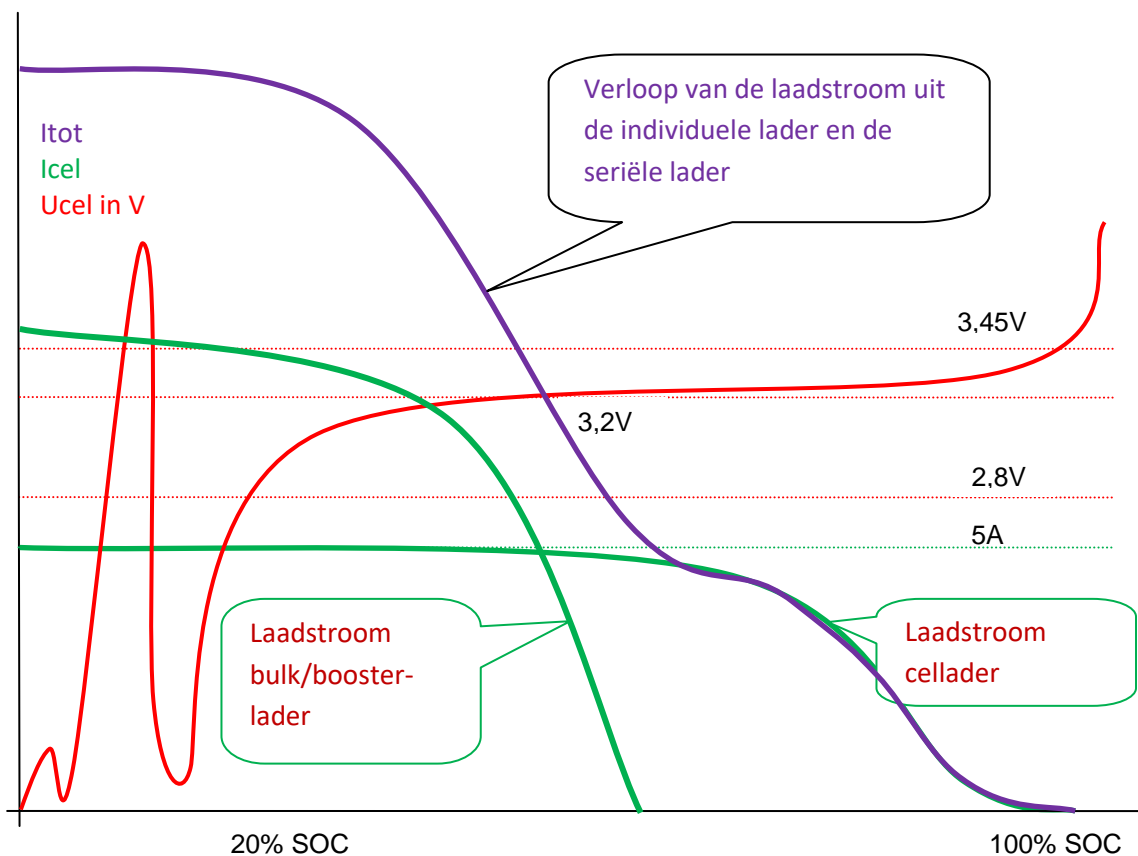


Peper



# [EVERYTHING YOU WANTED TO KNOW ABOUT LFP CELLS BUT DID NOT ASK]

Bemerkingen en conclusies bij metingen aan 4 LFP cellen van 180Ah waarmee populaire opvattingen over LiFePO cellen worden getoetst op hun waarde. Toegevoegd zijn methodes en schema's die zijn gebruikt bij dit onderzoek of schakelingen die noodzakelijk waren om het onderzoek te verrichten. De beschrijvingen en testen met hun resultaten zijn gepubliceerd in een topic op [zeilersforum.nl](http://zeilersforum.nl)

## Inhoud

Voorwoord .....	i
Soorten Li-ion accu's .....	1
Lithium Cobalt .....	1
Lithium Polymeer .....	1
Lithium FerroPhosphaat.....	1
Lithium Titanaat .....	1
Li-ion technologie .....	2
Hoe werkt een LFP accu? .....	3
Laden .....	3
Waarom initieel laden met 4V?.....	4
Ontladen.....	5
Inwendige weerstand.....	6
Op- en ontlad rendement.....	6
Te verwachten levensduur .....	6
Cyclisch gebruik.....	8
Flip the Switch .....	9
Balanceren.....	11
Balanceren van Li-ion accu's .....	11
Laden met limiters.....	12
De te bypassen stroom.....	12
Balanceren LFP cellen zichzelf bij gebruik tussen 30 en 90% SOC? .....	13
Diep ontladen en de gevolgen.....	19
Onderzoeksvragen.....	19
Voorlopige conclusies.....	21
Antwoord op de onderzoeksvragen .....	21
Laden van LiFePO <sub>4</sub> cellen in serie .....	22
Laden met walstroom .....	23
De 'enkele cel lader' .....	26
Ic's voor een dergelijk laadsysteem.....	27
LFP cellen laden via DC-DC converters .....	29
De 'Combine Charge Harvester' .....	30
Regels .....	33

LFP cellen en de Peukert factor:.....	34
Monitoring.....	34
Super simpel monitoren met LED's.....	36
Wat moet je echt weten?.....	37
Coulomb counting bij individueel te laden cellen.....	38
Dieper ontladen.....	42
Get down deeper and down.....	43
LFP cellen na diep ontlading.....	45
Het herstel van een ontladen LFP-cel.....	45
Bevindingen en conclusies .....	46
Is een diep ontladen LFP cel kapot? .....	48
Thermal runaway.....	50
Thermal runaway bij batterijen en accu's:.....	50
Blussen van een accubrand bij LiFePO <sub>4</sub> cellen .....	50
Blussen van een accubrand bij LiCoMnO cellen en Li-Polymeer cellen .....	51
Floaten... of toch met beide voeten op de grond.....	52
Kan 'float laden' kwaad? .....	53
Foutcondities.....	55
Na een week.....	56
Zaterdag 8 december .....	57
Tussenstand voor de kerstvakantie.....	57
Na een maand aan de lader .....	58
Muntjes .....	60
Bij het einde van de test.....	62
Conclusies.....	62
'Es sind die leeren Stöcke die den Hönig bringen' .....	64
Het opportunistisch laadsysteem.....	66
Vermogen van het zonnepaneel in relatie tot de individuele celladers .....	67
Use cases .....	71
Walstroom laadsysteem (systeemspanning 12V).....	71
Converter van 24V naar 12V en power back up voor een 24V boordnet .....	75
Afsluiting.....	80

## Voorwoord

We zitten in een transitie van de loodaccu naar de Li-ion technologie. De superieure eigenschappen van de Li-ion accu ten opzichte van de loodaccu maakt deze transitie onvermijdelijk. Het giftige lood, de snelle slijtage, de korte levensduur, het slechte rendement en het grote gewicht en volume van de loodaccu ten opzichte van de Li-ion accu, zij maken de overgang naar Li-ion accu's onvermijdelijk.

De Li-ion accu is begonnen als de Lithium Cobalt accu. De levensduur van deze accu was beperkt, de capaciteit even zo, maar deze accu was een grote verbetering ten opzichte van de Nikkel-Cadmium accu en de Nikkel Metaal Hydride accu. De eerste toepassingen waren dan ook in cordless gereedschap en telefoons en portable computers.

Aan het einde van de 20<sup>e</sup> eeuw komen er nieuwe ontwikkelingen op het gebied van de Li-ion accu. Door een tienjarige patentstrijd duurt het lang voordat deze nieuwe technologie verkrijgbaar is. De nieuwe technologie leent zich bij voorkeur voor de tractie accu, iets wat tot die tijd het exclusieve domein is van de loodzwavelzuur accu. De introductie gaat volkomen mis omdat de meesten de Li-ion accu behandelen als een loodaccu en de technische terminologie van de loodaccu en de Ni-Cad accu overzetten op de li-ion accu en daarmee in korte tijd de Li-ion accu door mishandeling kapot maken. De Li-ion accu's met een geheel dedicated laadsysteem houden het echter wel heel lang vol en bewijzen daarmee de superieure eigenschappen.

Bij 'drop in replacements' van loodaccu's komt de mismatch van accu en laadsysteem het beste naar voren, de nieuwe accu eigenaar wil de laadmethode van de loodaccu handhaven bij zijn Li-ion accu en sloopt onbewust zijn nieuwe Li-ion accu door deze serieel te laden volgens de 'float' methode. Soms wil de nieuwe eigenaar van een Li-ion zijn nieuwe accu snel laden net zoals zijn oude loodaccu. Hij gebruikt daarvoor de 'absorbtion' stand van de lader en molt in 2 keer laden zijn Li-ion accu. Door schade en schande wijs geworden schaft hij zich de nieuwe LFP accu aan met een dedicated lader voor Li-ion accu's voor Lithium Cobalt Mangaanaat en de LFP accu staat al bij de eerste keer laden zo bol als een ballon en spuit het elektrolyt uit de afblaas opening.

De mismatch tussen lader en li-ion accu wordt met name gevoed door de loodaccu terminologie te gebruiken voor Li-ion accu's en door te denken dat alle Li-ion accu's hetzelfde zijn. Met dit artikel wil ik aan de Babylonische spraakverwarring een einde maken en de werking van laders verduidelijken.

Deze publicatie is 'LFP batteries only'. Alle gebeurtenissen met Li-ion accu's zijn op voorhand waar, maar worden gezeefd door de '*welke soort li-ion accu was het?*' vraag.

Deze publicatie zou niet tot stand zijn gekomen door de inbreng van het test laboratorium. Ik ben veel dank verschuldigd aan het meetlaboratorium en kijk terug op zeer positieve brainstorm sessies en een enthousiaste samenwerking bij het tot stand komen van deze publicatie.

Peper, Oosterbeek ©2018

## Soorten Li-ion accu's

Het elektrolyt speelt geen actieve rol in het laden of ontladen zoals dat het geval is bij lood zwavelzuur accu's. Het gaat alleen om de Lithium ionen vandaar dat deze accu's Li-ion accu's heten. De elementen in het anode materiaal naast het Lithium geven de soortnaam aan de accu. Er zijn er globaal gezien vier:

### Lithium Cobalt

LiCo (Lithium Cobalt, de eerste ontwikkeling in de Lithium-ion accu's). De LiCo cel is zo goed als verdwenen in het dagelijks gebruik omdat de 'slijtage' en het geheugen effect een nadelige invloed had op de prestatie. Het zijn de li-ion accu's zoals die in telefoons, fototoestellen en computers werden gebruikt. Zij kenmerken zich door een gebruiksaanwijzing waarbij wordt aanbevolen 'de accu eerst helemaal te ontladen alvorens op te laden.' Deze technologie kent ook een hogere zelfontlading. De gebruikelijke levensduur van deze cellen was 5 jaar of 500 cycli. De nominale celspanning is 3,7V.

Ze is nu vervangen door een nieuwe ontwikkeling in deze groep: de Lithium Cobalt Mangaanaat of LCM accu met verbeterde eigenschappen op het gebied van zelf-ontlading en geheugeneffect. Voor deze cellen wordt geen leeftijd in jaren meer aangegeven, maar alleen in cycli en dit is in de meeste gevallen 1000 cycli.

### Lithium Polymeer

Li-Polymeer accu's (met een polymeerlaag op de anode). De Li-polymeer accu is de lichtste accu per Ah capaciteit. Erg handig in computers, mobiele telefoons en cordless gereedschap. De nominale celspanning is 3,7V. Hun levensduur ligt voor de meeste cellen op 1000 cycli. De Li-Polymer cellen kennen zelfontlading en geheugen effect, maar dit is gering.

### Lithium FerroPhosfaat

LiFePO<sub>4</sub> (Lithium Ferro-Fosfaat, met Ferrofosfaat op de anode. Hiervan bestaat een 'ondersoort' de LiYFePO<sub>4</sub> accu waarbij het element Yttrium aan het Ferrofosfaat is toegevoegd).

De LFP accu's zijn de zwaarste accu's per Ah capaciteit van de Li-ion accu's, maar stelt daar de langste levensduur, geen geheugen effect en kleinste zelfontlading tegenover. De nominale celspanning is 3,2V en daarmee is het te leveren vermogen van de LFP accu lager in verhouding tot de Li-Polymer en de LCM accu. De opgegeven levensduur is meestal 2000 cycli, maar bij gebruik tussen 20 en 80% van de capaciteit wordt zelfs 6000 cycli opgegeven, waarmee dit de 'langstlevende' accu is.

### Lithium Titanaat

De laatste ontwikkeling is de LiTiO<sub>3</sub> cel (Lithium Titanaat waarbij Titanium oxide aan de anode is toegevoegd).

De LTO (LiTiO<sub>3</sub> of Lithium titanaat) accu's zijn lichter dan de LiFePO<sub>4</sub> accu's maar hebben een nominale spanning van 2,8V en slaan minder energie op dan de andere Li-ion accu's. Zij hebben heel andere sterke kanten: ze hebben een extreem lage inwendige weerstand en je mag ze met 10c laden en ontladen zonder dat ze daaronder lijden. Er wordt een levensduur van 2000 cycli opgegeven, maar dit is moeilijk vast te stellen omdat de technologie nog zo jong is.

Dit zijn de snelladers bij uitstek. Een 12V accubank bestaat dan uit 5 LTO cellen met een nominale spanning van 14V en bij een celcapaciteit van 100Ah mag deze worden geladen met een laadstroom

van 1000A. Een 'kwart volle' accu zit dan in 4 minuten weer vol. Alleen, waar haal je die laadstroom van 1000A vandaan? (en kun je die laadkabel nog wel tillen?)

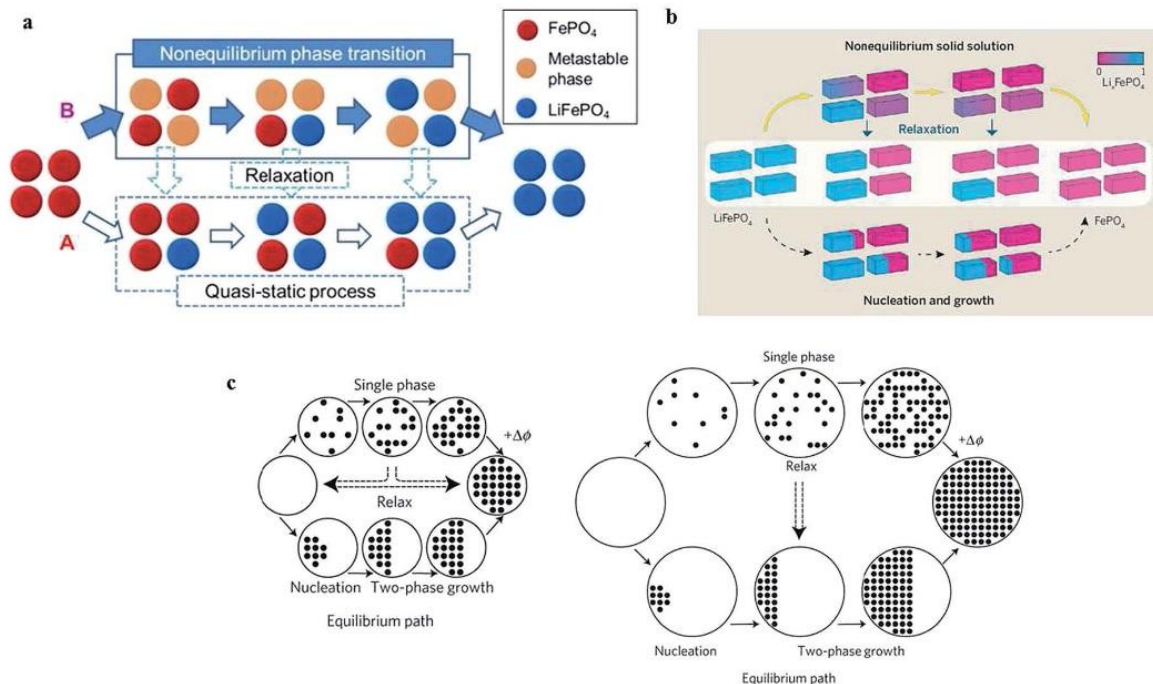
## Li-ion technologie

Alle Li-ion accu's werken hetzelfde. 'Li-ion accu' is een verzamelnaam voor een soort accu's waarbij de eigenschappen van de ene ondersoort vaak worden toegekend aan een andere ondersoort, terwijl deze eigenschappen helemaal niet bij deze ondersoort van toepassing zijn. Zo kunnen LFP accu's volgens sommigen 'ontploffen' terwijl er nog geen enkele is ontploft. Li-polymeer accu's zijn daar wel erg goed in (Nokia telefoons, Boeing vliegtuig accu en als je Li-po cellen op een zonnepaneel zonder regeling wil laden gaat dit goed tot de cel vol zit en ontploft.

Er bestaan ook Aluminium-ion accu's, zij bevinden zich nog voornamelijk in de laboratorium fase en komen daar misschien nooit uit, tenzij deze soort accu's plotseling eigenschappen blijken te hebben die boven de eigenschappen van Li-ion accu's uitsteken zoals de verkrijgbaarheid van Aluminium ten opzichte van de verkrijgbaarheid van Lithium.

## Hoe werkt een LFP accu?

Heel goed, maar nu even serieus...



Een geladen LFP accu heeft op de plus-plaat of anode LiFePO<sub>4</sub> moleculen. Is de accu ontladen, dan zijn er op de anode alleen FePO<sub>4</sub> ionen te vinden. De Lithium ionen zijn dan opgenomen in de Lithium laag van de anode.

Bij het laden vindt er een fysieke verschuiving van de Li-ionen plaats met een koppeling aan het ijzerfosfaat. Voor deze koppeling is elektrische energie nodig en het laden brengt deze elektrische energie in de vorm van vrije elektronen in de cel.

Bij het ontladen worden de koppelingen tussen de Li-ionen en de ijzerfosfaatgroepen verbroken waarbij er elektronen vrijkomen en deze vormen de ontladstroom.

## Laden

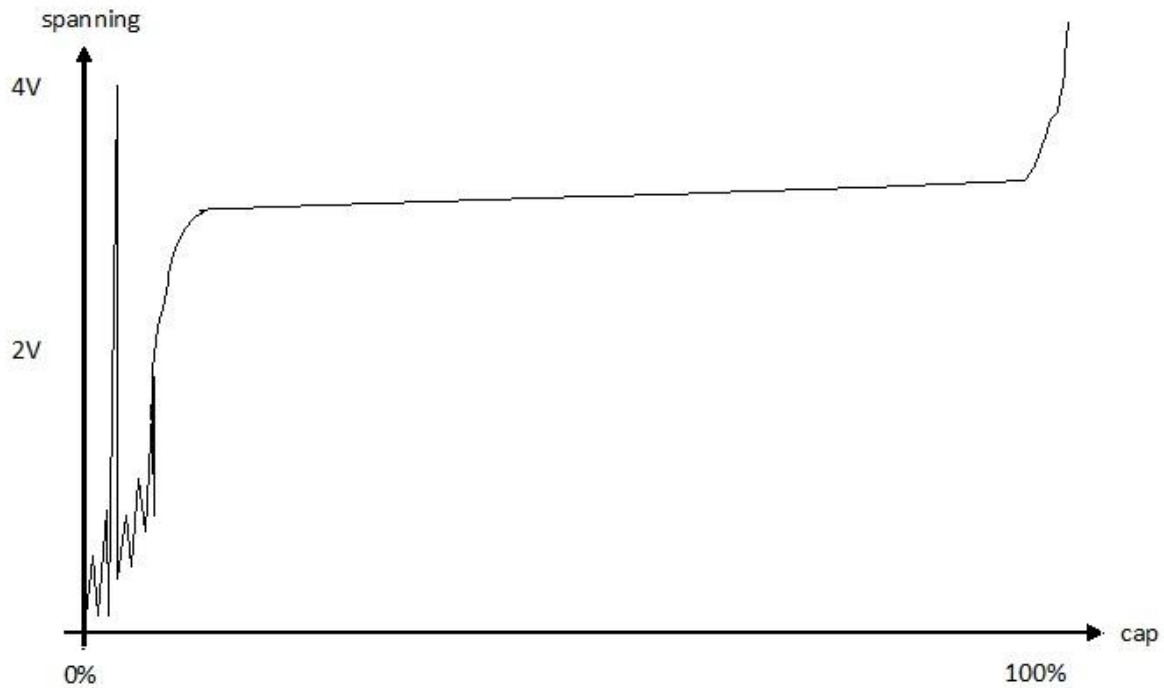
Het laden en ontladen van LFP-accu's gaat in 2 fasen. In eerste instantie gaat het laden 'diffuus' over de anode. Het aankoppelen van de Ferrofosfaat groep lijkt een willekeurig patroon te volgen, waarbij er kennelijk op de anode 'voorkeurs gebieden' zijn. Dit wordt de eerste fase genoemd.

Zijn de voorkeursgebieden eenmaal geladen of ontladen en wordt de accustroom 0, dan treed er 'relaxatie' op en ontstaat er klustering van LiFePO<sub>4</sub> in kernen op de anode. Hiervoor moeten de fosfaatgroepen zich verplaatsen en hoewel een dergelijke fosfaat groep een heel kleine massa heeft, is deze niet nul en is er tijd voor nodig 'om te clusteren'. Dit clusteren is de oorzaak van de spanningsdaling bij een geladen cel nadat deze van de lader is afgekoppeld. Ook is het de oorzaak van spanningsverhoging bij een ontladen accu indien deze van de belasting is afgekoppeld.

Uiteindelijk zullen bij een opgeladen accu alle LiFePO<sub>4</sub> groepen zijn geclusterd tot één grote kluit en kan er niet verder worden 'geclusterd' door er meer elektronen in te stoppen. Op dit punt heb je meer spanning nodig om de 'onwillige elektronen' nog in de cel te krijgen. "Een volle LiFePO<sub>4</sub> cel heeft een klemspanning van 3,4V." Deze spanning is verbonden aan een cel waarvan alle LiFePO<sub>4</sub>

groepen in één cluster zijn gevat. Een hogere celspanning kan wel worden aangelegd en er gaat ook weer laadstroom lopen bij die hogere spanning, maar de toegevoerde energie gaat niet 'in de accu' zitten in de vorm van clustervergroting, maar wordt omgezet in warmte en zo kun je een LFP cel kapot maken.

### Waarom initieel laden met 4V?



Ik heb deze curve ooit nagetekend, maar ben het originele artikel kwijtgeraakt en kan helaas geen referentie geven. De curve wordt opgetekend bij het initieel laden van een LFP cel met een constante stroom uit een stroombron. In het artikel werd bediscussieerd hoe hoog de laadspanning moest zijn om de cel de eerste keer vol te laden.

Het zou veilig zijn om de cel te laden met een constante stroom uit een stroombron met een maximale spanning van 3,5V. De cel zou dan niet worden overladen omdat de stroom uit de stroombron snel naar 0 zou dalen bij het bereiken van de 3,5V.

