

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2015
30 stp

Batterisystem for landbruksrobot

En evaluering av tidligere anskaffede komponenter til landbruksrobot med forslag til oppdateringer for et nytt system.

Battery Management of the NMBU Agricultural Robot

Sigurd Kile Flaatten

Batterisystem for landbruksrobot

En evaluering av tidligere anskaffede komponenter til landbruksrobot
med forslag til oppdateringer for et nytt system

Sigurd Kile Flaatten

15. mai 2015

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på fem års studier ved UMB og NMBU, i tillegg til et halvt års utveksling ved TU Clausthal. Det sies at normert tid for å fullføre en mastergrad på Ås er seks år, så da kan ikke jeg være noe dårligere.

Prosjektet med å skrive masteroppgave fikk en pangstart da vi dro 11 stykk studenter til Rio de Janeiro for å besøke det føderale universitetet(UFRJ) på bekostning av CAPES-SIU. Et samarbeid som tillater oss å dra nytte av deres kunnskap og erfaring med å lage roboter. Personlig ble oppholdet stort sett brukt til å lese meg opp på batteristyringssystemer på nettet, da batteriekspertene som hadde jobbet på de brasilianske robotene hadde tatt sommerferie. Allikevel vil jeg gjerne takke Marco for å ha tatt seg tid til å gå gjennom en av robotene de hadde for å forklare noen av dens funksjoner for meg.

Etter tilbakekomsten fortsatte arbeidet med å gjennomgå batteristyringssystemer både på internett via nettbutikker, og faglitteratur. Nå ble også arbeidet med batteripakken igangsatt. Uten hjelpen til Overingeniør Tom Ringstad hadde ikke denne oppgaven hatt noen del som innebar det å plukke fra hverandre et 48 volts batteri. Det hadde jeg aldri gjort på egenhånd! I løpet av arbeidet har jeg loddet på mikromotstander ved å kikke gjennom et mikroskop, og jeg har loddet direkte på en batteripol. Før jul hadde jeg knapt tatt i en loddebolt.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder; førsteamanuensis Pål Johan From, Overingeniør Tom Ringstad, Lars Grimstad for svar på uendelig mange småspørsmål rundt roboten, resten av gjengen som har laget robot og verktøy, Morten Solstad Øiaas og Fredrik Garnås Rylandsholm for gjennomlesing og tilbakemeldinger, og særlig Rasmus Lillekvelland for dissekering, av oppgaven før innlevering. En stor takk rettes også til blodsbrødre og -søstre på lesesalen, og venner og familie som jeg nesten ikke har sett på et halvt år, og til Tina som har måttet tåle en særs surrete masterstudent den siste tiden. Det har vært mange lange kvelder og mye detektivarbeid for å bla seg gjennom datablad og dokumentasjon, og gudene veit hva for å finne dingser som kan løse batteriproblemet til roboten. For, som Andrea skriver på side 19 i boken sin: 'As the saying goes: "There are three kinds of liars: liars, damns liars, and battery manufacturers."' [3]

Ås, 15.05.2015

Sigurd Kile Flaatten

Sammendrag

Denne oppgaven handler om en landbruksrobot som ble bygd av fem mastergrads-studenter våren 2014 ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Bakgrunnen for å lage roboten er å øke bærekraften i landbruket ved å benytte seg av mindre og lettere maskiner enn traktorer og annen tung redskap som brukes i dag. Denne roboten bruker batterier som energiforsyning, og kan dermed bruke elektrisk energi der traktoren er nødt til å benytte seg av diesel. Roboten skal være en lett landbruksmaskin som skal kunne benytte seg av diverse verktøymoduler for å utføre forskjellige oppgaver i felt uten overoppsyn.

Utviklingen av roboten våren 2015 inkluderer design og produksjon av forskjellige verktøymoduler som roboten skal kunne ta i bruk ute på jordet, samt evaluering og oppdatering av batterisystemet som per nå forsyner roboten med energi.

I denne oppgaven har ett av to batterier som utgjør batterisystemet til roboten blitt undersøkt, da det ble fryktet at dette batteriet kunne være ødelagt på grunn av dyputladning. Undersøkelsene av dette batteriet besto blant annet av en utladningstest over omtrent fem timer, hvor batteriet ved en utladningsstrøm på snaue seks ampere viste til en kapasitet på 30,2 amperetimer. Batteriene skal i utgangspunktet ha en kapasitet på 30 amperetimer. Frykten viste seg derfor å være ubegrunnet; batteriet har fortsatt kapasitet nok til å kunne brukes for å drive roboten.

Batteristyringssystemet som opprinnelig fulgte med i de originale batteripakkene viste seg derimot å ikke være tilfredsstillende. En billig 'protector'-BMS satt innebygd i batteripakken som ble åpnet opp, og det viste seg at denne ikke hadde de nødvendige funksjonene for å optimalisere kapasiteten til batteripakken. Noe som er viktig om roboten skal bidra til å minske utslippene fra landbruket generelt. Dermed har det blitt gått til innkjøp av nye 'protector'-BMSer, men disse er heller ikke noen god løsning på lengre sikt, da de uten varsel vil kunne bryte strømmen ut av batteriet, og dermed slå av hele systemet i kritiske situasjoner. En oppdatering til et nytt batterisystem bør bestå av batteripakker som kan kommunisere med resten av systemet slik at det oppnås bedre kontroll av cellene til enhver tid. Robuste LiFePO₄ erstatningsbatterier for blybatterier ser ut som en god, men dyr, oppdatering.

Abstract

This paper is about an agricultural robot, which was build by five master's degree students during the spring of 2014 at the Norwegian University of Life Sciences. The purpose of this robot is to increase the sustainability in agriculture by utilizing smaller and lighter machinery than the tractors and other heavy equipment currently in use. This robot is powered by batteries, and hence, is able to use electrical energy, whereas the tractor relies entirely on diesel fuel. The robot is supposed to be a light agricultural machine which performs different tasks autonomously in the field by utilizing specially made tools.

The development of the robot during the spring of 2015 includes design and production of different specialized tools which the robot can use in the field, as well as evaluation and updates of the battery system, which is currently providing the robot with energy.

During this paper, one out of two batteries, which constitutes the battery system of this robot, was examined because it was suspected that the battery might have sustained some damage due to an overdischarge. The examinations of this battery consisted, amongst other things, of a discharge test over the course of five hours, where the battery delivered a capacity of 30,2 amp-hours, with a discharge current of almost six amps. The batteries are supposed to have a name plate capacity of 30 amp-hours. Therefore, it is safe to assume that the battery still contains enough capacity to be able to power the robot.

The original battery management system, on the other hand, was not satisfactory. A cheap protector was build into the battery pack which was opened up, and it became apparent that the protector didn't contain the necessary functionality to optimize the capacity of the battery pack. This is an important feature, if the robot is to succeed in it's goal to minimize the emissions from agricultural use, in general. For this reason, a new protector has been purchased. This is, however, not a good long-term solution, because these protectors might turn off the battery current without warning, thereby shutting down the entire system during critical situations. An update to this battery system should contain battery packs with the ability to communicate with the rest of the control system of the robot, thereby maintaing a maximum of control of the battery cells at any time. Rugged, LiFePO₄ lead-acid replacement batteries seems to be a good, yet expensive, solution.

Tabeller

1.1	Mål for norsk landbruk. Tabellen er hentet fra stortingsmeldingen 'Velkommen til bords', kapittel 1.2[23].	13
3.1	Spesifikasjoner for batterier og lader fra Golden Motor.	35
3.2	Cellespenninger målt med en gang batteriet ble åpnet sammen med cellespenninger målt etter delvis oppladning.	37
3.3	Cellekapasitet ved lav ladestand.	39
3.4	Oppladningsstrøm, full oppladning.	40
3.5	Spenningsvern	46
3.6	Operasjonstider for robot.	49
4.1	Priser for Winston battericeller. GWL Power sin nettbutikk[19] . . .	51
4.2	Sammenlikning av nøkkelparametere for BMS systemer	53
4.3	Spesifikasjoner for BMS fra Ebay, hentet fra annonsen[13].	56
4.4	Sammenlikning av batteripakker	59

Figurer

1.1	Et utvalg eksisterende landbruksroboter.	14
2.1	Galvanisk celle	17
2.2	Endring i cellespenning ved endring i strøm. Egen reproduksjon av Andrea side 11[3].	18
2.3	Opp- og utladningskurve for LiFePO_4 - batteri. Graf hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9]. . .	19
2.4	Utladning av LiFePO_4 - batterier. Grafer hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9]	21
2.5	Kapasitet som funksjon av ladesykluser for LiFePO_4 - batteri. Graf hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9].	23
2.6	Utladning av et litium-ion batteri.	24
2.7	Operasjonsområdet til en LiFePO_4 26,650 celle. Hentet fra Andrea[3] side 7	25
2.8	Utladningskurver for LiCoO_2 - batteri og LiFePO_4 - batteri. Bildet er hentet fra nettsidene til ICC Nexergy[38].	26
2.9	BMS topologier	30
2.10	Prinsippskisse av BMS og ampertimeteller-løsning.	32
3.1	Roboten.	33
3.2	Bilde av batterikasse og åpnet batterikasse, hvor celler og BMS er synlig.	36
3.3	Måling av cellespenninger, sammen med vikarierende batterilader. . .	36
3.4	Delvis oppladning.	38
3.5	Delvis utladningstest. Spenningsmålinger tatt av celle 10 - 16 under utladningstest.	39
3.6	Cellespenninger målt under oppladning av ubalansert batteripakke. .	40
3.7	Balanseringsrigg til bruk for manuell balansering av battericeller. . .	41
3.8	Balansering av battericellene.	41
3.9	Oversiktsbilde av oppsett for utladning av batteripakken	42
3.10	Skisse av oppsett for utladning av batteripakken	42
3.11	Cellespenninger under utladning.	43
3.12	Utladningstest. Strøm i ampere fra batteriet plottet sammen med kapasitet i amperetimer.	43
3.13	Batterispenning plottet mot ladestand under utladning.	44
3.14	Test av over- og underspenningsvernet til BMSen	45
3.15	Skjema for testing av over- og underspenningsfunksjonaliteten i BMS-kortet	46

3.16	Original BMS, kretskort.	47
4.1	Batterier fra Winston Energy Group tilgjengelige på GWL Power sine nettsider[19]	50
4.2	Orion Jr. BMS, bilde hentet fra produktsiden til Orion BMS [15] . . .	52
4.3	Nuvation BMS TM , bildet er utklipp fra Nuvation sine nettsider og viser de forskjellige modulene i systemet[31].	52
4.4	BMS fra 123electric. Bildet er utklipp fra 123electric sine nettsider [1]	53
4.5	Integrerte kretser fra Texas Instruments[35][34].	54
4.6	BMS-kort fra Ebay.	55
4.7	Batteripakke fra Elite Power Solutions. Bilde hentet fra nettsidene til Elite Power Solutions[14].	56
4.8	Batteripakke fra Bren-Tronics. Bildet hentet fra nettsidene til Bren-Tronics[7]	57
4.9	Batteripakke fra Clayton TM Power. Bildet er hentet fra nettsidene til Clayton TM Power[10].	57
4.10	Batterimoduler fra A123 systems. Bildet er hentet fra A123 Systems sine nettsider[2].	57
4.11	ALM TM 12 volts batteri fra NEC Solutions. Bildet er hentet fra nettsidene til NEC Solutions[29].	58
4.12	Bilde av batterimodul fra Valence Technologies[41].	58
A.1	Målte og beregnede verdier for cellespenninger under delvis oppladning av batteripakken.	76
A.2	Målte verdier for cellespenning til celle 10 - 16 under delvis utladning	77
A.3	Måling av strøm og spenning sammen med beregnet resistans i effektmotstander brukt under delvis utladning	77
A.4	Beregnet strøm fra batteriet under delvis utladningstest	78
A.5	Beregnet kapasitet i cellene ut ifra delvis utladningstest	79
A.6	Spenningsmålinger under full oppladning av batteriet første halvdel. .	80
A.7	Spenningsmålinger under full oppladning av batteriet andre halvdel pluss balansering.	81
A.8	Spenningsmålinger under full oppladning av batteriet. Balansering og bleeding.	82
A.9	Strømmålinger og kapasitetsberegninger for full utladning.	83
A.10	Spenningsmålinger under full utladning av batteriet, første halvdel. .	84
A.11	Spenningsmålinger under full utladning av batteriet, andre halvdel. .	85
A.12	Beregning av gjennomsnittsstrøm under utladning	86
A.13	Beregning av gjennomsnittsspenning under utladning	87

Innhold

1	Innledning	13
1.0.1	Bærekraft i landbruket	13
1.0.2	Landbruksrobotikk	14
1.0.3	NMBU - roboten	14
1.0.4	Utvikling av roboten	14
1.1	Problemstilling	15
1.2	Fremgangsmåte	15
2	Teori	16
2.1	Energi	16
2.2	Batterier	16
2.2.1	Battericelle	16
2.2.2	Batterispenning	17
2.2.3	Batterikapasitet	19
2.2.4	Energi og effekt	22
2.2.5	Effektivitet	22
2.2.6	Levetid	22
2.3	Litium-ion Batterier	23
2.3.1	Operasjonsområde	24
2.3.2	Litium-ion kjemier	25
2.3.3	LiFePO ₄ Batterier	26
2.4	Batteristyringssystem	27
2.4.1	Motivasjon og definisjon	27
2.4.2	Funksjoner	27
2.4.3	Topologi	28
2.4.4	Ladestand	29
2.4.5	Balansering	31
2.5	Batteripakker	31
2.5.1	Batterier i serie	31
2.5.2	Batterier i parallell	31
2.5.3	Informasjon fra batteripakken	32
3	Robot - spesifikasjoner og utbedringskriterier	33
3.1	Beskrivelse av roboten	34
3.2	Batteriene til roboten	35
3.3	Undersøkelse av batteriet	35
3.3.1	Delvis utladingstest	36
3.3.2	Full utladingstest	40

3.4	Robotens batteristyringssystem	45
3.5	Undersøkelse av BMS-kretskort	45
3.6	Rekkevidde med to batterier	47
3.7	Utfordringer, oppsummert	49
4	Forslag til forbedringer	50
4.1	Battericeller	50
4.2	Batteristyringssystemer	51
4.2.1	Innkjøp av komplett batteristyringssystem	51
4.2.2	Innkjøp av integrerte kretser	54
4.2.3	Arduino ampertimeteller	54
4.3	Batteripakker	56
4.3.1	Sammenlikning av batteripakkene	58
5	Diskusjon	60
5.1	Målinger på batteriet	60
5.1.1	Delvis oppladning	60
5.1.2	Delvis utladning	61
5.1.3	Fullstendig oppladning	61
5.1.4	Balansering	62
5.1.5	Fullstendig utladning	62
5.1.6	Måleteknikk	63
5.1.7	Rekkevidde	63
5.2	Nåværende batterisystem	64
5.2.1	Batteri	64
5.2.2	Batteristyringssystem	65
5.3	Fremtidig batterisystem	66
6	Konklusjon	70
	Bibliografi	71
A	Excel Regneark	75

Kapittel 1

Innledning

De siste årene har antall gårdsbruk i Norge gått ned[24]. Flere og flere bønder legger ned brukene sine, og der det er mulig slås gårder sammen for å gi større produksjonseenheter. Samtidig minker det totale tilgjengelige jordbruksarealet, blant annet på grunn av at det bygges veier, boliger og industri over jordene[30]. I tillegg vokser befolkningen i Norge, og norsk landbruk må derfor regne med en økning i produksjon de neste årene. Målene som gjelder for dagens landbruk, er diktert av mat- og landbruksmeldingen 'Velkommen til bords', som kan leses i sin helhet på regjeringens nettsider[23]. Tabell 1.1 viser noen av målene som landbruks- og matdepartementet har satt for det norske landbruket. Hvor hovedmålene som nevnes er matsikkerhet, tilstedeværelse av landbruk over hele landet, økt verdiskaping og et bærekraftig landbruk.

Tabell 1.1: Mål for norsk landbruk. Tabellen er hentet fra stortingsmeldingen 'Velkommen til bords', kapittel 1.2[23].

Matsikkerhet	Landbruk over hele landet	Økt verdiskaping	Bærekraftig landbruk
Økt bærekraftig matproduksjon	Sikre bruk av landbruksarealer	Konkurransedyktige verdikjeder og robuste enheter	Beskytte arealressursene
Trygg mat og fullverdig kosthold	Styrke og bidra til sysselsetting og bosetting	Gode kompetansemiljø	Produksjon av miljøgoder
Ivareta forbrukerinteresser	Politikk tilpasset regionale muligheter og utfordringer	Konkurransedyktige inntekter	Sikre naturmangfold
Norge som konstruktiv internasjonal aktør			Klimautfordringene – landbruket en del av løsningen
Videreutvikle Norge som matnasjon			Redusere forurensingen fra jordbruket

1.0.1 Bærekraft i landbruket

Landbruket i dag drives av store, tunge maskiner. Traktor og redskap, som utgjør vogntog på mangfoldige tonn, kjører over jordene mange ganger årlig for å pløye, harve, så, gjødsle og høste. Dette tærer på jorda, og fører til dårligere vekstvilkår



(a) Wall-ye. En fransk robot for vindruedyrking[42].



(b) Ladybird. En australsk robot[39].



(c) Drone fra tyske Microdrones GMBH[28].

Figur 1.1: Et utvalg eksisterende landbruksroboter.

for plantene på grunn av at jorda pakkes sammen av de tunge maskinene[36]. En løsning på dette kan være å innføre små, og lette landbruksroboter, som kan redusere både jordpakkingen og energiforbruket i landbruket, og dermed bidra til å gjøre landbruket mer bærekraftig.

1.0.2 Landbruksrobotikk

Landbruksroboter er noe som forskes på over hele verden. Flere konsepter testes, og potensialet for automatisering av landbruket på verdensbasis er enormt. Figur 1.1 viser tre forskjellige landbruksroboter. Figur 1.1a viser en robot som er laget for å beskjære og overvåke druestokker, utviklet av Wall-ye, softwares & robots, som også tilbyr gressklipperroboter og vaktroboter på nettsidene sine[42]. Ladybird, figur 1.1b, er en robot fra Australian Center for Field Robotics, som har påmonterte solcellepaneler. Den er laget for å overvåke grønnsaksplanter, og skal både kunne luke og høste når den er ferdigutviklet[39]. Dronen i figur 1.1c er produsert av tyske Microdrones GMBH, og har blitt brukt i forsøk som ser på muligheten for å bruke droner i ugressbekjempelse[37].

1.0.3 NMBU - roboten

Våren 2014 ble det bygd en landbruksrobot ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet(NMBU). Heretter beskrevet som 'landbruksroboten'. Fem mastergrads-studenter designet og bygde roboten i forbindelse med sine mastergradsoppgaver. I ettertid har en av disse studentene blitt ansatt ved NMBU, og har fortsatt arbeidet med å utvikle roboten i samarbeid med andre ansatte ved NMBUs Institutt for matematiske realfag og teknologi(IMT). Formålet med roboten, er at den skal være en lett landbruksmaskin som kan utnytte diverse verktøysmoduler til å utføre oppgaver som tradisjonelt har blitt utført for hånd eller med traktor.

1.0.4 Utvikling av roboten

Det er ennå ikke blitt laget noen verktøy som roboten kan bruke, men det blir i skrivende stund utviklet verktøy for både såing og luking. Nettverk for kommunikasjon

mellom datamaskin, motorkontrollere og styringsmotorer er på vei til å bli implementert, og vil forhåpentligvis være operativt i løpet av kort tid. Energiforsyningen til roboten blir behandlet i denne oppgaven.

Energisystemet

Landbruksroboten har fortsatt til gode å bli testet ute på et jorde, men målet er at det skal skje i løpet av våren og sommeren 2015. Når roboten går ute på jordet, er det viktig at den til enhver tid vet hvor den er hen, hvor den skal, og om den har nok energi igjen til å komme seg dit. Rekkevidden vil blant annet avhenge av hva slags redskap roboten bærer med seg. Roboten drives av batterier, og må derfor ha en kapasitetsmåler som til enhver tid vet hvor mye lengre roboten kan kjøre. Spesielt viktig er det at roboten kan komme seg tilbake til ladestasjonen i tide for å lade opp batteriene igjen. For å få til dette, må roboten få informasjon om kapasiteten og ladestanden til batteriene sine. I tillegg er det viktig at roboten utnytter energien den har tilgjengelig i batteriepakkene sine på best mulig måte, om den skal bidra til å øke bærekraften i landbruket.

1.1 Problemstilling

Ett av batteriene som allerede er kjøpt inn til roboten skal undersøkes for å se om kapasiteten er som forventet. Mulige oppdateringer for batterisystemet til roboten skal utredes og presenteres.

1.2 Fremgangsmåte

Nåværende batteripakke

Den nåværende batteripakken ble evaluert ved at det ene av to innkjøpte batterier ble undersøkt. Ett av batteriene er allerede installert på roboten, og er i stand til å drive den på egen hånd. Det ble derimot fryktet at det andre batteriet var ødelagt. Dermed ble dette batteriet åpnet opp og testet som beskrevet i kapittel 3.

Fremtidig batteripakke

Det har blitt gjort omfattende undersøkelser av diverse nettbutikker for å finne alternative løsninger for batteripakken til fremtidige roboter. Resultatet av disse undersøkelsene er presentert i kapittel 4.

Kapittel 2

Teori

Dette kapitlet beskriver teori rundt batterier og batteristyringssystemer. Første del handler om batterier generelt, før litium-ion batterier, og litium-jernfosfat(LiFePO_4)-batterier beskrives spesielt. Deretter kommer det teori rundt batteristyringssystemer, som er en nødvendighet for å ivareta litium-ion batterier. Til slutt beskrives batteripakker og smarte batterier

2.1 Energi

Energi kan lagres i mange forskjellige former, men ikke alle formene har den samme nytteverdien. Det meste av energi vi bruker i dag har kommet via stråling fra sola for så å bli lagret i en eller annen form, for eksempel dannelsen av biomasse gjennom fotosyntese, og fossile energikilder som olje og kull. På grunn av klimautfordringene som nå gjør seg gjeldende over hele verden, er det ønskelig å fase ut fossilt karbon som energikilde til fordel for fornybare energikilder. Den viktigste fornybare energikilden i 2012 etter produksjon var vannkraft, deretter følger vindkraft, og bioenergi, før solenergi og geotermisk varme[21]. Et tilbakevendende problem med de nye fornybare energikildene, spesielt vind og sol, er at energien kun er tilgjengelig enten når sola skinner, eller når vinden blåser. Å lagre denne energien til senere bruk er et problem. En indirekte måte å lagre elektrisk energi på er å benytte seg av batterier.

2.2 Batterier

Denne seksjonen beskriver virkemåten til de fleste batterityper som er i bruk i dag. Teorien er i all hovedsak hentet fra Dell and Rand - "Understanding batteries"[11], kapittel 2 og 3, med mindre en annen kilde er spesifisert.

2.2.1 Battericelle

Batterier er bygd opp av galvaniske celler, hvor kjemisk energi konverteres til elektrisk energi ved behov¹. I en galvanisk celle er to elektroder av forskjellig materiale nedsenket i en elektrolytt, se figur 2.1. Ved hver elektrode skjer det en halvcelle-reaksjon. Den negative elektroden består vanligvis av et metall. Under utladning av cellen vil metallet på den negative elektroden splittes opp til et positivt ladd

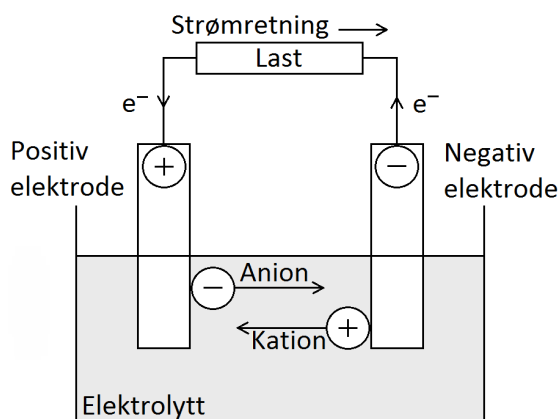
¹Oversatt definisjon fra Dell and Rand[11], 'Glossary', side xxiii

ion(kation) og elektroner. Antall elektroner som blir frigjort vil tilsvare ladningen til kationet, se likning 2.1a. På den positive elektroden, som normalt består av et metalloksid med et høyt oksidasjonstall, vil metalloksidet reagere med elektronene som kommer igjennom lederen, og danne negative ioner(anioner), se likning 2.1b. Under utladning vil halvcellereaksjonene reverseres.

Halvcellereaksjoner:



Her er M et metall, X er et oksidasjonsmiddel, typisk et metalloksid med høyt oksidasjonstall, e^{-} er elektroner, mens n angir antall elektroner som er involvert i reaksjonen. Pilene indikerer i hvilken retning reaksjonene går under opp- og utladning.



Figur 2.1: En galvanisk celle koblet til en last, og som dermed fungerer som et batteri under utladning.

Elektrolytt

For at batteriet ikke skal få en intern kortslutning ved at elektronene vandrer direkte fra den negative til den positive elektroden gjennom battericellen, må elektrolytten være en elektrisk isolator samtidig som den leder ioner mellom elektrodene.

2.2.2 Batterispenning

Spenningen til et batteri bestemmes av elektrodematerialene. Den nominelle celledspenningen er spenningen som står over cellen når det ikke går noen strøm. Dette kalles også åpen krets spenningen.

Polarisering

Polarisasjonsoverspenninger er et spenningsfall som oppstår ved elektrodene på grunn av to forskjellige mekanismer når det går en strøm igjennom den galvaniske cellen. For det første vil det være begrensninger i ladningsoverføringen fra elektrolytt til elektrode. I tillegg til det faktum at konsentrasjonen av ladningsbærere i nærheten av elektrodene minker ettersom ladningsbærerne beveger seg sakte gjennom elektrolytten.

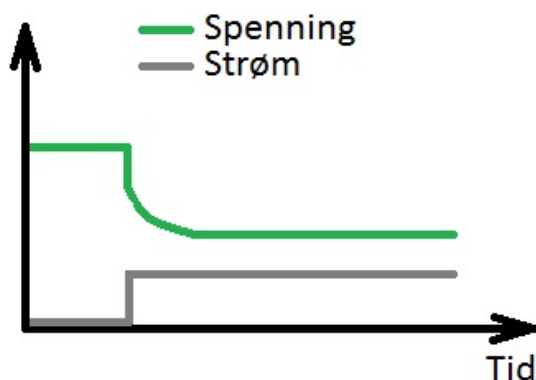
Intern resistans

Det vil også være et ohmsk spenningsfall fra cellen og ut på polene til batteriet på grunn av at battericeller har en indre resistans. Forholdet mellom strøm og spenning er gitt ved Ohms lov:

$$V = R \cdot I \quad (2.2)$$

Relaksjon

Når det går en strøm gjennom en battericelle, vil dette føre til at cellespenningen endres. Figur 2.2 viser hvordan spenningen endrer seg når et batteri plutselig kobles til en last. Tilsvarende vil spenningen stige når lasten kobles fra.



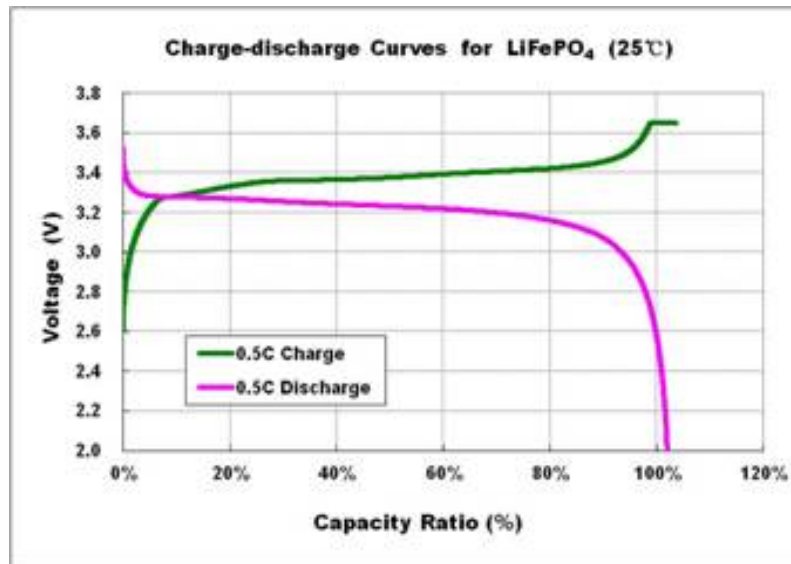
Figur 2.2: Batterispenning endrer seg gradvis ved en endring i strømmen. Egen reproduksjon av Andrea[3] side 11.

