ladenivå.

Koblet til samme last som måling med balansert batteripakke, og lot batteriet lade seg ut ved konstant 10w effekt mens spenningen over de ulike cellene ble logget hvert 10 minutt.

Balansering av batteripakke med LTC6802

LTC6802 i demokortet settes til å brenne opp energi i cellene med høyest spenning. Dette gjøres i softwaren for kretsen ved å krysse av for DCC (DisChargeCell), se figur16. Denne prosessen kan automatiseres dersom en sentral styringsenhet leser av alle celledspenninger og sender konfigurasjon for DCC for de riktige cellene til LTC6802.

Ulastet celledspenning og temperatur

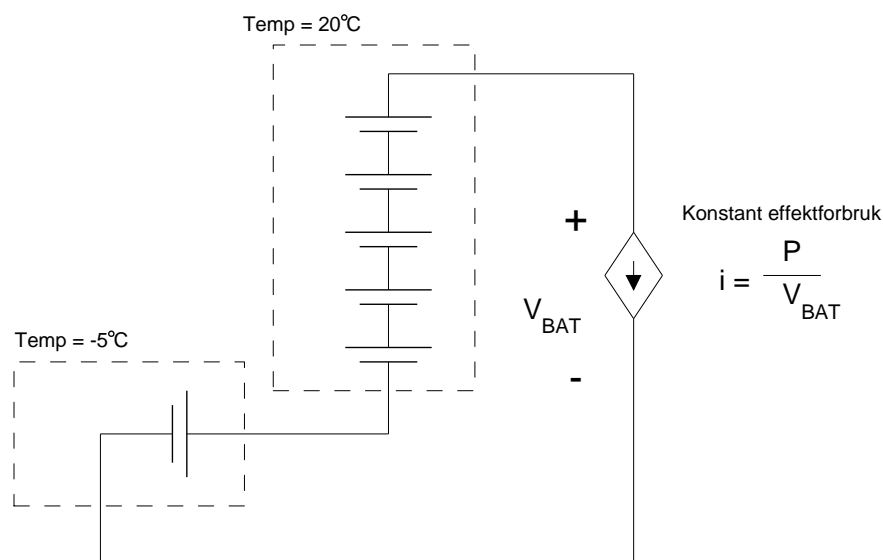
Hensikten med denne målingen er å avgjøre om ladenivået måles ulikt avhengig av temperatur på ulastet celle.

Kjølte ned batteriet fra 25°C til -8°C ved hjelp av egenkonstruert kjøleplate basert på peltier elementer. Målingen er gjort to ganger, ved 30 og 90 % ladenivå. Spenningen over cellene ble overvåket mens temperaturen falt.

Måling av celledspenning dersom en celle i serien er kjølt ned

Hensikten med denne målingen er å finne ut hvorvidt temperaturdifferanser mellom battericeller kan føre til ubalanse i ladenivået og redusert ytelse.

Enkeltcelle ble kjølt ned til -5°C mens de resterende i serien i romtemperatur ved 20°C. Her er også verdt å merke seg at av praktiske årsaker ble målinger ved dette forsøket foretatt med multimeter.



Figur 20 – Måleoppsett for å detektere avvik i ladenivå som følge av temperaturdifferanse mellom celler under konstant effektbelastning.

Batteriet ble koblet til 10W konstant last og celledspenning ble konstant målt. Prosessen ble avsluttet idet første celle kom ned til en celledspenning på 2V.

Polaritetsvending av enkeltcelle som følge av påtrykt strøm.

Hensikten med denne målingen er å verifisere at celler går i stykker ved polaritetsvending. Ved å påtrykke strøm i negativ retning vil batteriet tømmes fullstendig for ladning og polariteten vendes.

Dette er en situasjon som kan oppstå under belastning dersom det benyttes flere celler i serie i et ubalansert batteri. Dersom energiuttaket ikke stoppes ved celledspenninger under 2v for enkeltcelle,

vil strømmen fra de andre cellene som er i batteriet drive den lavest ladede som om cellen får negativ lading.