Dit werkte niet omdat bij het bereiken van ca 9% SOC er een hele hoge spanning nodig was om nog enige lading in de cel te brengen. Dit punt kenmerkt zich door een piek in de celspanning (die hier ook de laadspanning is). Om nog enige lading in de cel te 'prakken' moest er een spanning van 4V worden aangelegd. Een constante stroombron met een maximale spanning van 3,5V zou dit niet halen. In het artikel verdedigde de firma Winston de keuze voor 4,2V als initiële laadspanning. Doordat Winston  $\text{LiYFePO}_4$  cellen levert, zou deze curve uniek kunnen zijn voor de door hen gebruikte technologie waarbij Yttrium aan het anodemateriaal wordt toegevoegd.

Er ontstond nu de mogelijkheid een onderzoeksvraag toe te voegen: 'kennen de andere LFP technologieën ook een dergelijke spanningspiek onder de 20% SOC?'

Het grillige verloop van de laad/celspanning van 0% tot 20% SOC geeft de reden weer waarom de meeste fabrikanten ervoor kiezen de cellen niet onder de 20% SOC te laten komen. Het 20% SOC punt ligt bij ca. 2V. Is dit de minimaal toegestane spanning voor een LFP cel en gaat deze daaronder definitief kapot?

Ik had zelf mijn 100Ah LiYFePO<sub>4</sub> cellen ooit ontladen tot 1,9V per cel om ze daarna via een 35Wp zonnepaneel weer heel langzaam vol te laden en dat verliep prima gedurende drie maanden en zonder een merkbaar capaciteitsverlies. Ik vermoedde hierdoor dat de cellen veel beter tegen diepontlading zouden kunnen dan dat door de fabrikanten werd opgegeven.

Even een boude bewering: de 2,1V ondergrens wordt aangehouden om de cellen uit het 'vagevuur' van het gebied tussen de 0 en 2V weg te houden.

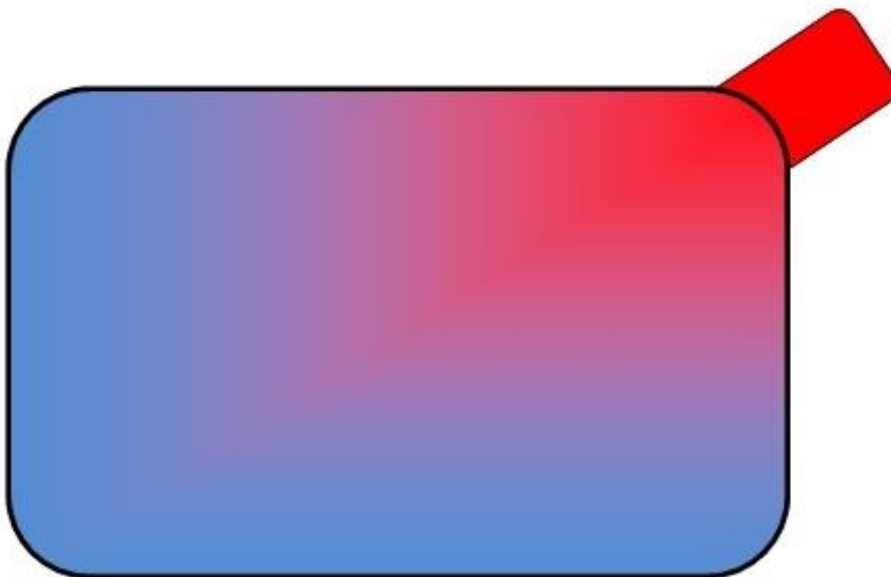
Eens zien of hoe een cel reageert in dat gebied...

## Ontladen

Bij ontladen ontstaat er 'ontclustering' die begint in dezelfde voorkeursgebieden. De ontlading gaat door totdat er geen sprake meer is van clusters en de resterende ladingsdragers in de vorm van de LiFePO<sub>4</sub> groepen zich diffuus over de anode hebben verdeeld. Wordt het ontladen van de accu nu gestopt, dan zullen de LiFePO<sub>4</sub> groepen 'naar elkaar toe kruipen' om weer clusters te vormen. Ik kan in de beschikbare literatuur niet vinden of dit de oorzaak is van het herstel van de celspanning bij diep ontlading. Het is wel heel verleidelijk om de celspanning van 2,8V toe te kennen aan de spanning waarbij zich nog clusters van ladingsdragers op de anode bevinden en die spanning dan te verbinden met de 'optimale bewaarspanning', de spanning waarbij er nog clusters ladingsdragers bevinden. Het is ook voor de hand liggend dat de cel de situatie waarin er ladingsdragers geclusterd zijn, een stabiel evenwicht vormt waarbij de cel zich 'goed voelt'.

"Dit is taalgebruik van een accufluisteraar!" 'Ja, dit is om het duidelijk te maken, het is metaforisch...'

Bij meerdere malen diep ontladen, komt naar voren dat de cel(len) zichzelf herstellen. Na het afkoppelen van de belasting loopt de spanning weer op. Hier moet een elektrofysisch proces aan ten grondslag liggen. Het past niet in het ontladingsgedrag van een capaciteit of een inductie. Bij een



Uitgaande van de aansluiting van de anode gaat de concentratie van de ladingsdragers zich herverdelen.

dergelijk gedrag past geen oplopen van spanning bij het onderbreken van de belasting. Bij een capaciteit loopt de spanning pas weer op bij het toevoegen van lading en bij een inductie schiet de spanning enorm omhoog bij het onderbreken van de stroom om snel weer te dalen naar de waarde ervoor. Het langzaam oplopen van de spanning van een cel na het afkoppelen van de belasting kan

alleen worden verklaard indien er een herverdeling van de ladingsdragers op de anode plaatsvindt. Dit kan gebeuren via enhancement en depletion zoals bij een MOSfet in het substraat onder de gate, of door herschikking van de clusters op de anode in de relaxatie fase.

## Inwendige weerstand

De inwendige weerstand van een LFP cel is evenredig met de capaciteit van de cel en dat is algemeen geldig voor alle accu's van welke technologie dan ook. Voor 100Ah LFP cellen ligt de inwendige weerstand in de buurt van de 10-5mOhm. Ter vergelijking: voor een 'natte' 100Ah lood zwavelzuur cel ligt de Ri op ca 500 tot 100mOhm.

Dit betekent dat een lege LFP accu zich voor een lader presenteert als een kortsluiting. Een LFP laadsysteem zal kortsluit vast moeten zijn anders verbrand de lader.

## Op- en ontlad rendement

Na het toevoeren van 100Ah aan lading kan bij een nieuwe loodzwavelzuur accu ca 80Ah worden gebruikt en dan geldt de accu als leeg. Het op- en ontladrendement is daarmee 80%. Het is overigens niet verstandig een loodaccu met meer dan 50% van de nominale capaciteit te ontladen.

Na 5 jaar gebruik kan het op- ontladrendement zijn terug gelopen tot 50% en komt er van de geladen 100Ah nog 50Ah terug als bruikbare lading.

Bij het toevoeren van 100Ah aan lading aan een nieuwe LFP accu kan 95Ah worden gebruikt en dan geldt de accu als leeg. Het op- en ontladrendement is daarmee 95%. Het is niet verstandig een LFP accu met meer dan 80% van de nominale capaciteit te ontladen.

Na 5 jaar is het op- ontladrendement terug gelopen naar 93% en na 20 jaar of 2000 cycli is het op ontlad rendement nog 80%, net zo hoog als bij een nieuwe loodzwavelzuur accu.

De grote verschillen in rendement worden veroorzaakt in de verschillen in de inwendige weerstand van de betrokken technologieën. In deze weerstand worden bij laden en ontladen warmte ontwikkeld. De ontwikkelde warmte is gelijk aan  $I^2 R t$  ofwel het kwadraat van de stroom maal de inwendige weerstand maal de tijd dat die stroom door de weerstand loopt. Door de lage inwendige weerstand van de LFP cellen ten opzichte van lood zwavelzuur cellen is er alleen warmte ontwikkeling bij een extreem hoge stroom zoals bij kortsluiting van de accu. Een loodzwavelzuur accu produceert al warmte bij een laadstroom van 0,1c (laadstroom van 0,1 maal de accucapaciteit in Ah). Voor het bepalen van het verlies aan capaciteit in gebruik is voor loodaccu's de Peukert factor van toepassing (zie aldaar).

## Te verwachten levensduur

De splitsing van  $\text{LiFePO}_4$  in Lithium ionen en Ferrofosfaat groepen verloopt niet via ionisatie in een elektrolyt. Hierdoor ontstaat ook geen slijtage van de anode of kathode in de vorm van chemische omzetting van het anode of kathode materiaal, waarbij de omzetting niet volledig reversibel is. De kathode speelt maar een hele beperkte rol in de LFP accu, het is niet meer dan een 'elektronen opvanger'. De afwezige chemische omzettingen in een LFP accu zorgen ervoor dat deze lang meegaat.

Voor een seizoen op een boot als huishoudaccu wordt met 100 cycli per jaar gerekend. Een lood zwavelzuur accu kan het op een boot 5 tot 10 jaar volhouden. Dit zou overeenkomen met 500 tot 1000 cycli. In vergelijking zou een LFP accu met 2000 cycli het dan minimaal 20 jaar moeten kunnen uithouden.

De fabrikanten van LFP cellen geven als minimum 2000 cycli aan bij gebruik tussen 100% en 20%

SOC. Bij minder grote variaties in de lading wordt er 4000 tot 6000 cycli als levensduur genoemd. Die 4000 tot 6000 cycli zijn genoteerd in laboratorium situaties en de praktijk kan best minder vriendelijk zijn voor de levensduur.

Voor LFP accu's kan geen praktijk gebaseerde inschatting van de praktische levensduur worden gegeven. Zij zijn er pas vanaf de eeuwwisseling vanwege een lange patentstrijd.

De proeven in het lab geven geen aanwijzing dat diepontlading –celspanning lager dan 2,5V– schadelijk is voor LFP cellen. Voor het omkeren van de bewering... (diepontlading is goed voor LFP cellen) er is wel over gepubliceerd, maar er is slechts één praktijkervaring weergegeven.

Het komt bij de onderzoeksvragen, evenals de vraag of het nadelig is voor de celcapaciteit als de cel tot 100% SOC wordt geladen en daar gedurende enige tijd op blijft staan.

## Cyclisch gebruik

Dit verlengt de levensduur van vooral de NiCad en de NiMH accu's omdat dit het geheugen effect van deze accu's tegen gaat. Voor lood zwavelzuur accu's is dit 'de dood in de pot' omdat het sulfateren van de platen wordt bevorderd. Voor de eerste generatie Li-ion cellen (LiCo cellen) werd dit ook aanbevolen omdat zij ook een geheugen effect kenden.

LFP cellen kennen geen geheugeneffect. Zij hoeven dus niet geheel te worden ontladen alvorens te worden geladen. Voor uitschakeling van het niet aanwezig zijnde geheugeneffect is cyclisch laden bij LFP cellen nutteloos.

Cyclisch gebruik geeft 'auto balancing' in zowel het laden en ontladen. Dat zou op zich al wel levensduur verlengend kunnen zijn. Bij individueel laden van de cellen is dit niet van toepassing omdat de cellen dan 'naar behoefte' worden geladen tot 100% en daarmee in balans zijn.

Overladen is slecht voor de levensduur van LFP cellen, zoveel is wel duidelijk. LFP cellen worden in gebruik niet warm, ook niet bij opladen en ontladen met 0,8c. Bij een laadspanning van meer dan 3,4V per cel in combinatie met een laadstroom van meer dan 10A worden 800Ah cellen warm. De laadstroom voor het warm worden zal wel een relatie hebben tot de capaciteit van de cellen, al was het maar dat een grotere capaciteit tevens een grotere accumassa betekent en dat er dan meer vermogen nodig is om deze massa in temperatuur te doen stijgen. De laadstroom speelt een cruciale rol in het warm worden van de cel, maar dit is alleen indien de celspanning boven de 3,4V komt. In de testen komt bij laden de spanning regelmatig boven de 3,4V maar er loopt dan maar een geringe stroom en de cellen worden niet merkbaar of meetbaar warmer. De spanning wordt dan wel hoger dan 3,4V. Deze 'overlading' met een lage laadstroom wordt door sommige fabrikanten aanbevolen als initiële lading. Dit is tegen alle logica in als het gaat om 'overladen'. Verder wordt het bij LCM accu's in auto's gebruikt om de accu's warm te houden zodat de capaciteitsdaling in de winter wordt gecompenseerd.

Is het warm worden van een LFP cel schadelijk? Dat is nog niet in cijfers aangetoond. De LFP cel gaat echt 'kapot' als het elektrolyt vergast door de hoge temperatuur en via een ontlastventiel naar buiten komt, maar dat is nog iets verder dan alleen 'warm'. In het geval van vergassen verdwijnt er elektrolyt uit de cel en dat is altijd schadelijk voor de levensduur.

Alleen een hoge spanning zonder dat er stroom loopt levert geen warmte op en kan niet leiden tot 'uitgassen' van de cel ( $I = 0$ ,  $I^2 = 0$  dan is  $I^2 \cdot R \cdot t$  ook 0 en wordt er geen elektrische energie omgezet in warmte).

Nu kun je jezelf afvragen of het handhaven van 3,4V per cel (zonder laadstroom!) nadelig is voor de levensduur van de cel. Er zijn publicaties over die dat aangeven, maar de parameter laadstroom is daarbij niet als variabele opgenomen en de soort Li-ion accu is een LiCo cel en dat is geen LFP cel. In het meetlaboratorium worden de cellen regelmatig met 1000mV boven de 3,4V geladen en dat levert geen merkbaar warmere cellen op. Het levert ook geen merkbare teruggang in capaciteit op, maar dit is op de korte termijn bezien en er kan geen uitspraak worden gedaan over wat dit op de langere termijn aan invloed heeft. Het blijft onzeker of het aanhouden van de maximale laadspanning van 3,4V per cel (zonder laadstroom) invloed heeft op de levensduur van de cel. Dat zullen we over 20 jaar testen weten. Als jullie het niet erg vinden ga ik daar niet op wachten.

Bij het opladen met 3,4V als laadspanning loopt er bij het bereiken van 3,4V klemspanning geen stroom meer. Wordt de cel van de lader afgehaald (de laadstroom is dan met zekerheid 0), dan blijft de gemeten celspanning 3,4V. Wordt de cel de volgende dag weer op de 3,4V voedingsspanning aangesloten, dan loopt er een kleine laadstroom van ca 200mA die snel naar 0 gaat. Dit kan worden verklaard door zelfontlading, maar dan zou de laadstroom ook langer aanwezig moeten zijn. Omdat dit niet het geval is, kan dit alleen worden verklaard uit het herschikken en verder clusteren van de ladingsdragers op de anode.

De 'bewaarspanning' van LFP cellen is bepaald op 2,9V. Dit is de spanning waarbij de cellen de langste 'shelf life' hebben. Het is buiten kijf dat de cellen in de winter het best op deze spanning kunnen worden bewaard. Bij deze spanning zit er nog zo'n 25% van de nominale capaciteit in de cel opgeslagen.

De accu staat echter niet op de boot om te worden opgeslagen, maar om te worden gebruikt en net zo goed als we in het voorjaar de brandstoftank vol maken om de haven uit te varen en daarna terug te komen, zo willen we de service accu vol hebben als de boot weer in het water ligt. Gedurende het seizoen willen we maar één ding: 'kijkglas moet vol zijn' bij afvaart. Dit is voor LFP accu's niet nodig als je weet of er nog genoeg in de accu zit voor de komende vaart en het wordt alleen maar beter als er via een wisselstroomgenerator, windmolen, sleepgenerator of schroefasgenerator en zonnepanelen tijdens de vaart kan worden bijgeladen.

Cyclisch gebruik betekent dat de accu wordt opgeladen tot 'vol' (3,4V celspanning) en dan wordt ontladen tot de spanning waarbij de langste shelf life is aangegeven (2,9V celspanning). Dat is allemaal mooi, maar er is geen garantie dat er op het moment van het bereiken van de 2,9V er ook energie voor het opvolgende laden aanwezig is. Nu hoeft dit voor een zeiler met een verbrandingsmotor geen probleem te zijn, want de motor met wisselstroomdynamo kan worden gestart om in elektrische energie te voorzien. Voor elektro-zeilers is dit niet het geval en zij moeten in hun energiemangement aan boord rekening houden met een grotere reserve om 'donkere tijden' te overbruggen.

## Flip the Switch

De schakeling is gebaseerd op een bistabiele flipflop waarvan de stabiele toestanden afhankelijk zijn van de accuspanning. De eerste schakeling moest met de hand worden gereset om het laden weer te starten. Dit is te doen voor het laden met walstroom in de haven, maar is lastig als je op zee de aandacht nodig hebt voor de navigatie. De handmatige reset werd vervangen door een automatische reset die de laadstroom weer toelaat als de lage triggerdrempel wordt bereikt.

Dit geeft maximale cycling van de accu en geeft de accu alle kans te balanceren. Het betekent ook dat van de opgeslagen lading de laatste 30% als 'reserve' aanwezig is. Dit vinden sommigen te weinig, zij willen meer en langere autonomie en hebben daar de totale accucapaciteit voor nodig. Hiervoor is de lage trigger verstelbaar gemaakt zodat er minder cycling plaatsvindt en de reserve in de grootte van 70% van de accucapaciteit komt. De verstelling kan lineair zijn, maar ook met een schakelaar zodat omgeschakeld kan worden tussen 30% SOC als laagste 'enable charging' trigger en 85% SOC als hoogste 'enable charging' trigger.

Uiteindelijk wilde iedereen die daar naar werd gevraagd met een volle accu afvaren en tijdens de vaart alle mogelijke lading binnen halen om in de accu te stoppen. Het idee het laden enige tijd te stoppen om de accu 'leeg te laten lopen' om daarna weer te laden is voor de meesten niet

acceptabel want: 'Je weet niet of op het moment dat je weer wilt laden de zon wel schijnt'. Dit betekende het einde voor 'Flip the Switch'.

Zou aanhoudend laden en op spanning houden van de accu inderdaad tot verkorting van de levensduur leiden, dan gaat dat om 30% van 6000 cycli en aan boord betekent dit dat verwachte levensduur van de accu niet 60 jaar is, maar ca 40 jaar. Voor mij betekent 40 jaar levensduur dat bij het einde van de levensduur van de accu, ik definitief geen pijn meer in mijn tanden heb.

## Balanceren

Balanceren is een term uit de loodzwavelzuur accutechnologie. Vooral grote accubanken bij elektratractie waar een groot aantal cellen in serie werden geschakeld, hadden last van ongelijkmatig desulfateren bij het laden van de cellen. Dit kon het gevolg zijn van te weinig elektrolyt in de cel of van een specifieke plaats van de cel in het totaal van de accubank. Op het moment dat na het laden bleek dat het verschil in celspanning groter was geworden dan 0,3V, werd de accu 'gebalanceerd' om het spanningsverschil tussen de geladen cellen terug te brengen naar onder de 0,1V. Dit betekende effectief dat de capaciteit van de cellen door veroudering en ongelijke desulfatering onderling ging verschillen en dat dit van tijd tot tijd moest worden rechtgezet ofwel 'gebalanceerd'.

De veel gebruikte methode hiervoor was 'gepulst laden', hiermee werd gedurende korte tijd een hoge laadstroom aangeboden die 'net voor de gasvorming' op de platen werd gestopt. Hierdoor vond diffuus in het loodsulfaat de omzetting naar lood (op de minplaat) en loodoxide (op de plusplaat) plaats. Uiteindelijk resulteerde dit in gelijkmatig gedesulfateerde platen en een meer gelijkmatige capaciteitsverdeling die weer een gelijkmatige spanningsverdeling tot stand bracht. Later ging men over tot hoogfrequent laden waarvan werd beweerd dat het de sulfaat ionen in het loodsulfaat 'los schudde' en zo weer bijdroegen tot een verhoging van de concentratie zwavelzuur in het elektrolyt.

Het balanceren zorgde ervoor dat de celcapaciteit weer gelijk werd en verlengde zo de gebruiksduur van de accu.

## Balanceren van Li-ion accu's

Omdat Li-ion accu's geen sulfateren kennen als onderdeel van hun werking, is het balanceren op de manier van lood zwavelzuur accu's ook niet mogelijk. Balanceren van lood zwavelzuur accu's is de reparatie van capaciteit die door sulfatering verloren is gegaan. Balanceren bij Li-ion accu's is er voor zorgen dat de cellen in een accubank tot dezelfde spanning worden opgeladen. Er wordt echter geen reparatie gedaan van in het gebruik verloren capaciteit. Uiteindelijk is het resultaat wel hetzelfde –een identieke spanning op alle cellen- maar de methode daartoe is verschillend. Eigenlijk kan een LFP accubank maar één keer echt worden gebalanceerd en dat is op het moment dat de cellen in de bank geselecteerd worden op identieke capaciteit.

Is het gepulseerd laden van een seriële lood zwavelzuur accubank 'balancerend' voor de spanning door gelijke opslagcapaciteit van de cellen, bij een Li-ion accubank heeft pulserend laden geen enkel effect op de opslagcapaciteit.

Bij een lood zwavelzuur accubank worden de laatste loodsulfaat resten door overladen en druppelladen of 'float charging' geforceerd omgezet naar lood en loodoxide en zwavelzuur. Hierbij wordt het water in het elektrolyt omgezet in waterstofgas en zuurstof om via de ventilatie opening van de accu te verdwijnen.

Bij een Li-ion cel is overladen desastreus omdat overladen van een volle cel de energie niet in opgeslagen lading omzet, maar in warmte en bij veel warmte gaat het elektrolyt vergassen en ontstaat er druk in de cel.

Om dit tegen te gaan moet elke cel van een LFP accubank worden voorzien van een elektronisch systeem dat bij het bereiken van de eind laadspanning van de cel, de laadstroom voor de cel omleidt naar de andere cellen in serie. De toegevoerde lading voor de cel gaat dan verloren en wordt omgezet in warmte. Deze schakeling wordt naar analogie met het balanceren van een lood

zwavelzuur accu's een 'balancer' genoemd, maar het is veel meer een spanningsbegrenzer voor de laadspanning, zodat 'limiter' een veel betere aanduiding is en juist weergeeft wat deze schakeling doet. De limiter wordt per cel geplaatst en zorgt ervoor dat er bij een volle accu alle nog toegevoerde energie om de cellen wordt heengeleid en wordt gedissipeerd in de vorm van warmte.

Een limiter gebruiken is geen 'dynamisch balanceren', zoals het gebruik van gepulseerd laden bij loodzwavelzuur accu's.

## Laden met limiters

Bij laden van een serieschakeling van 4 cellen, mogen de capaciteiten van de cellen niet uiteenlopen want dan kan dit resulteren in een groot verschil in celspanning in het traject naar 100% SOC. Dit is wat men 'onbalans' noemt.