Utladningskurve

Om et batteri lades opp eller ut med en konstant strøm, kan spenningen plottes mot ladestand som vist i figur 2.3. Det kommer frem av figuren at for en gitt ladestand vil batteriet ha en forskjellig spenning på polene avhengig av om det lades opp eller ut.

Opp- og utladingsspenning

Oppladning av et batteri pågår til cellespenningen har nådd et visst nivå, som bestemmes av batterikjemien. Etter at batteriet er fulladet vil den energien som eventuelt tilføres brukes opp i andre reaksjoner, for eksempel formasjon av oksygen- og hydrogengass under oppladning av blybatterier, som er grunnen til at blybatterier



Figur 2.3: Opp- og utladningskurve for LiFePO₄ - batteri. Spenning er plottet mot andel batterikapasitet tilgjengelig i batteriet. Graf hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9].

ofte utstyres med ventiler for å hindre at det bygger seg opp trykk inne i batteriet (Dell and Rand[11], side 101). Tilsvarende vil alle batterier også lades ut til en viss nedre spenning. Enkelte batterityper kan lades ut til null volt uten særlig problemer, mens andre batterikjemier er meget følsomme for både under- og overladning. Det vil si at for høye, eller for lave spenninger, kan ødelegge battericellene. Når celler lades for mye opp kalles dette overladning, hvis celler lades ut til en lavere spenning enn de har godt av kalles dette dyputladning.

2.2.3 Batterikapasitet

Hvis et batteri lades ut under konstant strøm, kan kapasiteten til batteriet uttrykkes ved amperetimer, altså produktet mellom strømmen som går og tiden det tar å nå en definert nedre cellespenning. Hvis strømmen ikke er konstant, er kapasiteten gitt ved integralet av strømmen over tiden det tar å tømme batteriet:

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2.3)$$

Hvor C er kapasiteten og $i(t)$ er strømmen som funksjon av tiden. Kapasiteten angis vanligvis i amperetimer (Ah), hvor amperetime er et mål på ladning, og en amperetime tilsvarer 3600 Coulomb. Kapasiteten til et batteri vil være forskjellig avhengig av celledemperaturen og utladningsstrømmen. Samtidig vil den endre seg med alderen til batteriet, og hvordan batteriet har blitt brukt. Generelt vil et batteri ha mindre tilgjengelig kapasitet hvis det er kaldt, eller hvis batteriet lades ut med en høy strøm. Kapasiteten synker også etterhvert som batteriet blir eldre. Hvor dyp batteriet lades ut, har gjerne også en påvirkning på hvordan kapasiteten utvikler seg.

Utladningsrater

For å bestemme kapasiteten til et batteri, er det dermed viktig å definere ved hvilken temperatur og ved hvilken utladningsstrøm kapasiteten gjelder. Batteriprodusenter oppgir gjerne en nominell kapasitet. Dette er ofte ved 5 timers utladning og 25 °C til en spesifisert nedre cellespenning. C/t brukes for å beskrive hvilken utladningsstrøm kapasiteten gjelder for. C/5 er utladning i løpet av 5 timer, mens 1C er utladning i løpet av en time. Figur 2.4 viser hvordan den tilgjengelige batterikapasiteten under utladning kan endre seg med (a)-utladningsstrøm og (b)-temperatur.

Strøm og spenning under utladning

Gjennomsnittlige verdier for strøm og spenning over et tidsintervall, kan beregnes ved følgende formel:

$$\bar{x} = \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t x(t) dt \quad (2.4)$$

Hvor x er parameteren som gjennomsnittet skal beregnes for, fra tiden t_0 til tiden t [8].

Ladestand

Andelen av den totale batterikapasiteten som er tilgjengelig for videre utladning kalles ladestand ('State Of Charge' - SOC).

$$SOC = 100 - DOD \quad (2.5)$$

Hvor SOC er ladestand i prosent og DOD er utladning (Depth Of Discharge) i prosent.

Hylle-liv

De aller fleste batterier opplever selvutladning. Dette skjer selv om batteriet ikke er tilkoblet noen last, og har en tendens til å øke med økende temperatur. Ladestanden til batteriet synker altså selv om batteriet står ubrukt.

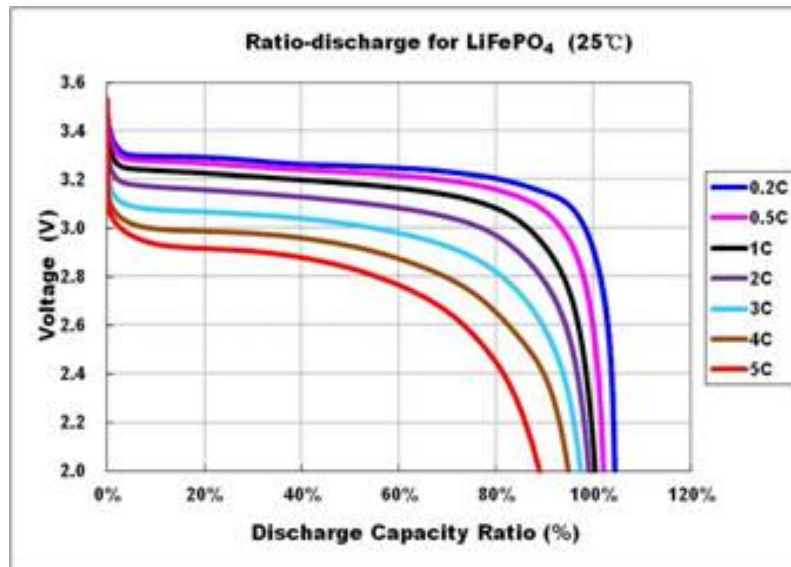
Tilgjengelig energiinnhold i et batteri

For å sammenlikne energiinnhold i batterier med forskjellig spenning, ganges kapasiteten opp med den nominelle spenningen for å få watt-timer innholdet. Energien i et batteri kan uttrykkes ved hjelp av kapasiteten til batteriet og batterispenningen ved:

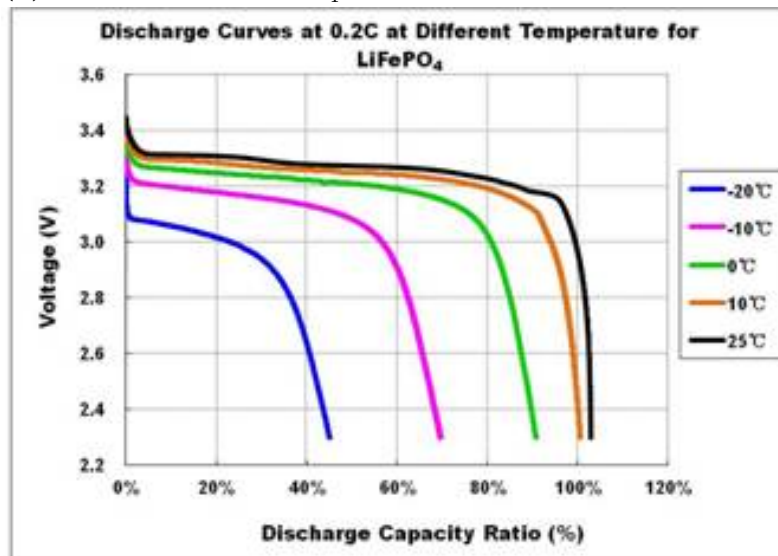
$$E = C \cdot V \quad (2.6)$$

Hvor E er tilgjengelig energi i watt-timer [Wh] C er batterikapasiteten [Ah] fra likning 2.3, og V er batterispenningen ved åpen krets.² Energien som leveres til lasten vil imidlertid avhenge av utladningsraten, da spenningen og kapasiteten faller med økende utladningsstrøm.

²1 Wh = 3600 Joule



(a) Utladning av LiFePO₄ - batterier ved forskjellige C - rater



(b) Utladning av LiFePO₄ - batterier ved forskjellig temperatur

Figur 2.4: Utladning av LiFePO₄ - batterier. Grafer hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9]

2.2.4 Energi og effekt

Sammenhengen mellom energi og effekt er gitt ved:

$$E = P \cdot t \quad (2.7)$$

Hvor P er effekt i Watt og t er tid. Elektrisk effekt er gitt ved:

$$P = I \cdot V \quad (2.8)$$

Hvor P er effekt i Watt, I er strømmen i ampere og V er spenning i volt. Spesifikk energi er energiinnhold delt på vekt.

$$e = \frac{E}{m} \quad (2.9)$$

Her er e spesifikk energi, E er energi og m er masse. Spesifikk effekt er effekten et batteri kan levere delt på massen.

2.2.5 Effektivitet

I følge Dell and Rand[11] kapittel 3, er det to mekanismer som bidrar til at det er mindre energi tilgjengelig i et batteri under utladning enn energimengden som ble brukt til å lade opp batteriet.

Coulomb ineffektivitet

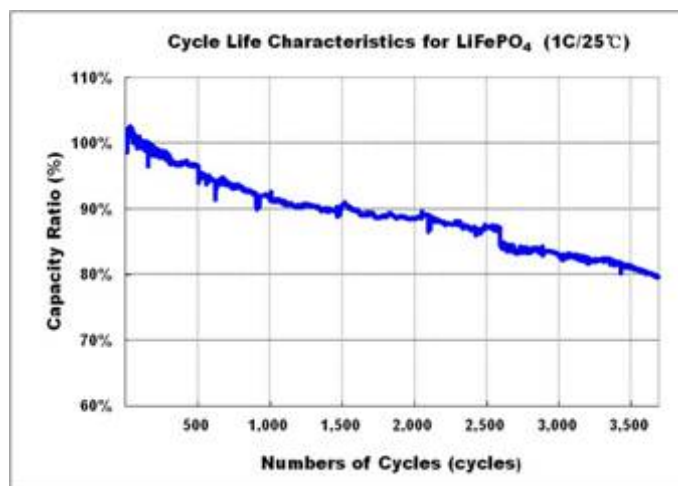
Strøm brukes opp i andre reaksjoner enn dem som lader opp batteriet. Eksempler på dette kan være at elektrolytten dekomponeres eller at batterikomponenter korroderer.

Voltaisk ineffektivitet

Som beskrevet ovenfor, er oppladningsspenningen i et batteri alltid større enn utladningsspenningen ved den samme ladestanden. Dette er på grunn av spenningsfall over komponenter inni batteriet i samarbeid med polarisasjonstapene, og fører til at høyere utladningsstrømmer gir lavere total energimengde ut av batteriet. Se figur 2.3.

2.2.6 Levetid

For alle typer batterier synker den tilgjengelige kapasiteten når batteriet blir eldre. Et batteri kan anses som oppbrukt når kapasiteten er på 80 prosent av den opprinnelige kapasiteten da batteriet var nytt. Et batteri som anses som 'oppbrukt' etter denne definisjonen inneholder altså fortsatt mesteparten av kapasiteten sin. Figur 2.5 viser et eksempel på hvordan batterikapasiteten synker med antall ladesykluser for et LiFePO_4 - batteri.



Figur 2.5: Kapasitet som funksjon av ladesykluser for LiFePO_4 - batteri. Graf hentet fra nettsidene til Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd [9].

2.3 Litium-ion Batterier

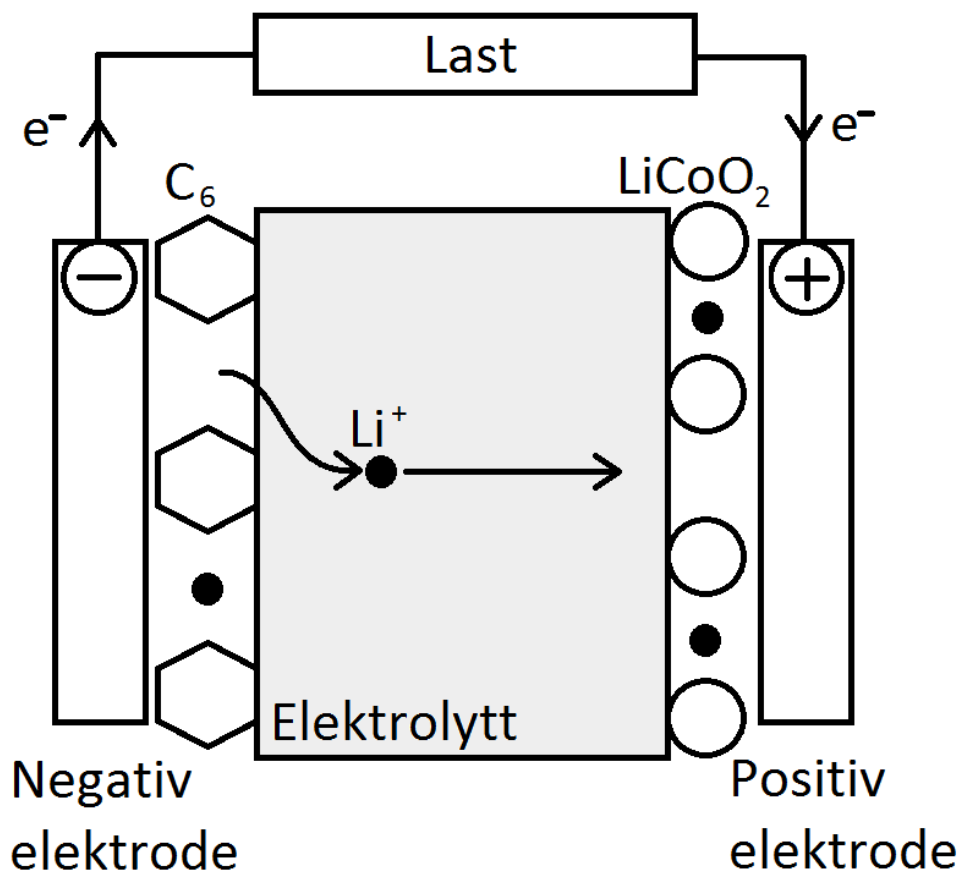
Denne seksjonen bruker informasjon hentet fra Dell and Rand [11] kapittel 10, Weicker [43] kapittel 2 og Andrea [3] kapittel 1.

Det er flere grunner til at litium-ion batterier har blitt så populære. En meget viktig grunn, er at cellene har høyere spenning enn tradisjonelle batterikjemier. Mens batterier som blybatteriet og nikkell-metallhydrid batteriet har cellespenninger på henholdsvis 2,1 volt og 1,2 - 1,3 volt, har litium-ion batteriet en cellespenning på godt over 3 volt, avhengig av kjemien. Siden den tilgjengelige energien i et batteri øker med cellespenningen, er høy cellespenning en ettertraktet egenskap. Litium-ion batterier har også en relativt lav selvutladning sammenlignet med andre batterikjemier, og har også en høy coulombsk effektivitet under oppladning. De har den høyeste energitettheten av batterier som er tilgjengelige på markedet i dag, og blant de høyeste effektivitetene. Samtidig virker de bra over et stort temperaturområde. En ulempe er at cellene må overvåkes nøye for at de ikke skal bli ødelagt.

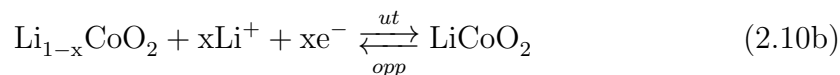
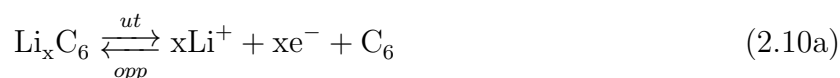
Ut- og oppladning

Figur 2.6 viser hvordan et litium-ion batteri oppfører seg under utladning. Når cellen kobles til en last, vil litium ioner bevege seg fra den negative elektroden, gjennom elektrolytten, og til den positive elektroden, mens elektronene beveger seg gjennom lasten i den eksterne kretsen, se likning 2.10a. Ved den positive elektroden vil litium-ionene reagere med elektronene som har kommet via lasten, og legge seg inne i den positive elektrodestrukturen 2.10b. Om cellen lades opp, vil litium-ionene flytte motsatt vei gjennom elektrolytten. Litium-ionene flytter seg altså frem og tilbake mellom elektrodene ved opp- og utladning. Halvcellereaksjonene kan skrives på følgende måte:

Halvcellereaksjoner:



Figur 2.6: Utladning av et litium-ion batteri. Litium-ioner beveger seg fra den negative elektroden, gjennom elektrolytten, og legger seg inne i gitterstrukturene i den positive elektroden. Elektronene går via lasten i den eksterne kretsen. Ved oppladning vil prosessen reverseres.

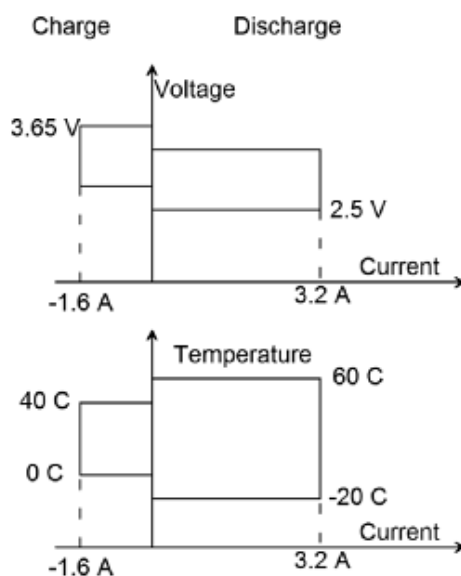


Her representerer C_6 den negative elektroden, i dette tilfellet karbon, mens LiCoO_2 er den positive elektroden. Li^+ er litium ioner, mens x representerer andelen av litium-ioner som kan trekkes ut av den positive elektroden. Ifølge Dell and Rand[11], side 149, er dette tallet 0,45.

2.3.1 Operasjonsområde

Litium-ion celler må brukes innenfor et visst operasjonsområde. Dette området defineres av spenningen over, strømmen gjennom, og temperaturen i cellene, og avhenger også av om cellene lades opp eller ut. Figur 2.7 viser operasjonsområdet til

en $26,650^3$ LiFePO_4 celle, hentet fra Andrea[3], side 7. Om en celle brukes utenfor disse områdene, vil den ta skade av det. Omfanget av skaden avhenger av hvilken grense operasjonen av cellen overskrider. Hvis litium-ion celler lades opp over en viss spenning, vil cellene ødelegges, og kan begynne å brenne. Samtidig vil mange celler bli ødelagt om de lades ut under en viss spenning. Levetiden til litium-ion celler synker drastisk om de lades ut utenfor et visst temperaturområde, eller lades opp utenfor et enda smalere temperaturområde. Om operasjonstemperaturen er for høy, kan batteriene begynne å brenne. Det kan også bygge seg opp trykk inne i cellen, som gjør at batteriene kan eksplodere. Levetiden synker hvis utladningsstrømmen er for stor. Cellene kan også ta skade av høye strømpulser som varer lengre enn i noen sekunder. Grensene for parameterne nevnt ovenfor, vil variere betydelig fra en cellekjemi til en annen, og også innenfor samme cellekjemi fra forskjellige fabrikanter. Figur 2.7 sier at denne battericellen kan lades ut til minimum 2,5 volt ved en strøm på maksimalt 3,2 ampere i temperaturer mellom -20°C og $+60^\circ\text{C}$. Oppladning må skje mellom 0°C og $+40^\circ\text{C}$, ved en oppladningsstrøm på maksimalt 1,6 ampere til en spenning på 3,65 volt.

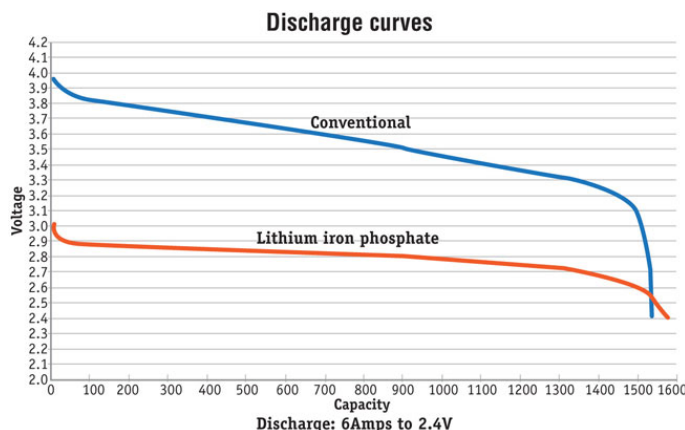


Figur 2.7: Operasjonsområdet til en LiFePO_4 26,650 celle. Hentet fra Andrea[3] side 7. Den øverste grafen viser grensene for strømmen gjennom cellen på førsteaksen plottet mot spenningen over cellen på andreaksen. Denne cellen kan ikke lades over 3,65 volt eller under 2,5 volt. Utladningsstrømmen må ikke overskride 3,2 ampere, og oppladningsstrømmen kan ikke overskride 1,6 ampere. Den nederste grafen viser grensene for strømmen gjennom cellen mot temperaturen i cellene. Denne cellen må lades opp mellom 0°C til $+40^\circ\text{C}$, mens den tåler utladning mellom -20°C til $+60^\circ\text{C}$. Negativ strøm betyr at cellen lades opp. Ved positiv strøm lades cellen ut.

2.3.2 Litium-ion kjemier

Litium-ion er en samlebetegnelse på batterier som utnytter prinsippet med at litium-ioner beveger seg ut og inn av såkalte interkaleringselektroder. Disse elektrodene er

³26,650 angir størrelsen til batteriet. Diameter = 26 mm, lengde = 650 mm.



Figur 2.8: Utladningskurve for LiCoO_2 - batteri i blått(Conventional) og LiFePO_4 - batteri i rødt(Lithium iron phosphate). Spenning er plottet mot kapasitet ved utladning på 6 ampere ned til en nedre cellespenning på 2,4 volt. Bildet er hentet fra nettsidene til ICC Nexergy [38].

laget slik at litium-ioner ligger interkalert i elektrodestrukturene, som kan representeres som en slags gitterstruktur, og kan hoppe ut og inn av disse strukturene i en prosess som er meget reversibel og dermed kan gjentas mange ganger uten at elektrodene desintegrerer nevneverdig. Karbon er det foretrukne materialet for den negative elektroden og brukes i de fleste litium-ion batterier, mens den positive elektroden kan bestå av for eksempel litium-koboltoksid (LiCoO_2), eller litium-jernfosfat (LiFePO_4).⁴ Det finnes også flere materialer som brukes, og forskes på ifølge Weicker[43] side 31. Figur 2.8 viser utladningskurver for LiCoO_2 , og LiFePO_4 - batterier. Som det kommer fram av figuren, så har LiCoO_2 - batteriene en mye høyere cellespenning. LiFePO_4 - batterier foretrekkes allikevel i større batteripakker, da disse batteriene er ansett som tryggere.

2.3.3 LiFePO_4 Batterier

Et problem med de 'vanlige' litium-ion batteriene, LiCoO_2 som man finner i laptop og mobiltelefoner, er at de kan være utrygge hvis de skades. I systemer med høyere energiinnhold er det ofte batterier som har en positiv elektrode laget av LiFePO_4 , da disse cellene ikke utvikler like mye energi om de skulle overopphetes[12]. LiFePO_4 -batterier har en flat spenningskurve som gir en relativt stabil spenning under utladning. Spenningen starter gjerne på 3,75 Volt etter oppladning, deretter følger et område mellom ca 70 - 20 prosent ladestand, hvor spenningen ligger på omtrent 3,3 Volt før cellen når sitt nedre spenningsnivå på omtrent 2,5 Volt. Den relativt lave cellespenningen til LiFePO_4 batteriene i forhold til andre litium-ion batterier, gjør at det trengs flere celler for å nå det samme spenningsnivået i forhold til for eksempel LiCoO_2 - celler. Samtidig vil watt-timer innholdet i disse batteriene være lavere ved samme amperetimer-innhold. Den lave energitettheten, i forhold til andre litium-ion batterier på 90 - 140 Wh/kg, gir relativt store og tunge batteripakker. Det finnes flere variasjoner i LiFePO_4 kjemien, som gjerne er patentert og brukes av forskjellige firmaer. A123 systems[2] har sin Nanophosphate® LiFePO_4 , teknologi, mens Valence[41] bruker LiFeMgPO_4 , hvor det er lagt til magnesium i batteriene,

⁴Det positive elektrodematerialet brukes for å identifisere batteritypen.

mens Winston Battery[44] bruker LiFeYPO_4 hvor yttrium legges til i batteriene.

2.4 Batteristyringssystem

Denne seksjonen beskriver batteristyringssystemer (Battery Management System - BMS), hvordan de virker og hvorfor de er viktige. Stoffet er i all hovedsak hentet fra Andrea [3] og Weicker [43].

2.4.1 Motivasjon og definisjon

Innføringen av litium-ion batterier har brakt med seg nye utfordringer for hvordan batterisystemer designes. Ytelsen er mye bedre enn tidligere batterityper, men disse høyt teknologiske cellene er ikke så robuste som eldre teknologi som for eksempel blybatterier. Derfor trenger batteripakker bestående av litium-ion teknologi et batteristyringssystem som holder cellene innenfor et operasjonsområde de tåler (se figur 2.7). Ut ifra hvor komplekst, og dyrt, system man er ute etter, finnes det flere forskjellige typer BMSer å velge mellom. Poenget med en BMS er å beskytte cellene og batteriet fra å bli ødelagt, øke levetiden til batteriene og samtidig passe på at batteriet er klart til bruk når det er behov for det. For å få til dette kan en BMS blant annet; overvåke batteriet ved å utføre målinger, beskytte batteriet ved å løse ut brytere eller be andre enheter om å løse ut brytere, beregne tilstanden til batteriet basert på målinger, maksimere ytelsen til batteriet, eller sende informasjon om batteriet til brukeren, eller til eksterne enheter.

2.4.2 Funksjoner

En BMS som skal ivareta et litium-ion batterisystem, må ifølge Andrea[3], side 16, ha et minstemål av funksjonaliteter. For at ingen av cellene skal få for høy spenning, må oppladningsstrømmen kunne brytes. Strømmen må også kunne brytes om cellene skulle bli for varme, dette gjelder både ved utladning og oppladning. Det kan også være muligheter for å iverksette kjøling ved for eksempel å bruke vifter. Utladningsstrømmen må også kunne brytes for å stoppe utladningen om en celle skulle få for lav spenning. Avhengig av spenning, temperatur og tidligere strømnivå må BMSen også passe på at ikke ut- eller oppladningsstrømmen blir for høy. Det finnes ennå ikke en fast terminologi for alle BMSer som kan beskrive funksjonene som utføres, ifølge Andrea[3]. En BMS kan med andre ord være alt fra en smart batterilader til et fullstendig overvåkningssystem som tar seg av cellene og rapporterer batteristatus til enheten som bruker batteriet.

Konstant strøm, konstant spenning - lader

Litium ion batterier lades gjerne opp med en konstant strøm, konstant spenning-lader (CCCV - Constant Current, Constant Voltage). Ladestrømmen holdes først konstant, helt til cellespenningen når et visst nivå. Deretter holdes spenningen fast til spenningsforskjellen mellom batteriet og oppladningsspenningen fra laderen har blitt så liten at ladestrømmen faller under et visst nivå, og oppladningen er fullført.

Regulator

En regulator, eller bløde ('bleeder') - BMS balanserer celler ved å omdirigere ladestrømmen fra fulladede celler via en motstand i parallell med cellen. En såkalt blødemotstand. Bløde - BMSen sørger dermed for at cellene lades opp like mye ved å tømme de fulleste cellene for energi så de andre cellene kan ta dem igjen.