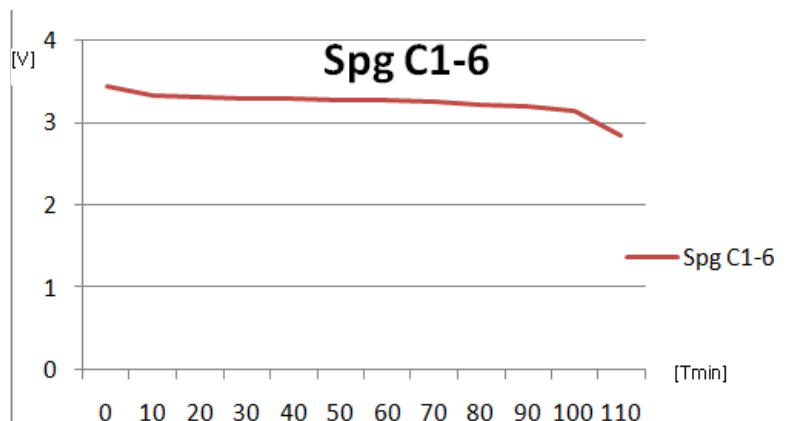
Måleoppsettet består i enkeltcelle LGR18500 koblet til Mascot 719 strømforsyning med strømbegrensning satt til 500mAh. Strømretningen er satt til motsatt retning. Multimeter måler kontinuerlig spenningen over battericellen. Av sikkerhetshensyn ble denne målingen foretatt i brannsikker metall beholder. Måling av temperatur for cellen ble utelatt da jeg ikke hadde tilgjengelig måleutstyr som kunne risikere å gå istykker dersom battericellen skulle begynne å brenne.

Merk at dette eksperimentet frarådes av batteriprodusenter da det kan medføre brann og eksplosjonsfare.

6. Måleresultater

6.1 Måling med balansert batteripakke

Resultatet for denne målingen er at lade og utladesyklus 0-100 % med balansert batteripakke har ikke vist målbare avvik på de 6 battericellene og måleutstyret som har vært tilgjengelig. Her kan man sannsynligvis måle avvik dersom forsøket gjentas mange nok ganger.



Figur 21 – Målte spenninger ved utlading av batteriet.

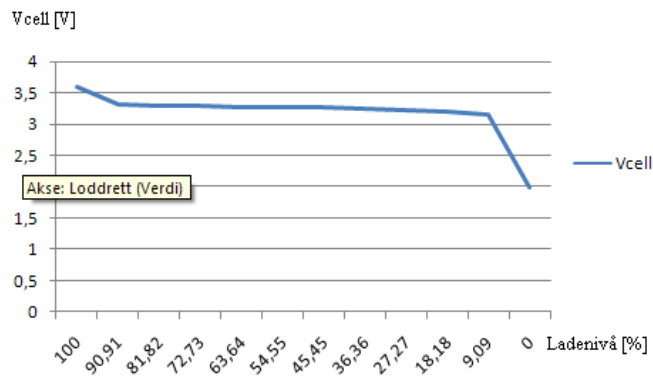
Grafen viser spenning som funksjon av tid når batteriet lastes konstant. Den har grov oppløsning da målinger er foretatt hvert 10 minutt.

6.2 Ladenivå og målt spenning

Resultatet for denne målingen:

Tid [Min]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Vcell [V]	3,60	3,32	3,31	3,30	3,28	3,28	3,27	3,25	3,23	3,20	3,15	2,00
Ladenivå [%]	100,00	90,91	81,82	72,73	63,64	54,55	45,45	36,36	27,27	18,18	9,09	0,00

Fremstilt som graf:



Figur 22 – Utladekurve enkeltcelle ved konstant last

Sammenlikning med måling mot oppgitt fra A123systems

Ladenivå	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Vgraf [V]	3,60	3,40	3,37	3,35	3,32	3,30	3,25	3,25	3,22	3,20	2
Vmålt [V]	3,6	3,32	3,31	3,28	3,28	3,27	3,25	3,23	3,20	3,15	2
Vdiff [V]	0	0,08	0,06	0,07	0,04	0,03	0	0,02	0,02	0,05	0

Største avvik mellom målt og oppgitt spenning for ladenivå er 0,08V. I realiteten er forskjellen større da det er ulastet spenning som er målt og lastet som er oppgitt i kurve.