Het in serie laden van 4 cellen dwingt de laadstroom door de 4 cellen te laten lopen. Is de laadstroom om welke reden dan ook, te hoog voor die cel, dan kan de cel daaraan niets veranderen.

Bij 4 cellen in serie is de laadspanning voor 100% SOC  $4 \times 3,4V = 13,6V$ . Dit is bereikt als alle cellen op 3,4V staan, maar ook als 3 cellen op 3,3V staan en de 4e cel op 3,7V ( $3,3 + 3,3 + 3,3 + 3,7V = 13,6V$ ).

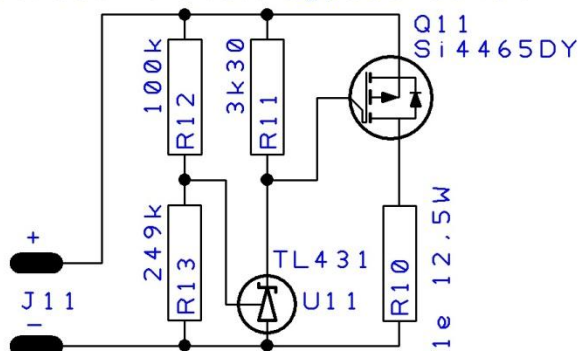
De 4e cel is dan overladen. De meetresultaten van het lab laten dit ook duidelijk zien. Dit kan al bij het eerste laden worden geconstateerd indien de totale accu spanning op 13V komt. Is er bij deze spanning al een cel die op 3,3V staat, dan is deze cel al bijna 'vol' en de capaciteit van deze cel moet dan wel veel lager zijn in vergelijking met de anderen. In een dergelijk geval kan een limiter over deze ene cel uitkomst bieden. Kan de 'kleinste' cel om welke reden dan ook niet worden gevonden, dan kunnen ook 4 limiters worden ingezet (over elke cel één), maar waarschijnlijk zal er één of zullen er misschien twee echt werken.

## De te bypassen stroom

Bij het laden met een constante spanning (CV-laden) zal de laadstroom afnemen naarmate de cellen 'voller' raken. De limiter(s) hoeven niet de maximale laadstroom te bypassen omdat de laadstroom in het gebied van de 100% SOC niet meer zo hoog zal zijn. Bij een CV-lader wordt er maar een gering vermogen in de limiters worden gedissipeerd. Één tot twee Ampère als bypass stroom zal voldoende zijn, het in de limiter gedissipeerde vermogen is dan maximaal  $3,4V \times 2A = 6,8W$ . Bij 4 functionerende limiters in een kleine accuimte ga je dat merken in temperatuursverhoging van die kleine accuimte.

Het zal bijna niet voorkomen dat alle 4 de limiters in een 12V installatie zullen werken (tenzij je laadt

*ruststroom < 14uA bypass @3.5V = 3.5A*

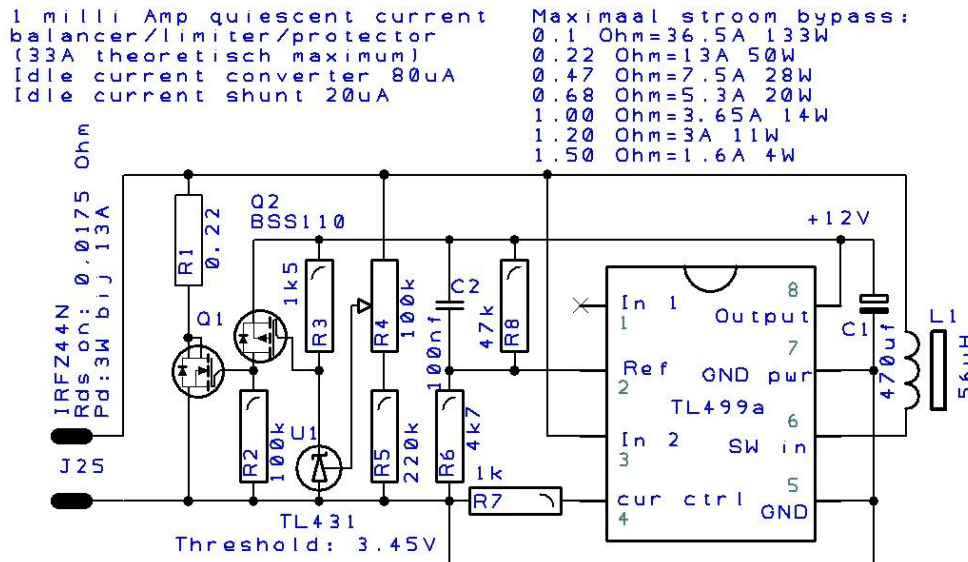


Limiter voor een LFP cel. Bypass stroom: 3,5A bij 3,5V

uit een ongeregelde bron zoals een zonnepaneel zonder regelaar of uit een wisselstroom-dynamo die op een te hoge spanning staat afgeregeld).

Bij het laden met een constante stroom (CC-laden) moet een limiter de gehele laadstroom langs de cel laten lopen. Een functionerende limiter gaat

dan veel vermogen dissiperen. Een CC-lader van 10A vereist een limiter die ook die 10A kan bypassen. Per functionerende limiter moet dan 34W worden gedissipeerd. Bij een ongeregelde aanvoer uit een zonnepaneel van 100Wp wordt het gehele paneelvermogen gedissipeerd in de limiters (maximale dissipatie:  $4 \times 34W = 136W$ ). Dat geeft beslist opwarming van de accuimte.



#### Limiter met een boost converter voor de laagst mogelijke warmte ontwikkeling in de power MOSfet.

Het gebruik van een CV-lader zal in alle gevallen minder 'zware' limiters vragen en minder vermogen dissiperen in de vorm van warmte in de accuimte.

Het werken van een limiter betekent dat er laadenergie zal worden omgezet in warmte. Dit gebeurt alleen als een cel de 3,4V heeft bereikt. Zou de accu worden geladen met een spanning die boven de som van 3,4V per cel komt, dan zullen de limiters uiteindelijk allemaal het surplus aan energie dissiperen in de vorm van warmte en dan kan de temperatuur in de accuimte flink oplopen. Jammer van de opgewekte energie.

Bij het bereiken van de 3,4V bij een cel met een lagere capaciteit in serie met andere LFP cellen waarvan de capaciteit hoger is, gaat de spanning van juist deze cel omhoog omdat alle ladingsdragers zijn geclusterd en de cel 'vol' zit. Een limiter die op dat moment de laadstroom om de cel leidt voorkomt dat de toevoerde energie in de cel wordt omgezet in warmte en dat deze warmte de cel kapot maakt. De limiter heeft geen andere keus dat deze energie om te zetten in warmte, maar dan buiten de cel.

#### Balanceren LFP cellen zichzelf bij gebruik tussen 30 en 90% SOC?

De ervaring met de niet van limiters voorziene 24V 800Ah accubank in een e-heftruck wijst op het zichzelf balanceren van de LFP cellen in gebruik. De cellen in het heftruckje zijn ooit opgeladen tot 95% SOC, waarbij er één cel een veel hogere spanning aannam en in onbalans bleek met de 7 andere. De cel werd daarmee overladen en werd warm. De e-heftruck werd gewoon gebruikt en verder langzaam geladen op het moment dat de 'brandstof meter' 'Halfvol' aangaf. In metingen van de spanning over de verschillende cellen was er na een paar weken geen noemenswaardige onbalans meer. De cellen 'balanceren' zichzelf in gebruik.

Inmiddels is vast komen te staan dat als de cellen cyclisch worden gebruikt, zij zichzelf balanceren en tot een gelijke spanning komen, ook al was er bij 'leeg' en bij 'vol' een groot spanningsverschil tussen de individuele cellen te meten.

Je kunt natuurlijk een vermoeden hebben dat LFP cellen zichzelf balanceren en dat bevestigen uit ervaring, maar 'meten is weten en gissen is missen'. Er zijn vier LFP cellen overgedragen aan een elektrotechnisch laboratorium met de vraagstelling:

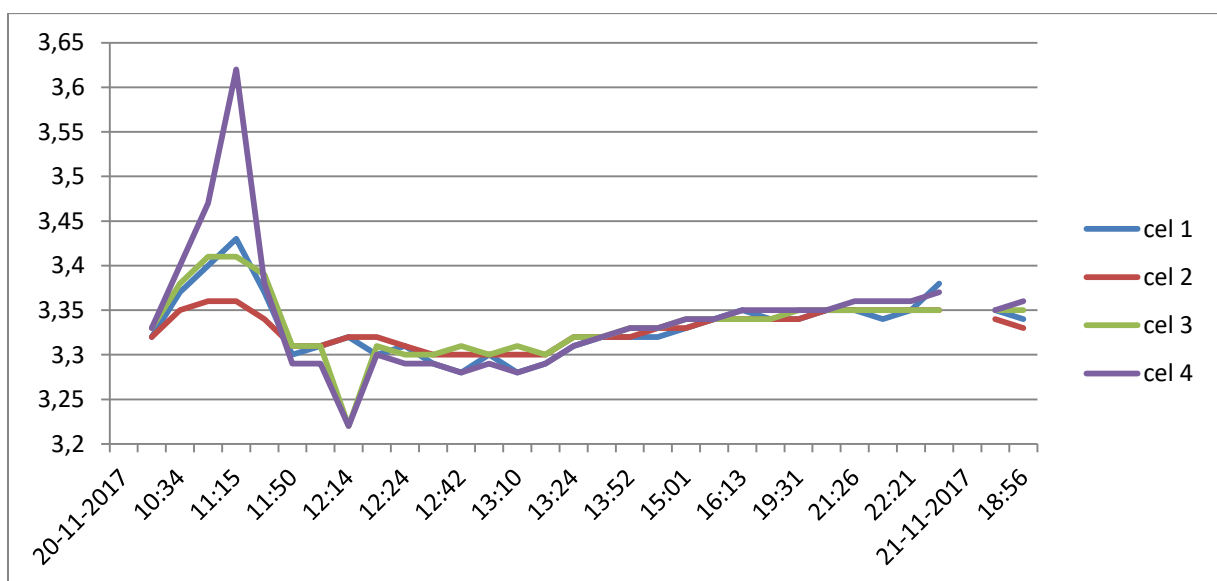
'Kunnen jullie in cijfers aantonen dat LFP cellen zichzelf balanceren als ze tussen 30% SOC en 90% SOC worden gebruikt.'

De meting levert een moeilijk te verklaren variabele op: er is verschil in aangegeven spanning als de meetpennen over de accupool worden verplaatst. Er is een spanningsverschil te zien als de meetpen op de aluminium moer wordt gezet ten opzichte van plaatsing van de meetpen op het koper of het aluminium van respectievelijk de min en plus pool. Bij de min pool zou de verklaring hiervoor te vinden kunnen zijn in het spanningsverschil door het verschil in de plaats in de edelheidsreeks (het spanningsverschil tussen koper en aluminium is rond de 2V en dat zal beslist invloed kunnen hebben). Voor de plus pool is het edelheid-spanningsverschil te verwaarlozen want tussen aluminium en aluminium is geen spanningsverschil in de edelheidsreeks. Toch treedt het daar ook op. Bij de meting wordt verder een vast gedefinieerd meetpunt op de accupool geprotocolleerd. Verder wordt meer dan 100mV spanningsverschil tussen de cellen als 'onbalans' gedefinieerd.

De cellen verschillen 10mV in klemspanning. Dit is geen onbalans, dit valt weg in de tolerantie van de meting. De cellen worden in serie aangesloten en als 12V accu behandeld. Cel 1 vormt de min-pool en cel 4 de pluspool. De meting van de celspanning is tussen de polen van de cellen in serieschakeling.

De cellen worden de eerste dag wisselend geladen en belast. De tweede dag worden de cellen niet geladen of belast om te zien of zij hun spanning 'vasthouden' en of er binnen een dag iets van zelfontlading te zien zou zijn.

De resultaten in een grafiek:



Cel 4 gaat bij het eerste laden al snel in spanning omhoog en geeft daarmee aan de cel met de laagste capaciteit te zijn ten opzichte van de andere cellen. Het laden gaat door tot de 3,6V op cel 4 is bereikt. 3,65V geldt als maximale laadspanning voor deze LFP cellen en daarom wordt het laden gestopt en er wordt overgegaan tot belasting met een weerstand van 2 Ohm die in serie met de weerstand van de ampère meter een stroom van 5,7A oplevert als belasting.

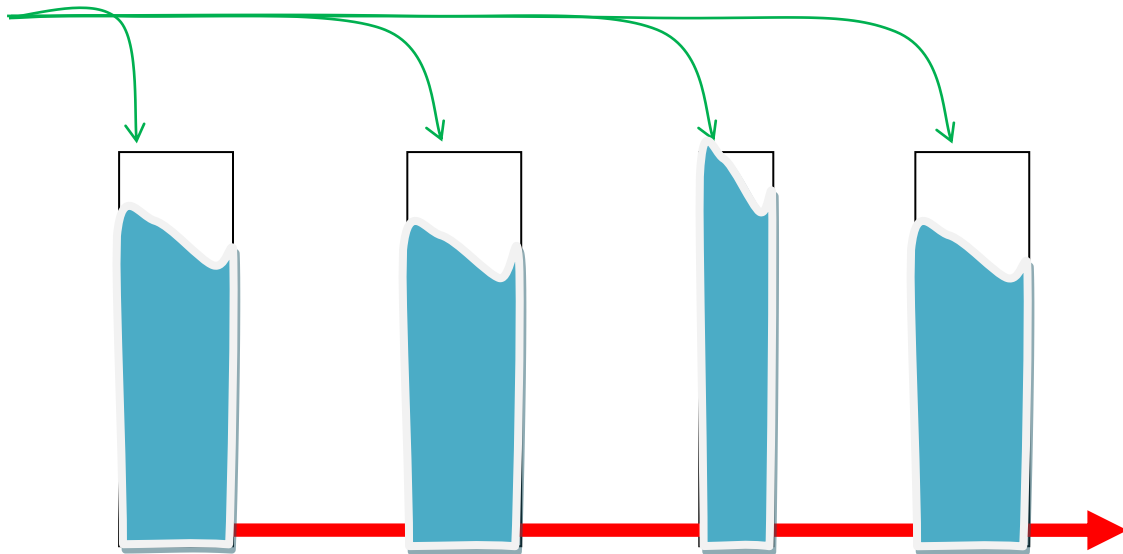
Na een half uur wordt de belasting eraf gehaald en wordt de celspanning onbelast gemeten. Het spanningsverschil tussen de cellen is 20mV en er is geen constateerbare onbalans meer binnen de definitie van 'onbalans' voor deze meting.

De belasting van de accu met een 2 Ohms weerstand wordt weer voortgezet gedurende 70 minuten en dan wordt weer onbelast de celspanning gemeten. Het verschil tussen de individuele cellen is nu 10mV in meetwaarde, maar met een fout van plus of min 1 digit van de meter wordt dit 0mV. Er is geen sprake meer van een meetbaar spanningsverschil.

De accu wordt nu geladen met een op 12,6V afgeregelde spanningsbron met een laadstroom van 1,25A en de celspanning wordt 'geturfd'. Na 10 uur laden is de accu nog steeds niet geheel vol en loopt er nog steeds een kleine laadstroom. Het spanningsverschil tussen de hoogste en de laagste celspanning is 30mV. Dit is niet aan te merken als onbalans.

Conclusie:

1. Onbalans ontstaat bij serie schakeling van cellen door een verschil in capaciteit van de cellen onderling. De onbalans is alleen zichtbaar als de cellen boven de 90% SOC komen en als zij onder de 30% SOC komen.
2. Bij laden en ontladen met een beperkte laadstroom verdwijnt de meetbare onbalans in LFP cellen. Dit bevestigt de observatie bij de e-heftruck waar ook de onbalans verdwijnt bij het gebruik tussen de 30% en 90% SOC.
3. Het gelijkmatig op- en ontladen van  $\text{LiFePO}_4$  cellen om de balans te handhaven is overbodig. De cellen raken niet in onbalans zolang zij tussen de 30% en 90% SOC worden gebruikt. De verklaring hiervoor ligt in de natuurkundige formule voor lading:  $Q = I \times t = C \times U$ . Ofwel de lading in Coulomb is gelijk aan de laadstroom maal de tijd dan wel de spanning maal de capaciteit. Heeft een cel een hogere lading en geeft deze dat aan door een hogere spanning, dan zal deze cel tussen de 2,9V en 3,4V van het gebruiksbereik automatisch nivelleren met de andere cellen door bij laden minder lading op te nemen en bij ontladen door meer lading af te geven en dit te regelen via de celspanning, ofwel tussen een state of charge van 30 en 90% van de cel met de kleinste capaciteit, balanceren de cellen zichzelf!



Bij serieel laden worden alle 'bakjes' met een gelijke stroom water gevuld. Het kleinste 'bakje' is het eerst vol en zal overstromen. Bij individueel laden stopt de stroom water als een bakje 'vol' zit. Er stroomt geen bakje over. Bij ontladen worden alle bakjes op een afvoerleiding aan gesloten en ontstaan er 'communicerende vaten' waarbij de vloeistof niveaus in hetzelfde horizontale vlak komen te staan. De accu balanceert zichzelf.

Daarna worden de cellen van de lader afgehaald en onbelast weggezet om te zien of zij een merkbare zelfontlading hebben in een tijdsbestek van 18 uur. Dat is er niet, de daling bedraagt in het uiterste geval 40mV en het spanningsverschil tussen de hoogste en de laagste celspanning blijft 30mV. Er treedt daarmee ook geen onbalans op.

Fouten discussie:

De 100mV spanningsverschil die als onbalans wordt aangemerkt is een praktische waarde en heeft geen natuurkundige grondslag. Uit de meting blijkt dat dit spanningsverschil wel kan worden gehaald, maar wellicht is 50mV spanningsverschil een verbeterde grenswaarde voor het vaststellen van onbalans tussen de cellen.

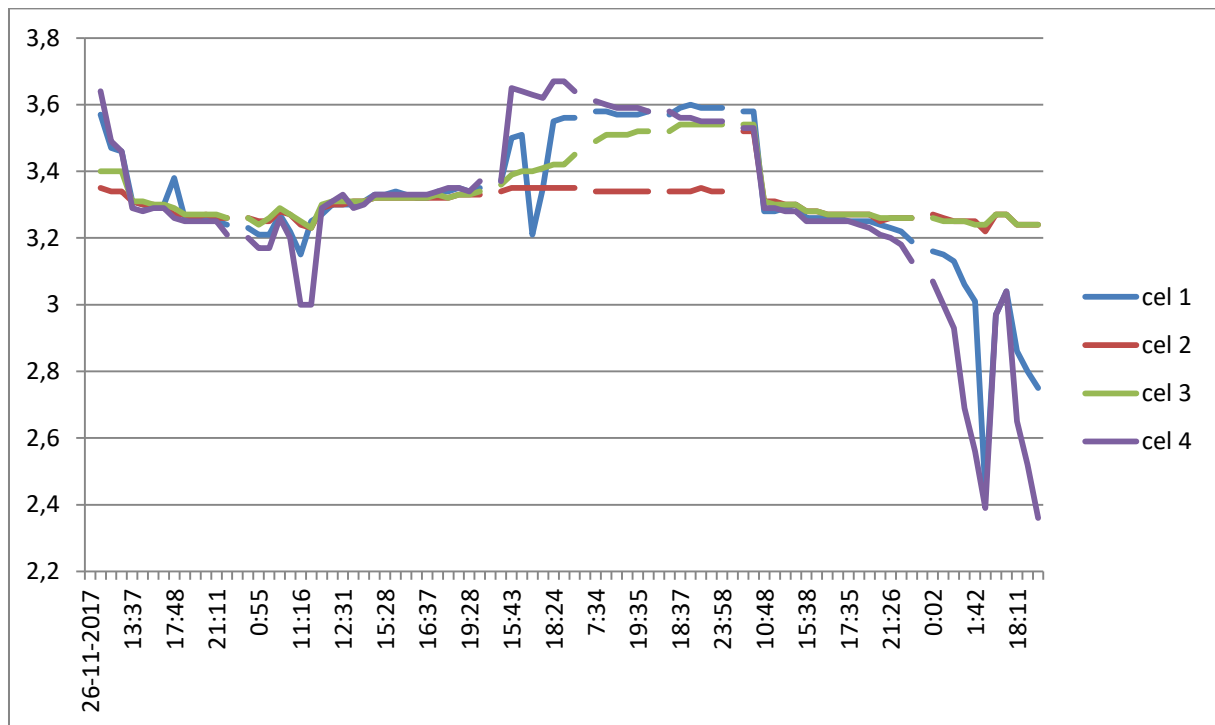
Het nut van balanceren en de inzet van een limiter is hiermee twijfelachtig. Het is discutabel of een limiter wel nodig is, zei het dat de functie van een limiter in geval van onbalans, de maximale celspanning binnen de grenzen houdt. Binnen de accubank van deze 4 cellen zou alleen een limiter op 'cel 4' nuttig zijn. Zouden er 4 limiters worden aangebracht (voor elke cel 1) dan zullen er 3 nooit werken indien er met een strak aangehouden eind laadspanning van 13,6V wordt geladen.

De tijd van de metingen waarbij het zelfbalancerend effect werd gevonden, vindt plaats in 2 dagen, er toch meer tijd nodig om de 'toevalligheid' van deze bevinding te verminderen. Om meer 'body' aan deze bevinding te geven werd er gedurende ruim een week geladen en ontladen met een stroom van tussen de 1 en 2A in het gebied van 70 tot 100% SOC. Dit is het gebied waar loodzwavelzuur accu gebruikers zich 'thuis voelen'. In een tijd van transitie naar LFP accu's is het waarschijnlijk dat een LFP accu zal worden beschouwd als een lood zwavelzuur accu en dat de LFP accu wordt onderworpen aan de gewoontes die de gebruiker heeft ontwikkeld van uit de lood zwavelzuur tijd.

De onderzoeksvraag bij de metingen wordt veranderd in: Is er 'zelfbalancering' bij het laden en ontladen van LFP accu's met een lage stroomsterkte, waarbij de LFP accu zich tussen de 30 en 100% SOC blijft.

De 'onbalans definitie' blijft op het oude niveau van 'delta 100mV' tussen de cellen gehandhaafd om referentie te houden aan de eerste metingen.

De laadspanning wordt gevarieerd tussen 4 x 3,65V en 4 x 3,4V om te zien of dit uiteindelijk invloed heeft op het optreden van onbalans.



Algemeen beschouwd:

In de grafiek is te zien dat de cellen die worden verdacht van een verminderde capaciteit (cel 1 en cel 4), zich ook 'jittery' gedragen. Bij het aanleggen van de maximale laadspanning van 3,65V per cel, komen zij eerder aan die spanning dan de cellen die kennelijk de nominale capaciteit hebben. Bij ontlading 'verliezen' zij ook sneller hun spanning.