Måler

Vil kun måle parametere, muligens også utføre beregninger og sende informasjon videre, men uten å gjøre noe aktivt med battericellene eller batteristrømmen basert på målingene.

Monitor

En monitor vil også måle forskjellige parametere, men i tillegg vil den ha funksjoner for å utføre handlinger basert på målingene, for eksempel å kontrollere en lader. En monitor vil passe på at cellene holder seg innenfor operasjonsområdet sitt, men har ikke nødvendigvis funksjoner for å optimalisere ytelsen til cellene ved for eksempel balansering.

Balancer

'Balancers' har de samme funksjonene som en monitor, men den maksimerer også ytelsen til cellene ved å bruke cellebalansering. Ofte inneholder enheten mulighet for kommunikasjon med systemet som bruker batteriene.

Protector

En 'protector', er som en 'balancer', men den inneholder også en bryter som slår av strømmen til batteripakken. En 'protector' er ofte integrert i mindre batteripakker, slik at beskytteren ligger inne i batterikassen sammen med cellene, og de eneste ledningene ut er strømledninger for opp- og utladning av batteriet.

2.4.3 Topologi

En BMS kan være koblet opp mot batteriet den beskytter på forskjellige måter.

Sentralisert

I en sentralisert konfigurasjon vil en BMS styre alle cellene, og alle funksjoner vil bli ivaretatt av en enhet. Fordelen med dette er at man slipper å tenke på kommunikasjon mellom enheter, bakdelen er at det kanskje ikke er mulig å skalere et system. Om man ønsker et mindre antall celler, er det ikke sikkert at dette er mulig, og hvis det er mulig, sparer man ingenting på å minske antall celler, da overvåkingenheten fortsatt koster det samme. En sentralisert enhet som overvåker et batteri bestående av 16 celler er vist i figur 2.9a.

Master-slave

I en master-slave topologi vil en sentral enhet styre flere underliggende enheter, som hver for seg får ansvaret for en del av cellene i batteripakken. Disse systemene er enklere å skalere opp eller ned, hvis det er ønskelig å gjøre endringer på batteripakken. En BMS-master som overvåker fire slaveenheter, som igjen passer på fire celler hver, er vist i figur 2.9b.

Modulert

En modulbasert BMS tilsvarer en sentralisert BMS hvor man har flere identiske moduler som sammen styrer en batteripakke. En av modulene blir satt som master, da denne har overoppsyn med hele batteriet, og tar seg av kommunikasjon til systemet som bruker batteriene. De andre modulene er redusert til måleapparater som kommuniserer data til master-enheten. En BMS modul har i figur 2.9c blitt satt som master enhet og kommuniserer med resten av systemet, mens den andre modulen kun måler sin del av cellene, og rapporterer data til master enheten.

Distribuert

En distribuert BMS har et BMS - kort koblet over hver eneste battericelle. Dette gir god kontroll over cellene da hver modul kan måle spenning og temperatur over sin egen celle, samtidig som cellebalansering kan utføres på oppfordring fra kontrolleren. Denne topologien gjør at det ikke blir så mange ledninger som flyter rundt i batteripakken. En kontroller som får informasjon om cellene via cellebrett montert over hver sin celle er vist i figur 2.9d. Ofte vil det første og det siste brettet i strengen være et dedikert 'inn'- eller 'ut'-brett.

2.4.4 Ladestand

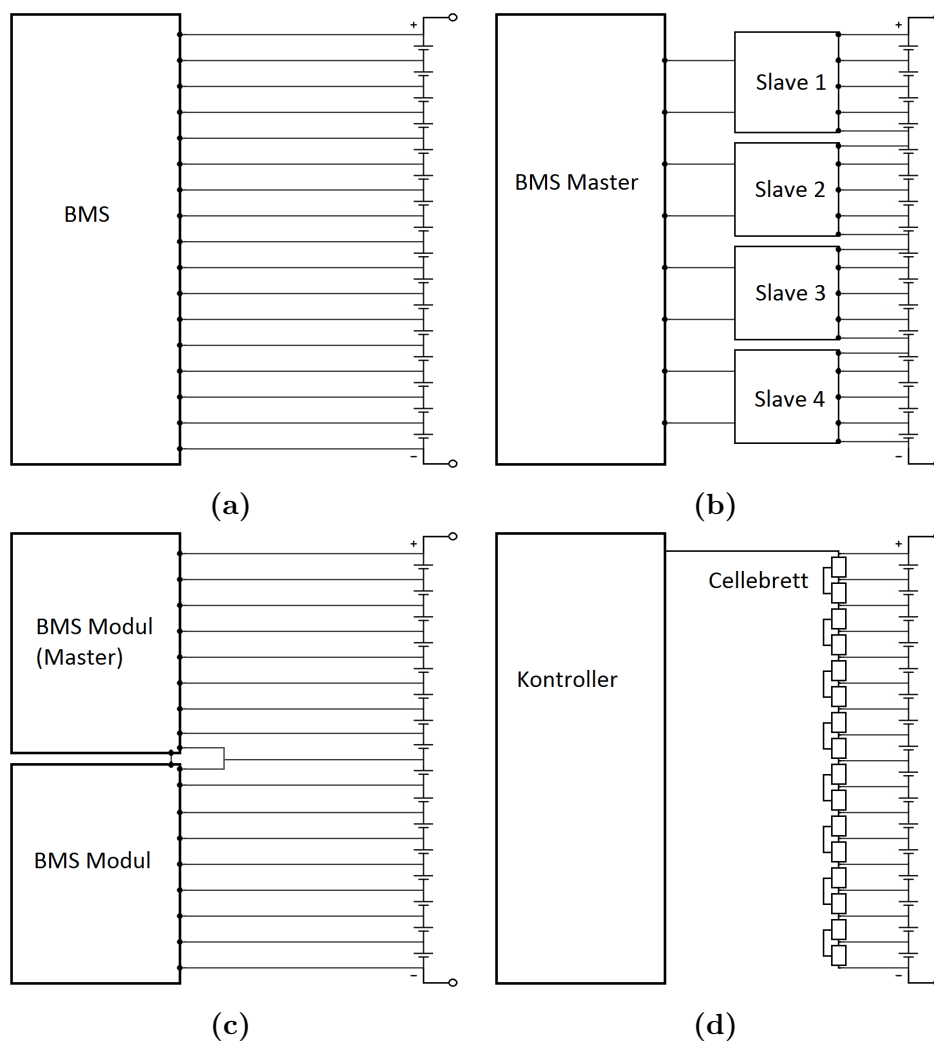
Det er flere måter å måle ladestand på. Noen er relativt enkle, men samtidig unøyaktige. Mer avanserte systemer gir bedre indikasjoner på ladestanden. For å unngå dyputladning av batteriet, og for å sikre seg mot at batteriet ikke tømmes under drift, kan kapasiteten som BMSen bruker for å beregne ladestand settes til 80 prosent av den nominelle batterikapasiteten.

Spenning som ladestandsindikator

Litium-ion batterier med LiCoO_2 elektroder, har en relativt bratt spenningskurve, som gjør at avlesning av ladestanden kan gjøres ved å måle spenningen. For LiFePO_4 batterier, er denne kurven så flat i store deler av ladestandsområdet, at en liten usikkerhet i spenningsmålingen, fører til en stor usikkerhet i ladestandsberegningen. Se figur 2.8. Ved høy og lav ladestand er spenningskurven til LiFePO_4 bratt nok til å kunne brukes som ladestandsindikator.

Coloumb telling som ladestandsindikator

Ladestanden kan også beregnes ved å telle amperetimen som har gått ut av batteriet siden det var fullt. En slik tilnærming krever ofte at ladestanden må kalibreres, stort sett ved å lade opp batteriet, så måleren selv kan telle hvor mange amperetimer



Figur 2.9: BMSer med forskjellig topologi som overvåker hvert sitt batteri med 16 celler i serie. I (a) sentralisert BMS, (b) master-slave BMS, (c) modulert BMS og (d) distribuert BMS.

som utgjør ett fulladet batteri. Enkelte slike målere er ganske unøyaktige de første syklusene, men 'lærer' seg etterhvert hvor stor kapasitet batteriet faktisk har.

Avansert ladestandsmåling

En metode som kan brukes, er å kombinere spenningsmåling med coulomb telling. Da vil coulomb-telleren måle strømmen i de flate delene av utladningskurven, mens spenningsmålinger kan brukes for å kalibrere ladestanden ved høy, eller lav ladestand, hvor utladningskurven er bratt nok. Mer moderne ladestandsmålere bruker avanserte teknikker for å beregne ladestanden til et batteri. Metoder for ladestandsberegninger inkluderer målinger av den interne resistansen til hver enkelt celle og oppslagstabeller for ladestand avhengig av temperatur og utladningsstrøm. Det finnes også mer avanserte matematiske modeller og algoritmer for å beregne ladestand, som det for eksempel kan leses mer om i Weicker[43], kapittel 15.

2.4.5 Balansering

Når batterier lades opp, vil ikke spenningen nødvendigvis fordele seg likt over alle cellene, for eksempel fordi cellene har forskjellig ladestand når oppladningen starter (Andrea[3] side 12). Forskjellen i ladestand kan komme av at alle celler opplever forskjellig selvutladning fra andre celler. For å utnytte kapasiteten i en batteripakke på best mulig måte, er det viktig at cellene i pakken er balansert. Balansering, betyr her at cellene i en batteripakke føres nærmere hverandre i ladestand. I et balansert batteri har alle cellene lik ladestand. Ved utladning vil et batteri være tomt når den cellen som har lavest ladestand, og dermed lavest cellespenning, er tom. Ved oppladning av batteriet, vil en BMS som overvåker cellespenningene slå av ladestrømmen om en av cellene får høy nok spenning. Da er det ikke sikkert at resten av cellene er ferdig oppladet. For å få ladet resten av cellene videre, kan den cellen med for høy spenning lades ut over en blødemotstand. Da vil spenningen til denne cellen synke ettersom ladestanden synker, og BMSen kan slå på ladestrømmen til hele batteripakken igjen. Balanseringen fortsetter til alle cellene er fulladet.

2.5 Batteripakker

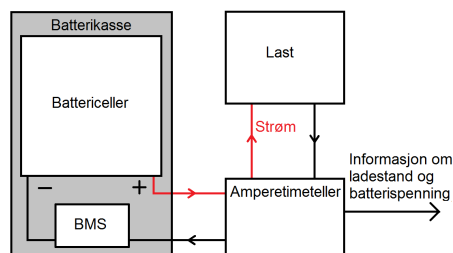
Om det er ønskelig å øke enten kapasiteten eller spenningen i forhold til en battericelle, kan flere celler kobles sammen, enten i parallell eller serie. En parallellkobling vil gi en høyere kapasitet, mens en seriekobling vil gi en høyere spenning. Andrea[3] argumenterer i kapittel 6 for at det, om mulig, er best å først bestemme seg for ønsket kapasitet, for så å koble celler i serie. Å koble celler i serie først for så å koble disse cellestrengene, eller batteristrengene, i parallell, vil føre til at det trengs mer elektronikk for å overvåke cellene. Samtidig som at parallelle strenger ofte vil føre til dårligere stabilitet, om enkelte celler skulle bli svakere enn andre. En dårlig celle i en seriekobling vil ha en større påvirkning på kapasiteten til en hel pakke enn en dårlig celle i parallellkobling.

2.5.1 Batterier i serie

Batterier med innebygde BMSer kan ikke uten videre plasseres i serie. Om elektronikken inne i batteripakkene ikke er i stand til å takle høye spenninger kan dette føre til at batteriene ødelegges. Andre batterier er derimot laget for å kunne kobles sammen til pakker med høyere spenning. Dette må undersøkes nøye før batterier eventuelt kobles sammen.

2.5.2 Batterier i parallell

Batterier koblet i parallell er heller ikke en triviell sak med litium-ion kjemier. Hvis to batterier ved forskjellig ladestand kobles sammen, kan det gå høye strømmer mellom batteriene. Selv om to batterier i parallell er fulladet, og så kobles sammen, kan små ulikheter i batteripakkene gjøre at det ene batteriet fortsetter å lade det andre batteriet. Hvis cellene ikke er ordentlig balansert innad i batteriene er det mulig at det batteriet som lades opp har en celle som ligger høyere enn snittet av cellene i det andre batteriet. Denne cellen vil da motta ladning og kan i verste fall overlades.



Figur 2.10: Prinsippskisse av BMS og amperetimeteller-løsning. BMSen balanserer cellene og skrur av batteristrømmen hvis cellene er utenfor operasjonsområdet. Amperetimetelleren måler amperetimer og batterispenningen, og sender informasjonen til en datamaskin.

2.5.3 Informasjon fra batteripakken

Om et batteri er utstyrt med en BMS, kan denne BMSen være basert på analog eller digital teknologi. Den viktigste forskjellen er at en analog BMS merker at det er et problem med batteriet, men kan ikke gi noen informasjon om feilen. For eksempel kan den merke at en celle har for høy spenning, men den vet ikke hvilken celle det gjelder eller hvor høy spenningen er. Det BMSen gjør er å åpne en bryter for å slå av ladestrømmen. En digital BMS kan på den annen side lagre data om alle cellene, og sende disse videre til en datamaskin for behandling. Det finnes flere måter som batteripakker og BMSer kan sende informasjon på. For eksempel: CAN, SMBus, Modbus, RS-485 og ethernet. For mer informasjon om disse, henvises det til Weicker[43], kapittel 10. Enkelte enheter bruker også vanlig USB(Universal Serial Bus) tilkobling.

Analog og digital BMS

Litium-ion batteripakker kommer i de fleste tilfeller med en innebygd BMS. Disse ivaretar gjerne battericellene, men er ikke i stand til å kommunisere med systemet som bruker batteriet. De eneste ledningene som går ut av batteriet er for oppladning og utladning. Disse BMSene er gjerne basert på analog teknologi. I smarte batterier, sitter det en BMS som i tillegg kan kommunisere tilstanden til batteriet ut til systemet som buker det.

Informasjon fra et batteri uten digital BMS

Selv om en batteripakke inneholder en analog BMS, kan det hende at man ønsker å hente ut informasjon om ladestand og spenning. En fremgangsmåte kunne vært å lage ekstra hull i batterikassen og legge nye ledninger for å hente ut de analoge målingene, men det er ikke alltid dette er praktisk, eller ønskelig. En annen fremgangsmåte kan være å installere en amperetimeteller på utsiden av batterikassen. Denne amperetimetelleren kan da måle strømmen som går inn og ut av batterikassen, og dermed gjøre et overslag over ladestanden til batteriet. Det er også mulig å legge inn en krets som måler spenningen over batteriet, for å kalibrere ladestanden som beskrevet i avsnitt 2.4.4. Figur 2.10 viser hvordan et slikt system kan se ut. En enkel BMS sitter inne i batteripakken og passer på at cellene holder seg innenfor sitt operasjonsområde, mens amperetimetelleren sitter på utsiden og måler strømmen gjennom og spenningen over batteripakken.

Kapittel 3

Robot - spesifikasjoner og utbedringskriterier



Figur 3.1: Roboten.

Dette kapitlet innledes med en beskrivelse av roboten, for så å beskrive batteripakken mer inngående. Den ene av de to batteripakkene til roboten ble åpnet opp og undersøkt. Innholdet i batteripakken består av battericeller og en innebygd BMS. Kapasiteten til battericellene blir undersøkt ved hjelp av en delvis utladningstest, og deretter ved en full utladning. Funksjonaliteten til BMSen blir også undersøkt. Deretter blir det gjennomført rekkeviddeberegninger basert på merkeverdier for batteriet, og resultater fra utladningstesten. Til slutt oppsummeres utfordringene som er oppdaget i løpet av undersøkelsene.

3.1 Beskrivelse av roboten

Landbruksroboten veier i seg selv omtrent 150 kg, og er dimensjonert med tanke på å bruke verktøy med en slik størrelse at samlet vekt på robot pluss verktøy blir omtrent 300 kg[27]. Roboten består av en U - formet aluminiumsramme med et hjul i hvert hjørne, hvor aluminiumen gjør rammen lett og bevegelig slik at hjulene skal kunne følge underlaget roboten kjører på[6]. Det er meningen at verktøymodulene skal monteres på rammen slik at verktøy og ramme former et rektangel, se figur 3.1. For å gjøre verktøymodulene så enkle som mulig, er det meningen at mesteparten av nødvendige sensorer skal monteres på fremsiden av rammen. Batteriene er montert på sidene av roboten, og det er meningen at disse skal forsyne både robot og redskap med energi.

Verktøy

De forskjellige verktøymodulene skal lett kunne byttes ut. Forskjellige verktøy vil ha forskjellig vekt og energiforbruk.

Motorer

Fremdriftsmotorene til roboten er på 600 W av typen BL823-A02, og ble kjøpt inn fra 3Men[18]. Fire motorer er kjøpt inn, og er plassert slik at de driver hvert sitt hjul. Merkedata for motoren for spenning og strøm er 48 volt DC og 12,8 ampere.

Styring

Styringen skjer ved at fire JVL Mac141 servomotorer sitter montert rett over hvert hjul[18]. Hvert hjul kan altså stilles inn uavhengig av de andre, og roboten kan bevege seg horisontalt i alle retninger. Motorene har en merkeeffekt på 134 W. Disse motorene kan brukes med en driftsspenning fra 12 - 48 volt, hvor absolutt maksimal spenning er 50 volt DC[22].

DC-DC - omformer

For å sørge for en stabil spenningsforsyning fra batteriene til servomotorene, har DC-DC - omformere blitt koblet inn mellom disse[26]. Disse omformerne har en effektivitet på 76 prosent og er begrenset til å gi ut 48 volt og 7,3 ampere. En omformer forsyner to servomotorer med spenning.

Kommunikasjon

Roboten er utstyrt med en SC215ML datamaskin, med Linux operativsystem. I tillegg har den en LCD-skjerm av typen SD100EHB, vanntett berøringskjerm, med en størrelse på 10,4". Det sitter også en Arduino mikrokontroller i roboten, og det er lagt opp til kommunikasjon mellom enheter via CANOpen.

3.2 Batteriene til roboten

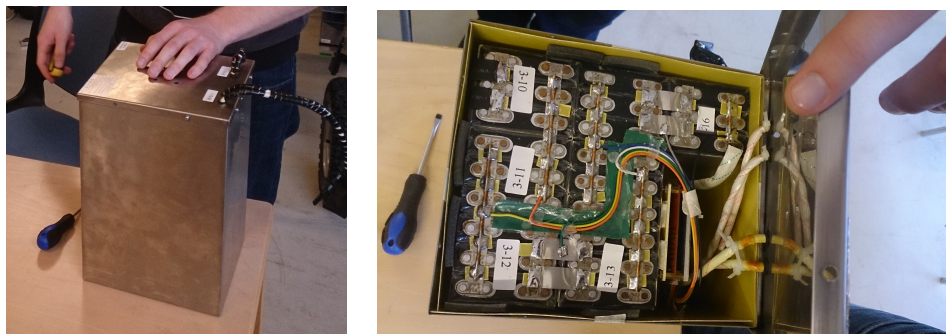
To 30 amperetimer LifePO₄ batteripakker, ble kjøpt inn sammen med ladere via Golden Motor [17]. Spesifikasjonene oppgitt på nettsidene i til Golden Motor kan lese av i tabell 3.1. Batteriene veier 18 kg hver, og er bygd opp av 16 seriekoblede moduler. Den ene batteripakken er vist i figur 3.2a. Ifølge nettsidene til Golden Motor, har disse batteriene en spenning på 48 volt, men LiFePO₄ batterier har en nominell cellespenning på 3,3 volt per celle, og en maksimal cellespenning etter oppladning på 3,65 volt. Disse batteripakkene har dermed en nominell batterispenning på 52,8 volt, og etter en full oppladning vil de ha en spenning på 58,4 volt. Modulene som batteripakken er bygd opp av består av tre battericeller i parallell, hvor hver av disse cellene har en kapasitet på 10 amperetimer. Videre i oppgaven er hver slik modul behandlet som en enhet. Målte cellespenninger refererer altså til spenningen som er målt over en slik modul. I figur 3.2b vises de syv øverste cellene(modulene) sammen med BMSen. To par ledninger kommer ut av batterikassen. Det ene paret skal kobles til en lader, det andre paret skal kobles til en last.

Tabell 3.1: Spesifikasjonene til batteriene som utgjør batteripakken til landbruksroboten, sammen med spesifikasjoner for laderene.

Golden Motor Batteri - LFP4830M	
Vekt	18 kg
Spenning	48(52,8) ¹ V
Kapasitet	30 Ah
Dimensjoner	180*190*320 mm
Maksimal utladningsstrøm	90 A
Maksimal kontinuerlig utladningsstrøm	60 A
Ladesykluser	> 1000
Mebo Lader - Li300-48AL	
Ladespenning	58,4 V
Oppladningsstrøm	5 A
¹ - Beregnet fra antall celler og nominell cellespenning	

3.3 Undersøkelse av batteriet

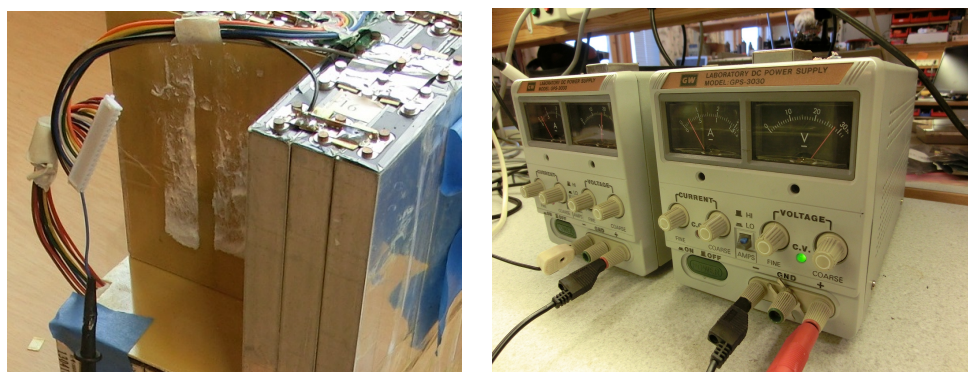
Det ene batteriet som ble kjøpt inn til roboten, ble kortsluttet ved første oppladning som følge av en loddefeil i laderkontakten, Grimstad[18] side 57. I tillegg til å ha blitt kortsluttet, vil batteriene også ha opplevd ytterligere selvutladning i løpet av tiden de har stått stille. Det var derfor ønskelig å utføre en utladningstest for å undersøke kapasiteten som batteriet kunne levere, og dermed se om cellene var blitt



(a) Det ene av to batterier som er kjøpt inn til roboten fra Golden Motor. Fotografi av Lars Grimstad.

(b) Batteriet til roboten. Lokket er skrudd av, og de syv øverste celledokumentene kan ses sammen med BMSen som er limt fast på høyre side av celle 13 og 14. Fotografi av Lars Grimstad

Figur 3.2: Batteripakken som undersøkes.



(a)

(b)

Figur 3.3: Bilder fra forsøkene gjort på batteripakken. I (a) vises det hvordan kontakten for ledninger som måler cellespenning ble brukt for å ta målinger. I (b) vises to av laboratoriestrømforsyningene som vikarierte som batterilader.

skadet. Slike tester tar lang tid, særlig hvis det brukes lave strømmer. Derfor ble det først utført en delvis utladningstest, for å få en indikasjon på tilstanden til cellene.

3.3.1 Delvis utladningstest

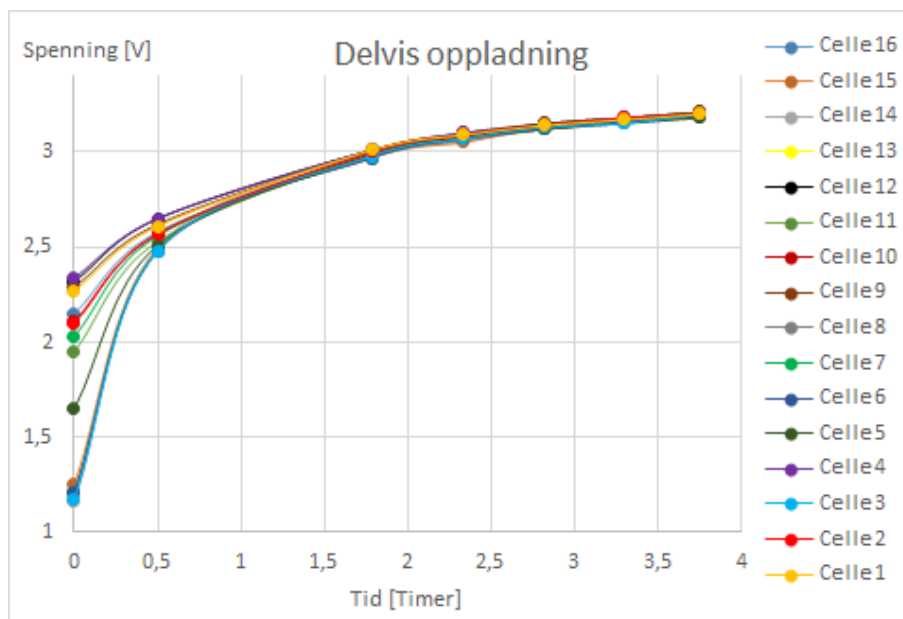
Delvis oppladning av batteripakken

Da batterispenningene først ble målt, ble det klart at cellespenningene var mye lavere enn 2,5 volt, men de var også veldig forskjellige fra hverandre. Figur 3.3a viser hvordan cellespenningene ble målt ved å benytte kontakten for ledningene som måler cellespenning. Hver ledning som kommer inn i den hvite kontakten har samme potensial som en av polene til en av cellene i batteriet. Ved å koble et voltmeter over den nederste pinnen på kontakten, tilsvarende den negative polen på celle 16, den cellen i batteriet nærmest jord, kunne spenningen over de øvrige cellene finnes ved å holde den ene pinnen fra voltmeteret ved jord i batteriet, for så å føre den andre pinnen oppover kontakten. Cellespenningene etter denne første målingen vises i tabell 3.2, siste kolonne. Etter at cellespenningene ble målt, ble batteriet

satt til en oppladning på omtrent tre amperetimer. Under oppladningen ble det brukt labstrømforsyninger av typen GW, GPS-3030, som vist i figur 3.3b. Etter denne oppladningen ble cellespenningene som vises i kolonne nummer to i tabellen målt. Etter oppladningen ble batteriet stående over helgen, før spenningene ble målt igjen mandag morgen. Slik fikk cellespenningene tid til å synke ned til åpen krets potensialet. Dette spenningsfallet vises i kolonne fire. Cellespenningene ble også målt under oppladningen, og resultatet er vist i figur 3.4.

Tabell 3.2: Cellespenninger. Siste kolonne viser de cellespenningene som først ble målt da batteriet ble åpnet opp. Oppladning 3 Ah gjengir cellespenningene etter en delvis oppladning på omtrent 3 Ah, og neste kolonne viser de målte cellespenningene etter at batteriet hadde stått i ro en helg. Spenningsfallet som cellene opplevde over helgen står i fjerde kolonne.

Celle	Oppladning 3 Ah	En helgs hvile	spenningsfall	Første måling
16	3,2	3,18	0,02	2,15
15	3,19	3,16	0,03	1,25
14	3,19	3,17	0,02	1,16
13	3,19	3,16	0,03	1,21
12	3,21	3,19	0,02	2,32
11	3,18	3,17	0,01	1,95
10	3,19	3,17	0,02	2,11
9	3,21	3,19	0,02	2,29
8	3,19	3,16	0,03	1,2
7	3,2	3,18	0,02	2,03
6	3,19	3,16	0,03	1,21
5	3,18	3,16	0,02	1,65
4	3,2	3,18	0,02	2,34
3	3,2	3,17	0,03	1,17
2	3,2	3,18	0,02	2,1
1	3,2	3,18	0,02	2,27



Figur 3.4: Cellespenningene ble målt under oppladningen av batteriet. Batteriet mottok ladning tilsvarende omtrent tre amperetimer.