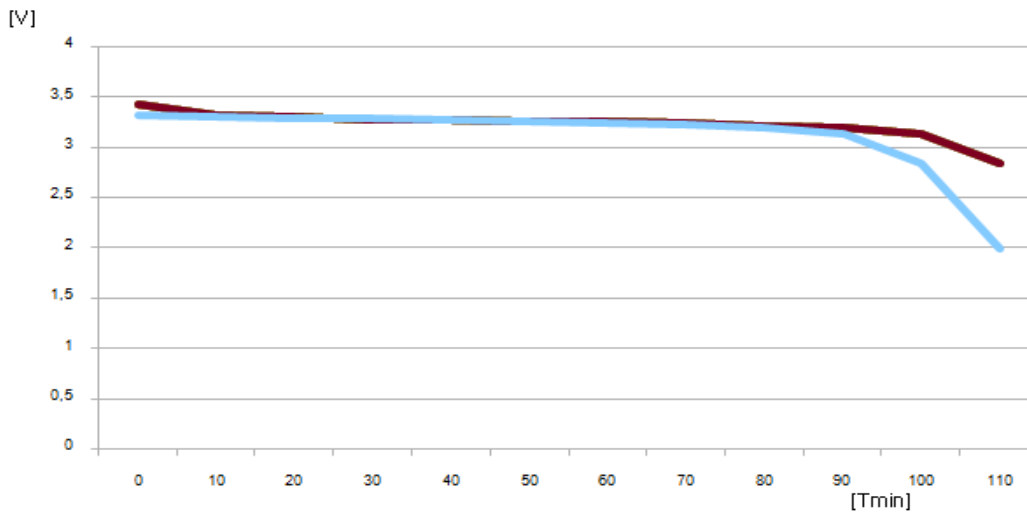
Eks:

Målt spenning: 3,32V

Leser man av 3,32v for den oppgitte spenningen vil man se at dette tilsier 60 % ladenivå, mens ved måling tilsier det 90 % ladenivå.

6.3 Måling med ubalansert batteripakke

Målingen viser at energien som kan utnyttes uten å risikere skade på C6 reduseres på grunn av en cellens lavere ladenivå. Energien i de resterende batteriene vil kunne drive C6 til negativ spenning dersom ikke utladingen stoppes.



Figur 23 – Spenningskurve for to batterier med ulik ladenivå ved utlading.

6.4 Balansering av batteripakke med LTC6802

Resultatet av denne målingen er at batteriet ble balansert relativt raskt. Det var ett lite avvik på små battericeller, og mengden energi som skulle fjernes fra celler med for høyt ladenivå var relativt liten.

6.5 Ulastet cellespenning og temperatur

Målte temperaturer og cellespenninger

Temperatur [°C]	Vcell 90% [V]	Vcell 30% [V]
25	3,32	3,23
20	3,32	3,23
15	3,32	3,23
10	3,32	3,23
5	3,32	3,23
0	3,32	3,23
-5	3,32	3,23

Spenningen endret seg ikke ved nedkjøling, altså kan ulastet spenning uavhengig av temperatur benyttes til å fastslå ladenivå.

Denne målingen er gjort på batteri med konstant ladenivå og uten last. Det kan tenkes at dersom man laster ett batteri mens det er kaldt måler lavere verdier for ulastet spenning.

6.6 Måling av cellespenning dersom en celle i serien er kjølt ned

Etter 90 minutter ble spenningen over den nedkjølte cellen målt til 2V samtidig som de resterende cellene ble målt til 3,20V. Når man ser på tidligere målinger for ladenivå tilsier dette at de cellene som holder 20°C fortsatt har 20 % av energien lagret.

Denne målingen samsvarer godt med databladets grafer for "Lav temperatur ytelse", se figur 4. Dette vil i perioder med kaldt vær tilsi at man får redusert kapasitet for batteriene.

6.7 Polaritetsvending av enkeltcelle som følge av påtrykt strøm.

Resultatet er at batteriet får vendt polaritet og blir varmt selv ved relativt lav ladestrøm, varmen indikerer at batteriet ikke tar lading i negativ retning, og at energien går over til varme istedenfor lagret energi.

Når ladestrømmen returneres til riktig retning etter at cellen har vært utsatt for negativ polarisasjon vil batteriet få tilbake sin opprinnelige polaritet, men uten å akkumulere energi. Battericellen stabiliserer seg ved en celledspenning på 0,1 V. Videre tilførsel av energi omformes til varme i battericellen med det resultat at battericellen blir overopphetet.