Er is ook een 'omgekeerd' gedrag te zien bij cel 2. Deze cel schijnt een 'eindeloos hoge capaciteit' te hebben en lijkt 'nooit vol te komen'. Vanuit het meetlaboratorium komt de vraag of de andere cellen in de serieschakeling uiteindelijk met een hogere spanning mogen worden geladen om te zien of cel 2 uiteindelijk toch 'vol' te laden is. Omdat de cellen voor onderzoeksdoeleinden zijn, wordt dit toegestaan. Dit leidt tot een gelegenheidsbevinding, waarover later.

Uit veiligheidsoverwegingen wordt er niet geladen als er geen laboranten aanwezig zijn en dit wordt gekenmerkt door de onderbrekingen in de grafiek. Na 3 dagen laden met een verhoogde eindlaadspanning blijft cel 2 hardnekkig op de 3,38V staan om na een nacht zonder laden toch ineens op 3,5V te staan.

Een goede verklaring hiervoor is er niet, een 'accu fluisteraar' zou in de nacht met de cel kunnen hebben gesproken en de cel hebben kunnen aangespoord om 'niet zo flauw te doen en nu gewoon even mee te werken' en zich normaal te gedragen.

Zoals in de verwachting lag zijn de cellen die worden verdacht van een lagere capaciteit, de eersten die de 3V ondergrens passeren. Zij gaan het focus vormen voor de omgang met LFP accu's die 'te diep' zijn ontladen.

In antwoord op de onderzoeksvraag:

In het 'gebruiksgebied' van LFP accu's tussen de 30% en 70% SOC vindt 'auto balancing' plaats bij zowel laden als ontladen. Deze balancering vindt zelfs plaats bij cellen waarvan de capaciteit verschillend is. Dat wil zeggen dat een 300Ah accubank met een kapotte cel, te repareren is met een 180Ah cel. Wel moet worden opgemerkt dat de capaciteit van de hele bank in serie nooit hoger is dan de capaciteit van de 'kleinste cel'. Een provisorische reparatie met een andere LFP cel beïnvloedt de celbalans niet. Heeft u een aparte accubank van 180Ah LFP cellen voor de boegschroef en een andere accubank van 300Ah LFP cellen voor de huishoudaccu, dan is de uitval van 1 cel in een bank te repareren met de cel uit de andere bank. Ook bij veroudering van een cel kan deze worden vervangen door een nieuwe cel die de nominale capaciteit heeft. Het idee dat je zonder limiters kunt werken in een serieschakeling van LFP cellen als deze zorgvuldig bij elkaar zijn gezocht, is nog steeds valide. Bij goede monitoring van de individuele celspanning kunnen alle capaciteiten door elkaar worden gebruikt. Wel is het zo dat de laagste celcapaciteit de capaciteit vormt voor de hele accubank.

De waarde van dynamisch balanceren bij op en ontladen is hiermee ook gedegradeerd, dat kunnen de cellen heel goed zelf.

De enige voorwaarde is dat u de accubank gebruikt tussen de 3,0V en de 3,4V per cel. Zij, die door ongeduld de cellen toch willen laden met de maximale 3,65V om snel de accu te laden, worden gestraft met onbalans en mogelijk het vernielen van een of meerdere cellen.

Gelegenheidsbevindingen:

Bij het bereiken van de maximale laadspanning door de accu, wordt de laadstroom nul. Dit is ook van toepassing op cel niveau. Bij een stroom van 0 is er ook geen vermogen beschikbaar om de accu op te warmen, of op andere wijze te vernielen. Dit is goed nieuws voor hen die graag een 'volle accu' hebben. Het lijkt erop dat de optimale bewaarspanning van ca 3V niet meer is dan dat. De 'gebruiksspanning' van een LFP accubank ligt tussen de 3V en de 3,4V per cel. Er is aangegeven dat de hoogste celspanning bij laden nooit boven de 3,65V mag komen op straffe van verkorting van de levensduur. Hoewel de resultaten in deze metingen niet aantonen dat de levensduur wordt verlengd indien de celspanning niet boven 3,4V komt, zijn er geen aanwijzingen dat de bewaarspanning van 3V de meest optimale is voor het gebruik van de cellen. Aan de andere kant is het wel mogelijk dat de 50 jaar levensduur van de accubank terug loopt naar 35 jaar.

Het fenomeen van clustering kan ook de verklaring vormen voor het zelfbalancerend effect in LFP cellen in serie. Uiteindelijk staat de mate van clustering voor de hoogte van de celspanning in het gebied tussen de 2,8V en 3,4V. De clustering is dynamisch en herschikking van de ladingsdragers in het cluster verhoogt de celspanning zonder dat daarbij een laadstroom nodig is.

## Diep ontladen en de gevolgen

Na de eerste diepe ontlading ontstaat er een flink verschil in celspanning tussen de cellen. De twee van capaciteitsverlies verdachte cellen zijn voor wat betreft hun klemspanning flink in elkaar gestort.

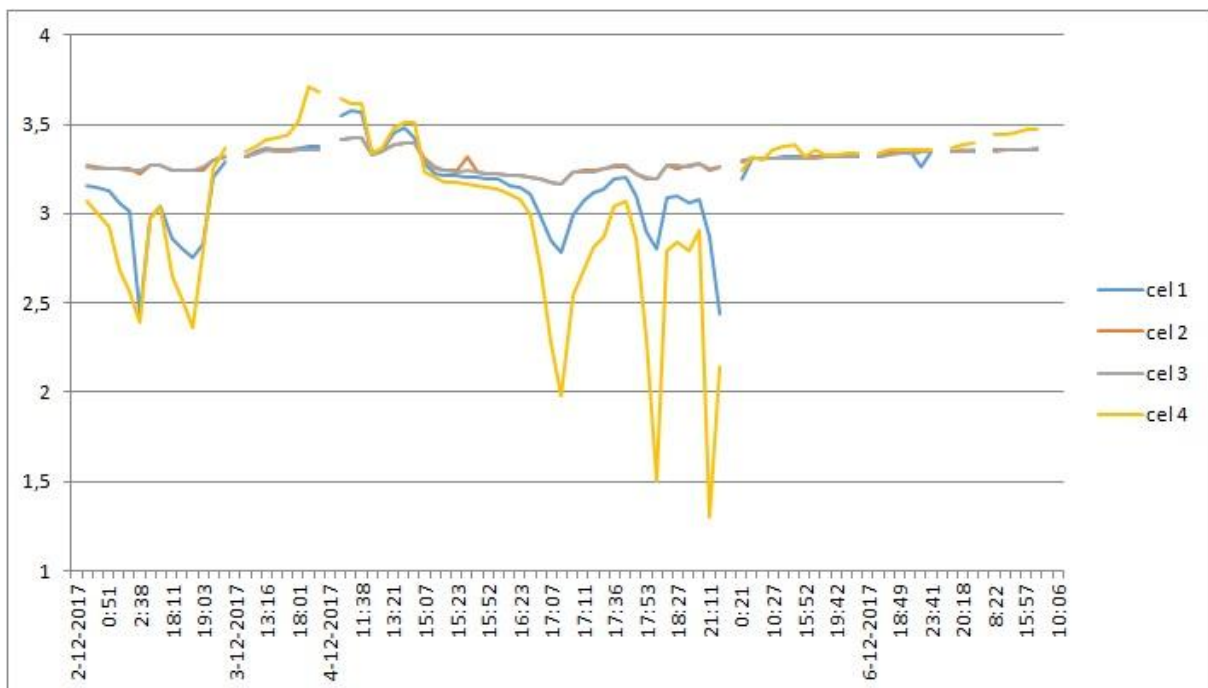
## Onderzoeksvragen

Geeft diep ontladen dit verschil in celspanning en kan de cel zich daarvan herstellen?

Geeft diep ontladen irreversibele schade aan de cellen?

Wat is er te zien aan de klemspanning na diepontlading?

De grafiek begint met het einde van de spanningscurve van de vorige grafiek.



Werd er in het begin nog belast met een aantal 'vreugdeloze weerstanden' parallel, nu wordt het menens en de belasting wordt gevormd uit iets wat op een zeiljacht wel eens zou kunnen voorkomen: een sinus omvormer van 12V naar 230V met daaraan een ventilator kachelkje omschakelbaar van 500 en 1000W.

De belastingsstromen zijn:	
De 3 weerstanden	5,6A
De ventilator kachel op 500W	44A
De ventilator kachel op 1000W	78A

De stromen zijn gemeten met een 'gelijkstroom Ampère-tang'.

Werd bij de eerste diepe ontlading voor de laagste spanning op cel 4 de ondergrens van 2,5V gerespecteerd. Het laboratorium vraagt toestemming om nog lager te mogen gaan. Dat mag.

De cellen die kennelijk minder capaciteit hebben, zakken als eerste in spanning op het moment dat die capaciteit is opgebruikt. Bij laden herstellen deze cellen ook snel in spanning om bij ongeveer

3,1V zich weer 'aan te sluiten' bij de andere cellen en gelijkmatig op te lopen tot 3,3V. Er is sprake van 'zelf balancering' van de cellen.

Boven de 3,5V neemt de spanning bij laden over de 'slechte cellen' snel toe. Zij zijn kennelijk 'vol' en de inwendige weerstand neemt daarmee toe waardoor er een hogere spanning over de cel komt te staan bij een gelijke stroom. De cellen 'lopen uit de pas' in vergelijking met de andere cellen en er is weer onbalans ontstaan.

Het laden wordt gestopt gedurende de nacht en de volgende dag wordt begonnen met een meting van de celspanning. Nu is er iets vreemds, zonder te zijn geladen is de spanning over de 'slechte cellen' flink omhoog gegaan. De cellen lijken zich gedurende de nacht te hebben hersteld en zijn in balans!

Bij verder laden neemt de spanning op cel 4 weer snel toe tot 'onbalans'.

Het zoeken naar hoe de LFP cellen zich gedragen bij diep ontladen gaat verder en in 3 pogingen wordt geprobeerd om cel 4 helemaal naar 0V te krijgen.

De spanning zakt bij belasting in elkaar, maar bij het opheffen van de belasting komt deze weer omhoog en dit gaat behoorlijk snel.

Op een gegeven moment krijg ik het laboratorium aan de telefoon: "Hoe krijg je zo'n cel eigenlijk leeg?" Ze willen de cel niet kortsluiten, maar zien het bijna als enige mogelijkheid om de klemspanning onder de 2V te krijgen.

Zodra de belasting met de omvormer wordt gestopt gaat de spanning op cel 4 weer omhoog. Interessant is dat de spanning snel oploopt in de richting van de 2V, maar bij langer wachten loopt deze zelfs op naar bijna 3V. Dit zonder dat er lading aan de cel wordt toegevoegd.

Dit heeft gevolgen voor de meting van de lading van de cel. Er kan lading uit de cel worden gehaald die er niet onlangs is ingestopt. Het bepalen van een 'nulpunt' voor de lading zoals veel ladingsmonitors vragen, wordt een probleem. Het heeft er veel van weg dat eenmaal geladen, de cel nooit meer echt leeg is te maken tenzij deze voor langere tijd wordt kortgesloten. De gevolgen daarvan voor de cel zijn nog onbekend.

Heeft een ladingsmonitor de mogelijkheid om de maximale lading in te stellen, dan kan bij een 'volle LFP accu', waarvan de celspanning op 3,4V staat, de nominale capaciteit van de cel worden ingegeven. Dit zal een redelijk goede capaciteitsmeting geven. Het invoeren van een compensatie voor de Peukert factor kan dit weer bederven. Ik kan niet zeggen welke instelling voor de Peukert factor bij LFP accu's een betrouwbare aanduiding geeft. Een relatieve meting van accustroom en richting x tijd lijkt een nauwkeurige aanduiding te zullen geven.

Relatie tussen spanning en lading is er alleen in het gebied boven de 3V tot 3,4V. Dit geeft een indicatie van de ladingsinhoud van de accu. Deze indicatie is niet nauwkeuriger dan de brandstof meter in een auto. Voor een 12V systeem van 4 cellen zit u dan bij 12V 'op reserve', bij 12,5V op 1/4, bij 12,9V op 1/2, bij 13,2V op 3/4 en bij 13,6V op 1/1.

Heeft u een 'NASA' of Victron, dan werkt de spanningsmeting adequaat, de 'Charge - Discharge' aanduiding werkt goed en de stroommeting is correct. Over de Ah weergave en de ladingsindicator is niet veel te zeggen.

Bij het 'jojoën' met de lading van de cellen ziet het laboratorium iets opmerkelijks: Bij diep ontlading tot 2V herstelt cel 4 zich zonder belasting tot ongeveer 2,8V gedurende de nacht. Bij het overladen tot boven de 3,4V herstelt cel 4 zich gedurende de nacht tot de 3,4V. Is dit 'auto balancering'... of heeft dit te maken met de manier waarop LFP cellen werken?

En dan: na diep ontlading volgt zonder een belasting een herstel tot 2,8V... Was de 'ideale bewaarspanning' ook niet iets van 2,8V? Ook daarvoor is een mogelijke verklaring te vinden in de werking van LFP cellen.

### Voorlopige conclusies

Je kunt LFP cellen niet kapot maken door ze diep te ontladen. (Niet verwarren met Li-polymer cellen, die gaan bij diep ontlading wel kapot door de vorming van kopernaaldjes die de plus en min plaat kortsluiten) Een diep ontlading beveiliging is voor LFP cellen niet nodig. Ze zullen zich ten dele door relaxatie herstellen tot rond de 2,9V en kunnen weer worden geladen. Tijdens dit laadproces zullen de cellen zich weer automatisch balanceren bij het pendelen van de laadtoestand.

Bij het ontladen met stromen tot 0,8c wordt ongeveer alles warm aan kabels, omvormers, 'straalkacheltjes' en andere belastingsweerstand, de accu's blijven echter koud. Het ziet er naar uit dat het kortsluiten van een LFP cel de kortsluiting eruit zal doen branden, maar geen gevolgen heeft voor de cel. Hierbij moet worden opgemerkt dat er nog geen echte kortsluitingstest heeft plaatsgevonden en de gevolgen daarvan nog niet bekend zijn.

De benaming 'balancer' en de functie van balancing bij het laden is overbodig omdat de cellen bij pendelend gebruik zichzelf balanceren. Voor de cellen uit de serieschakeling met de laagste capaciteit is een limiter wel een nuttig onderdeel.

Een accumonitor die de lading van een LFP accubank bijhoudt zal door het twee-traps laad en ontlad proces van LFP cellen niet nauwkeurig kunnen zijn. De hoogste kans op nauwkeurigheid ligt bij het gebruik van de accu in het gebied tussen de 3,0V en de 3,4V (30% en 99% SOC). De voltmeter en de ampèremeter zullen wel normaal werken.

### Antwoord op de onderzoeksvragen

-Geeft diep ontladen onbalans en kan de cel zich daarvan herstellen?

Ja en ja. Heel bijzonder is dat de cel hiervoor niet geladen hoeft te worden, het herstel volgt vanzelf. Bij laden na een diep ontlading volgt tevens balancering.

-Geeft diep ontladen irreversibele schade aan de cellen?

Voorlopig is daar geen aanwijzing voor zolang er niet dieper wordt ontladen dan 1,5V per cel. Het lijkt erop dat het diep ontladen zelfs herstel geeft van de capaciteit van een cel met teruggelopen opslag. Wel duidelijk is geworden dat er geen capaciteitsverlies optreedt zoals bij een 'leeg gestartte' loodzwavelzuur accu.

Heel bijzonder is dat de klemspanning zich herstelt, zonder dat er wordt geladen.

## Laden van LiFePO<sub>4</sub> cellen in serie

Basaal is het laden van accu's het aanbrengen van een lading in die accu. De opslagcapaciteit van een accu wordt aangegeven met de maximale lading die de accu kan bevatten. Lading wordt aangegeven met de letter Q en weergegeven in Coulomb (I.t of c.U). De opslagcapaciteit of kortweg capaciteit van accu's wordt meestal uitgedrukt in Ampère uur of Ah. 1 Ah is 1A x 3600 seconden ofwel 3600 Coulomb maar kennelijk is dat een veel moeilijker te bevatten hoeveelheid dan Ah en wordt dit zelden gebruikt. Condensatoren hebben ook een opslagcapaciteit, deze wordt uitgedrukt in Farad en dat is voor condensatoren makkelijker omdat de spanning over een condensator over een veel groter bereik kan variëren. Een LFP cel van 3,2V en een opslagcapaciteit van 1Ah kan worden vervangen door een condensator van  $3600C / 2,3V = 1565,2173913043478260869565217391$  Farad. Dat is een joekel van een ding en daarmee nauwelijks winst op het gebied van volume of gewicht ten opzichte van een LFP accu.

De belangstelling voor de condensator als ladingsopslag is sterk toegenomen door de komst van Grafeen als elektrodemateriaal, maar die belangstelling nam snel af toen een aantal grote condensatoren ontploften door inwendige sluiting. Theoretisch is de condensator als ladingsopslag mogelijk, praktisch zijn er nog wat haken en ogen. Hetzelfde gold ruim 100 jaar geleden voor de loodzwavelzuur accu en 40 jaar geleden voor de li-ion accu, die problemen zijn uiteindelijk overwonnen. *l'Histoire se répète...*

Zou de condensator als energieopslag even volumineus worden als een 80 liter dieseltank en evenveel energie kunnen opslaan als er in 30% van 80 liter diesel gaat, dan betekent dat het einde van de elektrochemische accu en de ionen accu.

Voor LFP cellen wordt vaak een optimale laadstroom van 0,1c opgegeven. Als maximale laadstroom wordt meestal 0,5c opgegeven. Kortdurend zijn laadstromen tot 2c opgegeven, maar dit kan alleen worden bereikt indien de laadspanning boven de maximale laadspanning van 3,65V per cel komt. De opgave van deze waarden zijn per celfabrikant verschillend en het is mogelijk dat er in de waarden nog veel aanpassingen komen.

Zou de celspanning tijdens het laden met een laadstroom van 2c korte tijd boven de 3,4V komen, dan wordt de cel onmiddellijk zeer heet en gaat het elektrolyt in de cel vergassen en komt de cel bol te staan en het vergaste elektrolyt wordt bij hoge druk in de kunststof cellen via een overdrukventiel afgeblazen. Blijft de laadstroom beperkt tot 0,01c, dan kan de celspanning wel tot 4V oplopen zonder dat de cel merkbaar warm wordt. Er zijn fabrikanten die hiervan gebruik maken voor de 'initiële lading' van LFP cellen. Ik ga ervan uit dat de overschrijding van de 3,4V tegelijk met het lopen van een laadstroom van 0,01c of hoger, nadelig is voor de levensduur van een cel. Dit is niet aangetoond in het laboratorium en dit is daarmee een persoonlijk gebonden grens die voortkomt uit mijn ervaring met LFP-cellen.

Hieruit volgt dat een LFP cel uit een stroombron met een constante stroom van 0,1c en een laadspanningbegrenzer op 3,4V veilig kan worden geladen, zonder risico op overladen. Bij 100% SOC bereikt de cel de 3,4V en wordt de stroom tot 0 teruggebracht.

De LFP cel kan ook worden geladen uit een spanningsbron van 3,4V met een ingebouwde stroombegrenzer op 0,1c. Bij een lage restspanning op de cel zal de stroombegrenzer de stroom

beperken tot 0,1c (als de netzekering dit al niet eerder doet). Bij het naderen naar 3,4V, zal de stroom geleidelijk afnemen tot 0 zodat het punt van 3,4V celspanning pas op het punt 'oneindig' zal worden bereikt en een lading tot 99% wel gehaald gaat worden, maar er nooit tot 100% SOC zal worden geladen. Het belangrijkste is dat de cel ook nooit zal worden overladen, omdat er vanaf de 3,4V onvoldoende spanningsverschil is om nog een laadstroom te kunnen laten lopen.

## Laden met walstroom

SMPS power supplies zijn zeer stabiele spanningsbronnen die een stroombegrenzing hebben. De stroombegrenzing kan zo worden gekozen dat de power supply niet meer stroom kan leveren dan 0,1c.

De SMPS power supplies hebben een heel hoge efficiëntie en worden tijdens het laden niet of nauwelijks warm. Een

24V SMPS power supply van 300W wordt pas merkbaar warm als de accuspanning van 8 in serie geschakelde 800Ah cellen op 24V is gekomen en de power supply 3 uur in stroombegrenzing modus met 12A staat te laden (opladen van de kleine vorkheftruck).

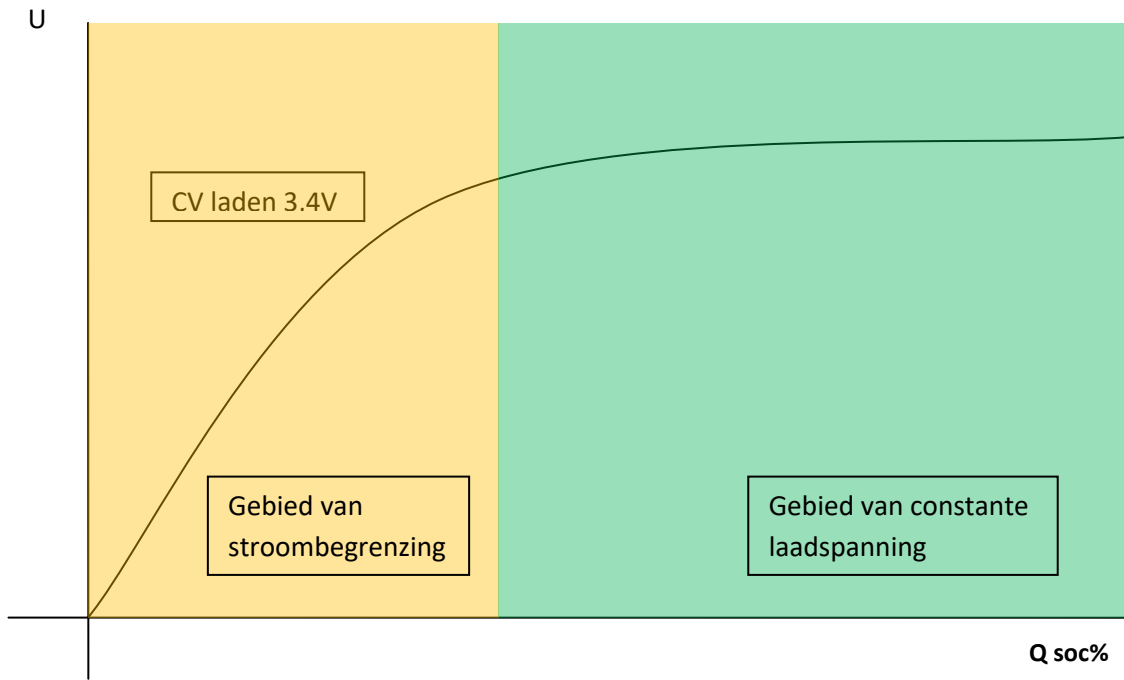
De uitgangsspanning van de power supply is vaak instelbaar (+ of - 5% van de nominale spanning). Het is mooier als de uitgangsspanning van de SMPS power supply dichtbij de gewenste spanning komt, dan hoeft er maar weinig te

worden ingesteld. Voor een 12V accubank is de klemspanning bij 100% SOC 13,6V, voor een 24V accubank bij 100% SOC is dat 27,2V, voor een 48V accubank is dat 54,4V.