Delvis utlading av syv celler

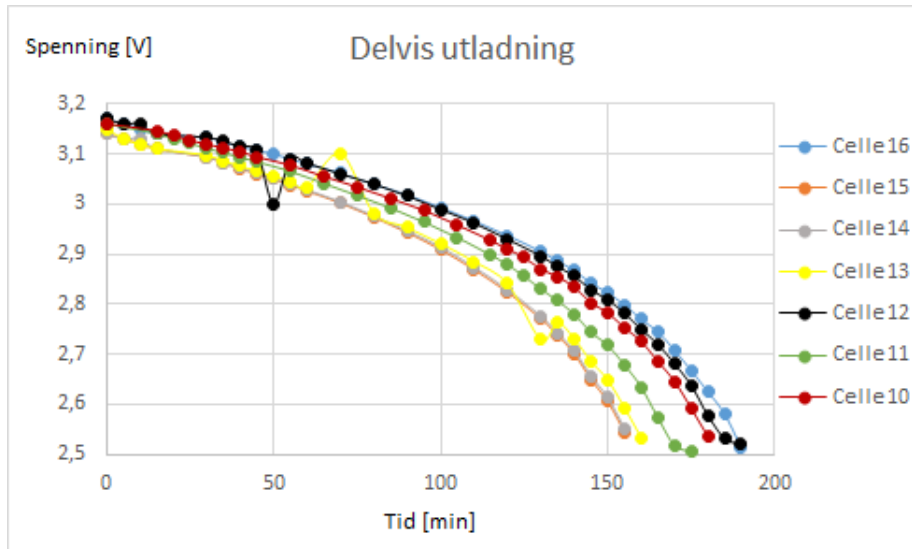
Etter oppladningen ble det gjennomført en utladingstest for å se hvor stor andel av den mottatte ladingen battericellene kunne levere ut til en last, for dermed å få en pekepinn på tilstanden til disse cellene. Effektmotstander ble loddet over syv av cellene, og spenningen ble målt mens cellene ladet ut til omtrent 2,5 volt. På grunn av at resistansen i disse motstandene kan variere fra merkeverdien, ble strøm og spenning målt samtidig midt under forsøket, slik at resistansen til motstandene kunne beregnes ut ifra likning 2.2. Deretter ble spenningsmålingene og den beregnede verdien til motstandene brukt til å beregne strømmen som gikk gjennom motstandene under forsøket, fortsatt ut ifra likning 2.2. Denne strømmen ble igjen brukt sammen med tidsintervallene på målingene for å beregne ladingen ut av batteriet, altså kapasiteten, ved likning 2.3. I beregningene er det antatt at strømmen innenfor et tidsintervall er gjennomsnittet av strømmen da intervallet startet og da intervallet sluttet.¹ I praksis vil da integralet i likning 2.3 beregnes på følgende måte:

$$C = \sum_{k=1}^n \frac{i(t_k) + i(t_{k+1})}{2} \cdot (t_{k+1} - t_k) \quad (3.1)$$

Hvor n er antall målinger, k er indeksen til målingen, et tall mellom 1 og n , $i(t)$ er strømmen ved tid t_k . Ved eventuelle uklarheter rundt omformingen fra likning 2.3 til likning 3.1 henvises det til Thomas' Calculus[8], kapittel 5.

Cellespenningene under utlading er vist i figur 3.5, mens resultatene for beregnet kapasitet vises i tabell 3.3.

¹Excel ark for spenningsmålinger er gjengitt i figur A.2, mens excel ark for beregninger av resistans, strøm og kapasitet er gjengitt i figur A.3, A.4 og A.5



Figur 3.5: Delvis utladningstest. Spenningsmålinger tatt av celle 10 - 16 under utladningstest.

Tabell 3.3: Cellekapasitet ved lav ladestand. Spenning målt da batteripakken først ble undersøkt, sammen med beregnet utladning(kapasitet) fra hver celle, og andelen denne kapasiteten utgjør av 3 amperetimer.

Celle	Spenning før oppladning [V]	Beregnet kapasitet [Ah]	Andel av 3 Amperetimer
16	2,15	2,83	0,94
15	1,25	2,40	0,80
14	1,16	2,32	0,77
13	1,21	2,44	0,81
12	2,32	2,86	0,95
11	1,95	2,72	0,91
10	2,11	2,64	0,88

3.3.2 Full utladingstest

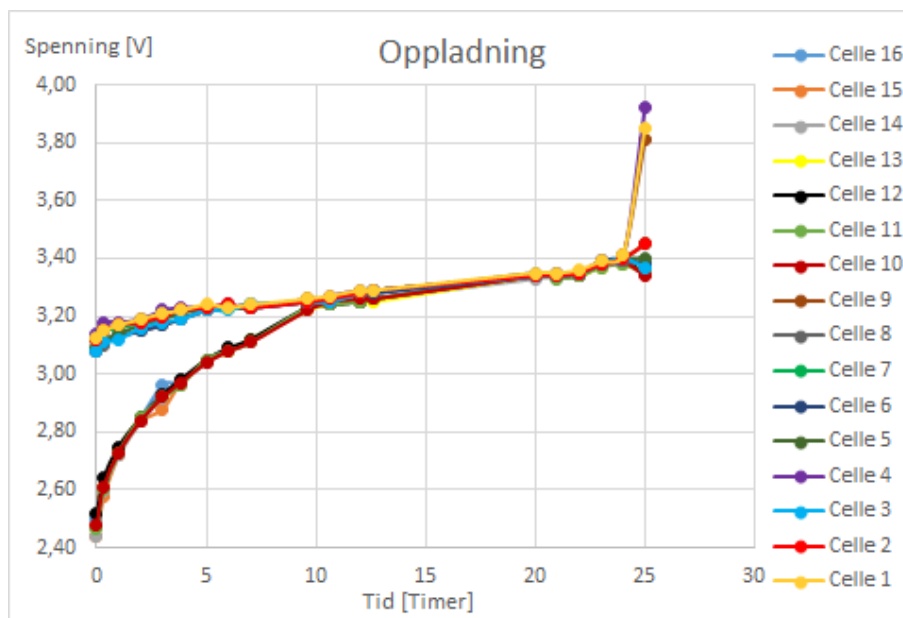
Full oppladning av batteripakken

På bakgrunn av resultatene fra den delvise utladingstesten, ble så batteriet ladet helt opp, men nå var BMSen koblet på batteriet igjen for å unngå overoppladning av cellene. I starten fikk batteriet en lav oppladningsstrøm, som ble økt etterhvert som cellene kom opp på et høyere ladestandsnivå. Tabell 3.4 viser hvor stor ladestrøm som ble brukt og hvor lenge batteriet ble ladet, sammen med ladningen batteriet mottok. Under oppladningen ble cellespenningene målt. Disse er vist i figur 3.6.

Tabell 3.4: Oppladningsstrøm. Strømmen i ampere, sammen med tidsintervallet for denne strømmen, og beregnet ladning(kapasitet) tilført batteriet i løpet av tidsintervallene i amperetimer.

Strøm [A]	Tid [Timer]	Kapasitet [Ah]
0,25	6,35	1,59
1	13	13
2	2,5	5
3	2	6
Sum	23,9	25,6

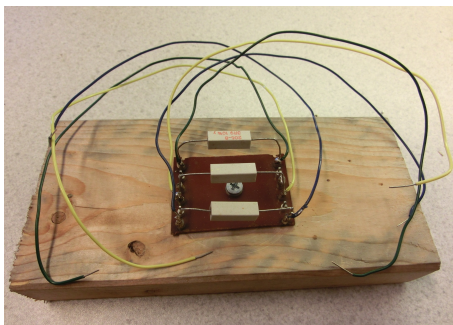
Som det kommer frem av figuren, stiger spenningen på enkelte celler veldig brått mot slutten av oppladningen. På grunn av at cellespenningen steg for høyt, ble ladestrømmen brutt av BMSen. For å kunne fortsette oppladningen måtte cellene balanseres manuelt.



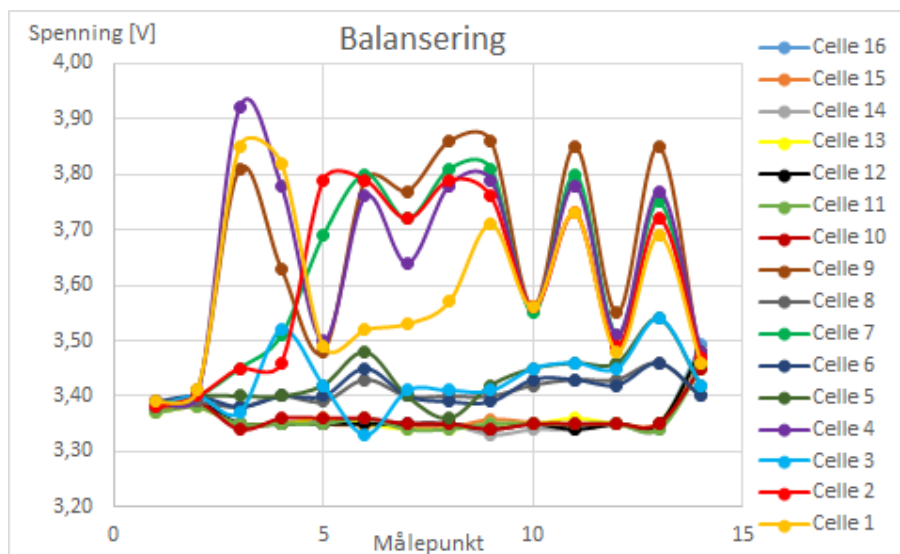
Figur 3.6: Cellespenninger målt under oppladning av ubalansert batteripakke.

Balansering av cellene i batteripakken

For å balansere cellene i batteripakken ble det laget en liten rigg bestående av effekt-motstander, som kunne lade ut tre og tre celler samtidig, se figur 3.7. Motstandene



Figur 3.7: Balanseringsrigg til bruk for manuell balansering av battericeller.



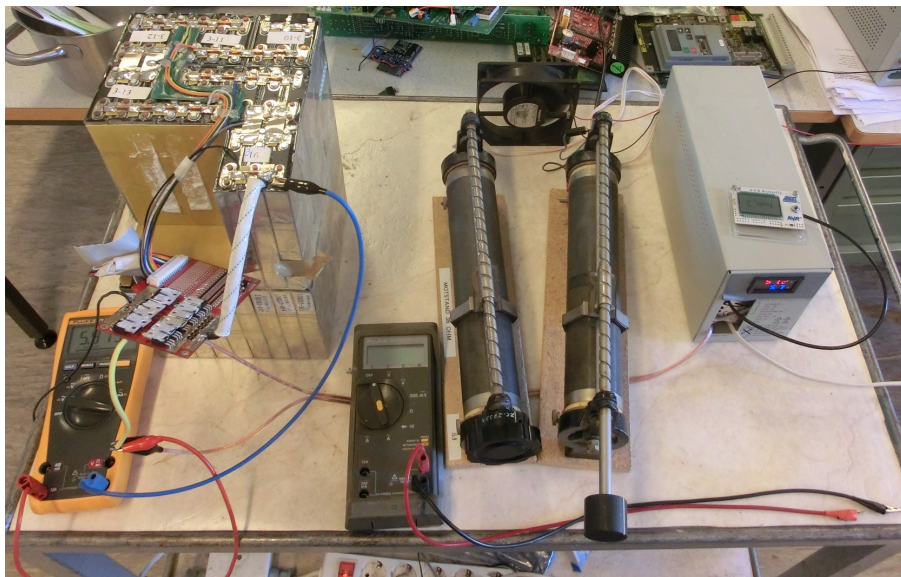
Figur 3.8: Balansering av battericellene. Førsteaksen angir målepunkter, mens andreaksen angir cellespenninger i volt. Målepunkt nummer 1 og 2, tilsvarer de to siste målepunktene for cellespenningene under oppladning i figur 3.6.

ble koblet over de cellene som hadde høyest spenning, for å lade disse ut. Mens utladningen pågikk var batteriet koblet fra strømforsyningene slik at ikke oppladningen plutselig skulle starte igjen under balanseringen. Etter en tid med utladning ble balanseringsriggen koblet fra, og oppladningsstrømmen koblet til igjen. Dette ble gjentatt helt til cellespenningene ble ansett som like nok. Cellespenningene under balanseringen kan ses i figur 3.8.

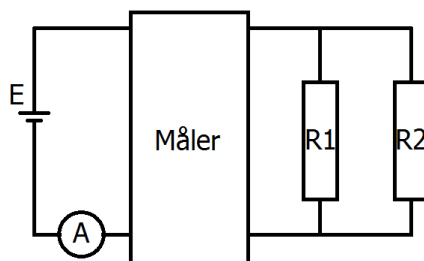
Kapasitetstest av batteripakken

For å teste kapasiteten til det fulladede batteriet, ble det koblet til en last tilsvarende 8 Ohm, for å få ut en strøm på cirka 6 ampere. Denne strømmen ble valgt fordi den i teorien skal tømme en 30 Ah batteripakke på 5 timer. Det ble også koblet til et multimeter i serie, samt en kapasitetsmåler.² Denne kapasitetsmåleren har en innebygd bryter som kan kutte strømmen ved ønsket spenningsnivå. For å unngå dyputladning, ble kapasitetsmåleren stilt inn på å bryte strømmen ved 45 volt, tilsvarende omtrent 2,8 volt per celle. I figur 3.9 ses oppsettet av testen, mens et forenklet koblingskjema er beskrevet i figur 3.10. To multimeter ble benyt-

²Laget av Tom Ringstad ved en tidligere anledning.

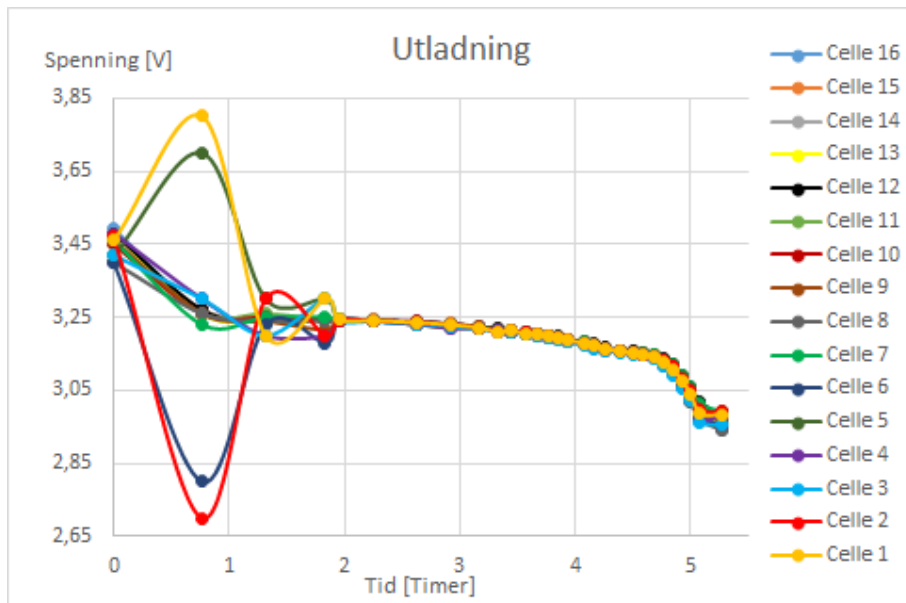


Figur 3.9: Oversiktsbilde av oppsett for utladning av batteripakken. Batteriet ses til venstre i bildet sammen med det gule multimeteret (amperemeteret) som målte strømmen i kretsen. Det grå multimeteret ble brukt til å måle cellespenninger. De to store sylindere midt på bildet er motstandene, mens kapasitetsmåleren er den grå boksen som ses helt til høyre i bildet. Bak motstandene står en vifte for å kjøle dem ned.

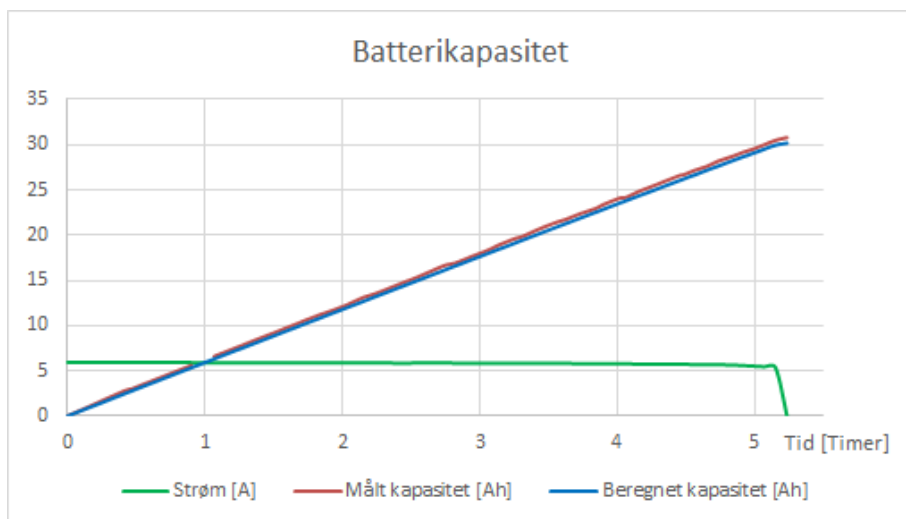


Figur 3.10: Skisse av oppsett for utladning av batteripakken. E er batteriet som er koblet til kapasitetsmåleren (Måler) som videre er koblet opp mot to motstander, R1 og R2 i parallell. A viser amperemeteret.

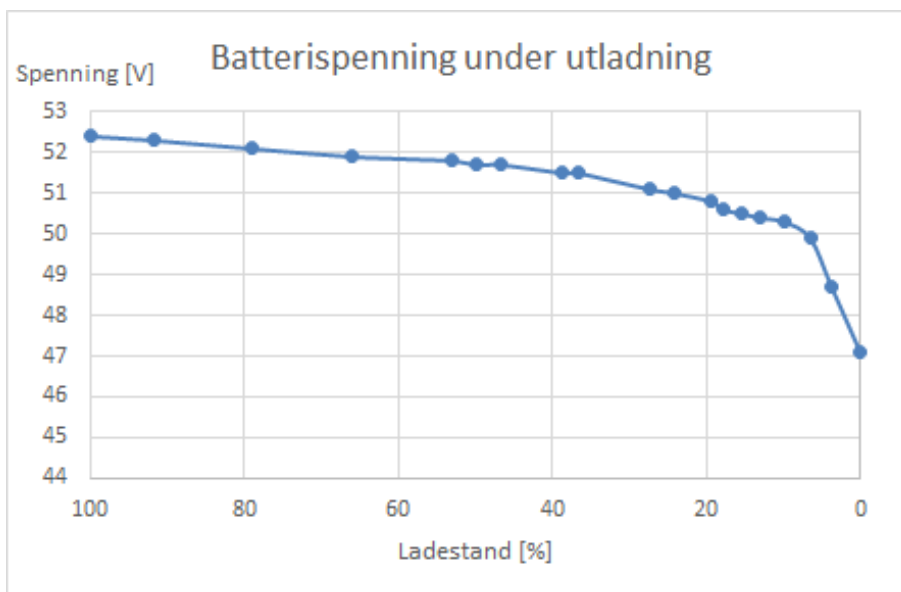
tet, et for å måle strøm (heretter referert til som amperemeteret), og et for å måle spenning. Under utladningen ble strømmen målt av amperemeteret, mens kapasitetsmåleren viste verdier for spenningen over batteriet, strømmen gjennom kretsen, samt ladningen som hadde gått ut av batteriet siden testen startet. Batterispenningen, og spenningen over de individuelle cellene ble målt med det grå multimeteret. Cellespenningene ble enten målt rett på polene på de øverste cellene, eller på den hvite kontakten på BMS-kortet. Figur 3.11 viser cellespenningene i løpet av utladningen. Etter å ha målt strømmen og tidsintervallene for denne, kunne dette brukes til å beregne kapasiteten ved likning 2.3. I figur 3.12 vises de målte verdiene for strøm i ampere, sammen med de beregnede verdiene for ladningen trukket ut av batteriet i amperetimer. Den målte kapasiteten fra kapasitetsmåleren er også vist i amperetimer.



Figur 3.11: Cellespenninger under utladning ved ca 6 ampere over 5 timer.



Figur 3.12: Utladningstest. Strøm fra batteriet i ampere(grønn) plottet sammen med målte(rød) og beregnede(blå) verdier for batterikapasiteten i amperetimer.



Figur 3.13: Batterispenning plottet mot ladestand under utladning.

Kapasitet, energiinnhold og effekt levert av batteriet under test

Etter å ha stått på i 5 timer og 14 minutter, tilsvarende 5,23 timer, ble det beregnet ved hjelp av likning 2.3 at batteriet hadde gitt fra seg ladning tilsvarende 30,2 Ah. Dataloggeren viste 30,8 Ah. Utladningen startet på omtrent 3,4 volt per celle, og gikk ned til omtrent 2,8 volt per celle. Den målte batterispenningen er plottet mot ladestanden til batteriet i figur 3.13. Gjennomsnittsspenningen ble beregnet ved å bruke formel 2.4.

$$\bar{V} = \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t V(t) dt = \underline{51,3V} \quad (3.2)$$

Dette integralet ble beregnet i excel på samme måte som beskrevet i likning 3.1. Denne summen blir så delt på tiden det tok å lade ut batteriet.³ Gjennomsnittsspenningen ble altså beregnet til å være 51,3 volt. Energien som ble levert til lasten fra batteriet, kan beregnes ved likning 2.6:

$$E = 30,2Ah \cdot 51,3V = \underline{1549Wh}$$

Dette gir ifølge likning 2.8 en gjennomsnittlig effekt på:

$$P = \frac{1549Wh}{5,23h} = \underline{296W}$$

³Se figur A.13

3.4 Robotens batteristyringsystem

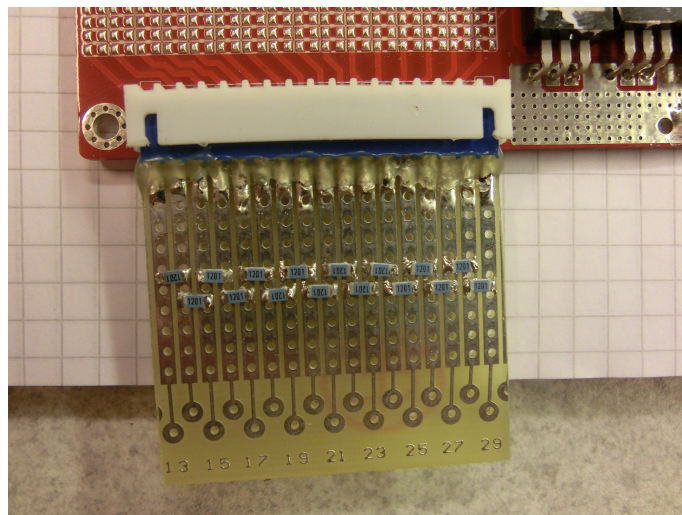
En minimumsløsning for et batteristyringsystem til denne roboten må ha over- og underspenningsvern, samt overstrømsvern. I tillegg bør temperaturen i batteriet måles i tilfelle batteriet blir for varmt, slik at strømmen kan kobles ut. For å utnytte kapasiteten i batteripakken på best mulig måte, må det også være en funksjon for å balansere battericellene. I tillegg er det viktig at roboten inneholder en funksjon som kan beregne ladestanden til batteripakken, da denne brukes for å beregne rekkevidden til roboten. Det bør også være en algoritme som beregner batteriets kapasitetstap som følge av at batteriet blir eldre.

3.5 Undersøkelse av BMS-kretskort

Det ble i utgangspunktet antatt at den innebygde BMSen hadde minst fire av de viktigste funksjonene; over- og underspenningsvern, overstrømsvern og cellebalansering. Uten noe tilgjengelig dokumentasjon om BMSen måtte disse antagelsene undersøkes nøyere. De følgende delkapitlene tar kun for seg spenningsvernet og cellebalanseringsfunksjonen.

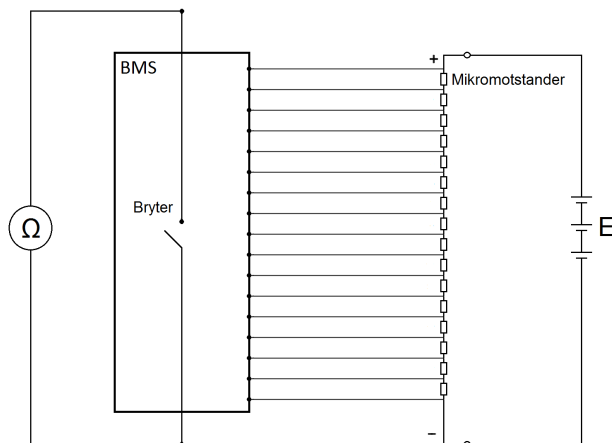
Spenningsvern

For å teste over- og underspenningsvernet, ble det loddet opp noen mikromotstander på et lite kort for å simulere cellespenninger i en batteripakke med 16 celler som vist i figur 3.14. Vernet skal i prinsippet fungere slik at hvis en av cellene har for høy eller



Figur 3.14: Test av over- og underspenningsvernet til BMSen. 16 mikromotstander er loddet på et lite kretskort som igjen er koblet til den hvite kontakten på BMSen som normalt tar inn ledninger som måler spenningsfall over battericellene. Det gule kortet tilsvarer her batteripakken.

for lav spenning, så skal strømmen til batteripakken kobles ut, ved at en bryter inne i BMS-kortet åpnes. Hvis BMSen åpner strømbryteren, må den også ha en funksjon for å lukke den igjen. Om åpningen og lukkingen av bryteren skjer ved samme spenningsnivå, vil bryteren åpne og lukke seg hele tiden. For å unngå dette, blir det gjerne satt et nytt spenningsnivå lengre inn mot midten av operasjonsområdet,



Figur 3.15: Skjema for testing av over- og underspenningsfunksjonaliteten i BMS-kortet. E er labstrømforsyningene som setter opp en spenning over mikromotstandene. Dermed blir det en spenningsforskjell over motstandene. En bryter inne i BMSen åpnes hvis spenningsfallet over en hvilken som helst motstand blir for høyt, eller for lavt. Et ohmmeter måler om bryteren er åpen eller lukket.

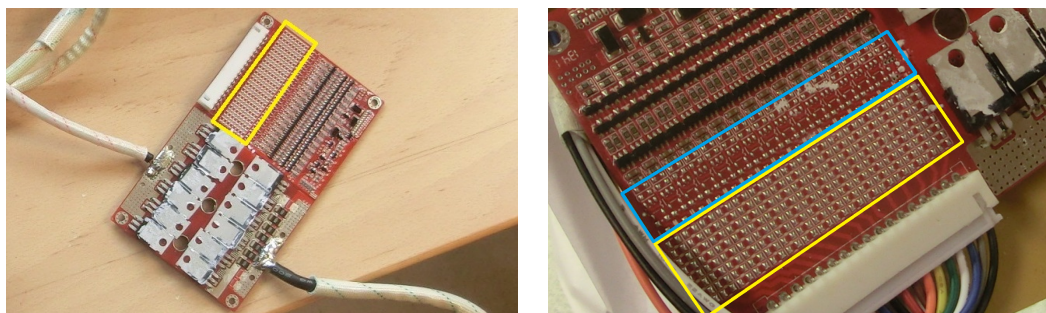
hvor bryteren skal lukke seg igjen. For eksempel vil bryteren etter å ha åpnet seg på grunn av en for høy spenning, vente til spenningen har sunket litt under den spenningen hvor den åpnet seg, før den lukker seg igjen. Tilsvarende hvis den åpner seg på grunn av for lav spenning, så vil den vente til spenningen har steget over det nivået hvor den åpnet seg, før den lukker seg igjen. 'Batteripakken' bestående av mikromotstander ble koblet på BMSen, deretter ble tre labstrømforsyninger koblet over kretskortet, for å få spenningsfall over mikromotstandene tilsvarende cellespenninger, se figur 3.15. Etter å ha koblet mikromotstandene opp til strømforsyningene, og justert spenningen over cellene, ble spenningen registrert når bryteren åpnet og lukket seg. Resultatene er beskrevet i tabell 3.5. BMSen vil altså kutte strømmen gjennom batteriet hvis spenningen over en hvilken som helst celle faller utenfor intervallet fra 2 - 3,9 volt.