Merk at dette eksperimentet frarådes av batteriprodusenter da det kan medføre brann og eksplosjonsfare.

7. Diskusjon

Som presentert i teoridel og verifisert gjennom måling 6.3 vil litium-ion batterier raskt kunne miste kapasitet og få redusert levetid som følge av avvik mellom enkeltceller. Gjennom målinger av ytelse ved lave temperaturer er det vist at celler yter ulikt og får ulikt ladenivå dersom det er temperaturdifferanser i batteriet. Det blir av den grunn viktig å integrere ett system som overvåker enkeltcellene, og er i stand til å korrigere ladeavvik etter hvert som det oppstår. Som verifisert i måling 6.4 kan passiv cellebalansering sørge for at avvik i ladenivå til enhver tid korrigeres slik at cellene har samme ladenivå.

Kapasitetsforskjeller mellom enkeltceller kan ikke korrigeres elektronisk, men ladenivået kan reguleres slik at batteriet utnyttes maksimalt uten at enkeltceller tar skade. I måling 6.1 er det ikke påvist avvik i de ulike cellenes kapasitet, men dette kan oppstå som følge av ulik aldring og ulike temperaturer. Dersom målingen hadde blitt gjort over lengre tid forventes differanser å kunne bli målt. Med riktig valg av målinger og loggføring av data vil systemet være i stand til å peke ut enkeltceller med stort avvik for bytte etter behov.

Det er vist i måling 6.7 at batteriet ikke tåler underlading uten å få degradert ytelse eller bli ødelagt. Dette er tilfeller som i utgangspunktet kun vil skje dersom enkeltceller har lavere ladenivå, og de resterende cellene i batteriet er i stand til å drive negativ lading på denne cellen når batteriet nærmer seg slutten. Som vist i måling 6.6 vil dette kunne oppstå ved temperaturdifferanser i batteriet. Et overvåkningssystem må dermed sørge for at energiuttaket av batteriet stopper idet første celle har ett ladenivå på 0 %. Merk at på grunn av indre motstand i batteriet kan spenningsnivået variere ved last for ladenivå på 0 %.

Løsningen som er presentert i kapittel 4 viser et mulig system for regulering. Systemet baserer seg på passiv cellebalansering ved lading. Dette er en sikker og rimelig metode for å korrigere avvik som uten store merkostnader lar regulering foregå på enkeltcellenivå. Ulempen med denne metoden er at den ikke regenererer effekt. Videre vil effekten som fjernes fra enkeltceller gå over til varme som må ledes vekk. Denne metoden egner seg derfor ikke for hurtiglading da utviklet varme blir stor. Dersom batteriene i hovedsak lades ved hurtiglading vil det for å balansere batteriet være nødvendig å vedlikeholdslade ved jevne mellomrom.

8. Konklusjon

For å sikre at litiumbatterier leverer høy ytelse og har lang levetid kreves effektiv overvåkning som korrigerer avvik. Mine målinger har vist at batteripakkens ytelse og levetid raskt kan reduseres dersom avvik i ladetilstand får anledning til å utvikle seg. Bruk av LTC6802 viser at dette er en krets som innehar de nødvendige egenskaper for å overvåke batteriets celler med stor presisjon. Målinger viser også at avvik raskt og enkelt kan korrigeres med de riktige balanseringskretsene koblet til utgangene på LTC6802. Med riktig overvåkning og beskyttelseskretser gir litiumbatterier høy ytelse og lang levetid for elbiler.

9. Kilder

- A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems av Stephen W. Moore og Peter J. Schneider.
- LTC6802-1 Multicell battery monitor datablad
- DC1331 Utviklings kort brukermanual
- ANR26650 A123systems batteri datablad
- Brukerveiledning Buddy
- Cell balancing maximizes the capacity of multi-cell Li-Ion battery packs – Av Carlos Martinez, Intersil, Inc.
- www.ssb.no - Direkte linket i fotnoter der det er brukt.
- www.wikipedia.org – Direkte linket i fotnoter der det er brukt.
- Batteriet – Den moderne strømkilde, Av Lauritz Holdø.

10. Vedleggsliste

- Datablad LTC6802-1 Multicell battery monitor
- Datablad ANR26650
- HP Recalls Notebook Computer Batteries Due to Fire Hazard
- A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems
- TeslaRoadsterBatterySystem