Er kan bij een SMPS van 600W bij 12V een laadstroom van ongeveer 50A worden geproduceerd, iets waar vier halfvolle 500Ah cellen in serie 'de schouders over zullen ophalen'. Een dergelijke SMPS neemt in vollast dan nog geen 3A uit het lichtnet.



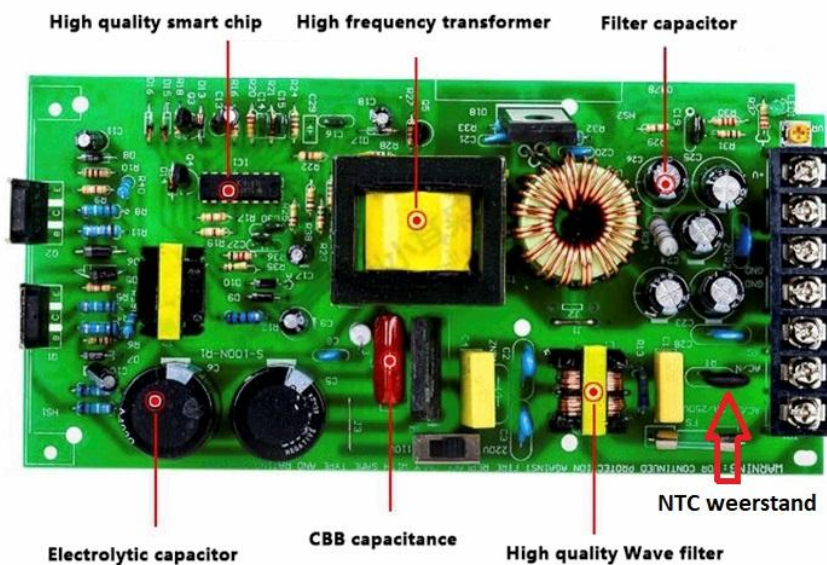
Potmetertje voor fijninstelling van de uitgangsspanning



Maar... (er is altijd een maar!)

Bij een SMPS wordt de wisselspanning uit het lichtnet eerst gelijkgericht tot een gelijkspanning. De converter die vanuit die gelijkspanning moet werken wil dat uit een mooie gelijkspanning doen en niet vanuit een 100Hz 'hobbelgelijkspanning' die uit de dubbelfasige gelijkrichter komt. Om die 'hobbels' glad te strijken worden een paar flinke elektrolytische condensatoren gebruikt en om deze in eerste instantie op te laden, heb je een forse stroom nodig. Deze stroom wordt in het Engels 'rush in current' genoemd en bereikt waarden (voor een 600W SMPS voeding) die 20 tot 25 maal de nominaal stroom kunnen zijn. Voor een 600W voeding komt de rush in current makkelijk op 60 tot 75A. Die stroom loopt er maar heel kort, maar een 16A automaat knalt er meteen uit.

“Maar daar kunnen ze toch wel iets aan doen?” Ja, gelukkig wel. Ze bouwen daarvoor een NTC



weerstand in de 230V aansluiting van de voeding. Deze weerstand heeft koud een hoge waarde en naarmate de weerstand warmer wordt, wordt de weerstandswaarde veel lager. In eerste instantie beperkt de weerstand de stroom en als deze warm wordt (en de condensatoren zijn

opgeladen) neemt de weerstandswaarde af en verdwijnt de beperking voor de stroom.

De rush in current neemt dan af tot iets van 30A en de 16A automaat 'knalt' er net niet uit omdat de stroom op tijd afneemt naar 3A en dat kan een 16A automaat makkelijk aan. Je kunt het ook zelf wel verhelpen met een heel lang verlengsnoer van 1mm<sup>2</sup> naar de aansluiting op de steiger. Daar valt bij hoge stroomdoorgang dan zoveel spanning over dat de rush in current ook wordt beperkt. ("Is niet een hele nette methode!" 'Ja, maar het werkt wel!').

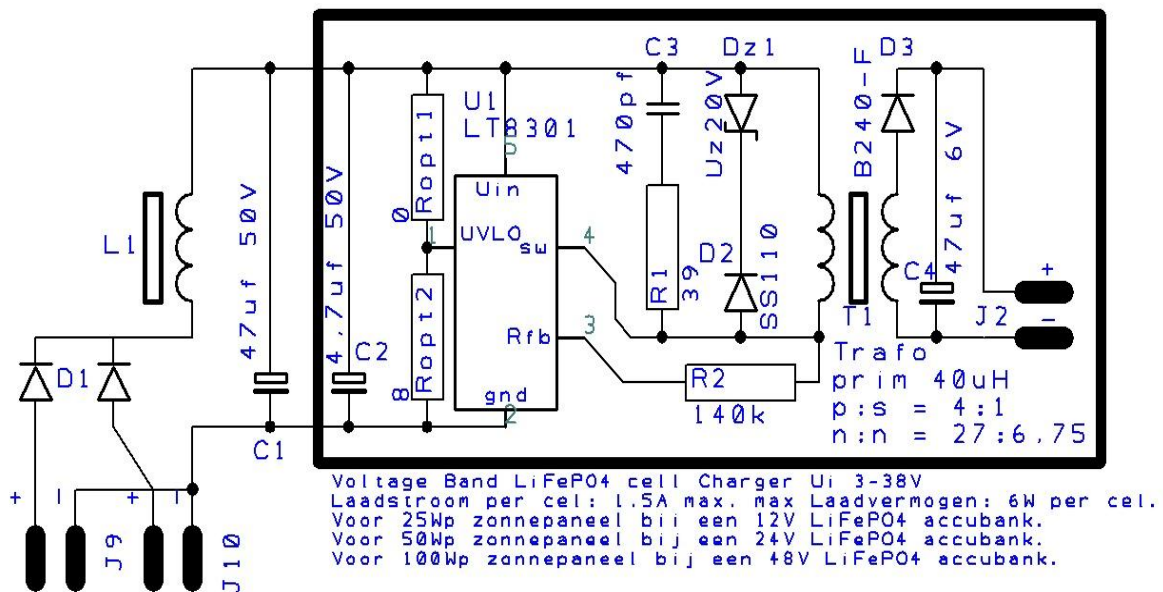
Neem je een SMPS power supply van meer dan 600W, dan is het goed mogelijk dat deze het in een haven waar alle contactdozen met een 6A diazed patroon zijn gezekerd nooit zal werken. Het wordt nog lulliger als de SMPS voeding de hele steiger zonder stroom zet. Heb je ook nog boze 'buurboten'. Houdt jezelf een beetje in bij de keuze van een SMPS walstroomlader. Met een 600W model bij 12V laadt je op met 50A en heb je in de nacht een 500Ah accu van 'plat' naar helemaal vol. Bij een accubank van 200 tot 300Ah en 12V heb je met 16 uur en 200W aan laadvermogen gedurende 16 uur 16A aan laadstroom 256Ah aan lading in uw accu gestopt.

Hoe lager het vermogen van de SMPS converter, des te lager de rush in current en dan is een ventilator voor de koeling ook vaak niet nodig. Sommige van die ventilatoren kunnen erg lawaaiig zijn en je 'fijn' uit de slaap houden.

## De 'enkele cel lader'

Bij de inzet van één lader per cel bestaat het probleem van verschillende celcapaciteit niet. De lader is begrensd op 3,4V en er gaat niet meer komen dan die 3,4V. Ongeacht de capaciteit van de cel, wordt elke cel 'vol' geladen. Is één cel vol, dan wordt de aangevoerde energie automatisch verdeeld over de andere 3 cellen (bij een 12V installatie) en krijgen deze cellen de beschikbare energie. Is er een tweede cel vol, dan gaat alle energie naar de 2 overgebleven cellen en wordt de laadstroom voor deze cellen hoger, tot uiteindelijk alle cellen op 3,4V staan en allemaal 'vol' zitten. Ongeacht de capaciteit van de cellen zullen zij allemaal op 100% SOC uitkomen.

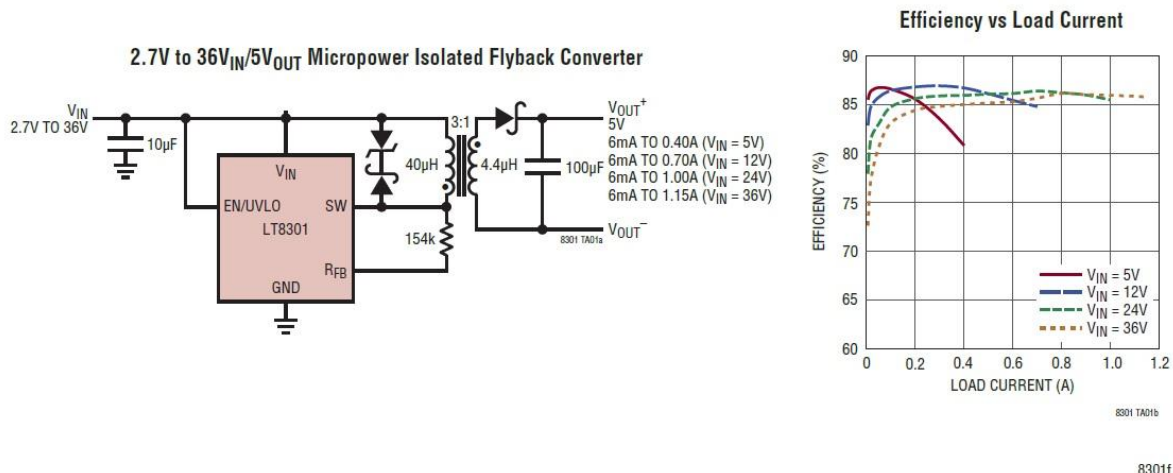
Een voorwaarde voor dit functioneren is dat de lader bij het bereiken van de 3,4V geen stroom meer levert aan de cel met 3,4V klemspanning en dat de cel bij deze spanning ook geen stroom meer opneemt. Bij testen en meten in het laboratorium wordt vastgesteld dat er bij 100% SOC en 3,4V laadspanning 0mA aan stroom loopt. Het loskoppelen van de cel gedurende de nacht laat de celspanning iets dalen. Het aansluiten van de lader geeft in korte tijd weer de 3,4V aan celspanning en de laadstroom wordt weer 0mA. LFP cellen lenen zich bij uitstek voor een CV-laadmethode in het gebied tussen 95 en 100% SOC.



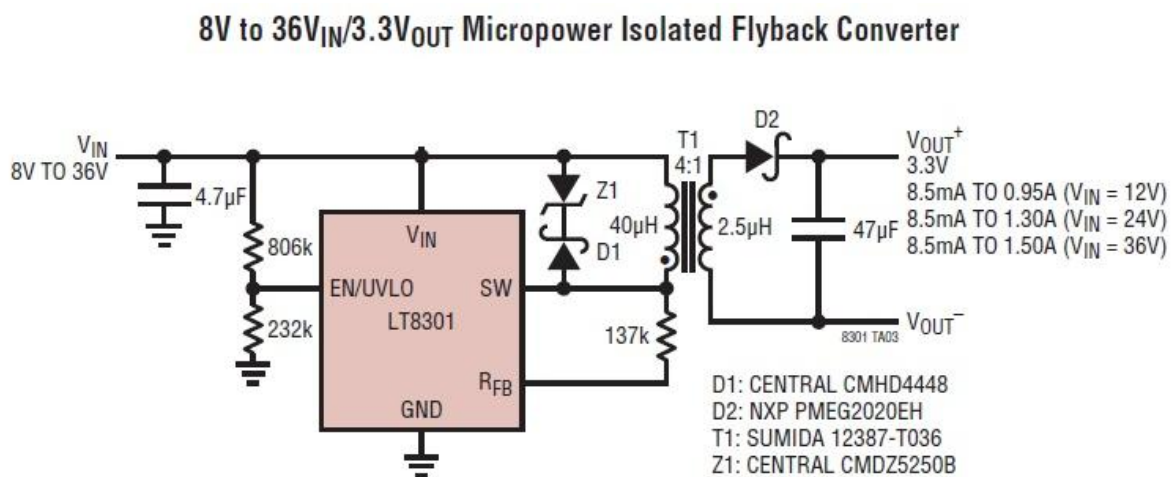
## Ic's voor een dergelijk laadsysteem

De kleinste en eenvoudigste chip is de LT8301 van Linear Technologies.

### TYPICAL APPLICATION

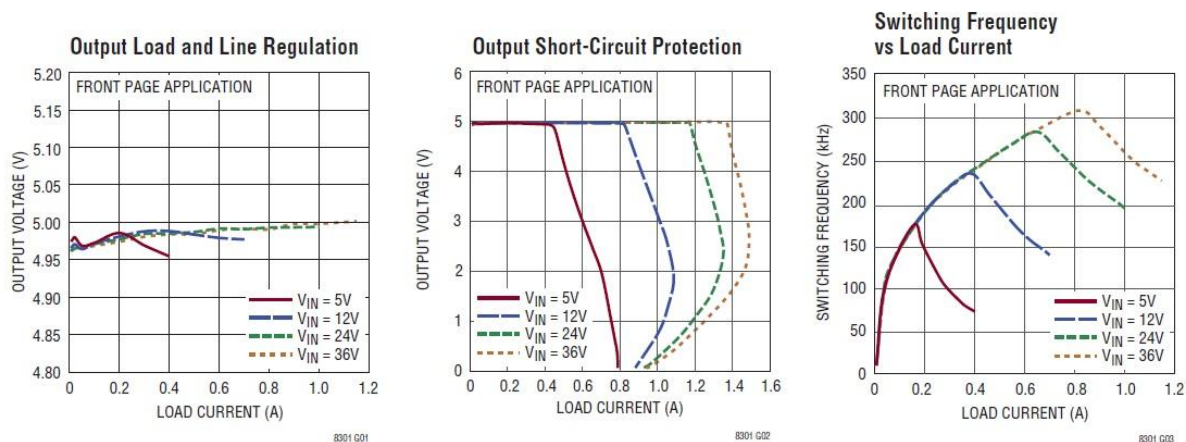


Voor geheugenbanken in computers worden converters gebruikt waarvan de uitgang op 3,3V wordt ingesteld.



Met wat aanpassing kan daar ook 3,4V van worden gemaakt. Dit zijn zogenaamde 'fly-back' converters. De ingangsspanning van dergelijke converters is niet erg kritisch, alles tussen de 3 en 36V is goed. Er worden voor deze converters speciale chips gemaakt die via de wederkerige zelfinductie van het transformatortje de secundaire spanning nauwkeurig op een bepaalde waarde kunnen houden. Het is de waarde van de 137k weerstand op de R<sub>FB</sub> (FeedBack) aansluiting van het IC die bepalend is voor de uitgangsspanning en achteraf wordt bepaald om de spanningsval over de diode D2 te kunnen compenseren.

## TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.



Bij de schakeling voor 5V uitgangsspanning, gevoed door 36V, is de variatie in de uitgangsspanning 30mV bij een belastingbereik van 0 tot 1,2A. Dat is belachelijk stabiel voor een fly-back converter maar ook zeer goed om de aangesloten cel te veilig tot de maximale spanning te laden. In de eenvoudigste configuratie kan er 6W aan vermogen omgezet worden naar 3,4V bij ongeveer 1,2A. Dat is niet veel maar het is veilig voor de accu in het bereik van 99 tot 100% SOC. Dit zonder energie verspilling door limiters die vermogen dissiperen om de celspanning gelijk te houden.

De secundaire wikkeling is galvanisch gescheiden van de voedingsspanning en galvanisch gescheiden van elkaar. Ze kunnen dus in serie worden geschakeld zonder elkaar te beïnvloeden. De vermogensopname is direct in relatie tot de vermogensafgifte, is een cel geladen, dan wordt er geen vermogen aan de secundaire wikkeling afgegeven en wordt er primair ook geen vermogen meer opgenomen. Het toegevoerde vermogen wordt dan herverdeeld over de converters waarvan de cel nog niet 'vol' zit en daardoor ontstaat sneller laden van de cellen die nog niet op 100% SOC zijn. Is de accubank 'vol', dan wordt er geen vermogen meer opgenomen.

De gelijkrichtdiode voorkomt dat er stroom uit de cel via de secundaire wikkeling loopt en de converters kunnen 'altijd' op de cel aangesloten blijven en ontladen de cel niet als ze buiten gebruik zijn. Dit in tegenstelling tot limiters die dat wel doen.

Vier keer 6W is niet veel om een 12V boordaccu op te laden, maar past mooi voor wat in de loodzwavelzuur technologie een 'druppel' lading heet. 'Bulk' laden kan goed met een hogere spanning over de serieschakeling van cellen zolang de maximale spanning van 13,6V maar gegarandeerd blijft. Door de individuele celladers wordt de spanning per cel gelijk gehouden en is er balancering van de celspanning in het gebied van 90 tot 100% SOC.

Voor 24V accubanken moet er al 50W aan de 8 converters worden toegevoerd voor maximaal functioneren.

Voor mijn 48V 100Ah accubank ga ik 16 converters nodig hebben en die vragen minimaal 100Wp aan zonnepaneel vermogen. Ik heb dan geen MPPT regelaar meer nodig want deze zit in elke chip min of meer ingebouwd. Dit komt naar voren in de mogelijkheid van de chip om in 'burst mode' en

'boundary mode' te kunnen werken en de schakelfrequentie aan te passen aan het aangeboden vermogen.

De LT8302 kan 15 tot 20W verwerken en kan 60 tot 80W in een 12V accubank stoppen. Wie verder de mogelijkheden van deze cellader-chips wil bekijken: download de spec sheet via het internet.

Samenvattend: balanceren met een limiter kost energie in grotere of kleine mate. Cel laden kan maar met beperkte energie.

Maar het idee is te kopiëren en met zwaardere fly-back converters uit te voeren. Het mooie is daarbij dat de ingangspanning in hoogte heel veel vrijheid geeft. Alle 'vreemde energie opwekkers' kunnen aan de 4 (voor 12V), 8 (voor 24V) en 16 (voor 48V) converters worden aangesloten. Windmolens van 3 tot 30V? dat kan. Sleepgeneratoren van 6 tot 40V? dat kan. Wisselstroomdynamo's van 10 tot 16V? dat kan. Zonnepanelen van 22V tot 6V? dat kan. Walstroomladers van 5V tot 48V? dat kan! De cellen worden dan nooit verder dan 3,4V geladen en blijven automatisch gelijk in spanning. Op deze manier van celladen is de 'alles-etende acculader' ontstaan die uit diverse energiebronnen kan putten.

Dit betekent overigens niet dat er altijd voldoende energie aan boord zal zijn... Of dat het geval is, wordt bepaald door het verbruik.

## LFP cellen laden via DC-DC converters

Nu er meer van de eigenschappen van de LFP cellen bekend zijn, kunnen zij bij laden via de DC-DC converters laten zien waar de 'quircks' in de redenering zitten. LFP cellen hebben zonder uitzondering een zeer lage inwendige weerstand en een lege cel presenteert zich aan een lader als een kortsluiting.

Vragen hierbij zijn:

*Wat gebeurt er met de converters als er een lege cel wordt aangesloten om te laden?*

De converters worden opgegeven als kortsluitvast en een hoge laadstroom zou ze niet mogen beschadigen. Als maximale uitgangsstroom wordt 5A opgegeven. Dat is een uitgangsvermogen van 3,4V x 5A ofwel 17W. Het is een geïsoleerde fly back converter (zoals er vroeger in de beeldbuis televisies zaten) en de efficiëntie van die converters ligt tegenwoordig tussen de 80 en 85%. Het opgenomen vermogen zal ergens tussen de 20 en 22W liggen. Het verschilvermogen zal in de converters worden gedissipeerd en deze zullen warm worden.

Zou de cel zijn ontladen tot 3V, dan is het uitgangsvermogen 15W en gaat het in de converter gedissipeerde vermogen omhoog naar 7W bij een uitgangsstroom van 5A. Komt de uitgangsstroom boven de 5A (en dat doet deze) dan neemt ook het gedissipeerde vermogen toe en moet er worden voorzien in koeling. De converters hebben hiervoor een koelvlak waarop een koelvin kan worden gemonteerd.

Er wordt een tot 2,5V ontladen LFP cel op de converter aangesloten en de ingangsspanning wordt op 12V ingesteld.

De 12V voeding levert bijna 1,5A aan de ingang en er gaat 7A aan laadstroom in de cel. Dit is meer dan de opgegeven 5A en de converter wordt snel warm. De converter slaat af en de stroom uit de voeding valt terug naar 0A.

Er wordt een minder diep ontladen cel (3,32V) aangesloten en de converter start weer en blijft de cel laden. De ingangsspanning wordt gevarieerd tussen 10 en 15V maar aan de uitgang van de converter

verandert de spanning niet (blijft 3,44V) en alleen de laadstroom varieert met 500mA. De cel wordt geladen tot 3,39V is bereikt. Bij de nadering tot 3,4V neemt de laadstroom geleidelijk af op basis van het spanningsverschil tussen de spanning van de converter en de klemspanning van de cel. De temperatuur wordt niet gemeten, maar deze neemt merkbaar af naar gelang de laadstroom naar de cel verminderd.

De cel wordt afgekoppeld en de diep ontladen cel wordt weer aangesloten. De celspanning is inmiddels opgelopen tot 2,6V ter indicatie dat er toch enige lading in de cel is gebracht voordat de converter afsloeg. In de spec sheet staat dat de converter kortsluitvast is, maar er staat niet op welke manier dit is gerealiseerd. Een afslag op basis van stroomsterkte is niet waarschijnlijk want de stroom kan binnen zeer wijde grenzen variëren.

Al snel slaat de converter weer af. Dit kan worden geconstateerd doordat de stroom uit de voeding naar 0 gaat. De spanning op de cel is inmiddels weer 0,1V hoger. De converter wordt eraf gehaald en na een tijdje er weer opgezet en het laden wordt voortgezet.

Ook nu weer slaat de converter weer snel af, maar deze keer wordt de voeding niet onderbroken en na enige tijd start de converter zelf op. De tijden van het starten en stoppen worden nu bijgehouden en de tijd tussen starten en stoppen (de tijd waarin de converter werkt) wordt steeds langer. Een provisorisch aangebrachte koelvin heeft een merkbaar effect en de converter werkt na nog een paar keer te zijn afgeslagen, continu door. Het is duidelijk dat de kortsluitvastheid is gebaseerd op een thermische schakelaar. 'Je hebt de thermische duty cycle modulatie uitgevonden' zeg ik tegen de laborant. "en, is dat belangrijk?" vraagt hij... 'vind ik wel!' zeg ik.