Tabell 3.5: Cellespenninger hvor spenningsvernet åpnet og lukket bryteren for batteristrøm.

Hendelse	Spenning [V]
Bryter åpner ved overspenning	3,9
Bryter lukker seg igjen etter overspenning	3,8
Bryter lukker seg igjen etter underspenning	2,4
Bryter åpner ved underspenning	2,0

Cellebalansering

I figur 3.16a er BMS-kortet tatt ut av batteripakken. Ledningen ut på venstre side av kortet går til den negative delen av kontakten som skal kobles til laderen, mens ledningen på høyre side går til den negative polen på celle nummer 16 i batteriet.



(a) Kretskortet til BMSen, tilkoblede ledninger leder strømmen som går gjennom batteripakken. Ledninger for å måle celledspenning kommer inn via den hvite kontakten oppe til venstre. Avsatt plass til blødemotstander innenfor den gule firkanten.

(b) Nærbilde av BMS-kretskort. Avsatt plass til blødemotstander innenfor den gule firkanten. Avsatt plass til annen elektronikk innenfor den blå firkanten. Ledninger for å måle celledspenninger kommer inn via den hvite kontakten nederst i bilde.

Figur 3.16: Original BMS, kretskort.

I tillegg var ledningen som skal kobles til den negative delen av kontakten som skal lede strøm ut av batteriet til en last loddet fast på undersiden av kortet. På bildet er denne ledningen fjernet. Den hvite kontakten oppe til venstre tar inn ledninger for måling av celledspenninger. Figur 3.16b viser nærbilde av BMS-kortet. Den gule firkanten markerer et område hvor det ser ut som det er satt av plass til å lodde på blødemotstander, den blå firkanten markerer et område hvor det ser ut som det er satt av ytterligere plass til annen elektronikk for å styre balanseringen over disse motstandene⁴. Det burde altså være mulig å modifisere dette kortet til å utføre cellebalansering, men uten et datablad som beskriver kortet er det umulig å vite hva slags komponenter som mangler for at kortet skal kunne balansere celler.

3.6 Rekkevidde med to batterier

Meltzer[27] foreslo i kapittel 4 hvordan rekkevidden til landbruksroboten kunne beregnes ved å finne total effekt som driftsmotorene til roboten bruker under kjøring. Effekten vil variere med underlag, helning og vekten til roboten, men det blir antatt at driftsmotorene til roboten vil trenge en effekt på 232 watt fra batteriene under vanlig kjøring i 3,4 km/h ved gjennomsnittlige forhold i en rett linje med en uspesifisert såmaskin. Hafnor og Hoås[20] designet sammen med Lillekvelland[25] en såmaskin til landbruksroboten. Hafnor og Hoås beregnet at det ville kreve en effekt på 261 watt om roboten skulle trekke denne såmaskinen ved en hastighet på 0,6 m/s = 2,16 km/h.

Beregning av rekkevidde

Beregningen av rekkevidde er gjort to ganger for hver effekt som motorene trekker. Dette er gjort fordi spenningen over polene til batteriene er forskjellig ved forskjellige utladningsrater. Dermed blir den teoretiske batterispenningen satt som en maksimumsverdi, mens den gjennomsnittlige spenningen fra utladningsforsøket på 51,3

⁴Personlig kommunikasjon med Tom Ringstad.

volt, vil bli satt som en minimumsverdi. Det antas at spenningen som står over polene til batteriet, og dermed energiinnholdet, vil ligge ett eller annet sted mellom disse to spenningene. Derfor vil operasjonstiden til roboten ligge i intervallet mellom de to beregnede tidene for hver effekt trukket av motorene. Det antas at batteripakken har en kapasitet på 60 Ah, altså antas det at begge batteriene er installert i roboten. Det er også gjennomført beregninger for rekkevidden ved 80 prosent batterikapasitet.

Hvis man setter inn den nominelle kapasiteten og batterispenningen i likning 2.6, finner man det teoretiske energiinnholdet per batteri⁵:

$$E = 60Ah \cdot 52,8V = \underline{3168Wh}$$

Tiden det tar å tømme to batterier ved en effekt på 232 W blir da ifølge likning 2.7:

$$\frac{3168Wh}{232W} = \underline{13,7h}$$

og den totale nødvendige strømmen blir ifølge likning 2.8:

$$I = \frac{232W}{52,8V} = \underline{4,39A}$$

Per batteri blir det omtrent 2,20 ampere. Dette er imidlertid ikke energien som blir levert til lasten. Spenningen ut fra batteriet vil være lavere enn den nominelle batterispenningen når det går en strøm. Hvor mye lavere vites ikke, men om det antas at batterispenningen er den samme som gjennomsnittsspenningen i utladningstesten ovenfor blir energimengden:

$$E = 60Ah \cdot 51,3V = \underline{3078Wh}$$

Ved tilsvarende beregninger som ovenfor, vil operasjonstiden ved 232 watt, og gjennomsnittsspenning på 51,3 volt under utladning, bli 13,3 timer. Disse beregningene er ført inn i tabell 3.6 sammen med beregninger for operasjonstider ved en effekt på 261 watt, samt beregninger for operasjonstiden om kun 80 prosent, tilsvarende 48 Ah, av kapasiteten skal benyttes.

I disse beregningene er strømmen per batteri mye lavere enn den som ble brukt under utladningsforsøket, hvor gjennomsnittsstrømmen var 5,77 ampere for ett batteri. Om roboten trekker denne strømmen fra hvert av batteriene under drift, altså 11,5 ampere, vil batteripakken være tom etter maksimalt 5,23 timer. Et grovt overslag sier at roboten trekker nærmere ti ampere under drift.⁶

⁵Her er den nominelle kapasiteten lavere enn det som ble målt under utladningstesten, mens den nominelle cellespenningen er høyere.

⁶Personlig kommunikasjon med Lars Grimstad

Tabell 3.6: Operasjonstider for roboten ved full, og 80 prosents utnyttelse av en 60 Ah batteripakke. Beregningene er utført ved to forskjellige effekter trukket av motorene. I kolonnen 'Målt' antas det at gjennomsnittsspenningen under utladning er den samme som ble målt under utladningsforsøket. I kolonnen 'Ideelt' antas det at spenningen under utladning er den nominelle batterispenningen. Energi er beregnet ved likning 2.6, strøm er beregnet ved likning 2.8, og operasjonstid er beregnet med likning 2.7. Den faktiske operasjonstiden til roboten ved de gitte effektene og kapasitetene antas å ligge mellom de beregnede verdiene i kolonne 'Målt' og 'Ideelt'.

Operasjonstider	Full kapasitet (60 Ah)		80 % kapasitet (48 Ah)	
	Målt	Ideelt	Målt	Ideelt
Spenning [V]	51,3	52,8	51,3	52,8
Energi [Wh]	3078	3168	2462,4	2534,4
P = 232 W				
Total strøm [A]	4,52	4,39	4,52	4,39
Strøm per batteri [A]	2,26	2,20	2,26	2,20
Operasjonstid [h]	13,3	13,7	10,6	10,9
P = 261 W				
Total strøm [A]	5,09	4,94	5,09	4,94
Strøm per batteri [A]	2,54	2,47	2,54	2,47
Operasjonstid [h]	11,8	12,1	9,4	9,7

3.7 utfordringer, oppsummert

Etter å ha gjennomgått batteriene og batteristyringssystemet(BMSen) til roboten, burde følgende utfordringer ses nærmere på:

- Batteri
 - Batteriene til roboten har for høy spenning
- BMS
 - Ingen balanseringsfunksjon for battericellene
 - Ingen informasjon om individuelle celledspenninger
 - Ingen informasjon om temperaturen til cellene
 - Ingen informasjon om ladestanden til cellene
 - Ingen informasjon om aldringen av cellene

Kapittel 4

Forslag til forbedringer

Dette kapitlet beskriver batterier, batteristyringssystemer og smarte batterier som har blitt vurdert som løsninger for energiforsyningen til landbruksroboten. Det blir presentert løsninger for å oppdatere roboten som allerede er laget, samt forslag for batterisystemet til en ny robot.

4.1 Battericeller

Det finnes mange battericeller tilgjengelige for å bygge egne batteripakker. Om man bestemmer seg for en kapasitet på batteripakken, har for eksempel GWL Power mange battericeller tilgjengelige i sin nettbutikk[19] med kapasitet på for eksempel 90, 100, 160 og 200 Ah. De har også 12 volts batteripakker som kan kjøpes som en modul med 4 seriekoblede celler, som kan settes sammen til større batteripakker. Disse pakkene er tilgjengelige i 40 og 90 Ah. Slike celler kan settes sammen i serie for å gi batteripakker med høyere spenning. Disse cellene leveres uten BMS. En BMS må derfor komme i tillegg.



(a) Battericelle fra Winston

(b) 4 x 1 batteripakke fra Winston

Figur 4.1: Batterier fra Winston Energy Group tilgjengelige på GWL Power sine nettsider[19]

Tabell 4.1 viser priser for Winston battericeller og 4 x 1 batteripakker fra GWL Power, som vist i figur 4.1.

Tabell 4.1: Priser for Winston battericeller. GWL Power sin nettbutikk[19]

Pris på Winston battericeller		
Type	Kapasitet [Ah]	Pris [NOK]
Battericeller	40	432
	90	970
	100	1078
	160	1725
	200	2156
Batteripakker 4 x 1	40	1783
	90	4021

4.2 Batteristyringssystemer

Tre forskjellige fremgangsmåter ble vurdert for robotens BMS løsning. Disse BMSene kan benyttes sammen med innkjøpte battericeller beskrevet i kapittel 4.1, eller sammen med batteripakkene som allerede er kjøpt inn til robotene.

Fullstendig batteristyringssystem

Markedet for BMSer er relativt nytt, men det finnes allerede et stort utvalg av systemer med forskjellig kompleksitet og pris, og det kommer stadig flere. Et fullstendig batteristyringssystem skal kunne utføre alle oppgavene som forventes av en BMS. Den må overvåke og beskytte cellene samtidig som den sender informasjon om batteritilstand til resten av systemet.

Integrerte kretser

Det kommer stadig flere integrerte kretser som er spesiallaget for å overvåke batterisystemer. Disse vil være mye billigere å kjøpe inn enn et komplett system, men det krever en del arbeid med oppkobling, lodding og programmering fra innkjøp til et system som fungerer.

Arduino BMS

En mulighet var å bruke en mikrokontroller som allerede var tilgjengelig for å lage et system som det ble beskrevet i delkapittel 2.5.3. Her er det mulig å lage en ekstern Arduino amperetimeteller som holder orden på ladestanden til batteriet, mens en billig BMS kan sitte inne i batteripakka og passe på cellene, men da uten mulighet til å kommunisere batteritilstanden ut til systemet.

4.2.1 Innkjøp av komplett batteristyringssystem

Det fins flere komplette BMS systemer tilgjengelig, men mange av disse er dimensjonert for større batteripakker enn de som er kjøpt inn til landbruksroboten. På grunn av at disse systemene i enkelte tilfeller takler større pakker enn den som sitter i landbruksroboten, blir også prisen deretter. Prisen har blitt hentet inn for de systemene hvor den har vært tilgjengelig. Løsningene presentert i dette avsnittet må bygges inn i, eller kobles opp mot en batteripakke. Celler er ikke inkludert.

Orion BMS - Ewert Energy Systems

Ewert Energy Systems har laget et BMS system som skal kunne ta seg av batteripakker i el-biler og hybridbiler[15]. BMSen kan bestilles i flere størrelser; 'Junior' er vist i figur 4.2, de øvrige er 'Standard' og 'Extended'. Systemet har beskyttelse mot



Figur 4.2: Orion Jr. BMS, bilde hentet fra produksiden til Orion BMS [15]

over og underspenninger, overstrøm og for høy temperatur. Den balanserer cellene etter oppladning, og har funksjoner for å beregne ladestand og aldringen til cellene. Den måler også den interne resistansen til cellene. Kommunikasjonen foregår via CAN, og det er mulig å bruke systemet sammen med en pc. Junior versjonen kan ta seg av 16 celler i serie, men det er også mulig å bruke standardversjonen konfigurert for 24 celler eller mer.

Nuvation BMSTM

Nuvation har laget et fleksibelt system som benytter seg av tre forskjellige moduler, figur 4.3. Cellene overvåkes av en 'cell interface' som kan ta seg av opptil 16 celler. Disse modulene kan serie- og parallellkobles. 'Cell interfacene' blir igjen overvåket av en 'stack controller' som kontrollerer hele batteripakken. I tillegg brukes et 'power interface' for å overvåke den fulle batterispenningen, og strømmen som går gjennom batteriet. Den modulbaserte løsningen gjør dette til et fleksibelt system, og Nuvation kan også hjelpe til med spesialiserte løsninger. Systemet kan leveres med mulighet for å lese ut informasjon på iPad.



Figur 4.3: Nuvation BMSTM, bildet er utklipp fra Nuvation sine nettsider og viser de forskjellige modulene i systemet[31].

123electric - '123 \BMS'

Nederlandske 123electric har en distribuert BMS, hvor hver celle utstyres med et lite BMS-brett, som sender informasjon til en sentral kontrollenhet, som vist i figur 4.4[1]. Batteripakken kan deles opp ved å bruke dedikerte BMS 'inn' og 'ut' brett. Kontrollenheten kommuniserer via USB, og et 'elektronisk dashboard' er tilgjengelig for nedlastning fra nettsidene til 123electric.



Figur 4.4: Den distribuerte BMSen til 123electric. Kontrolleren øverst til venstre, strømsensor øverst til høyre, battericeller med påmonterte BMS-brett og kapasitets- og strømmåler nederst til høyre. Bildet er utklipp fra 123electric sine nettsider [1]

Sammenlikning av BMSer

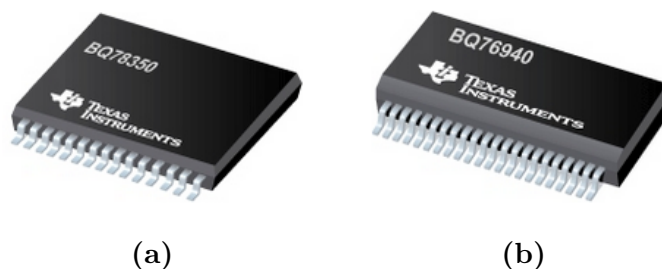
Dokumentasjon og datablader for BMSene ligger på nettsidene til produsentene. Ut ifra disse kan tabell 4.2 settes opp:

Tabell 4.2: Sammenlikning av nøkkelparametere for BMS systemer

Merke	Orion Jr	Orion Standard	Nuvation BMS™	123\BMS
Over/underspenning, overstrøm, temperatur	Ja	Ja	Ja	Ja
Balansering	Ja	Ja	Ja	Ja
Antall celler i serie	< 16	< 108	2 - 100 ++	2 - 255
Topologi	Sentral	Sentral/ master-slave	Modul	Distribuert
Ladestand	Ja	Ja	Ja	Ja
Aldring	Ja	Ja	Ja	Nei
Kommunikasjon	CAN	CAN	CAN, Ethernet, RS485	USB
Datalogging	Ja	Ja	IT	IT
Pris [NOK]	3590	6400	IT	6530

4.2.2 Innkjøp av integrerte kretser

Det finnes også et utvalg av integrerte kretser (IC) som er laget for batteriovervåkning¹. Det store flertallet klarer mellom en og fire celler i serie, men enkelte ICer er laget for opptil 15 celler i serie. Texas Instruments har laget en litium-ion BMS kontroller og kapasitetsmåler chip BQ78350, som kan kombineres med en chip, BQ76940 som overvåker battericellene. Begge disse er vist i figur 4.5. BQ76940 overvåkeren tar seg av viktige funksjoner som beskyttelse mot over-, underspenninger og overstrøm, samt celledbalansering og strømmåling og coulomb telling. BQ78350 kontrolleren, på den annen side tar seg av kapasitetsmåling, kommunikasjon videre ut i systemet og datalogging. Sammen danner disse to et system som kan overvåke batteripakker på opptil 15 celler i serie. Kontrolleren er også i stand til å kommunisere med flere overvåkere. Disse ICene kan kjøpes fra nettsidene til Farnell element14[16] fra snau 90 NOK for BQ76940 overvåkeren, og i underkant av 50 NOK for BQ78350 kontrolleren.



Figur 4.5: (a) BQ78350 BMS kontroller og kapasitetsmåler, bildet hentet fra nettsidene til Texas Instruments [35], (b) BQ76940 batteri overvåker, bildet hentet fra nettsidene til Texas Instruments [34].

4.2.3 Arduino ampertimeteller

En Arduino mikrokontroller kan brukes til å lage en amperetimeteller som beskrevet i delkapittel 2.5.3. Om mikrokontrolleren kobles opp med en krets for å måle strøm og en krets for å måle spenning, er den selv utstyrt med funksjoner for å måle tiden. Dette er parameterne som trengs for å beregne elektrisk energi inn og ut av en batteripakke. Når Arduinoen har målt at batteriet har brukt for eksempel 80 prosent av kapasiteten kan den sende et signal til roboten om at det er på tide å lade batteriene opp igjen.

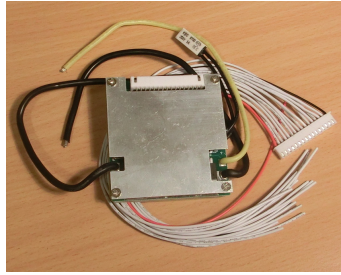
Kontrolleren

Arduino mikrokontroller er laget for å være en enkel, open source mikrokontroller[5]. Den benytter seg av en 10-bit analog til digital konverter for å ta inn analoge spenningsmålinger og gi dem en digital verdi som Arduinoen kan bruke i beregninger[4].

Hall-effekt sensor

En hall-effekt sensor kan brukes til å måle strøm ved at den kan merke magnetfeltet som oppstår når det går en strøm. Et eksempel på en slik sensor fra SEC electronics

¹Linear Technology har også et utvalg kretser for batteripakker med opptil 12 celler i serie.



Figur 4.6: BMS-kort fra ebay annonse. Bildet viser ifølge annonsen en billig 'protector'-BMS, med basisfunksjoner for å ivareta en batteripakke, pluss cellebalansering.

inc [32] gir ut en spenning på omtrent 2,5 volt, når sensoren ikke merker noe magnetfelt. Hvis magnetfeltet endrer seg, vil spenningen ut fra sensoren øke eller minke, avhengig av strømretningen. Denne sensoren kan altså brukes til å måle strøm i to retninger gjennom en ledning. Ut ifra spenningssignalet som sendes fra sensoren til mikrokontrolleren, kan mikrokontrolleren beregne strømmen som går igjennom ledningen som overvåkes.

Spenningsmåling

En Arduino kan ikke ta inn spenninger over 5 volt på sine analoge innganger. Batterispenningen kan deles ned i en spenningsdeler som sørger for at spenningen inn på Arduinoen ikke blir for høy.

SOC algoritme

Når Arduinoen måler strømmen og tar tiden på hvor lenge det går en strøm, kan den beregne ladningen som har gått ut eller inn av batteriet ved likning 2.3. Den totale kapasiteten settes til en verdi, for eksempel 30 Ah. Dermed kan ladestanden beregnes ved å dele kapasiteten som har forlatt batteriet på den totale kapasiteten til batteriet. For å kalibrere kapasiteten kan det utføres spenningsmålinger ved ferdig oppladning.

BMS - kort

Et enkelt BMS-kort som ligner på den originale BMSen i batteriene, men med cellebalansering kan kjøpes inn via ebay. BMSen i figur 4.6, har ifølge annonsen stort sett de samme funksjonene som den originale BMSen, i tillegg har den cellebalansering. Se tabell 4.3 for spesifikasjoner. For å få på plass en billig minimumsløsning for ivaretagelsen av battericellene som kan implementeres relativt raskt, har to slike BMSer blitt kjøpt inn, og vil installeres i batteripakkene ved første anledning.

Tabell 4.3: Spesifikasjoner for BMS fra Ebay, hentet fra annonsen[13].

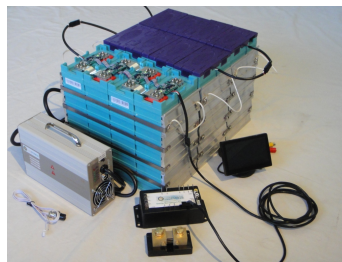
PCB/BMS for 16 s LiFePo4 batteripakke	
Spenning, balansering [V]	3,6
Overspenning [V]	3,85
Underspenning [V]	2,1
Kontinuerlig utladningsstrøm [A]	30
Beskyttelse overstrøm [A]	60
Driftsstrøm [μ A]	30
Beskyttelse kortslutning	Ja
Oppladningsstrøm [A]	8
Maks temperatur [$^{\circ}$ C]	70
Ekstra ladetid pga. balansering [min]	30
Størrelse [mm]	66 x 71 x 13,5
Vekt [g]	85
Pris [NOK]	210

4.3 Batteripakker

Det er også mulig å kjøpe inn batteripakker med medfølgende BMS. Disse vil i varierende grad være i stand til å kommunisere tilstanden sin ut til systemet som bruker dem.

Elite Power Solutions

Elite Power Solutions[14] har tilgjengelige batteripakker med medfølgende BMS i sin nettbutikk. Disse leveres enten som 'nøkkelklare', eller som 'lavkost', som må settes sammen etter levering. Batteripakkene kan leveres med nominell spenning på 12 - 96 volt, med kapasitet på blant annet 40, 60 og 100 Ah(36 volts pakker).



Figur 4.7: Batteripakke fra Elite Power Solutions. Bilde hentet fra nettsidene til Elite Power Solutions[14].

Bren-Tronics, Inc.

Bren-Tronics, Inc. lager solide litium-ion batteripakker som kan brukes både på 14,4 volt og 28,8 volt, nominelt[7]. Disse batteriene kan kommunisere med systemet som bruker dem via for eksempel SMBus, og kan vise til veldig høy spesifikk energi.

ClaytonTMPower

Danske ClaytonTM Power har også tilgjengelige batteripakker hvor en innebygd BMS ivaretar cellene, og sender informasjon ut til systemet[10]. Batteripakkene som er



Figur 4.8: Batteripakke fra Bren-Tronics. Bildet hentet fra nettsidene til Bren-Tronics[7]

tilgjengelige er på 12 eller 24 volt. Disse batteriene kan ikke kobles i serie, men pakkene kan kobles i parallell for høyere kapasitet.



Figur 4.9: Batteripakke fra Clayton™ Power. Bildet er hentet fra nettsidene til Clayton™ Power[10].

A123 systems

A123 systems har tilgjengelig såkalte 'Energi moduler' på nettsidene sine[2]. AMP20 Energy Modules kan kombineres i konfigurasjoner fra 6 - 28 enheter i serie, og 1 - 13 enheter i parallell. Hver modul har en innebygd BMS, som sørger for balansering, spenningsregulering og temperaturovervåkning. Modulene er bygd opp av Nanophosphate® AMP20M1HD-A, celler med spenning på 3,3 volt og 20 Ah.



Figur 4.10: Batterimoduler fra A123 systems. Bildet er hentet fra A123 Systems sine nettsider[2].



Figur 4.11: ALMTM 12 volts batteri fra NEC Solutions. Bildet er hentet fra nettsidene til NEC Solutions[29].

NEC Energy Solutions

NEC Energy lanserte i januar erstatningsbatterier for blybatterier[29][33]. Disse batteriene er tilgjengelige i 12 volts pakker, hvor disse pakkene kan kobles sammen opptil 4 i serie og 10 i parallell, og all elektronikk for å passe på battericellene er integrert i batteripakken. Batteriene er tilgjengelige med CANBus eller SMBus. Batteriene er tilgjengelig via norsk distributør.²

Valence

Valence Technology har utviklet to serier av batterimoduler. XP moduler som er beregnet som enheter som kan settes sammen til en større batteripakke mellom 12 - 1000 volt, og RT moduler, som er beregnet som direkte erstatninger for bly-syre batterier og er beregnet for bruk fra 12 - 48 volt[41][40]. XP modulene har hver for seg spenninger på 12, 18 eller 36 volt, mens RT modulene har 12 eller 24 volt. Begge har mulighet til å kobles sammen med flere enheter i serie for høyere spenning, hvor RT modulene kan kobles sammen til batteripakker med maksimal spenning på 48 volt, og XP modulene mye høyere.³ XP modulene kan kobles opp mot en 'U-Charge® XP and P40-24 Power Battery Management System' for kommunikasjon via CANBus. RT modulene kan kobles opp mot en 'U-Charge® XP Diagnostics Toolkit' som konverterer RS485 til USB for kommunikasjon.



Figur 4.12: Bilde av batterimodul fra Valence Technologies[41].

4.3.1 Sammenlikning av batteripakkene

Noen viktige egenskaper ved de ovennevnte batteripakkene, samt batteriet fra Golden Motor, blir presentert i tabell 4.4.

²Personlig kommunikasjon med Einar Tolpinrud, Gylling Teknikk AS

³Avhengig av hvilken BMS som bestilles på kjøpet.

Tabell 4.4: Sammenlikning av batteripakker

Produsent		Elite Power Solutions - 36V60Ah 2.3KWh	Bren-Tronics BT-70791CG	Clayton Power - 24V – 100Ah Lithium Ion Battery	Golden Motor - LFP4830M
Batteri-celler	Kjemi	LiFePO4	Litium-ion**	LiFeYPO4	LiFePO4
	Spenning [V]	38,4	28,8	24	52,8
	Kapasitet [Ah]	60	9,6	100	30
	Vekt [kg]	27,7	1,4	37,2	18
	Energiinnhold [Wh]	2300	276*	2640	1584
	Spesifikk energi [Wh/kg]	83*	197*	71*	88,0
BMS	Måling av over/underspenning, strøm, temperatur	Ja	IT	Ja	Ja
	Balansering	Ja	IT	Ja	Nei
	Ladestand	Ja	Ja	Ja	Nei
	Kommunikasjon	CAN/MODBus (valgfritt)	SMBus	CAN	Ingen
Pakke	Serie/parallellkobling mulig	IT	Serie/parallell	Parallell	IT
	Pris [NOK]	13422	3554	25110	6760
Produsent		AMP20 - A123 Systems	ALM(TM) 12V35i - NEC Energy Solutions	Valence - U-Charge® U27-36 XP	Valence - U-Charge® U1-24RT
Batteri-celler	Kjemi	Nanophosphate® LiFePO4	Nanophosphate® LiFePO4	LiFeMgPO4	LiFeMgPO4
	Spenning [V]	19,2 - 89,6	13,2	38,4	25,6
	Kapasitet [Ah]	20 - 260	35	46	20
	Vekt [kg]	IT	6,3	19,6	6,4
	Energiinnhold [Wh]	< 5,38 kWh	462	1766*	512*
	Spesifikk energi [Wh/kg]	IT	73*	91	80
BMS	Måling av over/underspenning, strøm, temperatur	Ja (strøm-IT)	Ja	Ja	Ja
	Balansering	Ja	IT	Ja	Ja
	Ladestand	IT	Ja	Ja	Ja
	Kommunikasjon	IT	CAN/SMBus	CAN via BMS	USB via Diagnostics toolkit
Pakke	Serie/parallellkobling mulig	IT	4 x Serie/10 x parallell	Serie/parallell	2 x Serie/IT
	Pris [NOK]	IT	9400***	IT	IT
IT - Ikke Tilgjengelig. Informasjonen var ikke spesifisert på produsentens nettsider					
* Beregnede verdier ut ifra informasjon tilgjengelig på produsentens nettsider.					
** Ingen videre spesifisering av cellekjemi funnet på produsentens nettside					
*** Pris oppgitt av Einar Tolpinrud ved Gylling Teknikk AS					
Alle priser er kun veiledende, og inkluderer ikke frakt og andre avgifter.					