De Mornsun DC-DC converter is kortsluitvast op basis van een thermische beveiliging. Het aantal afschakelingen dat maximaal mag voorkomen is niet bekend. In de 'application notice' bij de converter wordt aangeraden de converter bij hoge vermogens te koelen.

Voor het lab wordt de volgende vraag geformuleerd:

Ga 4 cellen in serie laden met de 4 converters, tot een celspanning van 3,4V per cel.

Gebruik 14V voedingsspanning, alsof de converters worden gevoed uit een wisselstroomdynamo op een dieselmotor. Noteer de stroom uit de voeding tijdens het laden.

Wie geeft het eerder op door overbelasting, de voeding of één van de converters?

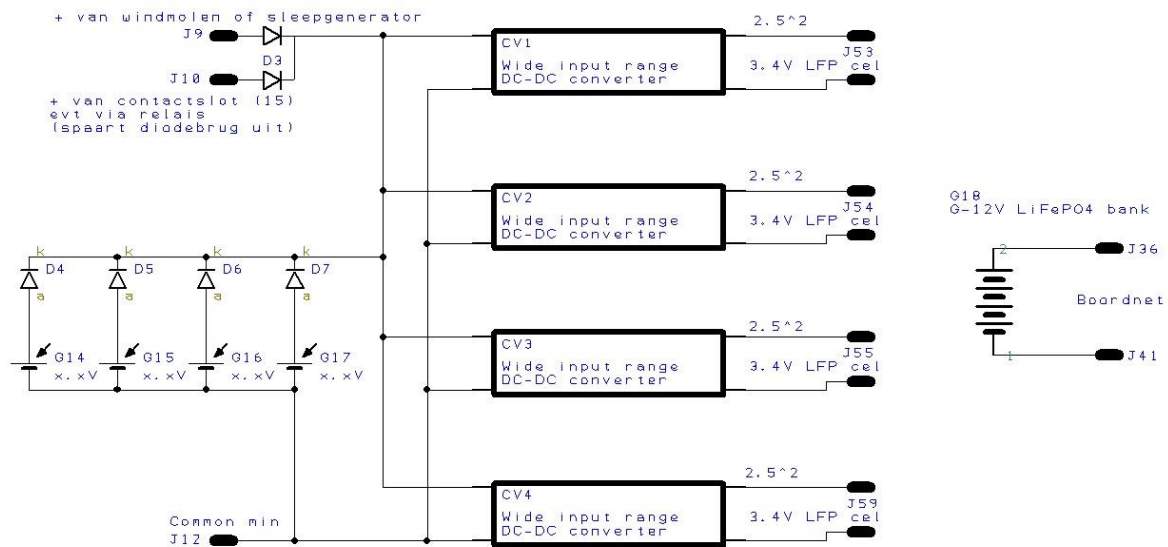
Is er bij volle cellen een 'backflow current' te meten naar de converter? Test dit met een onderbroken voeding en 0V voedingsspanning en met ingeschakelde voeding waarbij de stroom uit de voeding lager is dan 10mA.

Ik wil weten of de converters 'stiekem' de cellen laten leeglopen als er geen lading wordt aangeboden door de converters.

De converters worden op deze manier gebruikt als de 'alles etende lader'.

## De 'Combine Charge Harvester'

In het Nederlands heet een 'combine harvester' een 'maai-dorser'. Omdat er op een boot niets groeit wat te oogsten valt, heb ik de aanduiding van heer WADenWIND dat een converter een harvester systeem volgt, gebruikt en tevens omdat alle mogelijke bronnen van elektrische energie gecombineerd kunnen worden gebruikt, noem ik het systeem 'de combine charge harvester'.



De basis wordt gevormd door 4 DC-DC converters die elk een stabiele 3,4V output geven aan een LFP cel. Door deze stabiele output per cel, kan een LFP cel niet worden overladen en wordt elke cel individueel tot 100% SOC geladen.

De gebruikte DC-DC converters hebben een 'wide input range', dit houdt in dat zij werken indien er eeningangsspanning tussen de 8 en 30V wordt aangesloten. De output van de converters is stabiel in spanning maar varieert in stroom en vermogen.

Door de 'wide input range' zijn er veel bronnen beschikbaar om de converters te voerden. De bronnen mogen niet elkaar 'voeden' en moeten via keer diodes worden aangesloten om -bij zonnepanelen- 'dark current bypass' te voorkomen.

Van de energiebron wordt alleen geëist dat deze tussen de 8 en 18V aan spanning levert (voor de gebruikte Mornsun converters, er zijn ook andere converters met andere specificaties).

Bij het dimensioneren van een dergelijke lader is het convertervermogen bepalend voor de snelheid van laden van de cellen. Is het toegevoerde vermogen –binnen de ingangsspanning range- lager dan de som van het convertervermogen, dan is dit alleen van invloed op de individuele laadstroom van de cellen. De laadstroom van een cel wordt bepaald door het verschil in laadspanning en de celspanning gedeeld door de  $R_i$  van de cel.

De converters zijn als in het schema aangesloten en op de 8 tot 18V bus is één zonnepaneel via de dubbele ingangsdiodes aangesloten en aan de andere anode van de ingangsdiodes is een regelbare voeding aangesloten. Er loopt een ingangsstroom naar de converters (aangegeven door de Ampèremeter van de voeding) en het zonnepaneel wordt in een gunstige positie gebracht. De stroom uit het zonnepaneel komt duidelijk in mindering van de stroom uit de voeding, de stroom vanuit de converters naar de cellen verandert iets, maar de spanning over de cellen is vast op 3,44V. De spanning op de ingang van de converters verandert sterk en is afhankelijk of het zonnepaneel goed is gericht op de zon.

De situatie simuleert het laden van de 4 cellen via een wisselstroomdynamo op 14,1V bij een lopende motor en de toevoeging van energie uit een zonnepaneel op een bewegende boot. In deze simulatie conditie houdt de lader voor 4 cellen zich uitstekend en blijft laden. Bij het uitschakelen van de

voeding en het laden via alleen het bewegende zonnepaneel, zoals bij een boot onder zeil, varieert de ingangsspanning en stroom van de converters sterk (soms slaan de converters af omdat het zonnepaneel onvoldoende vermogen kan aanvoeren om de minimale spanning te halen), maar bij meer toevoeging van vermogen starten de converters weer en laden de cellen weer op.

Bij al deze experimenten raken de accu's toch langzamerhand vol en kan er een antwoord worden gegeven op de vraag: 'loopt er stroom uit de accu naar de converters als deze uitstaan.' Ja, dat is het geval omdat de weerstand voor de afregeling op 3,4V stroom opneemt. Bij een meting met een DMM blijft de laatste digit in het 200mA bereik tussen 1 en 0 springen, er loopt stroom maar niet in een te meten hoeveelheid. Bij het gebruik van de verbinding tussen converter en de cel als shuntweerstand is de waarde van de stroom niet te meten, maar er staat rond de 120uV over deze verbinding maar belangrijker is de polariteit, de stroom die er loopt gaat naar de converter. Het is nog niet duidelijk of deze stroom in de praktijk significant is. Zou er permanent een zonnepaneel op de converters worden aangesloten, dan kan het betekenen dat dit stroomverbruik in rust geheel wegvalt tegen de energie toevoer vanuit het zonnepaneel.

Concluderend:

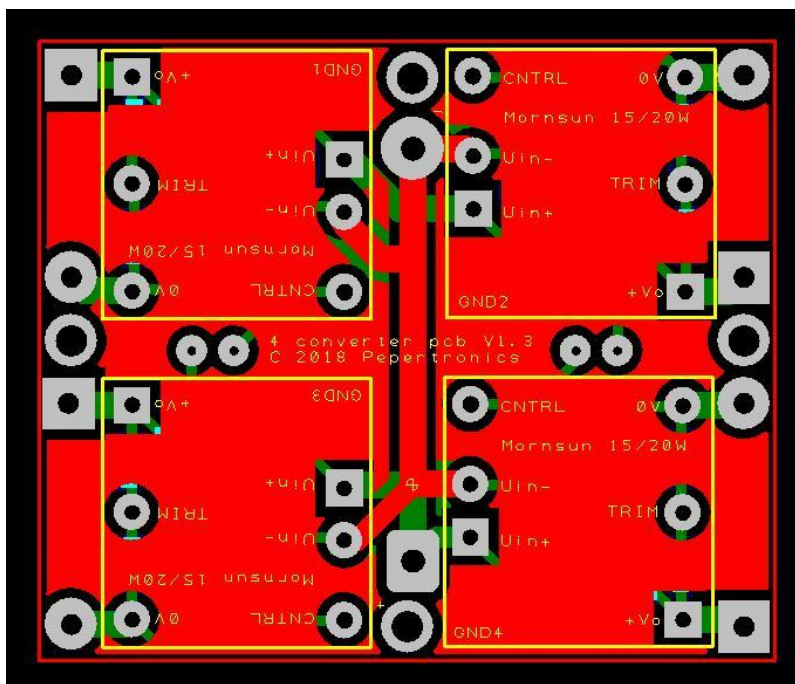
De voedingsbus met keerdiodes werkt zoals het hoort. De bron met de hoogste spanning en de laagste inwendige weerstand levert het meeste vermogen aan de converters.

De vermogensopname door de converters is proportioneel met de geleverde laadstroom (bij gelijke spanning) van de converters.

Is het opgenomen vermogen van de te laden cel zo hoog dat de converter te warm wordt, dan slaat deze af, om na afkoeling weer aan te slaan. De duty cycle van dit proces kan worden beïnvloed door de converter te koelen. Het laden gaat dan wel door, zoiet met onderbrekingen.

Er is een kleine retourstroom vanuit de cel die voornamelijk wordt bepaald door de stroom door de instelweerstand om de converter naar 3,4V te trimmen.

Er loopt pas een stroom van de uitgang naar de ingang van de converter als de isolatiespanning van 5000V wordt overschreden.



Dubbelzijdige print voor vier 15W of 20W converters. Afm 60 x bij 70mm.

## Regels

Wie lang wil doen met zijn dure investering, neemt het volgende in acht:

Serieel Laden:

Laadt de accu niet op boven de 3,4V celspanning. (Het is aangetoond dat dit de levensduur van de cel verkort. Het is aangetoond dat de ongelijke capaciteit van de cellen de oorzaak is van de verkorting van de levensduur.)

Ontlaad de accu niet onder de 2,9V celspanning. (Het is niet aangetoond dat dit de levensduur van de cel verkort. Het is wel aangetoond dat dit opnieuw initieel laden nodig maakt en als dat niet gebeurt is dat op zich aanleiding tot 'onbalans' en het verkorten van de levensduur.)

Bij het van boord gaan is de celspanning idealiter 2,9V (de bewaarspanning). Dit is afgeleid uit een onderzoek naar de bewaarspanning, maar de accu aan boord heeft geen bewaar-status, maar is in gebruik. Er is geen onderzoek gedaan of een verhoogde bewaarspanning bij gebruik op de lange termijn slecht is voor de accu. Op de korte termijn (3 maanden) is er geen effect gevonden in zowel voordelige als nadelige zin.

Bij het weer aan boord gaan geeft een celspanning van 3,4V de maximale energie inhoud van de accu aan. (de maximale spanning van een accu met 100% SOC).

Zet de accu niet bij het verlaten van de boot aan een seriële lader, ook niet als deze geschikt is voor LFP accu's. Schakel ook de toevoer van stroom uit de zonnepanelen naar de seriële lader af. Wil je de accu bij afvaart op 100% SOC hebben en kun je niet zo lang voor de afvaart op de boot aanwezig zijn om een lader aan te sluiten, dan zijn er hele leuke schakelaars voor het inschakelen van de lader, die via de telefoon kunnen worden geactiveerd.

Heb je bij serieel laden geen zekerheid over de actuele capaciteit van de cellen in de accubank, gebruik dan limiters over alle cellen van de bank. Zij voorkomen een te hoge laadspanning per cel en daarmee het overladen van een cel. Heb je een duidelijke indicatie van een cel met een lagere capaciteit, dan is het goed over deze cel een limiter te plaatsen.

limiters nemen heel beperkt vermogen op en ontladen de accu een klein beetje. Als er niet wordt geladen, hoeven er ook geen limiters aanwezig te zijn.

Maak je gebruik van individuele celladers om tot een veilige eind laadspanning van de cel te laden, dan nemen zij geen vermogen op, maar werken ze als 'langzaam'-laders. Door de strikt gelimiteerde laadspanning, zullen zij er langer over doen om een accubank vol te laden omdat de laadstroom ook beperkt is. Bij de afvaart heb je de accu's misschien niet 'vol', maar zeker boven de 30% SOC. Het leveren van energie door de wisselstroomdynamo kan voldoende lading opleveren voor een dag varen (ervaring van een 'LFP accu zeiler').

Dit is tegen het idee de cellen beter zo lang mogelijk op hun 'bewaarspanning' moeten blijven. Het verschil is mogelijk of een accubank 40 of 60 jaar meegaat.

## LFP cellen en de Peukert factor:

De capaciteit van accu's in Ah wordt bepaald door de accu in 20 uur geheel te ontladen met een constante stroom. Dit geldt voor loodzwavelzuur accu's. De Peukert factor is verschillend voor de soort loodzwavelzuur accu. Deze varieert van 1,09 voor AGM accu's, 1,2 voor gel accu's tot 1,25-1,4 voor 'natte accu's'.

De ideale accu heeft een Peukert factor van 1. De Peukert factor is de mate waarin de accucapaciteit afhankelijk is van de hoogte van de ontladstroom. De Peukert factor is niet van toepassing op Li-ion accu's (Bron: Wikipedia).

Uit de metingen in het laboratorium is er bij diep ontladen en bij ontladen met een hoge stroom, geen aanwijzing gevonden dat de capaciteit bij een hoge stroom afneemt, ook niet bij de cellen met een capaciteit onder de nominale waarde. Ik weet het al een paar jaar, maar heb het niet met metingen vastgesteld, de LFP accu gedraagt zich als de ideale accu, zelfs al is de capaciteit onder de nominale waarde. Ik ga even een paar mensen boos maken: "de LFP accu is de ideale accu!"

Heb je een accumonitor voor loodzwavelzuur accu's en wil je die gebruiken voor het monitoren van LFP-accu's, dan zul je de Peukert factor moeten instellen op '1' om de meest betrouwbare (of de minst onbetrouwbare) weergave van de accustatus te geven.

## Monitoring

Beter is het een coulomb-counter te gebruiken. Zolang het test laboratorium de testcellen niet naar 0 Coulomb heeft kunnen brengen, kan een 'coulomb teller' niet op het absolute nulpunt worden geijkt. In de meet- en regeltechniek wil men de analyse apparatuur op tenminste 2 punten controleren: 'Zero' en 'Gain'. Bij een zuurstofanalyser wordt het nulpunt vastgelegd door de sensor in 100% stikstof te houden en dan moet de analyser 0% aangeven. Daarna wordt de sensor in 100% zuurstof gebracht en de gain (digitaal of analoog) bijgesteld tot de analyser 100% aangeeft. Zo hoort het eigenlijk.

Een relatieve ijking op de nominale capaciteit is wel mogelijk, de coulomb teller wordt bij een tot 13,6V opgeladen accu op de nominale capaciteit ingesteld. Er moet rekening worden gehouden dat er na een paar cycli weer opnieuw een ijking moet plaatsvinden en dat een echte 100% nauwkeurigheid nooit gehaald zal worden. Het is de vraag of dat ook noodzakelijk is...

Want er is iets in de praktijk dat ook de uitslag van de coulomb counter vernacheld! Nagenoeg alle coulomb/Ah monitoren werken op basis van een meetshunt in de massakabel van de accu. Door die meetshunt loopt dezelfde stroom die door de serieschakeling van de cellen loopt. Zou je de stroomsterkte en stroomrichting (accu in of accu uit) kunnen bepalen en vermenigvuldigen met de tijd in seconden, dan heb je een coulombcounter gemaakt. Om dat dit wel een heel eenvoudig instrument is, hebben ze er nog wat gadgets aan toegevoegd zoals accuspanningmeting en eventueel -bewaking en een leuke NMEA uitgang om het via het hele boordnet te laten zien. Nog mooier wordt het met een blauwtand, dan kun je overal aan boord op je smartphone zien hoe vol je accu is. "Peper, zit jij op je 24 voeter dan de hele tijd te kijken hoe vol je accu is?" 'Ben je belatafelt! Doutzen Kroes is een enthousiast zeilster en stel je voor dat je die niet op het water ziet langskomen omdat je naar je accuspanning zit te turen!'

Is je accubank uitgerust met limiters, dan wordt bij een volle cel de laadstroom door die limiters kortgesloten en het laadvermogen gedissipeerd in de limiter. De balansstroom loopt daarmee niet door de meetshunt en de lading die verloren gaat in de limiter, wordt niet verdisconteerd door de coulomb counter. Je coulomb counter geeft meer aan dan dat er aan lading in de accu zit.

Heb je een individuele cellader in gebruik om zo je accu te balanceren, dan loopt de laadstroom vanuit die cellader direct in de cel en passeert de meetshunt niet. De lading die door die laders aan het pakket wordt toegevoegd wordt niet door de coulomb counter geregistreerd. Je coulomb counter geeft minder aan dan dat er aan lading in de accu zit.

Bij gebruik van een coulomb counter per cel is de invloed van de limiter of de individuele cellader automatisch in de meting verdisconteert. Dan heb je ook mooi weer 4 metertjes erbij in de cockpit!

Zij die 4 (of 8 of 16) cellen met limiters of individuele celladers willen bewaken met 1 coulomb counter, moeten rekening houden met meer dan normale onnauwkeurigheid in de meting.

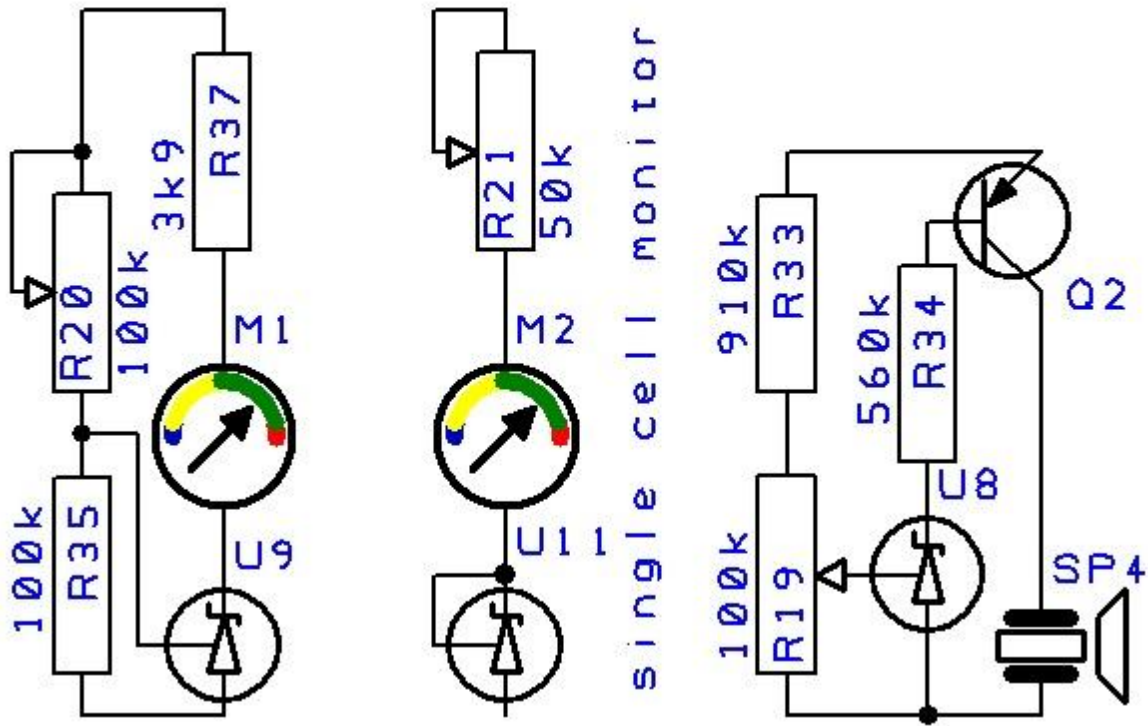
Er zijn andere mogelijkheden:

De celspanning in het gebied tussen 30 en 100% SOC van een LFP cel is zeer constant en loopt zeer regelmatig op tussen 3,0 en 3,4V. Hoewel de lineariteit in dit traject wel niet perfect zal zijn, zal 3,1V heel dicht in de buurt komen van 45% SOC, 3,2V ongeveer overeenkomen met 60% SOC, 3,3V wel ongeveer 75% SOC zal zijn en 3,4V echt 100% SOC is. Komt de spanning boven de 3,4V per cel, dan zou er een overlaad alarm getriggerd kunnen worden. Dit alarm zal alleen afgaan als er uit een bron wordt geladen die niet de maximale laadspanning respecteert. Bij 3V per cel zou een soort aanduiding van 'reservestand' kunnen knippen. Wordt de 2,6V gehaald dan zou een pieper een dermate irritant geluid moeten maken dat je van pure ellende de verbruikers gaat uitschakelen. Je kunt ook automatisch de hele accu uit het circuit halen, maar hoe zendt je dan je 'PAN PAN' melding uit?



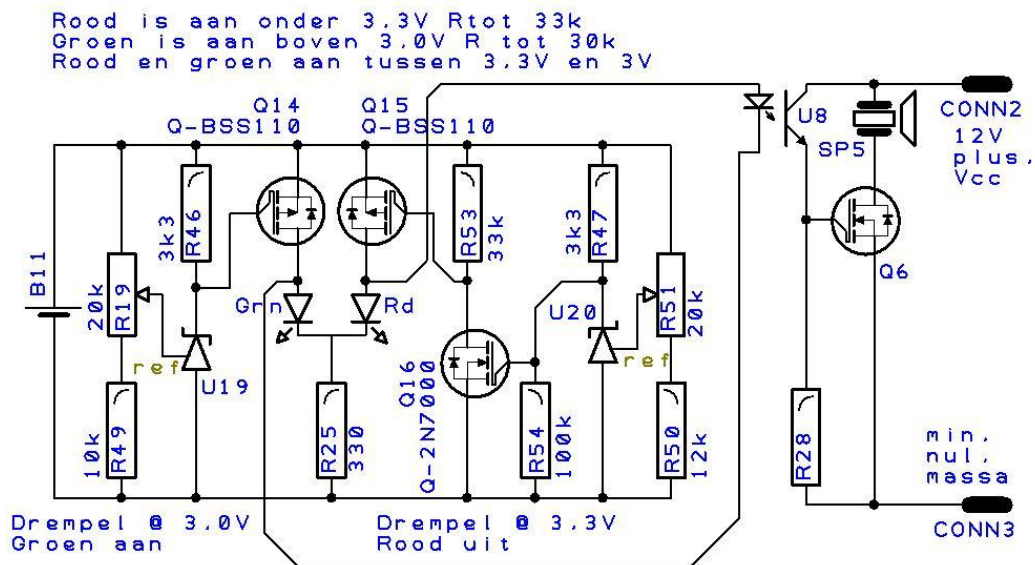
Voor een eenvoudige monitor kun je een 5V draaispoelmeter gebruiken waarbij je de eerste 10V onderdrukt en tussen 10 en 15V gebruikt om van een 12V accubank de SOC in real time weer te geven.