Kapittel 5

Diskusjon

Dette kapittelet tar først for seg undersøkelsene som er gjort på batteripakken i kapittel 3. Deretter blir det diskutert tiltak som kan gjøres med den nåværende batteripakken. Til slutt vil det bli diskutert hvordan et nytt batterisystem kan designes.

5.1 Målinger på batteriet

Det har ikke blitt utført noen evaluering av nøyaktigheten til målingene som ble utført under arbeidet med batteriet og BMSen. I første omgang var meningen å undersøke om batteriet i det hele tatt kunne brukes. Senere vil det, avhengig av hva slags system som velges for å ivareta batteriene, muligens bli nødvendig med mer nøyaktige målinger for å kalibrere kapasiteten til batteriet ved forskjellige temperaturer og strømrater, for å lage oppslagstabeller for kapasiteten. Ved disse målingene vil usikkerheten spille en viktig rolle.

5.1.1 Delvis oppladning

Den delvise oppladningen som blir beskrevet som omtrent tre amperetimer, i kapittel 3, ble antageligvis litt høyere. Oppladningen varte nærmere tre timer og tre kvarter, men strømmen var ikke nøyaktig en ampere hele tiden. Etterhvert som ladestanden til batteriene økte, slik at spenningsforskjellen mellom laderen og batteriene sank, sank også oppladningsstrømmen. Ved enkelte anledninger sank strømmen så lavt som ned til en halv ampere. Hver gang dette skjedde ble ladespenningen stilt opp, slik at ladningen kunne fortsette med omtrent en ampere.

I tabell 3.2 er det en besynderlig sammenheng mellom cellene som hadde lavest cellespenning under den første målingen, og cellene som hadde størst spenningsfall over helgen. I tillegg antyder tabell 3.3 en sammenheng mellom lav cellespenning og kapasiteten som ble levert under utladning over effektmotstandene. Dette var en grunn til bekymring, da det kunne tyde på at cellene var skadet. Dessverre er oppløsningen på målingene litt lav, så forskjellen på en grei ($\Delta V = 0,02$ volt) celle og en dårlig ($\Delta V = 0,03$ volt) celle, kan være måleusikkerhet eller grunnet uheldig avrunding. For eksempel hvis alle cellene har hatt spenningsfall på omtrent 0,025 volt. På den annen side, er det trolig at de cellene som lå lavest i spenning, også lå lavest i kapasitet. Da cellene skal ha mottatt den samme oppladningen, vil noen celler ha opplevd å ikke bli løftet fullt så høyt opp i ladestand som andre celler. Siden

utladningskurven til LiFePO_4 blir brattere jo lavere ladestand, kan det hende at disse cellene opplevde et større spenningsfall nettopp på grunn av at de var i et brattere område på utladningskurven. Dermed kan det hende at sammenhengen som tabell 3.2 antyder mellom spenningsfall og den opprinnelig målte cellespenningen ikke har noe å gjøre med tilstanden til cellene (om de er skadet eller ikke), men derimot ladestanden til cellene.

5.1.2 Delvis utlading

De syv cellene som ble ladet ut under den delvise utladingstesten, var de syv øverste cellene på batteriet. Det var disse som var lette å komme til, og som er synlige i figur 3.2b. Det var ønskelig å lade ut en og en celle separat, for å få en indikasjon på om noen av cellene faktisk var skadet. I tillegg virket disse syv cellene, celle nummer 10 - 16, som et representativt utvalg ut ifra tabell 3.2 da tre av cellene (nr. 13 - 15) hadde veldig lav utgangsspenning, tre lå midt imellom (nr. 10, 11 og 16), mens nr. 12 lå nesten høyest av alle cellene i spenning ved den første målingen. Det ble forsøkt å lade ut cellene til 2,5 volt, men det var ikke så lett å stoppe utladingen på det riktige tidspunktet da motstandene måtte loddes direkte av polene på batteriet, og denne operasjonen måtte utføres med største forsiktighet for ikke å kortslutte battericellene på nytt.

Det er sannsynlig at kapasiteten som ble trukket ut av batteriene er lavere enn tre amperetimer fordi cellene ble ladet ut til en høyere spenning enn den de startet på under den delvise oppladningen. Da antas det også at de, etter utladingen, lå høyere i ladestand enn det de gjorde før testingen startet. De cellene som startet med høyest spenning viser da også den høyeste kapasiteten under utladingen, fordi disse cellene ikke måtte løftes så høyt opp i ladestand før de passerte 2,5 volt. Grunnen til at disse cellene allikevel leverte en såpass høy andel av tre amperetimer (opptil 95 prosent) er antagelig at de mottok mer ladning enn tre amperetimer, som beskrevet i avsnittet ovenfor. Cellene har da sannsynligvis ikke levert ut 95 prosent av den ladningen de faktisk mottok.

5.1.3 Fullstendig oppladning

Etter at den delvise utladingstesten var fullført ble hele batteripakken satt på felles ladning uten at celle 10 - 16 ble løftet opp igjen. Dette kommer tydelig frem av figur 3.6 hvor noen celler starter rundt 3,2 volt, mens andre starter rundt 2,5 volt. Kurven i figur 3.6 kan ikke tolkes direkte som en oppladningskurve fordi det ble brukt forskjellige strømrater under oppladningen, men man ser tydelig at battericellene som starter rundt 2,5 volt, har en veldig brå økning i spenning opp til et plata på omtrent 3,2 volt. Her ligger spenningen lenge, før den øker brått igjen like før cellene er fulladet. Når celle nummer 3 oversteg grensen for maksimalspenning tolerert av BMSen, ble oppladningen stoppet selv om de fleste av cellene ikke var ferdigladet. Dette viser konsekvensene av å ha en batteripakke uten en BMS som tar seg av cellebalansering. Den cellen med høyest spenning dikterer når oppladningen slutter, og ladningen man får puttet inn i batteriet vil være lavere enn om alle cellene slutter oppladningen omtrent samtidig. Tilsvarende vil skje under utlading, da den cellen med lavest spenning vil bestemme når utladingen er over. Batteriet er tomt selv

om flere celler fortsatt har ladning igjen. Dermed vil kapasiteten til batteripakken begrenses av disse ytterpunktene.

5.1.4 Balansering

Det hadde vært interessant å ha målt tiden som gikk under oppladning og utladning av battericellene under balanseringen for å kunne beregne hvor mye mer ladning som ble tilført batteriet. Dette ble altså ikke gjort, fordi det hadde blitt for mye styr med å starte og stoppe tiden samtidig som balanseringsriggen ble koblet til eller fra, og kun ett par hender tilgjengelig under forsøket. En logger kunne muligens vært brukt. Det er altså ikke noe fast tidsdifferanse mellom målepunktene i figur 3.8.

5.1.5 Fullstendig utladning

Kapasitet

Utladningstesten ga meget bra resultater for batteriets kapasitet i forhold til at det ble fryktet at batteriet var ødelagt. Den beregnede verdien på 30,2 amperetimer, og verdien målt av kapasitetsmåleren på 30,8 amperetimer tyder på at batteriet ikke har tatt stor skade av dyputladningen det har opplevd. Den målte kapasiteten lå hele tiden litt over den beregnede kapasiteten under utladningsforløpet, men kapasitetsmåleren var heller ikke kalibrert for så høye spenninger som ble brukt i dette forsøket. Det er uansett oppløftende at målinger og beregninger for utladning av batteriet stemmer såpass godt overens.

Når det gjelder å se på bidraget fra balanseringen, til det totale ladningsinnholdet i batteripakken ved å bruke den totale ladningen ut av batteriet under utladningstesten og trekke fra den totale tilførte ladningen fra tabell 3.4 sier ikke dette all verden. Det var, for det første, celler som allerede hadde mottatt ladning da denne oppladningen begynte, og for det andre, ble ikke cellene ladet ut til den samme ladestanden som der de startet før oppladningen.

Kapasitetsmåleren, som hadde ansvaret for å bryte strømmen når batterispenningen ble lav nok, viste ikke samme spenning som den som ble målt over polene på batteriet med et voltmeter. For å unngå dyputladning av cellene ble derfor utladningen stoppet ved omtrent 2,8 volt per celle, altså 45 volt totalt over batteriet.

Utladningskurven som kom frem etter forsøket viser at cellespenningene holder seg på et platå rundt 3,2 volt per celle under utladning, hvoretter spenningsfallet mot slutten av utladningen er meget brått. På utladningskurven i figur 2.3 ser man at det ikke er noen måling for batterispenningen som tilsvarer 45 volt. Det er på grunn av at spenningen i minst en av cellene falt såpass brått etter den siste målingen før brudd at kapasitetsmåleren slo av strømmen, og dermed ga cellene ro på seg til å stige oppover mot relaksjonsspenningen, som beskrevet i figur 2.2, før neste måling rakk å bli utført. Det er antagelig dette som har skjedd i løpet av de to siste målepunktene under utladningen.

Utladningskurve

Utladningskurven i figur 3.13 stemmer godt overens med de teoretiske utladningskurvene til LiFePO_4 - batterier, om man ser bort ifra at den ikke viser noe raskt spenningsfall i starten av utladningsforløpet. Det første datapunktet ble målt litt etter at utladningen startet på 52,4 volt. 20 minutter før testen begynte ble batterispenningen målt til 55,2 volt. Det antas at spenningsfallet i starten av utladningsforløpet var så bratt at da den første målingen ble tatt, hadde batterispenningen allerede begynt å nærme seg spenningsplataet.

Cellespenninger

Grafen for målte cellespenninger under utladning, figur 3.11, viser helt håpløse verdier i det andre datapunktet for fire av cellene. To celler har fått veldig høy spenning, mens to celler har fått veldig lav spenning. Under forsøket ble dette dobbeltsjekket av frykt for at noen celler allerede var i ferd med å tømmes, men alle cellene hadde da en relativt lik spenning da det ble målt direkte over hver celle. Derfor antas det at disse målingene har kommet som følge av dårlig kontakt med måleutstyr over en celle, som har gitt litt for lav spenning, og at neste celle har fått denne spenningsdifferansen lagt til sin måleverdi, og dermed fått en høyere spenning. Det at differansene ser ut til å være symmetriske om resten av cellene forsterker dette inntrykket. Etter at denne litt rare målingen ble oppdaget, ble resten av målingene foretatt direkte over hver enkelt celle istedenfor å måle over flere celler og så ta differansen mellom hver måling for å finne cellespenningen.

5.1.6 Måleteknikk

På grunn av små avstander og høye spenninger ble det under målingene av cellespenninger benyttet metoder som kanskje ikke ga det beste måleresultatet, men som skulle minimere risikoen for å kortslutte battericeller. Innimellom var det vanskelig å få skikkelig kontakt mellom målepinnene på voltmeteret og målepunktene, både på BMSen og batteriet. Pinnene måtte trykkes skikkelig ned i metallet. Spesielt under den fullstendige utladningstesten, da BMSen var koblet til batteriet, men ikke satt skikkelig fast, var dette vanskelig.

En annen faktor som spiller inn, er at det å måle disse batterispennningene over 16 kontakter med ett par hender tar tid. Først måtte spenningen måles, så måtte utstyret legges forsiktig bort for ikke å kortslutte noe, deretter kunne måleverdien noteres, før neste måling ble gjennomført. Denne fremgangsmåten førte til at en måleserie, som har fått ett tidspunkt i excel arkene, i virkeligheten kan ha strukket seg over flere minutter. Forsøkene kunne med fordel vært utført av to personer.

5.1.7 Rekkevidde

Beregningene for rekkevidde antar at det kun er driftsmotorene som skal forsynes med energi. Om styringsmotorer, sensorer og øvrige komponenter tas med i beregningene, vil det kreve mer energi for å drive roboten. Hvor mye mer er usikkert, men et grovt overslag fra Lars Grimstad sin side, anslår at roboten muligens trekker

ti ampere under drift. Hvis begge batteripakkene installeres i roboten, vil den tilsvarende strømmen per batteri være nærmere den strømmen som batteriet leverte i utladningstesten i kapittel 3.3.2 enn hva som ble brukt i beregningene av rekkevidde i kapittel 3.6. Hvis begge batteriene til roboten har den samme kapasiteten vil roboten ved en strøm på totalt 11,4 ampere kunne arbeide i 5,23 timer. Dette vil tilsvare en levert effekt fra batteriene på $296\text{W} \times 2 \text{ batterier} = 592\text{W}$. Denne effekten ligger en god del høyere enn det som har blitt estimert i tidligere beregninger, men det er ikke sikkert at denne tilnærmingen gir et bedre estimat av den virkelige operasjonstiden til roboten. Den må testes ute på et jorde. 5,23 timer er i alle tilfeller en respektabel tid, selv om det er en god del lavere enn hva som har blitt beregnet. Beregningen som er basert på utladningsforsøket antar at dette batteriet har 30,2 amperetimer, og at det andre batteriet er like sterkt. I beregningene blir det antatt at batteripakkene tilsammen har en kapasitet på 60 amperetimer. Dermed blir operasjonstidene litt kortere enn det de ville ha vært om man antok 60,4 amperetimer, men det antas at denne forskjellen vil være minimal.

5.2 Nåværende batterisystem

5.2.1 Batteri

Kortslutningen av batteriet, sammen med selvutladning over flere måneder kombinert med at litium-ion batterier gjerne sendes på halv ladestand, har antagelig sammen bidratt til de lave celledspenningene som først ble observert på batteriet. Om batteriet har tatt skade av den lave spenningen vites ennå ikke, da konsekvensen av å dyputlade batterier ofte er at levetiden synker, og det er umulig å si noe om levetiden til batteriet før det faktisk er oppbrukt. Når det er sagt henger levetiden gjerne sammen med kapasiteten. Selv om batteriet viste en kapasitet på over 30 Ah under utladning, som i og for seg tyder på at alt er i orden, kan det hende at batteriet, uten kortslutning og selvutladning, hadde ligget enda høyere i kapasitet. Det står heller ikke oppgitt på nettsidene til Golden Motor ved hvilken utladningsstrøm disse batteriene skal levere 30 Ah. Man kunne ha gjort en utladningstest av det andre batteriet, for å se hvor stor kapasitet det har, men det virker som en relativt unødvendig øvelse siden det kortsluttede batteriet viste en såpass høy kapasitet.

Batteriet fra Golden Motor var relativt billig, og cellene ser foreløpig ut til å virke som de skal. Et ledende spørsmål er hvor lenge cellene vil vare, men det har blitt gjort tiltak for å øke levetiden til batteripakken. En BMS med cellebalansering har blitt kjøpt inn, og vil bli installert så fort som mulig. Battericellene i batteripakken som allerede er anskaffet til roboten ser ut til å være en tilstrekkelig løsning som energiforsyning til roboten. Foreløpig er den i alle tilfeller god nok til å drive roboten mens man tester de øvrige funksjonalitetene.

Redusert batterispenning

For å bringe spenningen fra batteripakkene ned under 50 volt, og dermed slippe å bruke DC-DC-omformere, kan det tas ut noen celler fra den eksisterende batteripakken. For å være helt sikker på at denne batteripakken ikke skal overstige 50 volt, kan det ikke være mer enn 13 LiFePO_4 celler i serie i batteripakken. Nå antas det at

den nyinnkjøpte BMSen installeres, og balanserer cellene ved 3,6 volt, slik som det står oppført i tabell 4.3. Med 14 celler vil den maksimale spenningen bli 50,4 volt. Det er så marginalt over, at batterispenningen antageligvis vil synke ned under 50 volt i løpet av meget kort tid. I alle tilfeller vil det medføre en del arbeid å ta to celler ut av batteripakken. Kontaktene må loddes av, og teipen som holder cellene samlet må rives bort. Omfanget av operasjonen vil også avhenge av hvilke to celler som fjernes. Det enkleste vil være å ta ut de to cellene som ligger lavest i spenning i batteriet, altså nærmest jord, fordi disse er lettest å få tak i. Disse cellene er i tilfelle celle nummer 15 og 16 som kan sees i figur 3.2b. Om man vil fjerne de to cellene som ligger nærmest den positive polen i batteriet, må hele batteripakken demonteres. Alt i alt er det ikke sikkert at det vil være verdt det å hente ut to battericeller. Mye arbeid må investeres for å få opp effektiviteten, samtidig som man mister $2/16 = 12,5$ prosent av energiinnholdet i batteripakken. Regnestykket ser enda styggere ut om man skal sikre seg og ta ut tre battericeller for å havne under de 50 voltene som servomotorene tåler.

Arkitektur

Det kan være litt problematisk å koble to LiFePO_4 batterier inn i det samme systemet om de ikke er laget for å parallellkobles. En parallellkobling med to batterier er i utgangspunktet ikke ønskelig da det kan oppstå strømmer som går fra det ene batteriet til det andre. Det lureste for roboten sin del er muligens å la batteriene ta seg av to driftsmotorer og to servomotorer hver, mens sensorer og datamaskinen kun drives av det ene batteriet. Da vil man unngå alle problemene som kan oppstå ved å koble batteriene sammen. Problemet med denne fremgangsmåten er at batteriet som driver de ekstra komponentene vil tappes fortere enn det andre batteriet, og dermed minke operasjonstiden i forhold til om batteriene trekker like mye strøm. Spørsmålet er hvor mye strøm som trekkes av de øvrige komponentene.

5.2.2 Batteristyringsystem

Den originale BMSen som sitter inne i batterikassen vil holde cellene innenfor operasjonsområdet sitt, men den har ikke de nødvendige funksjonalitetene som skal til for å maksimere kapasiteten til batteripakken ved å balansere cellene. For å sette inn en mer avansert BMS, slik som de som blir presentert i kapittel 4.2.1, kreves det inngrep i batteripakken eller batterikassen. For å montere en distribuert BMS, for eksempel den fra 123 electric, så må hele batteripakken demonteres slik at BMS-brettene kan monteres over hver enkelt celle. Det er heller ikke sikkert at det vil bli plass til disse brettene inne i batteripakken, da de må monteres oppå cellene slik at de blir høyere. Orion Jr. BMS vil kunne få inn cellespenningene via den samme kontakten med ledninger for å måle spenning som allerede er i batteriet. Da er en løsning å enten legge BMSen inne i batterikassen, men da må det tas ut to celler, og på grunn av størrelsen til Orion JR. så må det være to celler under hverandre som må tas ut. I såfall må hele batteripakken tas ifra hverandre, samtidig som det må bores hull til kommunikasjonen fra BMSen til datamaskinen som styrer roboten. En annen måte å gjøre det på er å dra ledningene for å måle batterispenningene ut av batterikassa. Da må det bores hull til disse. Samme problemstilling vil gjelde for Nuvation sin BMS. Det er ikke oppgitt noen størrelse på enhetene, så man slipper muligens å omrokere celler. Det må fortsatt bores hull til ledninger, enten for kommunikasjon,

hvis 'cell interfacen' skal monteres inni batterikassen, eller for ledningene som måler spenning hvis BMSen monteres på utsiden av kassen. Et alternativ er å lage en ny batterikasse med plass til en innebygd BMS enhet, men dette koster også ressurser.

Et system bestående av integrerte kretser vil muligens kunne få plass inne i batterikassen, men det anses som urealistisk at dette vil bli laget til roboten i den nærmeste fremtid.

BMS-kortene som er kjøpt inn som erstatning for den originale BMSen vil balansere cellene på bekostning av at den maksimale strømmen som er tilgjengelig ut av batteriene, altså maksimal effekt, minker. Den maksimale strømmen som BMSen tillater kontinuerlig er fortsatt på 30 ampere. Per batteri. Dette skal være mer enn nok for å drive roboten under normal drift, så det bør ikke være noe problem.

Grunnen til at det ble valgt å anskaffe en slik 'protector' BMS, er at den, sammen med en ekstern amperetimeteller, utgjør et billig system som kan implementeres relativt raskt, og med minimalt av arbeid. Ett batteri er allerede åpnet, og den nye BMSen vil bli installert så snart den blir levert. Det er bestilt inn to av disse kortene slik at det andre batteriet også har muligheten for å bli utstyrt med en slik BMS. Det er en fordel at begge batteriene styres på samme måte, men det anses som en fordel om det testes på det ene batteriet først for å se om BMSen virker som den skal før det gjøres noe med den fungerende batteripakken. En Arduino mikrokontroller kan brukes som en amperetimeteller, men det er uvisst hvor nøyaktig det vil gå an å lage denne. Ladestand er noe som endrer seg med både strøm, temperatur og alderen til battericellene. Dette fører til at ganske avanserte beregninger må tas i bruk, muligens må det også lages oppslagstabeller hvor man tar flere utladningstester ved forskjellige strømmer og temperaturer, og bruker disse som referanse i beregningene. På den annen side, er utladningskurven i figur 3.13 bratt i slutten av utladningsforløpet, så det vil være mulig å kunne måle en minkende spenning ved lavere ladestand. Spørsmålet er da om roboten allerede har brukt opp så mye av energien den har tilgjengelig at den ikke rekker tilbake til ladestasjonen. Det kan kompenseres for dette ved å si at det kun skal brukes 80 prosent av batterikapasiteten, men da mister man rekkevidde.

Et problem som kan oppstå med en løsning hvor BMSen ganske enkelt bryter strømmen om cellene havner utenfor operasjonsområdet som tillates, er at BMSen vil slå av hele systemet. Dette kan føre til utrygge situasjoner. For eksempel hvis roboten beveger seg i en bakke når strømmen brytes, har man plutselig en tung maskin som triller nedover en skråning uten mulighet til å stoppe. Dette er den viktigste grunnen til at denne løsningen ikke anbefales som noen varig løsning. I første omgang anses den imidlertid som tilstrekkelig.

5.3 Fremtidig batterisystem

Det er flere muligheter for hvordan batterisystemet til en ny robot kan designes. I kapittel 4 ble det presentert løsninger som representerer de fleste nivåer av kompleksitet og pris. Billige løsninger fører gjerne med seg en god del arbeid, mens det i andre enden av skalaen er mulig å kjøpe seg ut av problemene ved å gå til anskaffelse

av dyre, høyt teknologiske batterier.

Batteristyringssystem pluss celler

En batteripakke som designes fra bunnen av vil gi full kontroll over design, funksjonalitet og arkitektur. Det er mulig å kjøpe inn enkeltceller med nøyaktig den kapasiteten som ønskes, og disse kan deretter kobles i serie for å gi en pakke med høyere spenning. Et eksempel på hva det kan koste å kjøpe inn battericeller, er presentert i tabell 4.1. Disse pakkene må i alle tilfeller overvåkes og styres av en BMS. En slik BMS kan for eksempel lages ved å kjøpe inn integrerte kretser. Da er det flere muligheter for å bygge opp systemet nøyaktig som ønsket. Alternativet er å kjøpe inn fullstendige batteristyringssystemer som allerede er ferdiglaget, men da må man føye seg etter spesifikasjonene til BMSen som kjøpes inn. I enkelte tilfeller vil BMS fabrikanter tilby å skreddersy løsninger til forskjellige systemer, som selvfølgelig også fører med seg utviklingskostnader. BMS løsningen fra Nuvation er ment for å svare på etterspørselen etter en fleksibel BMS som er hyllevare. Med en slik modulær BMS, vil det kunne tenkes et system hvor man lager to seriekoblede strenger med så mange batterier i serie som man ønsker, opp til 16. Disse kontrolleres av hvert sitt 'cell interface'. Siden denne BMSen er laget for å kontrollere strenger i parallell, vil ikke dette være noe problem. Batteristrengene kan så kobles opp på hver sin side av roboten. Fordelen med dette systemet er at siden hele batteripakken kontrolleres av en BMS, vil man trenge kun en lader for å lade opp batteriene. Den distribuerte BMSen fra 123electric har mulighet for å dele opp batteripakker ved å bruke flere streng 'inn' og 'ut'-brett. Da kan halvparten av strengen settes på den ene siden av roboten, mens den andre delen av strengen settes på den andre siden. I dette tilfellet vil alle cellene være koblet i serie. Et problem kan være at avstanden mellom de to halvpartene av batteristrengen nå antageligvis vil komme opp i over to meter. Det er uvisst om denne ledningen blir for lang til at BMSen vil fungere skikkelig. Denne BMSen har heller ikke algoritmer for å fange opp kapasitetstapet i cellene på grunn av aldring. Derfor anbefaler 123electric i databladet til BMSen å sette tilgjengelig kapasitet for batteripakken til 80 prosent av den nominelle kapasiteten. Orion sine BMSer er sentraliserte enheter. For at dette skal virke i roboten, må en enhet enten følge med hver sin batteripakke, altså en BMS per pakke, eller så kan det kobles opp en sentral enhet som får inn spenningsmålinger fra batteriene via lange ledninger. Førstnevnte vil bli unødvendig dyrt, sistnevnte vil antageligvis føre til unøyaktige målinger på grunn av lange ledninger, og krever samtidig at disse ledningene flyter rundt i roboten med høy spenning. Dette anses som en dårlig løsning.

Hvis det kjøpes inn battericeller og BMS sammen eller for seg vil det kreve en del arbeid for å sette dem sammen. Dette er muligens prosjekter som kan gjennomføres som masteroppgaver eller som studentprosjekter, men det fordrer at noen tar på seg den oppgaven. Batteripakker er i all hovedsak et energilager. Hvis noe skulle gå galt, er det mye energi som potensielt kan slippes løs. Derfor er det strenge reguleringer og sertifiseringer for å få godkjent batteripakker. Dette må tas med i beregningene om en batteripakke skal bygges fra bunnen av, eller monteres, av studenter.

Batteripakker

Det vil være mye enklere, og kreve mindre arbeid, å kjøpe inn smarte batterier som kan kommunisere med resten av systemene i roboten. Et stort utvalg av pakker fra Elite Power Solutions er tilgjengelige, enten som nøkkelklare eller lavkost. Dette antyder at man enten kan få batteripakkene ferdig sammensatt eller i deler. Det står imidlertid ikke spesifisert noe sted hva som menes med nøkkelklar, og hva som i tilfelle må monteres. Om man får disse levert som ferdige batteripakker virker dette som et godt alternativ. Batteripakkene fra Bren-troncis er de som gir klart høyest spesifikk energi. Dette kommer nok av at når batteriene står avertert som litium-ion batterier, så menes det nok LiCoO_2 -batterier. Batteriene kan parallellkobles for høyere kapasitet, de kan også, med visse forhåndsregler, kobles i serie. Disse batteriene er visstnok meget robuste, og er ment for militært bruk. Da det mistenkes at disse batteriene er LiCoO_2 -batterier, kan de allikevel ikke anbefales for roboten. Det kan ikke forsvares å velge batterier som, i tilfelle noe skulle gå galt, er mer brannfarlige enn de batteriene som allerede er valgt ut. Det er ikke dermed sagt at LiFePO_4 batterier ikke er brannfarlige, men alle mulige forholdregler må tas for å minske faren for at noe skal kunne ta fyr og LiFePO_4 -batterier anses altså som tryggere. Batteriene fra Clayton Power har høy kapasitet, og relativt høy spenning. Om man velger disse, vil energiinnholdet i batteripakken som følge av den økte kapasiteten, tapes mot den lavere batterispenningen. En batteripakke bestående av to slike i parallell bør allikevel være et alternativ som vurderes videre. Energimodulene fra A123 systems er ment for å være byggeklosser i en større batteripakke, men en modul av disse kunne allikevel vært nok til å drive roboten. På grunn av lite fritt tilgjengelig informasjon på nettsidene til A123 systems er det vanskelig å si noe mer om et system basert på disse. A123 har blitt kontaktet, men foreløpig har ikke henvendelsen blitt besvart. Antageligvis ville man fått et meget bra system, med batteripakker i nøyaktig den størrelsen man ønsker som ivaretas på en god måte av en BMS. Prisen vil nok bli deretter. Batteriene fra NEC Energy Solutions virker som et meget godt alternativ. De er ment som erstatningsbatterier for blybatterier, og må derfor være robuste. Dessverre er spenningen såpass lav som 12 volt. Pakkene kan imidlertid kobles i serie opp til 48 volt, men da må man selvfølgelig kjøpe flere batterier. Disse batteriene kan fås tak i fra en norsk forhandler, det kan ses på som en sikkerhet i forhold til at det er lett å få kontakt med leverandør. Dette bør absolutt ikke underverdes. Selv om en batteripakke bestående av disse batteriene vil bli meget dyr. Batteriene fra Valence representerer to forskjellige måter å designe batteripakken på. Enten kan man bruke RT modulene, som i likhet med batteriene fra NEC, er erstatninger for blybatterier. Det virker imidlertid som om disse, på grunn av at de er ment for å klare seg uten en BMS, ikke er ment for å sende informasjon til systemet som bruker batteriene. De kan kommunisere via et såkalt 'Diagnostics toolkit', som sender informasjon over USB til en datamaskin, men om det er meningen at dette skal brukes mens batteriet er i drift er noe uklart. XP modulene derimot er ment til å brukes sammen med en BMS med mulighet for kommunikasjon over CAN nettverk.