## Budget monitoring



## Super simpel monitoren met LED's

Bij individueel laden van een cel in een serieschakeling is het passend de cellen ook individueel te monitoren. Dat kan kostbaar worden bij een 12V systeem van 4 cellen, maar wordt echt prijzig bij 24V of 48V systemen. Dus het moet goedkoop en simpel zijn en elke cel moet zijn eigen monitor krijgen.



## Wat moet je echt weten?

Komt de cel aan de 3,4V als deze vol zit?

Bij een individuele cellader is dat altijd zo en het monitoren of de cel wel op 3,4V komt is niet nodig. De LED licht groen op.

Is de celspanning tussen de 3 en 3,4V?

De cel is gebruiksklaar. Laden in deze situatie kan, maar is niet noodzakelijk. De signalering LED licht oranje geel op.

Is de celspanning 3V en lager, dan is laden aanbevolen om boven de minimale spanning te blijven. De LED licht rood op. Optioneel kan er een alarm klinken of de toevoer van stroom naar niet kritische apparatuur kan worden onderbroken.

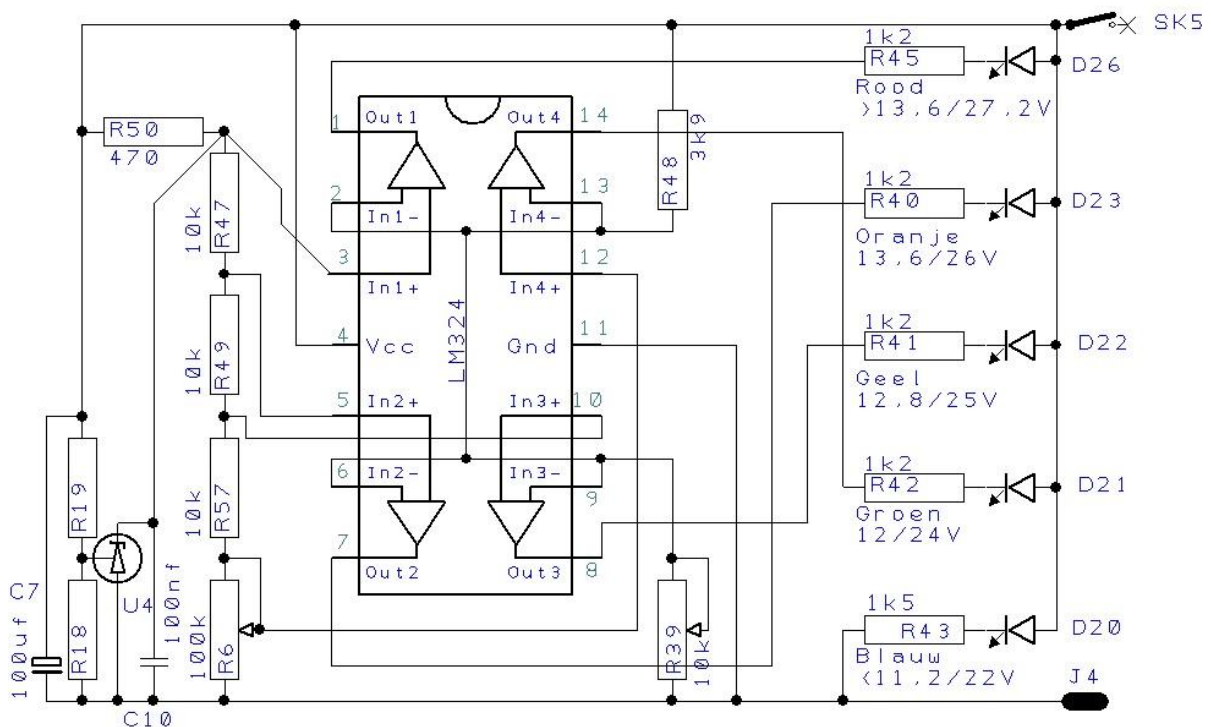
Zou één cel deze spanning bereiken en de anderen nog boven de 3V zijn, dan is er een groot capaciteitsverschil tussen de cellen. Laden is dan de oplossing om de cellen binnen de 30 en 99% SOC te gebruiken.

Celspanning onder 3V

Celspanning van 3 tot 3,4V

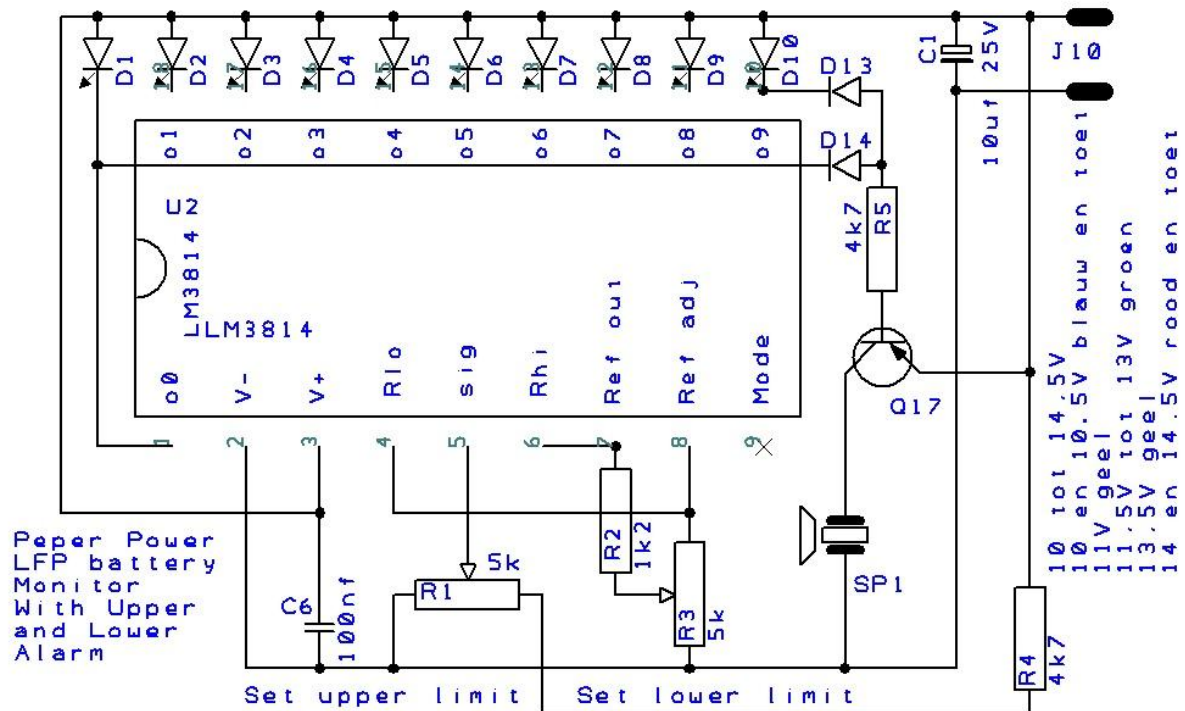
Celspanning van 3,4V

Je kunt ook een 4 voudige opamp gebruiken om 5 ledjes aan te sturen voor vol, 3/4, halfvol, 1/4 en reserve weer te geven. Giet een dergelijke schakeling in epoxy en het is waterproof.



Er is ook een kant en klaar IC dat 10 ledjes kan aansturen in de vorm van een thermometer en daarmee kan het gebied tussen 3,0V en 3,4V in 10 stappen worden verdeeld. Dat geeft een SOC meter met een redelijk hoge resolutie. Het ledje voor 'vol' kan tevens een overlaadalarm triggeren en

het ledje voor 'reserve' kan een 'zuinig aan' alarm triggeren.



Niet erg chique, maar wel heel effectief in het gebied waar het om gaat en wie weet is het wel nauwkeuriger dan een coulomb counter die door limiters en single cell chargers voor de gek wordt gehouden.

### Coulomb counting bij individueel te laden cellen.

De meeste accubatterijen worden serieel geladen zodat je ze tijdens het laden ook kunt gebruiken. De opgeslagen en weer afgenomen capaciteit kan worden gemonitord door een Coulombcounter. Hiermee zie je dan hoeveel lading er in en uit de accu gaat. Doordat een loodzwavelzuur accu een verlies heeft in de vorm van dissipatie van warmte door de inwendige weerstand en een verlies door elektrolyse van het elektrolyt, zal er meer lading in de accu moeten worden gestopt dan dat er uit kan worden gehaald.

Het verlies door dissipatie van warmte is afhankelijk van de laad en de ontlad stroom en de Duitser Peukert heeft hiervoor een algoritme uitgevonden. In het kort komt het hierop neer dat de toegevoerde lading gelijk is aan de afgegeven lading maal de Peukert factor bij een bepaalde stroomsterkte. Varieer je de stroomsterkte dan zal het Peukert effect ook variëren. Bij een hoge stroomsterkte is het verlies in de accu hoog en bij een lage stroomsterkte is deze laag. Naarmate de accu 'verslijt' zal de Peukert factor ook veranderen (lees verslechteren) en zal er veel meer lading in een 'oude accu' worden gestopt dan dat er uit wordt gehaald. Voor loodzwavelzuur accu's in een stationaire toepassing met een vaste ontlad stroom, is de Peukert factor een zinvolle reken tool.

Op een boot of in een kampeerauto kan de ontlad stroom van de service accu sterk variabel zijn en wordt de Peukert factor meestal ingesteld voor de gemiddelde ontlad stroom. Voor die Coulombcounters waar de Peukert factor kan worden ingesteld, betekent dit dat ze door de instelling van een 'gemiddelde' waarde voor de Peukert factor, de Coulombcounters ook maar een 'gemiddelde' nauwkeurigheid hebben.

De Peukert factor voor loodzwavelzuur accu's ligt tussen de 1,1 en 1,6 (met nog een paar digits achter de komma). Een waarde van 1,1 geldt voor AGM en sommige gel accu's en de waarde van 1,3 tot 1,6 voor de 'klots accu's'. Een nieuwe 'natte' accu kan beginnen met een Peukert factor van 1,08 en bij zijn 'end of life' kan de Peukert factor zijn opgelopen tot 1,7. Meestal heeft het 'baasje' van de accu dan zo genoeg van de slechte prestaties van de accu dat deze wordt vervangen.

Deze publicatie gaat over LFP accu's en het bovenstaande is alleen voor de situatieschets bij ombouw naar LFP accu's. De LFP accu benadert de ideale accu dermate, dat de Peukert factor voor dergelijke accu's op de 'ideale waarde' wordt gesteld, te weten '1,00' (of nog een 0 erachter als je dat wilt). Bij een op/ontlaad rendement van 95% voor een LFP accu, past een Peukert factor van 1,052. Hierbij wordt afgezien van de invloed van de stroomsterkte bij laden en ontladen. Deze invloed verhoogt de Peukert factor, maar dit is niet reëel voor LFP cellen en valt nadeliger uit dan de werkelijkheid. Daarom wordt geadviseerd voor LFP cellen de Peukert factor op 1,000 te stellen voor de meest accurate weergave.

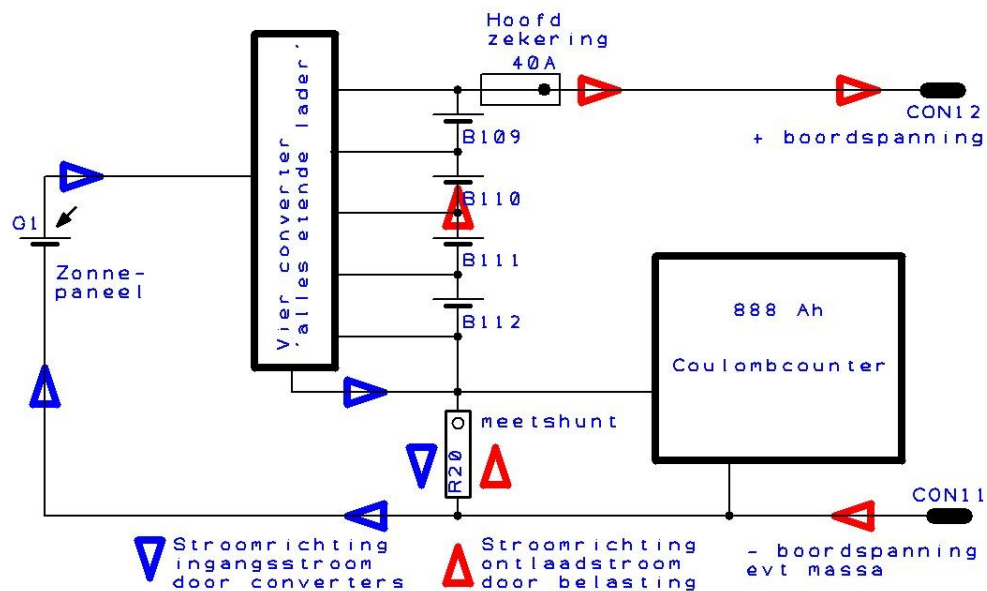
Het op/ontlaad rendement van LFP accu's is gedurende de leeftijd van de accu stabiel. De levensduur van een LFP accu wordt op uitsluitend de afname van de capaciteit gewaardeerd, er zijn nog geen cijfers over toename van dissipatie in de vorm van warmte binnen het bereik van 20% tot 100% SOC naarmate de accu ouder wordt (geldt voor LFP accu's, niet voor LCM accu's). Heeft u een service accu met LFP cellen en laadt u die serieel via een Coulombcounter, waarvan u de Peukert factor kunt instellen, dan is de waarde van 1,000 een goede waarde om op de Coulombcounter in te geven. Zou de Coulombcounter na een cyclus nog capaciteit 'over hebben', dan kan met het aanpassen van de waarde voor de Peukert factor de 'boekhouding' kloppend worden gemaakt. Heeft de Coulombcounter een temperatuur sensor, dan wordt het moeilijker omdat LFP cellen nauwelijks in temperatuur variëren bij laad en ontlad stromen tot 0,5c en de Coulombcounter hier wel rekening mee houdt. Dit zou de nauwkeurigheid van de meting kunnen verlagen.

Een individuele cellader werkt buiten het circuit van de Coulombcounter. De lading die de celladers uiteindelijk in de accu stoppen, kan niet via een shuntweerstand worden gemeten, want de laadstroom loopt niet door deze shuntweerstand. De ontlad stroom loopt wel door deze weerstand zodat de lading die de accu verlaat wel door de Coulombcounter wordt gemeten. Heeft u een cumulatieve Coulombcounter die als een boekhouder credit en debet bijhoudt, dan zal deze na verloop van tijd gaan 'schreeuwen' dat de accu leeg dreigt te raken omdat er geen lading bijkomt die via de shuntweerstand wordt aangevoerd. Voor een aantal potentiële 'overstappers' van loodzwavelzuur accu's naar LFP accu's met individuele celladers is dit een reden om niet over te stappen, 'de (dure) Coulombcounter doet het dan niet'. Voor hen heb ik goed nieuws!

De individuele celladers werken met DC-DC converters. Voor elke cellader geldt dat de aangeboden gelijkspanning/stroom tussen 9 en 36V wordt omgezet naar een spanning van maximaal 3,4V en bij de 30W uitvoering een maximale stroomsterkte van 9A. De omzetting heeft een rendement van 80% tot 90% en dit is afhankelijk van de hoogte van de aangeboden spanning. Bij de nominale spanning van 24V is het rendement van de converters rond de 90% in vollast.

De celladers worden parallel aangesloten en er is één gemeenschappelijke toevoerende ader en één gemeenschappelijke afvoerende ader. De afvoerende ader kan op de 'accukant' van de shunt worden geplaatst en zo kan de stroom en de stroomrichting worden gemeten. Dan is er informatie over de stroom die naar de converters loopt om de cellen te laden (blauwe pijltjes). Stroom x tijd = lading en

de lading naar de converters kan worden gemeten en wordt via de shunt in mindering gebracht op de lading die aan de belasting wordt geleverd. Dit gaat automatisch omdat in de meetshunt de stroom naar de converters tegengesteld aan de belastingsstroom (rode pijltjes) uit de accu loopt. Lading vanaf de output naar de input van de converters is er niet, er is niet eens een elektrische verbinding die lading kan transporteren (Galvanische scheiding), dus dat zit wel goed.



Dit is ontdekt in het meetlab, waar de Victron Coulombcounter BMV600 wordt gebruikt in de testen van de LFP cellen. Door de stroom voor de ingang van de converters in tegengestelde richting ten opzichte van de 'ontlaad stroom' door de shunt te laten lopen ontstaat een vereffening van de lading voor opladen en ontladen en kunnen we gaan 'boekhouden'.

In eerste instantie werd met de Coulombcounter alleen de ontlading gemeten om de capaciteit van de bank te monitoren na ontladingen met verschillende stroomsterkten. Daar zaten onverklaarbare verschillen in, totdat werd ontdekt dat de Coulombcounter een programmeerbare Peukert factor had en dat deze op 'loodzwavelzuur accu' stond. Ja, dan geeft een ontlading met 50A heel andere resultaten dan een ontlading met 10A, want het verlies van energie in een loodaccu is bij 50A groter dan bij 10A. Bij LFP accu's is dat verschil veel kleiner omdat het verlies op zich al veel kleiner is. De cellen worden individueel geladen via 20W DC-DC converters, de 'boekhoud functie' van de Coulombcounter kon daarom niet worden gebruikt. De Coulombcounter verwerkt de ingaande en uitgaande lading in 'één boekhouding' van de lading. Dit houdt in dat de ingaande Coulombs van de converters worden verrekend met de uitgaande Coulombs van de belasting. Dat levert een meetfout op. Voor de uitgaande Coulombs geldt de Peukert factor 1 en dat is wel accuraat. Voor de ingaande Coulombs via de converters wordt de bruto waarde gemeten van vóór de converters. Die converters hebben geen rendement van 100% of 95%, maar van 80 tot 90%. Uiteindelijk wordt lading verbruikt om de converters te laten werken en is er verlies in HF transformator kernen van de converters. Dit maakt dat er minder lading in de cellen komt, dan dat er via de ingang van de converters wordt opgenomen. De boekhouding loopt weliswaar minder uit de pas dan bij het weglaten van de lading die de individuele celladers aanbrengen, maar nauwkeurig is het niet. Dit wordt ook nog eens versterkt door het verschil in spanning tussen de 'oplaad kant' en de 'ontlaad kant'.

Dan is het mooi als de Peukert factor kan worden ingesteld.

Bij individueel laden van de cellen is er door het verlies in de converters een verlies bij het laden aanwezig. Bij het laden met een conversie rendement van gemiddeld 85% (en 15% verlies) voor de converters past een Peukert factor van  $100/85 = 1,176$ .

Bij het ontladen is er een rendement van 95% (en een verlies van 5%) en past een Peukert factor van 1,052.

Voor de Coulombcounter moet in dit geval een gemiddelde voor de waarde van de Peukert factor worden ingegeven om de invloed van de verliezen te compenseren. Zo zou de Coulombcounter bij instelling van 1,050 de werkelijkheid redelijk moeten benaderen bij het gebruik van individuele celladers voor LFP accu's.

Er wordt hierbij geen rekening gehouden met de invloed van de stroomsterkte voor laden en ontladen op de Peukert factor (dat hoeft ook niet bij LFP cellen) maar als er een Peukert factor wordt ingevoerd (anders dan 1,000) heeft de stroom die de coulombcounter meet, wel invloed op de totale berekening en daarmee op de nauwkeurigheid van de 'boekhouding' van de Coulomb counter. Stel je de Peukert factor op 1,000, dan wordt er geen rekening gehouden met de invloed van de laad en ontlad stroom in de verliezen. Dat is passend voor LFP accu's. Zij kennen bij elke vorm van laden een minimaal verlies vanwege de lage inwendige weerstand.

Worden we nu belazerd door de Coulombcounter of belazeren we onszelf door de Peukert factor van de Coulombcounter aan te passen... Coulombcounters in 'boekhoudkundige' monitoring van de lading zijn notoir onnauwkeurig door de vele variabelen die maar ten dele kunnen worden beheerst. Veroudering van de loodaccu is daar één van.

In het manual van de gebruikte Coulombcounter wordt dit aangegeven en in hetzelfde manual wordt geadviseerd met enige regelmaat de Coulombcounter opnieuw in te stellen en de waarde van de Peukert factor aan te passen. De Coulombcounter kan door te 'spelen met de Peukert factor' op de werkelijkheid worden aangepast en er is geen sprake meer van 'nauwkeurigheid'. Een technicus spreekt dan niet meer over een meter maar over een indicator.

Er zijn Coulombcounters die per cyclus zichzelf opnieuw instellen aan de hand van het verloop in de vorige cyclus. Zo wordt de boekhouding dan kloppend gemaakt, maar het blijft 'creatief boekhouden'. Voor een 'straight' technicus is dat vloeken in de kerk, voor de meer pragmatische zeiler is dit acceptabel.

Gebruikte Coulombcounter: Victron BMV600

Gebruikte LFP cellen: capaciteit variërend tussen 120 en 160Ah om 'onbalans door capaciteitsverschil' te veroorzaken.

## Dieper ontladen

Er is nog een onbeantwoorde onderzoeksvraag: "Hoe gedragen LFP cellen als ze worden diep ontladen."