Det var opprinnelig et ønske om at roboten skulle utstyres med batterier som enkelt kunne byttes ut og lades opp utenfor roboten, og som legges til og trekkes fra systemet om det skulle være ønskelig med mer kapasitet. For eksempel om roboten skulle bytte fra en relativt lett oppgave til en tyngre oppgave, som krever mer kraft. Det ser ut som om LiFePO_4 - batterier som er laget som erstatningsbatterier

for blybatterier er de som ligger nærmest disse spesifikasjonskravene. Batteriene fra NEC Energy Solutions og Valence er eksempler på dette. Spørsmålet er om disse batteriene uten videre kan kobles sammen om de har forskjellig spenning. Hvis systemet designes slik at det er enkelt å ta ut og inn batteriene, er det fort gjort at et batteri som ikke er helt fulladet i vanvare settes inn. Hvis det da begynner å gå strømmer mellom batteriene kan dette føre til problemer. Hvis dette derimot er noe som batteriene er bygd for å tåle, noe de antageligvis er, har man et meget fleksibelt system. Om denne fleksibiliteten gjør systemet mer stabilt og driftssikkert er derimot en annen sak, da det med flere batteripakker er flere komponenter som kan gå i stykker. En annen fordel med disse batteriene, er at de kan benytte seg av en vanlig batterilader for blybatterier, men det er også trolig at den relativt lave energitettheten til disse batteriene kommer som følger av all elektronikken som er innebygd for at batteriene skal være så robuste. Alternativet til små, modulære batterier, er å kjøpe inn større batterier fra for eksempel Clayton eller Elite Power Solutions, eventuelt XP modulen på 36 volt fra Valence. Det vil nok totalt sett bli billigere, da det vil være mindre elektronikk som går med til å passe på to store batterier i forhold til fire eller åtte små. En fordel som kan følge av å velge de små batteriene kan være at om man først bare kjøper inn noen få batterier, kan det testes ut om de virker i roboten som man hadde tenkt seg, før man eventuelt kjøper inn flere. Fire batterier fra NEC vil gi en batteripakke på omtrent samme størrelse som ett av batteriene som allerede er kjøpt inn til roboten. Prisforskjellen er meget stor, men om det tas med i beregningen at de opprinnelige batteriene ikke akkurat har fungert optimalt, kan det tenkes at det er en god grunn for nettopp dette. Et annet argument for de små erstatningsbatteriene for blybatterier, er at med mindre markedet for større batteripakker, som den fra for eksempel Clayton, virkelig eksploderer, så vil antageligvis erstatningsbatterier for blybatterier være de som har det største markedet, noe som igjen vil gjøre batteriene billigere på sikt. Batteriene fra NEC er siste skrik i slike erstatningsbatterier, og vil naturlig nok være ganske dyre, i hvert fall en stund til.

En videre undersøkelse av hva som fins tilgjengelig av LiFePO_4 -batterier som er laget for å erstatte blybatterier er likevel tilrådelig. Siden det ikke har blitt hentet inn noen prisantydning for batteriene fra Valence, er det vanskelig å si hvor godt dette alternativet er, i tillegg er det trolig at det finnes flere slike batterier på markedet. Dessverre dreide undersøkelsene i denne oppgaven seg i første omgang veldig mye om batteristyringssystemer, og kom litt sent inn på smarte batterier og erstatningsbatterier for blybatterier spesielt. Grundige undersøkelser av disse batteriene har det derfor ikke blitt tid til i denne oppgaven.

Kapittel 6

Konklusjon

Batterisystemet til en landbruksrobot har blitt undersøkt. En av to batteripakker som var kjøpt inn ved en tidligere anledning ble fryktet ødelagt på grunn av veldig lav spenning målt over batteripolene. Til tross for dette, ser det ut som om batteriet har overlevd og kan vise til en kapasitet på omtrent 30 amperetimer under utladning over fem timer. Systemet som per nå ivaretar battericellene er på den annen side ikke tilfredsstillende, da det ikke er i stand til å optimalisere kapasiteten, og dermed det tilgjengelige energiinnholdet i batteripakken. Tiltak har blitt iverksatt for å få et akseptabelt batteristyringssystem, bestående av en billig 'protector'-BMS, installert i batteripakken slik at batteriet kan tas i bruk på landbruksroboten. Det har også blitt lagt opp til å utføre dette samme tiltaket for å oppdatere den andre batteripakken.

Videre arbeid

Installasjonen av disse 'protector'-ene er i skrivende stund ikke ferdigstilt, men oppdateringen vil forhåpentligvis være tilgjengelig for roboten i løpet av kort tid. Ennå må en amperetimeteller utvikles og installeres i roboten for at dette systemet skal virke som tidligere forestilt.

Et nytt batterisystem kan lages ved å bruke erstatningsbatterier for blybatterier. Disse er gjerne meget robuste batterier som lages for tøffe forhold, og som i enkelte tilfeller kan kobles opp i større batteripakker slik som det opprinnelig var tenkt at batterisystemet til roboten skulle være da den først ble laget.

Før nye batterier kjøpes inn, bør det i alle tilfelle gjennomgås nøyaktig hvordan det blir forestilt at disse batteriene skal brukes på roboten, og om de er i stand til å operere slik det ønskes. Bare slik kan batteriene til roboten utnyttes på best mulig måte og dermed bidra til at denne landbruksroboten drar sitt lass i innsatsen for å gjøre landbruket mer bærekraftig.

Bibliografi

- [1] 123electric. 123electric Battery Management System. '<http://www.123electric.nl/index.phtml>'. Hentet: 24.04.2015.
- [2] A123 Systems. AMP20 Energy Modules. '<http://www.a123systems.com/products-modules-energy.htm>'. Hentet: 05.05.2015.
- [3] Davide Andrea. *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Artech House, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062, 2010.
- [4] Arduino. `analogRead()`. '<http://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>'. Hentet: 06.05.2015.
- [5] Arduino. What is Arduino? '<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>'. Hentet: 06.05.2015.
- [6] Fredrik Blomberg. Rammekonstruksjon til autonom landbruksmaskin. Masteroppgave, Institutt for Matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2014.
- [7] Bren-Tronics, Inc. BT-70791CG, BB-2590/U, 9.6 Ah High Performance Rechargeable Lithium-Ion Battery. '<http://www.bren-tronics.com/batteries/rechargeable/bt-70791cg.html>'. Hentet: 25.04.2015.
- [8] George B.Thomas,Jr., Maurice D.Weir, Joel Hass, and Frank R. Giordano. *Thomas' Calculus Eleventh Edition Media Upgrade*. Pearson Education, Inc., 2008.
- [9] Changzhou Huake New Energy Technology Co., Ltd. High Rate Discharge Lithium-Ion / LiFePO4 Battery Cell , 10Ah LFP Battery PL1260190. http://www.hecobattery.com/china-high_rate_discharge_lithium_ion_lifepo4_battery_cell_10ah_lfp_battery_pl1260190-1303811.html. Hentet: 22.03.2015.
- [10] Clayton Power. Products, Lithium Ion Batteries. '<http://www.claytonpower.com/products/lithium-ion-batteries/>'. Hentet: 25.04.2015.
- [11] Ronald M. Dell and David A. J. Rand. *Understanding Batteries*. The Royal Society of Chemistry, Milton Road, Cambridge, 2001.
- [12] Dan Doughty and E. Peter Roth. A general discussion of li ion battery safety. *The Electrochemical Society's Interface*. Publisert: Sommeren 2012.

- [13] Ebay. PCB/BMS for 48v (16s)LiFePO4 Battery Pack/60A Limited/Equilibrium,Tem Switch! 'http://www.ebay.com/itm/PCB-BMS-for-48v-16s-LiFePO4-Battery-Pack-60A-Limited-Equilibrium-Tem-Switch-/171746676991?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item27fce650ff'. Hentet: 22.04.2015.
- [14] Elite Power Solutions. Application Packages - GBS Cells. 'http://elitepowersolutions.com/products/index.php?cPath=27_36'. Hentet: 10.05.2015.
- [15] Ewert Energy Systems, Inc. OrionBMS. 'www.orionbms.com'. Hentet: 24.04.15.
- [16] Farnell element14. Nettbutikk. 'http://no.farnell.com/?_ga=1.94852757.845886463.1431247084'. Hentet: 10.05.2015.
- [17] Golden Motor. Power Packs Specially Designed for EVs Reliable, Safe, Long Working Life. 'http://www.goldenmotor.com'. Hentet: 12.05.2015.
- [18] Lars Grimstad. Powertrain, Steering and Control Components for the NMBU Agricultural Mobile Robotic Platform. Masteroppgave, Institutt for Matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2014.
- [19] GWL Power. EV-Power.eu - Your Complete Power Solutions. 'http://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/'. Hentet: 04.05.2015.
- [20] Dagfinn Klem Hafnor and Kristian Hoås. SÅmaskin for autonom landbruksrobot; Agronomisk og bærekraftig design. Masteroppgave, Institutt for Matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2015.
- [21] International Energy Agency. World Energy Outlook Special Report 2013: Redrawing the Energy Climate Map. 'http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo-special-report-2013-redrawing-the-energy-climate-map.html'. Publisert: 10.06.2013, Hentet: 12.05.2015.
- [22] JVL Industri Elektronik A/S. The MAC motor® . AC-servo motor with Integrated driver MAC50, 95, 140 and 141. http://www.jvl.dk/files/_2011clean/pdf/1d043gb.pdf. Hentet 29.04.2015.
- [23] Landbruks- og matdepartementet. 'Velkommen til bords'. 'https://www.regjeringen.no/nb/dokumenter/meld-st-9-20112012/id664980/'. Publisert: 02.12.2011, Hentet: 29.04.2015.
- [24] Landbruksdirektoratet. Antall jordbruksforetak som mottar produksjonstilskudd. https://www.slf.dep.no/no/statistikk/utvikling/jordbruksforetak/antall-jordbruksforetak-som-mottar-produksjonstilskudd. Hentet: 29.04.2015.
- [25] Rasmus Lillekvelland. SÅmaskin til NMBUs autonome landbruksrobot; utforming og styrkeberegninger. Masteroppgave, Institutt for Matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2015.

- [26] Mean Well. 350W Single Output DC-DC Converter, SD-350 Series. 'https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/sd350_eng_tds.pdf'. Publisert: 17.12.2013, Hentet: 29.04.2015.
- [27] Fredrik Meltzer. Fremdrift og energiforbruk for autonom landbruksrobot. Masteroppgave, Institutt for Matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2014.
- [28] Microdrones GMBH. Flying Farmers – Future Agriculture: Precision Farming with microdrones. '<http://www.microdrones.com/en/applications/growth-markets/microdrones-in-agriculture/>'. Hentet: 29.04.2015.
- [29] NEC Energy Solutions. ALM™ Lithium Ion Batteries. '<http://www.neces.com/products-services/battery-systems/alm-lithium-ion-battery-systems/>'. Hentet: 06.05.2015.
- [30] Norsk Landbrukssamvirke. Landbrukspolitiske mål. <http://www.landbruk.no/Politikk/Nasjonalt/Landbrukspolitiske-maal>. Hentet: 29.04.2015.
- [31] Nuvation Engineering. Battery Management Systems. '<http://www.nuvation.com/battery-management-system>'. Hentet: 24.04.2015.
- [32] SEC electronics inc. SS49E Hall Effect Sensor. 'http://dscl1.csr.jhu.edu/main/images/3/31/SS49e_Hall_Sensor_Datasheet.pdf'. Hentet: 06.05.2015.
- [33] NEC Energy Solutions. Nec energy introduces breakthrough 12-volt lithium-ion batteries for tough, critical applications. Pressemelding Publisert: 27.01.2015, Hentet: 12.05.2015.
- [34] Texas Instruments. BQ76940, 9 to 15-Series Cell Li-ion and Li-Phosphate Battery Monitor (bq76940 Family). '<http://www.ti.com/product/BQ76940?keyMatch=bq76940&tisearch=Search-EN-Products>'. Hentet: 24.04.2015.
- [35] Texas Instruments. BQ78350, Companion CEDV Fuel Gauge Battery Management Controller for bq76940 Monitor Family. '<http://www.ti.com/product/bq78350?keyMatch=bq78350&tisearch=Search-EN-Everything>'. Hentet: 24.04.2015.
- [36] Till Seehusen. Jordarbeiding og jordpakking. <http://www.nlr.no/media/ring/1043/ES/Jordarbeiding%20V0.pdf>. Artikkel basert på: Vestopp-land Forsøksring, Medlemskriv 2, april 2008. Publisert på Norsk Landbruksrådgiving: 08.12.2008, Hentet 13.05.2015.
- [37] Jorge Torres-Sánchez, Francisca López-Granados, Ana Isabel De Castro, and José Manuel Peña-Barragán. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLOS ONE*. Publisert: 06.03.2013, Hentet: 29.04.2015.
- [38] Chris Turner. Iron Phosphate Builds a Better Battery. '<http://www.iccnexergy.com/articles/1256/iron-phosphate-builds-a-better-battery/>'. Publisert: 09.2008, Hentet: 28.04.2015.

- [39] James P. Underwood. Our robots. '<http://confluence.acfr.usyd.edu.au/display/AGPub/Our+robots>'. Publisert: 30.06.2014, Hentet: 29.04.2015.
- [40] Valence Technology. U-Charge RT Modules. '<https://www.valence.com/products/standard-modules/u-charge-rt-modules-2/>'. Hentet: 06.05.2015.
- [41] Valence Technology. U-Charge XP Lithium Iron Magnesium Phosphate Battery Modules. '<https://www.valence.com/products/standard-modules/xp-module/>'. Hentet: 06.05.2015.
- [42] Wall-ye, softwares and robots. Our products. '<http://wall-ye.com/index-2.html>'. Hentet: 29.04.2015.
- [43] Phillip Weicker. *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Artech House, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062, 2014.
- [44] Winston Energy Group. Tech Support. '<http://en.winston-battery.com/index.php/support>'. Hentet: 11.05.2015.

Tillegg A

Excel Regneark

	fredag 27.02 11:45		12:15		13:32		14:05	
Celle	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]
16	2,15	2,15	2,58	2,58	2,99	2,99	3,1	3,1
15	3,4	1,25	5,07	2,49	5,96	2,97	6,15	3,05
14	4,56	1,16	7,57	2,5	8,94	2,98	9,22	3,07
13	5,77	1,21	10,06	2,49	11,91	2,97	12,3	3,08
12	8,09	2,32	12,71	2,65	14,92	3,01	15,39	3,09
11	10,04	1,95	15,24	2,53	17,91	2,99	18,47	3,08
10	12,15	2,11	17,81	2,57	2,99	2,99	3,08	3,08
9	14,44	2,29	2,62	2,62	6	3,01	6,18	3,1
8	15,64	1,2	5,11	2,49	8,97	2,97	9,24	3,06
7	17,67	2,03	7,67	2,56	11,97	3	12,33	3,09
6	18,88	1,21	10,15	2,48	14,94	2,97	15,4	3,07
5	1,65	1,65	12,66	2,51	17,92	2,98	18,47	3,07
4	3,99	2,34	15,31	2,65	3,01	3,01	3,1	3,1
3	5,16	1,17	17,79	2,48	5,99	2,98	6,17	3,07
2	7,26	2,1	2,57	2,57	8,99	3	9,26	3,09
1	9,53	2,27	5,18	2,61	12	3,01	12,35	3,09
	28,4	28,41	40,78	40,78	47,83	47,83	49,29	49,29

	14:34		15:03		15:30		02.03.2015 kl 09:00	
Celle	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]	Målt spenning [V]	Cellespenning [V]
16	3,13	3,13	3,17	3,17	3,2	3,2	3,18	3,18
15	6,26	3,13	6,33	3,16	6,39	3,19	6,34	3,16
14	9,39	3,13	9,49	3,16	9,58	3,19	9,51	3,17
13	12,52	3,13	12,65	3,16	12,77	3,19	12,67	3,16
12	15,67	3,15	15,83	3,18	15,98	3,21	15,86	3,19
11	18,79	3,12	18,99	3,16	19,16	3,18	19,03	3,17
10	3,13	3,13	3,16	3,16	3,19	3,19	3,17	3,17
9	6,28	3,15	6,34	3,18	6,4	3,21	6,36	3,19
8	9,4	3,12	9,5	3,16	9,59	3,19	9,52	3,16
7	12,54	3,14	12,67	3,17	12,79	3,2	12,7	3,18
6	15,66	3,12	15,83	3,16	15,98	3,19	15,86	3,16
5	18,78	3,12	18,98	3,15	19,16	3,18	19,02	3,16
4	3,14	3,14	3,18	3,18	3,2	3,2	3,18	3,18
3	6,27	3,13	6,33	3,15	6,4	3,2	6,35	3,17
2	9,41	3,14	9,51	3,18	9,6	3,2	9,53	3,18
1	12,55	3,14	12,68	3,17	12,8	3,2	12,71	3,18
	50,12	50,12	50,65	50,65	51,12	51,12	50,76	50,76

Figur A.1: Målte og beregnede verdier for cellespenninger under delvis oppladning av batteripakken. Spenning ble målt over flere celler for å unngå kortslutning mellom målepinnene og cellene. Beregnede verdier for cellespenning er differansen mellom en måling og den forrige målingen.

Tid [min]	Spenning [V]						
	Celle 16	Celle 15	Celle 14	Celle 13	Celle 12	Celle 11	Celle 10
0	3,17	3,14	3,14	3,15	3,17		
5	3,16	3,13	3,13	3,13	3,16		
10	3,15	3,12	3,13	3,12	3,16		
15	3,14	3,11	3,11	3,11	3,14	3,16	3,16
30	3,132	3,093	3,094	3,097	3,133	3,14	3,146
35	3,124	3,082	3,082	3,085	3,125	3,129	3,136
40	3,114	3,07	3,072	3,076	3,115	3,121	3,127
45	3,106	3,06	3,061	3,065	3,106	3,111	3,119
50	3,1	3,05	3,052	3,056	3	3,102	3,112
55	3,089	3,038	3,04	3,045	3,09	3,093	3,104
60	3,08	3,026	3,028	3,034	3,081	3,084	3,094
70	3,061	3,002	3,004	3,101	3,06	3,065	3,077
80	3,039	2,974	2,976	2,982	3,04	3,041	3,055
90	3,018	2,943	2,946	2,953	3,016	3,017	3,034
100	2,993	2,909	2,914	2,921	2,989	2,992	3,011
110	2,966	2,869	2,874	2,885	2,962	2,964	2,987
120	2,937	2,824	2,829	2,841	2,93	2,933	2,958
130	2,905	2,771	2,776	2,729	2,896	2,898	2,927
135	2,886	2,738	2,743	2,763	2,875	2,879	2,91
140	2,867	2,701	2,707	2,731	2,856	2,856	2,893
145	2,842	2,65	2,657	2,686	2,829	2,83	2,87
150	2,823	2,606	2,614	2,649	2,809	2,807	2,855
155	2,799	2,545	2,552	2,594	2,782	2,78	2,834
160	2,77			2,534	2,75	2,744	2,803
165	2,745				2,72	2,718	2,783
170	2,708				2,681	2,679	2,753
175	2,668				2,638	2,635	2,726
180	2,625				2,578	2,574	2,686
185	2,581				2,532	2,518	2,646
190	2,512				2,52	2,507	2,592
195							2,536

Figur A.2: Målte verdier for cellespenning til celle 10 - 16 under delvis utladning. Her ble spenningen målt med voltmeter rett over polene til cellene. Rosa celler markerer verdier som antageligvis kommer av dårlig kontakt under måling, eller avlesningsfeil.

	Spenning	Strøm	Resistans
Celle 16	2,867	0,864	3,32
Celle 15	2,701	0,84	3,22
Celle 14	2,707	0,815	3,32
Celle 13	2,731	0,836	3,27
Celle 12	2,856	0,874	3,27
Celle 11	2,856	0,893	3,20
Celle 10	2,893	0,87	3,33

Figur A.3: Midt under den delvise utladningen ble strøm og spenning målt samtidig for å bestemme resistansen til effektmotstandene mer nøyaktig ved hjelp av ohms lov. Strømmen ble målt ved å bruke et klampe amperemeter over motstandene.

Tid [min]	Strøm [A]						
	Celle 16	Celle 15	Celle 14	Celle 13	Celle 12	Celle 11	Celle 10
0	0,955	0,977	0,945	0,964	0,970		
5	0,952	0,973	0,942	0,958	0,967		
10	0,949	0,970	0,942	0,955	0,967		
15	0,946	0,967	0,936	0,952	0,961	0,988	0,950
30	0,944	0,962	0,932	0,948	0,959	0,982	0,946
35	0,941	0,958	0,928	0,944	0,956	0,978	0,943
40	0,938	0,955	0,925	0,942	0,953	0,976	0,940
45	0,936	0,952	0,922	0,938	0,951	0,973	0,938
50	0,934	0,949	0,919	0,935	0,918	0,970	0,936
55	0,931	0,945	0,915	0,932	0,946	0,967	0,933
60	0,928	0,941	0,912	0,929	0,943	0,964	0,930
70	0,922	0,934	0,904	0,949	0,936	0,958	0,925
80	0,916	0,925	0,896	0,913	0,930	0,951	0,919
90	0,910	0,915	0,887	0,904	0,923	0,943	0,912
100	0,902	0,905	0,877	0,894	0,915	0,936	0,905
110	0,894	0,892	0,865	0,883	0,906	0,927	0,898
120	0,885	0,878	0,852	0,870	0,897	0,917	0,890
130	0,875	0,862	0,836	0,835	0,886	0,906	0,880
135	0,870	0,852	0,826	0,846	0,880	0,900	0,875
140	0,864	0,840	0,815	0,836	0,874	0,893	0,870
145	0,856	0,824	0,800	0,822	0,866	0,885	0,863
150	0,851	0,810	0,787	0,811	0,860	0,878	0,859
155	0,844	0,791	0,768	0,794	0,851	0,869	0,852
160	0,835	0	0	0,776	0,842	0,858	0,843
165	0,827	0	0	0	0,832	0,850	0,837
170	0,816	0	0	0	0,820	0,838	0,828
175	0,804	0	0	0	0,807	0,824	0,820
180	0,791	0	0	0	0,789	0,805	0,808
185	0,778	0	0	0	0,775	0,787	0,796
190	0,757	0	0	0	0,771	0,784	0,779
195						0	0,763

Figur A.4: Strømmen gjennom motstandene, det vil si ut av batteriet, ble beregnet ved å dele den målte spenningen på resistansen til effektmotstandene.

Tid [min]	Kapazität [Ah]							
	Celle 16	Celle 15	Celle 14	Celle 13	Celle 12	Celle 11	Celle 10	
0								
5	0,0795	0,0812	0,0787	0,0801	0,0807	0	0	
10	0,0792	0,0810	0,0785	0,0797	0,0806	0	0	
15	0,0790	0,0807	0,0783	0,0795	0,0803	0,0412	0,0396	
30	0,2363	0,2411	0,2335	0,2375	0,2400	0,2462	0,2370	
35	0,0786	0,0800	0,0775	0,0789	0,0798	0,0817	0,0787	
40	0,0783	0,0797	0,0772	0,0786	0,0796	0,0814	0,0785	
45	0,0781	0,0794	0,0769	0,0783	0,0793	0,0812	0,0783	
50	0,0779	0,0792	0,0767	0,0781	0,0779	0,0809	0,0781	
55	0,0777	0,0789	0,0764	0,0778	0,0777	0,0807	0,0779	
60	0,0775	0,0786	0,0761	0,0775	0,0787	0,0805	0,0777	
70	0,1542	0,1562	0,1513	0,1565	0,1566	0,1602	0,1546	
80	0,1532	0,1549	0,1500	0,1552	0,1556	0,1591	0,1537	
90	0,1521	0,1533	0,1486	0,1514	0,1544	0,1578	0,1526	
100	0,1510	0,1517	0,1470	0,1498	0,1531	0,1566	0,1515	
110	0,1497	0,1497	0,1452	0,1481	0,1518	0,1552	0,1503	
120	0,1482	0,1475	0,1431	0,1461	0,1503	0,1537	0,1490	
130	0,1467	0,1450	0,1406	0,1421	0,1486	0,1519	0,1475	
135	0,0727	0,0714	0,0692	0,0700	0,0736	0,0753	0,0731	
140	0,0722	0,0705	0,0684	0,0701	0,0731	0,0747	0,0727	
145	0,0717	0,0693	0,0673	0,0691	0,0725	0,0741	0,0722	
150	0,0711	0,0681	0,0661	0,0680	0,0719	0,0734	0,0717	
155	0,0706	0,0667	0,0648	0,0669	0,0713	0,0728	0,0713	
160	0,0699	0,0330	0,0320	0,0654	0,0705	0,0720	0,0706	
165	0,0693	0	0	0,0323	0,0697	0,0712	0,0700	
170	0,0685	0	0	0	0,0689	0,0703	0,0694	
175	0,0675	0	0	0	0,0678	0,0692	0,0687	
180	0,0665	0	0	0	0,0665	0,0679	0,0678	
185	0,0654	0	0	0	0,0652	0,0663	0,0668	
190	0,0640	0	0	0	0,0644	0,0655	0,0656	
195	0	0	0	0	0	0	0,0643	
	2,8264	2,3974	2,3235	2,4370	2,8602	2,7210	2,7092	18,2746

Figur A.5: Kapasiteten til cellene ble beregnet ved å måle strømmen og ta gjennomsnittet av denne og forrige måling og gange denne med tidsdifferansen i minutter delt på 60 (minutter/time) for å få enhet amperetimer.

	1/4 Ampere									
		0	0,3	1	2	3	3,8	5	6	7
Målinger	16	2,5	2,61	2,74	2,849	2,962	2,974	3,05	3,087	3,118
	15	2,439	5,185	5,459	5,684	5,841	5,939	6,091	6,166	6,229
	14	2,437	7,78	8,18	8,52	8,76	8,91	9,13	9,25	9,34
	13	2,475	10,39	10,92	11,37	11,68	11,88	12,18	12,33	12,46
	12	2,516	13,03	13,67	14,22	14,61	14,86	15,23	15,42	15,58
	11	2,469	15,63	16,4	17,07	17,53	17,82	18,28	18,5	18,69
	10	2,476	18,24	19,13	19,91	20,45	20,79	21,32	21,58	21,8
	9	3,127	21,4	22,3	23,1	23,66	24,01	24,55	24,82	25,03
	8	3,08	24,5	25,43	26,25	26,83	27,2	27,77	28,05	28,27
	7	3,119	27,65	28,59	29,43	30,04	30,42	31	31,28	31,5
	6	3,081	30,76	31,72	32,58	33,21	33,61	34,22	34,51	34,74
	5	3,095	33,88	34,86	35,75	36,4	36,82	37,45	37,74	37,97
	4	3,138	37,06	38,04	38,94	39,62	40,05	40,68	40,98	41,2
	3	3,081	40,17	41,16	42,1	42,8	43,24	43,9	44,2	44,44
	2	3,118	43,32	44,33	45,28	46	46,46	47,13	47,44	47,67
	1	3,128	46,47	47,5	48,47	49,21	49,68	50,37	50,67	50,91
Beregninger	16	2,50	2,61	2,74	2,85	2,96	2,97	3,05	3,09	3,12
	15	2,44	2,58	2,72	2,84	2,88	2,97	3,04	3,08	3,11
	14	2,44	2,60	2,72	2,84	2,92	2,97	3,04	3,08	3,11
	13	2,48	2,61	2,74	2,85	2,92	2,97	3,05	3,08	3,12
	12	2,52	2,64	2,75	2,85	2,93	2,98	3,05	3,09	3,12
	11	2,47	2,60	2,73	2,85	2,92	2,96	3,05	3,08	3,11
	10	2,48	2,61	2,73	2,84	2,92	2,97	3,04	3,08	3,11
	9	3,13	3,16	3,17	3,19	3,21	3,22	3,23	3,24	3,23
	8	3,08	3,10	3,13	3,15	3,17	3,19	3,22	3,23	3,24
	7	3,12	3,15	3,16	3,18	3,21	3,22	3,23	3,23	3,23
	6	3,08	3,11	3,13	3,15	3,17	3,19	3,22	3,23	3,24
	5	3,10	3,12	3,14	3,17	3,19	3,21	3,23	3,23	3,23
	4	3,14	3,18	3,18	3,19	3,22	3,23	3,23	3,24	3,23
	3	3,08	3,11	3,12	3,16	3,18	3,19	3,22	3,22	3,24
	2	3,12	3,15	3,17	3,18	3,20	3,22	3,23	3,24	3,23
	1	3,13	3,15	3,17	3,19	3,21	3,22	3,24	3,23	3,24

Figur A.6: Spenningsmålinger under full oppladning av batteriet. Øverst står tiden i timer fra oppladningen startet. Et voltmeter ble koblet over den negative polen til batteriet og deretter til den positive polen til hver enkelt celle oppover i batteripakken. Dette for å unngå kortslutning. Ladestrømmen var 1/4 ampere.

	1 Ampere			2 Ampere			3 Ampere			1 Ampere		
Målinger	9,6	10,6	12	12,6	20	21	22	23	24	25	Balansering og bleeding	
16	3,227	3,24	3,251	3,257	3,338	3,339	3,342	3,375	3,383	3,351	3,349	3,351
15	6,45	6,48	6,501	6,512	6,68	6,68	6,68	6,75	6,77	6,7	6,7	6,7
14	9,68	9,72	9,75	9,77	10,01	10,02	10,03	10,12	10,15	10,05	10,05	10,05
13	12,9	12,96	13	13,02	13,35	13,36	13,37	13,49	13,53	13,4	13,4	13,41
12	16,13	16,2	16,25	16,28	16,69	16,7	16,71	16,87	16,92	16,75	16,75	16,76
11	19,36	19,44	19,5	19,54	20,03	20,03	20,05	20,24	20,3	20,1	20,1	20,11
10	22,58	22,69	22,76	22,8	23,37	23,38	23,4	23,62	23,69	23,44	23,46	23,47
9	25,84	25,95	26,04	26,09	26,71	26,72	26,75	27	27,1	27,25	27,09	26,95
8	29,09	29,2	29,32	29,37	30,06	30,06	30,1	30,39	30,49	30,63	30,49	30,34
7	32,34	32,46	32,6	32,66	33,4	33,41	33,45	33,77	33,89	34,08	34	34,03
6	35,59	35,72	35,88	35,94	36,74	36,75	36,8	37,16	37,29	37,46	37,4	37,43
5	38,84	38,98	39,16	39,23	40,08	40,09	40,15	40,54	40,69	40,86	40,8	40,85
4	42,09	42,25	42,45	42,52	43,42	43,44	43,5	43,93	44,09	44,78	44,58	44,35
3	45,34	45,5	45,73	45,81	46,76	46,78	46,85	47,31	47,49	48,15	48,1	47,77
2	48,59	48,76	49,01	49,1	50,1	50,12	50,2	50,69	50,89	51,6	51,56	51,56
1	51,85	52,03	52,3	52,39	53,45	53,47	53,56	54,08	54,3	55,45	55,38	55,05
Beregninger												
16	9,6	10,6	12	12,6	20	21	22	23	24	25	Balansering og bleeding	
15	3,23	3,24	3,25	3,26	3,34	3,34	3,34	3,38	3,38	3,35	3,35	3,35
14	3,22	3,24	3,25	3,26	3,34	3,34	3,34	3,38	3,39	3,35	3,35	3,35
13	3,23	3,24	3,25	3,26	3,33	3,34	3,35	3,37	3,38	3,35	3,35	3,35
12	3,22	3,24	3,25	3,25	3,34	3,34	3,34	3,37	3,38	3,35	3,35	3,36
11	3,23	3,24	3,25	3,26	3,34	3,34	3,34	3,38	3,39	3,35	3,35	3,35
10	3,23	3,24	3,25	3,26	3,34	3,33	3,34	3,37	3,38	3,35	3,35	3,35
9	3,22	3,25	3,26	3,26	3,34	3,35	3,35	3,38	3,39	3,34	3,36	3,36
8	3,26	3,26	3,28	3,29	3,34	3,34	3,35	3,38	3,41	3,38	3,63	3,48
7	3,25	3,25	3,28	3,28	3,35	3,34	3,35	3,39	3,39	3,38	3,40	3,39
6	3,25	3,26	3,28	3,29	3,34	3,35	3,35	3,38	3,40	3,45	3,51	3,69
5	3,25	3,26	3,28	3,28	3,34	3,34	3,35	3,39	3,40	3,38	3,40	3,40
4	3,25	3,26	3,28	3,29	3,34	3,34	3,35	3,38	3,40	3,40	3,40	3,42
3	3,25	3,27	3,29	3,29	3,34	3,35	3,35	3,39	3,40	3,92	3,78	3,50
2	3,25	3,25	3,28	3,29	3,34	3,34	3,35	3,38	3,40	3,37	3,52	3,42
1	3,25	3,26	3,28	3,29	3,34	3,34	3,35	3,38	3,40	3,45	3,46	3,79

Figur A.7: Spenningsmålinger under full oppladning av batteriet. Øverst står tiden i timer fra oppladningen startet. Et voltmeter ble koblet over den negative polen til batteriet og deretter til den positive polen til hver enkelt celle oppover i batteripakken. Dette for å unngå kortslutning. Ladestrømmen står øverst på regnearket.

	1 A	0 A	0 A	0 A	1/2 A	0 A	1/2 A	0 A
Målinger	Balansering og bleeding							
16	3,352	3,346	3,346	3,352	3,348	3,348	3,35	3,348
15	6,7	6,69	6,69	6,71	6,7	6,69	6,7	6,7
14	10,06	10,04	10,04	10,04	10,04	10,03	10,05	10,04
13	13,41	13,38	13,38	13,39	13,39	13,39	13,4	13,39
12	16,76	16,73	16,73	16,73	16,74	16,73	16,75	16,74
11	20,12	20,07	20,07	20,08	20,09	20,08	20,1	20,08
10	23,48	23,42	23,42	23,42	23,44	23,43	23,45	23,43
9	27,27	27,19	27,28	27,28	27	27,28	27	27,28
8	30,7	30,59	30,68	30,68	30,42	30,71	30,43	30,74
7	34,5	34,31	34,49	34,49	33,97	34,51	33,94	34,49
6	37,95	37,71	37,88	37,88	37,4	37,94	37,36	37,95
5	41,43	41,11	41,24	41,3	40,85	41,4	40,82	41,49
4	45,19	44,75	45,02	45,09	44,41	45,18	44,33	45,26
3	48,52	48,16	48,43	48,5	47,86	48,64	47,78	48,8
2	52,31	51,88	52,22	52,26	51,42	52,37	51,27	52,52
1	55,83	55,41	55,79	55,97	54,98	56,1	54,75	56,21
Beregninger	Balansering og bleeding							
16	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35
15	3,35	3,34	3,34	3,36	3,35	3,34	3,35	3,35
14	3,36	3,35	3,35	3,33	3,34	3,34	3,35	3,34
13	3,35	3,34	3,34	3,35	3,35	3,36	3,35	3,35
12	3,35	3,35	3,35	3,34	3,35	3,34	3,35	3,35
11	3,36	3,34	3,34	3,35	3,35	3,35	3,35	3,34
10	3,36	3,35	3,35	3,34	3,35	3,35	3,35	3,35
9	3,79	3,77	3,86	3,86	3,56	3,85	3,55	3,85
8	3,43	3,40	3,40	3,40	3,42	3,43	3,43	3,46
7	3,80	3,72	3,81	3,81	3,55	3,80	3,51	3,75
6	3,45	3,40	3,39	3,39	3,43	3,43	3,42	3,46
5	3,48	3,40	3,36	3,42	3,45	3,46	3,46	3,54
4	3,76	3,64	3,78	3,79	3,56	3,78	3,51	3,77
3	3,33	3,41	3,41	3,41	3,45	3,46	3,45	3,54
2	3,79	3,72	3,79	3,76	3,56	3,73	3,49	3,72
1	3,52	3,53	3,57	3,71	3,56	3,73	3,48	3,69

Figur A.8: Spenningsmålinger under balansering av batteriet. Et voltmeter ble koblet over den negative polen til batteriet og deretter til den positive polen til hver enkelt celle oppover i batteripakken. Dette for å unngå kortslutning. Ladestrømmen står øverst på regnearket.

Klokkeslett	Strøm [A]	Spenning [V]	Målt kapasitet [Ah]	Delta t [Min]	Beregnet kapasitet per tidsintervall [Ah]	Beregnet kapasitet [Ah]	SOC [%]
08:56	5,989	52,4	0	0		0	1,000
09:21	5,928	52,3	2,8	25	2,472	2,472	0,918
09:24	5,926		3	3	0,296	2,769	0,908
09:25	5,925		3,1	1	0,099	2,867	0,905
09:30	5,923		3,6	5	0,494	3,361	0,889
09:35	5,918		4,1	5	0,493	3,854	0,872
09:40	5,912		4,6	5	0,493	4,347	0,856
09:48	5,902		5,4	8	0,788	5,135	0,830
09:50	5,897		5,6	2	0,197	5,332	0,823
09:56	5,894			6	0,590	5,921	0,804
10:00	5,89	52,1	6,6	4	0,393	6,314	0,791
10:10	5,88		7,6	10	0,981	7,295	0,758
10:15	5,878		8,1	5	0,490	7,785	0,742
10:25	5,872		9,1	10	0,979	8,764	0,710
10:31	5,869		9,7	6	0,587	9,351	0,690
10:35	5,868		10,1	4	0,391	9,742	0,677
10:40	5,865	51,9	10,6	5	0,489	10,231	0,661
10:45	5,864		11,1	5	0,489	10,720	0,645
10:52	5,86		11,7	7	0,684	11,404	0,622
10:58	5,856		12,3	6	0,586	11,989	0,603
11:05	5,854		13,1	7	0,683	12,673	0,580
11:10	5,854		13,5	5	0,488	13,160	0,564
11:20	5,847	51,8	14,5	10	0,975	14,135	0,532
11:25	5,847		15	5	0,487	14,623	0,515
11:30	5,856	51,7	15,5	5	0,488	15,110	0,499
11:40	5,852	51,7	16,6	10	0,976	16,086	0,467
11:45	5,846		16,9	5	0,487	16,573	0,451
11:50	5,84		17,4	5	0,487	17,060	0,435
12:00	5,843		18,4	10	0,974	18,034	0,402
12:05	5,837	51,5	19	5	0,487	18,521	0,386
12:11	5,832	51,5	19,6	6	0,583	19,104	0,367
12:15	5,828		19,9	4	0,389	19,493	0,354
12:21	5,818		20,6	6	0,582	20,075	0,335
12:28	5,81		21,3	7	0,678	20,753	0,312
12:33	5,803		21,7	5	0,484	21,237	0,296
12:35	5,8		21,9	2	0,193	21,431	0,290
12:40	5,795	51,1	22,4	5	0,483	21,914	0,274
12:46	5,786		22,9	6	0,579	22,493	0,255
12:50	5,777	51	23,4	4	0,385	22,878	0,242
12:57	5,765		24,1	7	0,673	23,551	0,220
13:00	5,761		24,2	3	0,288	23,840	0,210
13:05	5,747	50,8	24,8	5	0,480	24,319	0,194
13:10	5,734	50,6	25,3	5	0,478	24,797	0,178
13:18	5,715	50,5	26,1	8	0,763	25,561	0,153
13:23	5,709		26,6	5	0,476	26,037	0,137
13:25	5,707	50,4	26,7	2	0,190	26,227	0,131
13:30	5,697		27,2	5	0,475	26,702	0,115
13:35	5,686	50,3	27,6	5	0,474	27,176	0,100
13:40	5,669		28,2	5	0,473	27,650	0,084
13:46	5,634	49,9	28,7	6	0,565	28,215	0,065
13:51	5,577		29,2	5	0,467	28,682	0,050
13:55	5,519	48,7	29,5	4	0,370	29,052	0,037
14:00	5,444		30	5	0,457	29,509	0,022
14:05	5,342		30,5	5	0,449	29,958	0,007
14:10	0	47,1	30,8	5	0,223	30,181	0,000
05:14				5,23	30,181		

Figur A.9: Klokkeslett, strøm, spenning og kapasitet ble målt under full utladning. Delta t, er tidsforskjellen mellom hvert måleintervall i minutter. Beregnet kapasitet per tidsintervall er beregnet ved å ta gjennomsnittet av strømmen ganget med Delta t delt på 60. For eksempel: Beregnet kapasitet legger sammen kapasitetene beregnet per tidsintervall, mens SOC tar en minus den beregnede kapasiteten delt på den fulle kapasiteten.

Data	08:30	09:42	10:15	10:46	10:53	11:11	11:34	11:51	12:06	12:16	12:23	12:30	12:36	12:42	12:47
Celle	16	3,493	3,26	3,25	3,247	3,243	3,238	3,233	3,224	3,218	3,211	3,21	3,205	3,2	3,195
	15	6,95	6,53	6,5	3,246	3,24	3,243	3,233	3,225	3,218	3,213	3,21	3,205	3,2	3,195
	14	10,41	9,8	9,75	3,244	3,243	3,236	3,231	3,223	3,217	3,212	3,209	3,205	3,2	3,195
	13	13,89	13,06	12,99	3,243	3,24	3,235	3,23	3,222	3,216	3,21	3,208	3,204	3,199	3,194
	12	17,37	16,33	16,23	3,245	3,24	3,237	3,232	3,225	3,218	3,213	3,21	3,206	3,201	3,197
	11	20,82	19,59	19,49	3,244	3,242	3,241	3,236	3,228	3,221	3,215	3,207	3,203	3,197	3,193
	10	24,27	22,85	22,74	3,245	3,242	3,238	3,232	3,223	3,216	3,211	3,208	3,203	3,198	3,193
	9	27,73	26,11	25,98	3,243	3,242	3,235	3,228	3,223	3,216	3,212	3,206	3,201	3,198	3,194
	8	31,13	29,37	29,22	3,24	3,239	3,236	3,23	3,221	3,214	3,21	3,209	3,204	3,195	3,191
	7	34,59	32,6	32,47	3,242	3,24	3,235	3,229	3,222	3,216	3,213	3,206	3,202	3,199	3,195
	6	37,99	35,4	35,7	3,242	3,24	3,23	3,228	3,221	3,214	3,211	3,208	3,203	3,196	3,192
	5	41,41	39,1	39	38,9	3,242	3,24	3,23	3,22	3,215	3,212	3,206	3,202	3,198	3,194
	4	44,89	42,4	42,2	42,1	3,239	3,232	3,22	3,22	3,214	3,211	3,204	3,2	3,196	3,192
	3	48,31	45,7	45,4	45,4	3,241	3,238	3,232	3,226	3,217	3,211	3,209	3,199	3,193	3,189
	2	51,78	48,4	48,7	48,6	3,242	3,24	3,235	3,23	3,222	3,21	3,207	3,203	3,198	3,194
Batterispenning	1	55,24	52,2	51,9	51,9	51,9	51,751	51,662	51,553	51,438	51,385	51,317	51,248	51,165	51,096
Beregninger															
Celle	16	3,49	3,260	3,250	3,247	3,245	3,238	3,233	3,224	3,218	3,211	3,210	3,205	3,200	3,195
	15	3,46	3,270	3,250	3,246	3,240	3,230	3,233	3,225	3,218	3,213	3,210	3,205	3,200	3,195
	14	3,46	3,270	3,250	3,244	3,243	3,236	3,231	3,223	3,217	3,212	3,209	3,205	3,200	3,195
	13	3,48	3,260	3,240	3,243	3,240	3,235	3,230	3,222	3,216	3,210	3,208	3,204	3,199	3,194
	12	3,48	3,270	3,240	3,245	3,240	3,237	3,232	3,225	3,218	3,213	3,210	3,206	3,201	3,197
	11	3,45	3,260	3,260	3,244	3,242	3,241	3,236	3,228	3,222	3,215	3,207	3,203	3,197	3,193
	10	3,45	3,260	3,250	3,245	3,245	3,238	3,232	3,223	3,216	3,211	3,208	3,203	3,198	3,193
	9	3,46	3,260	3,240	3,216	3,243	3,242	3,235	3,228	3,223	3,216	3,206	3,201	3,198	3,194
	8	3,40	3,260	3,240	3,240	3,240	3,239	3,236	3,229	3,221	3,214	3,209	3,204	3,195	3,191
	7	3,46	3,230	3,250	3,240	3,240	3,240	3,239	3,229	3,222	3,216	3,206	3,202	3,199	3,195
	6	3,40	2,800	3,230	3,180	3,242	3,240	3,238	3,228	3,221	3,214	3,208	3,203	3,196	3,192
	5	3,42	3,700	3,300	3,300	3,242	3,240	3,230	3,220	3,211	3,204	3,206	3,202	3,198	3,194
	4	3,48	3,300	3,300	3,200	3,240	3,239	3,232	3,220	3,214	3,211	3,204	3,200	3,196	3,192
	3	3,42	3,300	3,200	3,300	3,241	3,238	3,232	3,226	3,217	3,211	3,209	3,203	3,199	3,189
	2	3,47	2,700	3,300	3,200	3,242	3,240	3,235	3,230	3,222	3,210	3,207	3,203	3,198	3,194
	1	3,46	3,800	3,200	3,300	3,244	3,241	3,236	3,222	3,210	3,213	3,206	3,203	3,197	3,193

Figur A.10: Spenningsmålinger under full utlading av batteriet. Øverst står klokkeslettet. Målingene er tatt ved å føre pinnene på et voltmeter mot kontaktpinnene til ledningene som måler spenningen inn på BMS - kortet.

Data	12:52	13:01	13:06	13:12	13:19	13:26	13:31	13:37	13:42	13:47	13:52	13:56	14:01	14:12	14:40
Celle	3.19	3.181	3.174	3.165	3.16	3.155	3.151	3.144	3.128	3.107	3.071	3.05	2.995	2.942	3.003
16	3.191	3.182	3.175	3.165	3.159	3.156	3.152	3.146	3.134	3.114	3.08	3.039	3.005	2.955	3.002
14	3.19	3.182	3.175	3.166	3.159	3.155	3.152	3.146	3.136	3.119	3.087	3.059	3.014	2.97	3.007
13	3.188	3.18	3.173	3.164	3.157	3.153	3.15	3.145	3.134	3.117	3.084	3.055	3.01	2.968	3.005
12	3.191	3.183	3.176	3.166	3.159	3.155	3.152	3.147	3.136	3.121	3.09	3.058	3.018	2.979	3.015
11	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.141	3.125	3.104	3.068	3.033	2.988	2.949	2.996
10	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.142	3.125	3.103	3.067	3.033	2.989	2.97	2.998
9	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.142	3.125	3.103	3.067	3.033	2.989	2.97	2.998
8	3.184	3.176	3.168	3.165	3.158	3.155	3.151	3.146	3.138	3.117	3.094	3.057	2.997	2.941	24.06
7	3.189	3.181	3.174	3.162	3.158	3.154	3.15	3.145	3.134	3.119	3.09	3.059	3.013	2.992	27.06
6	3.185	3.177	3.169	3.162	3.156	3.152	3.148	3.141	3.122	3.099	3.063	3.029	2.977	2.954	30.08
5	3.187	3.18	3.172	3.164	3.157	3.153	3.15	3.144	3.122	3.115	3.084	3.052	2.989	2.992	33.1
4	3.186	3.178	3.17	3.162	3.156	3.152	3.148	3.142	3.127	3.107	3.074	3.04	2.967	2.984	36.1
3	3.182	3.174	3.165	3.159	3.154	3.149	3.145	3.136	3.116	3.091	3.056	3.021	2.963	2.956	41.1
2	3.187	3.18	3.172	3.164	3.157	3.153	3.149	3.144	3.132	3.114	3.082	3.05	2.997	2.991	45.1
1	3.187	3.18	3.171	3.164	3.157	3.153	3.148	3.142	3.127	3.106	3.073	3.04	2.986	2.984	48.2
Batterispenning	50,998	50,871	50,747	50,614	50,516	50,45	50,388	50,284	50,048	49,729	49,187	48,664	47,86	47,475	48,2
Beregninger															
Celle	12:52	13:01	13:06	13:12	13:19	13:26	13:31	13:37	13:42	13:47	13:52	13:56	14:01	14:12	14:40
16	3.190	3.181	3.174	3.165	3.160	3.155	3.151	3.144	3.128	3.107	3.071	3.050	2.995	2.942	3.003
15	3.191	3.182	3.175	3.165	3.159	3.156	3.152	3.146	3.134	3.114	3.080	3.039	3.005	2.955	3.002
14	3.190	3.182	3.175	3.166	3.159	3.155	3.152	3.146	3.136	3.119	3.087	3.059	3.014	2.970	3.007
13	3.188	3.180	3.173	3.164	3.157	3.153	3.150	3.145	3.134	3.117	3.084	3.055	3.010	2.968	3.005
12	3.191	3.183	3.176	3.166	3.159	3.155	3.152	3.147	3.136	3.121	3.090	3.058	3.018	2.979	3.015
11	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.141	3.125	3.104	3.068	3.033	2.988	2.949	2.996
10	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.141	3.123	3.099	3.061	3.026	2.979	2.948	2.998
9	3.187	3.179	3.171	3.163	3.157	3.153	3.149	3.141	3.123	3.099	3.061	3.026	2.979	2.948	2.998
8	3.184	3.176	3.168	3.165	3.158	3.155	3.151	3.146	3.138	3.117	3.094	3.057	2.970	2.941	3.020
7	3.189	3.181	3.174	3.162	3.158	3.154	3.150	3.145	3.134	3.119	3.090	3.059	3.013	2.992	3.000
6	3.185	3.177	3.169	3.162	3.156	3.152	3.148	3.141	3.122	3.099	3.063	3.029	2.977	2.954	3.020
5	3.187	3.180	3.172	3.164	3.157	3.153	3.150	3.144	3.132	3.115	3.084	3.052	2.989	2.992	3.020
4	3.186	3.178	3.170	3.162	3.156	3.152	3.148	3.142	3.127	3.107	3.074	3.040	2.967	2.984	3.000
3	3.182	3.174	3.165	3.159	3.154	3.149	3.145	3.136	3.116	3.091	3.056	3.021	2.963	2.956	5.000
2	3.187	3.180	3.172	3.164	3.157	3.153	3.149	3.144	3.132	3.114	3.082	3.050	2.997	2.991	4.000
1	3.187	3.180	3.171	3.164	3.157	3.153	3.148	3.142	3.127	3.106	3.073	3.040	2.986	2.984	3.100

Figur A.11: Spenningsmålinger under full utlading av batteriet. Øverst står klokkeslettet. Målingene er tatt ved å føre pinnene på et voltmeter mot kontaktpinnene til ledningene som måler spenningen inn på BMS - kortet.

Klokkeslett	Delta t [Min]	Strøm [A]	Vektet tid og strøm
08:56	0	5,94	0,0
09:21	25	5,93	148,3
09:24	3	5,93	17,8
09:25	1	5,93	5,9
09:30	5	5,92	29,6
09:35	5	5,92	29,6
09:40	5	5,91	29,6
09:48	8	5,90	47,3
09:50	2	5,90	11,8
09:56	6	5,89	35,4
10:00	4	5,89	23,6
10:10	10	5,88	58,9
10:15	5	5,88	29,4
10:25	10	5,87	58,8
10:31	6	5,87	35,2
10:35	4	5,87	23,5
10:40	5	5,87	29,3
10:45	5	5,86	29,3
10:52	7	5,86	41,0
10:58	6	5,86	35,1
11:05	7	5,85	41,0
11:10	5	5,85	29,3
11:20	10	5,85	58,5
11:25	5	5,85	29,2
11:30	5	5,86	29,3
11:40	10	5,85	58,5
11:45	5	5,85	29,2
11:50	5	5,84	29,2
12:00	10	5,84	58,4
12:05	5	5,84	29,2
12:11	6	5,83	35,0
12:15	4	5,83	23,3
12:21	6	5,82	34,9
12:28	7	5,81	40,7
12:33	5	5,80	29,0
12:35	2	5,80	11,6
12:40	5	5,80	29,0
12:46	6	5,79	34,7
12:50	4	5,78	23,1
12:57	7	5,77	40,4
13:00	3	5,76	17,3
13:05	5	5,75	28,8
13:10	5	5,73	28,7
13:18	8	5,72	45,8
13:23	5	5,71	28,6
13:25	2	5,71	11,4
13:30	5	5,70	28,5
13:35	5	5,69	28,5
13:40	5	5,67	28,4
13:46	6	5,63	33,9
13:51	5	5,58	28,0
13:55	4	5,52	22,2
14:00	5	5,44	27,4
14:05	5	5,34	27,0
14:10	0	0,00	13,4
	314		1810,8
	Gjennomsnitt:	5,70	Vektet gjennomsnitt: 5,77

Figur A.12: Beregning av gjennomsnittsstrøm under utladning er beregnet ved å ta gjennomsnittet av strømmen i hver tidsperiode for så å gange dette med lengden av tidsperioden. Summen av disse produktene over hele utladningsforløpet blir så dividert med summen av vektene(tidsperiodene) for å få den vektete gjennomsnittsstrømmen.

Klokkeslett	Delta tid [min]	Spenning [V]	Vektet tid og spenning
08:30	-	55,2	-
08:56	0	52,4	0,0
09:21	25	52,3	1308,8
09:42	21	52,2	1097,3
10:00	18	52,1	938,7
10:15	15	51,9	780,0
10:40	25	51,9	1297,5
10:46	6	51,9	311,4
10:53	7	51,9	363,2
11:11	18	51,9	933,5
11:20	9	51,8	466,4
11:30	10	51,7	517,5
11:34	4	51,8	206,9
11:40	6	51,7	310,4
11:51	11	51,7	568,5
12:05	14	51,5	722,1
12:06	1	51,6	51,5
12:11	5	51,5	257,6
12:16	5	51,4	257,3
12:23	7	51,4	359,9
12:30	7	51,3	359,5
12:36	6	51,2	307,7
12:40	4	51,1	204,7
12:42	2	51,2	102,3
12:47	5	51,1	255,7
12:50	3	51,0	153,1
12:52	2	51,0	102,0
13:01	9	50,9	458,4
13:05	4	50,8	203,3
13:06	1	50,7	50,8
13:10	4	50,6	202,7
13:12	2	50,6	101,2
13:18	6	50,5	303,3
13:19	1	50,5	50,5
13:25	6	50,4	302,7
13:26	1	50,5	50,4
13:31	5	50,4	252,1
13:35	4	50,3	201,4
13:37	2	50,3	100,6
13:42	5	50,0	250,8
13:46	4	49,9	199,9
13:47	1	49,7	49,8
13:52	5	49,2	247,3
13:55	3	48,7	146,8
13:56	1	48,7	48,7
14:01	5	47,9	241,3
14:10	9	47,1	427,3
Sum	314		16122,9
	Gjennomsnitt:	51,0	Vektet gjennomsnitt: 51,3

Figur A.13: Beregning av gjennomsnittsspenning under utladning er beregnet ved å ta gjennomsnittet av spenningen i hver tidsperiode for så å gange dette med lengden av tidsperioden. Summen av disse produktene over hele utladningsforløpet blir så dividert med summen av vektene(tidsperiodene) for å få den vektete gjennomsnittsspenningen.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no