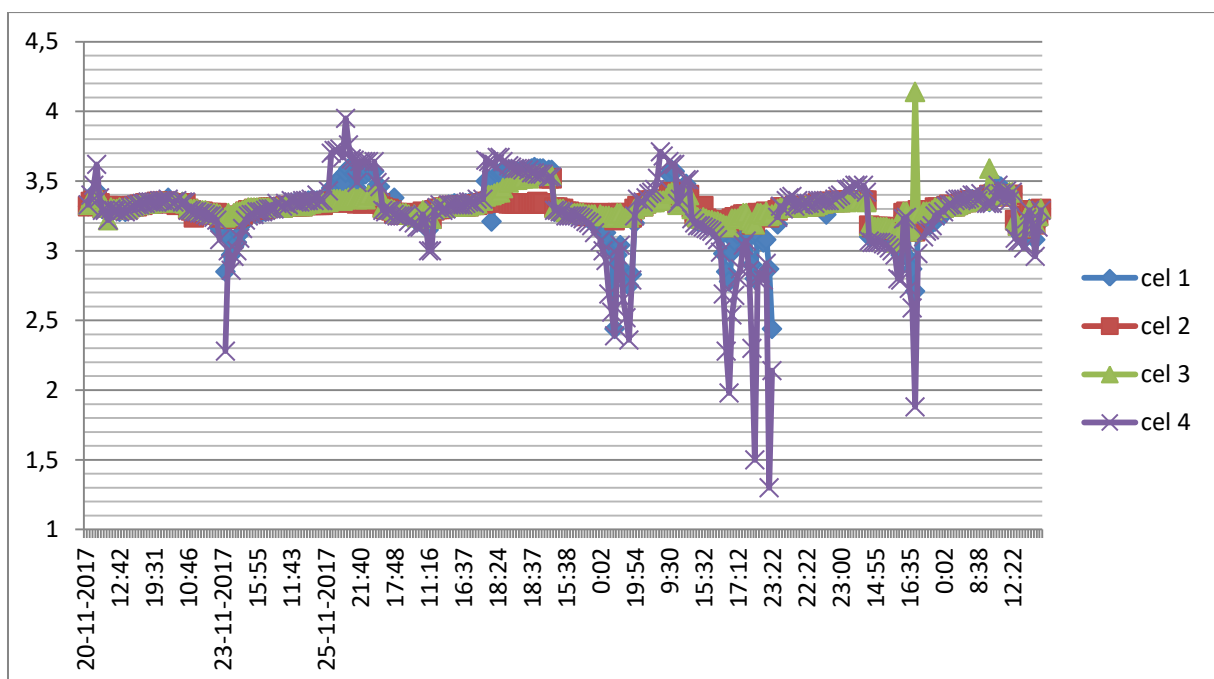
Het is logisch dat de cellen die de kleinste capaciteit hebben ook het diepst ontladen zijn. Zij zijn alle lading kwijt. Cel 4 heeft van alle cellen de laagste capaciteit en er wordt in een dag bekeken of de cellen zich door herverdeling van de ladingsdragers op de anode zich herstellen. Dit is nauwelijks het geval.

Ik geef bij het lab aan dat het laden misschien een soort 'hindernis' heeft bij een spanning van 1 tot 1,5V en dat de laadstroom dan wel eens sterk zou kunnen teruglopen. Na een dag belt het lab weer op en ze zeggen dat wat ik voorspelde ook precies gebeurde. Ze hebben de spanning verhoogd om de laadstroom een beetje 'op peil' te houden. Volgens wat ze zo zien speelt hier toch een elektrochemisch proces. Daarvan geef ik weer aan dat dit eigenlijk alleen met loodzwavelzuur accu's het geval is en niet bij Li-ion accu's. Het zou wel een elektrofysisch proces kunnen zijn. 'What ever' antwoord het lab, 'maar we hebben nog wel een nieuwtje voor je... Bij het verhogen van de laadspanning worden de cellen met de laagste capaciteit warm!' Dat is inderdaad nieuws en ook onverwacht. De cellen komen niet boven de 40°C, maar zijn voelbaar warmer. Er is niet alleen een piek in de gevraagde laadspanning, er wordt ook een groot deel van het laadvermogen in warmte omgezet.

Met een lage laadstroom worden de cellen weer naar 3,4V geladen en dat duurt een paar dagen. Onder de 2,8V strompelen de 'kleine cellen' er in klemspanning een beetje achteraan, om boven de 3V de balans weer terug te vinden en zich gelijkmatig met de andere cellen naar 3,4V te laden. Het lijkt erop dat er geen aantoonbare schade is veroorzaakt door de '0' ontlading.

Geeft dat schade aan de capaciteit of heeft het geen gevolgen. Wat gebeurt er als de cellen worden ontladen met 0,8c.

De diepontlading testen resulteerden in de volgende gegevens:



Bij elke diepontlading (en ook bij elke overlading) treedt er verschil in de celspanningen op. Het opvolgende laden (maar ook het opvolgende ontladen) geeft zonder uitzondering 'auto balancing' van de cellen.

Cel 2 heeft de hoogste capaciteit. Dit blijkt uit de constante celspanning bij laden en ontladen.

Cel 3 heeft een iets minder hoge capaciteit. Er is meer variatie in de celspanning bij laden en ontladen, hetgeen de grenzen van 'vol' en 'leeg' aangeeft.

Cel 1 geeft nog meer spanningsvariatie in het traject tussen vol en leeg en moet nog minder capaciteit hebben dan cel 3 en cel 2.

Cel 4 heeft de minste capaciteit. Deze cel krijgt de grootste ladingswisselingen te verwerken en daarmee ook de grootste klemspanning wisselingen.

De door de fabrikanten aangegeven ondergrens van de spanning (tussen 2,8V en 2,0V) wordt door de laboratorium tests met LFP cellen nergens bevestigd, niet in geval van langzaam ontladen of in geval van snel ontladen. In het laboratorium laten alle cellen zich vanaf 1,5V weer 'normaal' opladen. Er zijn geen aanwijzingen dat er capaciteitsverlies van de cellen optreedt na deze diep-ontladingen, voor beschouwingen over invloed op de levensduur zijn er onvoldoende gegevens, maar het feit dat er per incidentie geen afname van de capaciteit plaatsvindt is een aanwijzing dat de afname van de levensduur op langere termijn niet heel groot zal zijn, als deze er al zijn.

Uit de tests komt naar voren dat LFP cellen na te zijn ontladen tot 1,5V zich normaal herstellen en dat de diep-ontlading grens voor een 12V LFP accu installatie op 6V kan worden ingesteld zonder dat dit schadelijk is voor de accu's. De reset van deze diepontlading bescherming zal bij ca 10V moeten plaatsvinden of handmatig. Er moet enige hysteresis zijn omdat de cellen zich tenderen te herstellen tot 2V per cel of 8V voor een 12V installatie. De cellen zelf laden zich gewoon weer op naar de gebruikscapaciteit en balanceren zich tijdens het opladen zelf.

"LFP cellen... die zijn niet kapot te krijgen!"

## Get down deeper and down

Status Quo.

Het is het meetlab gelukt de LFP cellen echt 'plat' te krijgen. Daar was wel een procedurele/protocollaire fout voor nodig. De veiligheidsregels in het lab laten het niet toe dat er proeven doorlopen zonder aanwezigheid van tenminste één laborant.

Dus werd vrijdagavond alle meetapparatuur rond de LFP cellen uitgezet en afgekoppeld voor het weekeinde. Bij het opstarten op maandag werd uitgevonden dat de belastingsweerstand op de accu was blijven zitten... Dat was ruim 48 uur belasting en de eerste meting gaf aan dat er in cel 1 en cel 4 nog een restspanning aanwezig was in de grootteorde van 20mV. Hoewel de definitie van 'leeg' niet van te voren was bepaald (wat wel hoort in een goed onderzoek!), vond men in het lab dat dit toch wel echt als 'leeg' kon worden gedefinieerd.

Als eerste werd gevraagd of het lab nu de capaciteitsmeting moest uitvoeren op de lege cellen. Ik vond het belangrijker om te zien of er op deze manier irreversibele schade aan de cellen zou zijn ontstaan en gaf voorrang aan opladen om te zien of dat nog mogelijk was, dan wel dat de cellen naar het klein chemisch afval konden. Wel wilde ik dat de laadstroom werd geturfd om te zien hoeveel Ah 'erin' zou gaan als inderdaad de 3,4V celspanning weer zou worden bereikt. Uit het lab kwam de opmerking dat dit het best kon worden vergeleken met een initiële lading, zodat ze wilden laden met

4V en een stroombeperking van 10A.

Dit werkte niet omdat bij het bereiken van ca 9% SOC er een hele hoge spanning nodig was om nog enige lading in de cel te brengen. Dit punt kenmerkt zich door een piek in de celspanning (die hier ook de laadspanning is). Om nog enige lading in de cel te 'prakken' moest er een spanning van 4V worden aangelegd. Een constante stroombron met een maximale spanning van 3,5V zou dit niet halen. In het artikel verdedigde de firma Winston de keuze voor 4,2V als initiële laadspanning. Doordat Winston  $\text{LiYFePO}_4$  cellen levert, zou deze curve uniek kunnen zijn voor de door hen gebruikte technologie waarbij Yttrium aan het anodemateriaal wordt toegevoegd.

Er ontstond nu de mogelijkheid een onderzoeksvraag toe te voegen: 'kennen de andere LFP technologieën ook een dergelijke spanningspiek onder de 20% SOC?'

Het grillige verloop van de laad/celspanning van 0% tot 20% SOC geeft de reden weer waarom de meeste fabrikanten ervoor kiezen de cellen niet onder de 20% SOC te laten komen. Het 20% SOC punt ligt bij ca. 2V. Is dit de minimaal toegestane spanning voor een LFP cel en gaat deze daaronder definitief kapot?

Ik had zelf mijn 100Ah  $\text{LiYFePO}_4$  cellen ooit ontladen tot 1,9V per cel om ze daarna via een 35Wp zonnepaneel weer heel langzaam vol te laden en dat verliep prima gedurende drie maanden en zonder een duidelijk capaciteitsverlies. Ik vermoedde hierdoor dat de cellen veel beter tegen diepontlading zouden kunnen dan dat door de fabrikanten werd opgegeven.

Even een boude bewering: de 2,1V ondergrens wordt aangehouden om de cellen uit het 'vagevuur' van het gebied tussen de 0 en 2V weg te houden.

Eens zien of hoe een cel reageert in dat gebied...

Het is logisch dat de cellen die de kleinste capaciteit hebben ook het diepst ontladen zijn. Zij zijn alle lading kwijt. Cel 4 heeft van alle cellen de laagste capaciteit en er wordt in een dag bekeken of de cellen zich door herverdeling van de ladingsdragers op de anode zich herstellen. Dit is nauwelijks het geval.

Ik geef bij het lab aan dat het laden misschien een soort 'hindernis' heeft bij een spanning van 1 tot 1,5V en dat de laadstroom dan wel eens sterk zou kunnen teruglopen. Na een dag belt het lab weer op en ze zeggen dat wat ik voorspelde ook precies gebeurde. Ze hebben de spanning verhoogd om de laadstroom een beetje 'op peil' te houden. Volgens wat ze zo zien speelt hier toch een elektrochemisch proces. Daarvan geef ik weer aan dat dit eigenlijk alleen met lood-zwavelzuur accu's het geval is en niet bij Li-ion accu's. Het zou wel een elektrofysisch proces kunnen zijn. 'What ever' antwoord het lab, 'maar we hebben nog wel een nieuwtje voor je... Bij het verhogen van de laadspanning worden de cellen met de laagste capaciteit warm!' Dat is inderdaad nieuws en ook onverwacht. De cellen komen niet boven de 40°C, maar zijn voelbaar warmer. Er is niet alleen een piek in de gevraagde laadspanning, er wordt ook een groot deel van het laadvermogen in warmte omgezet.

Met een lage laadstroom worden de cellen weer naar 3,4V geladen en dat duurt een paar dagen. Onder de 2,8V strompelen de 'kleine cellen' er in klemspanning een beetje achteraan, om boven de 3V de balans weer terug te vinden en zich gelijkmatig met de andere cellen naar 3,4V te laden.

Het lijkt erop dat er geen aantoonbare schade is veroorzaakt door de '0' ontlading.

Toch doet er zich een verandering voor die op schade wijst: Bij een dag niet aan de lader valt de kleinste cel terug van 3,5V naar 3,3V terug zonder belast te zijn geweest. Dat was eerder niet het geval. Er is iets veranderd, maar het is niet duidelijk wat. In de formule  $Q = C \times U$  is de U lager

geworden en dat duidt op verlies van capaciteit.

Het lab gaat door met cyclisch laden en belasten om te zien of de cel de neiging heeft zich te repareren of dat het hier om een permanente schade gaat.

Voorlopig moet het ontladen naar '0' gevolgd door 2 dagen kortsluiting gezien worden als 'beschadigend' voor de cel. Dit levert duidelijk schade op ten opzichte van ontladen tot 1,5V. Een diepontladingsbeveiliging voor LFP cellen zou op 1,5V moeten worden ingesteld om beschadiging te voorkomen. Voorlopig! Zou de cel zich met cyclisch laden/ontladen weer herstellen... dan is deze werkelijk niet kapot te krijgen.

## LFP cellen na diep ontlading

De cel met de laagste capaciteit is 'verkoeverd' tot het beeld van voor de diepontlading. Dit heeft twee cycli geduurd, maar na die twee cycli is er geen afwijkend gedrag te zien ten opzichte van het gedrag van de cel voor de diepontlading. Bij het eerste laad traject werd de cel in serie geladen en kwam de cel weer keurig in balans met de anderen op 3,4V.

Na weer ontladen, wordt de cel nu individueel opgeladen met een DC-DC converter van 20W, 3,3V die door een externe regeling met een weerstandje is afgeregeld op 3,44V. De converter heeft een ingangsspanning bereik van 9 ~ 36V en wordt gevoed door een regelbare voeding.

Na enige tijd bereikt de cel 3,38V en valt de laadstroom terug naar 0mA behalve als de spanning op de cel wordt gemeten want dan wordt de stroom door de meter als laadstroom gezien. Deze situatie wordt 2 dagen gehandhaafd en blijft stabiel.

Concluderend:

LFP cellen kunnen heel diep ontladen worden (tot kortsluiting aan toe) zonder merkbare afname van capaciteit. De tijd van het ontladen zijn door een kortsluiting of doorlopende belasting (laten branden van het ankerlicht) nadat de cel onder de 1,5V is gekomen, is nu gesteld op 2 dagen en dan is de cel weer te herstellen 'naar het oude beeld' (verkoeveren in oud Nederlands).

Hierbij moet worden opgemerkt dat voor dit herstel in het traject van 0V naar 1,5V een spanningspiek nodig is om de cel weer normaal te laten werken.

Als de celspanning gelijk is aan de laadspanning wordt de laadstroom 0 of in elk geval onmeetbaar laag.

## Het herstel van een ontladen LFP-cel

De geheel ontladen cel is in eerste instantie weer geladen zonder een capaciteitsmeting om te zien of deze zich zou herstellen. Zou de cel zich niet herstellen, dan is de meetwaarde van een capaciteitsmeting heel makkelijk: 0Ah.

De betrokken cel is weer geladen tot 3,4V en blijft netjes op spanning. Voorafgaand aan de test is er een berekening gedaan naar de capaciteit van de cel. De formule daarvoor wordt gevormd door de stroom te turven gedurende de tijd van de ontlading van 3,4V (100% SOC) en het bereiken van 3,0V over de cel (30% SOC). Zou de cel de nominale capaciteit van 180Ah hebben, dan ligt tussen 3,4V en 3,0V ongeveer 70% van die nominale capaciteit en dat is 126Ah, met de nadruk op ongeveer.

Bij het volgen van een ontlading en het meten van het capaciteitsverbruik door een belastingsweerstand blijkt deze capaciteit op 80Ah te komen in dit gebied. Teruggerekend houdt dit in dat de cel nog maar 120Ah aan capaciteit heeft. Dit werd berekend voordat de diepontlading werd begonnen.

Twee cycli na de diepontlading wordt weer een capaciteitsberekening gedaan. De cel is ontladen via een 'current sink' die een constante stroom van 45A door de belastingsweerstand laat lopen. De

ontladingstijd is 2 uur tussen de 3,4V en 2,8V. De SOC bij 2,8V is ca 25% en zou voor de nominale waarde van 180Ah van de cel 45Ah bedragen maar zou voor deze cel van 120Ah 30Ah bedragen. Bij een belastingsstroom van 45A in twee uur wordt er 90Ah aan lading onttrokken en blijft er nog 30Ah over. Dit betekent dat de cel 90Ah plus de restcapaciteit van 30Ah kan opslaan en dat is gelijk aan de capaciteit bepaling (je mag dat geen meting noemen, want dat is het officieel niet) die er voor de diepontlading is gedaan. Er is daarmee geen capaciteitssteruggang van de cel opgetreden. Nu voldoet de cel niet meer aan de oorspronkelijke spec's en daarmee is de meting niet representatief, maar er kan wel worden geconcludeerd dat een totale ontlading van een 'kapotte' LFP cel, deze de cel niet nog 'kapotter' maakt.

Het lijkt dus toch zo te zijn: LFP cellen zijn niet kapot te krijgen of in elk geval niet 'kapotter' dan deze al was. Ja,  $n=1$  en wie er aan twijfelt mag zelf een goede LFP cel tot 0 ontladen om het tegendeel aan te tonen. Verder bevestigt deze bevinding de opmerking van een LFP accu eigenaar waarbij hij aangeeft dat zijn LFP accu's na de diepontlading beter waren dan voor de diepontlading.

De cellen worden nu verder ingezet bij metingen met betrekking tot de individuele cellader. Het verschil in capaciteit zal niet worden opgeheven omdat dit juist de zwaarste opgave oplevert voor de cellader.

Het teruglopen in capaciteit van LFP accu's is meestal het gevolg (maar niet altijd) van het losraken van de 'pouches' van de 'bus' in de cel. De betrokken cel is de cel waarbij er een verschil in spanning werd geconstateerd indien er op een andere plaats op de accupool werd gemeten. Deze accupool blijkt los te zitten. Dit werd ontdekt bij het afwisselend parallel en in serie zetten van de cellen. Het kan zijn dat het bewegen van de bus-rail door de druk van de meetpen, het slechte contact tussen pouch en bus maakt en verbreekt en dit zou de verklaring kunnen zijn voor de wisselende spanning. We gaan dit pas weten na een 'LFP cel autopsie'.

### Bevindingen en conclusies

Een LFP accu bestaande uit in serie geschakelde cellen balanceert zichzelf bij opladen en ontladen. Onbalans wordt gevormd door verschil in capaciteit van de cellen.

Onbalans bij serieel opladen leidt tot overladen van de cel ( $U_{cel} \geq 3,4V$ ). Dit overladen veroorzaakt temperatuursverhoging, De mate van de temperatuur verhoging is kwadratisch met de stroom bij het overladen. De temperatuursverhoging leidt tot vergassing van het elektrolyt en druktoename in de behuizing. Bij het passeren van de maximale druk zal een pop-off zich openen en het vergaste elektrolyt aflaten. Het nadelige effect van het verschil in capaciteit tussen de cellen kan worden tegengegaan door limiters.

Onbalans bij belasting leidt tot een klemspanning van de cel met de laagste capaciteit, lager dan de algemeen aangenomen (onder)grenswaarde van 2V. Hierbij tredt geen noemenswaardige temperatuursverhoging op.

Belasten van een LFP accu met een stroom van  $0,9c$  geeft geen merkbare temperatuurstijging van de cellen.

Bij ontlading tot 1,5V celspanning recupereren alle cellen naar een klemspanning boven de 2V door herschikking van de ladingsdragers op de anode. De cel kan met een spanningsbron voorzien van een stroombegrenzer weer worden geladen voor verder gebruik. De laagste spanning van een LFP cel in gebruik ligt op 1,5V. Er zijn geen tekenen van vermindering van capaciteit waargenomen nadat de cel weer werd geladen.

Bij een totale ontlading tot  $U_{\text{cel}} = 0,02\text{V}$  of lager vindt geen recuperatie meer plaats op korte termijn. De cel moet via een initiële laadprocedure weer worden opgeladen. Bij het gebruik van een hoge laadstroom in het gebied van 0 tot 2V, wordt de cel warm. De toegevoerde energie wordt niet omgezet in lading van de cel, maar voor een onbekend fysisch proces gebruikt. Om vernieling van de cel te voorkomen, moet de laadstroom in het begin van het initieel laden beperkt blijven tot 0,01c. Komt de cel weer aan de 2V klemspanning, dan kan daarna weer CV worden geladen met stroombegrenzing tot 3,4V.

Bij deze diepontlading zijn nadelige effecten voor de capaciteit van de cel waargenomen in de vorm van spanningverlies zonder belasting.

Is laden van LFP cellen nu echt zo moeilijk dat je er een BMS voor nodig hebt?

Uit praktische ervaring met LFP accu's komt eigenlijk alleen naar voren dat je niet boven de 3,4V per cel moet komen en dan is er niets aan de hand.

Als je daar wel bovenuit komt omdat de capaciteit per cel sterk verschilt en de cellen met een lagere capaciteit eerder vol zijn, dan kun je met een limiter over de cel met de laagste capaciteit de laadspanning voor deze cel binnen de perken houden.

Dat heeft als nadeel dat de lading die je er dan niet in kunt stoppen verloren gaat in de vorm van warmte. Jammer.

Stel dat je elke cel met een aparte lader gaat laden... Dan kun je die lader zo dimensioneren dat er nooit meer dan 3,4V uitkomt en dan worden alle cellen met een dergelijke lader nooit overladen ongeacht hun effectieve capaciteit. De uitgang van die laders moet dan wel 'zwevend' of 'geïsoleerd' zijn, anders kan de stroom voor de ene cel bij de andere cel komen en stort het hele systeem in elkaar. De cellen moeten wel kunnen worden gebruikt om lading af te geven in het gebruik, het moet niet zo zijn dat ik de cellen uit de bank moet halen om ze individueel te laden.

Even uitgaande van een 12V installatie waarin 4 LFP cellen in serie worden gebruikt en die geladen gaat worden met een 100Wp zonnepaneel. Dan moeten er 4 converters van 25W op het zonnepaneel worden aangesloten om maximaal gebruik te maken van optimale zoninstraling in het MPP. De spanning in het MPP ligt rond de 17V, de stroom daarbij is 5,88A. Bij 4 identiek belaste converters is er dan 1,47A per converter beschikbaar om 3,4V van te maken. Elke converter kan dan 24,99 Watt of 7,35A laadstroom aan elke cel toevoegen. Dit zou 0,1c zijn voor een 76Ah cel. Niet helemaal natuurlijk want de converters hebben geen 100% efficiëntie.

Het meetlab heeft een aantal converters aangeschaft van Mornsun type VRB1203YMD-20WR3. Met een weerstand tussen de + uitgang en de 'trim' aansluiting wordt de uitgangspanning op 3,34V ingesteld. Bij een ingangspanning van 8,5V komt er een spanning van 3,44V op de uitgang, bij het opvoeren van de ingangsspanning naar 18V verandert de spanning op de uitgang niet, deze blijft op 3,44V staan.

Dezelfde meting wordt herhaald met een belastingsweerstand van 14 Ohm en ook dan staat er in het traject tussen 9 en 18V 3,44V op de uitgang van de converter. Bij het aansluiten van een 'lege' LFP cel bereikt de uitgangsstroom 7A en wordt de converter warm. De maximale stroom voor de converter is 5A, maar wordt daar kennelijk niet op begrensd. Wel is er een temperatuur bewaking want de converter 'slaat af' bij een te hoge temperatuur.

Het kan dus! 9 tot 18V in en dan 3,44V uit. Bij 20W converter vermogen is een laadstroom van 5A per cel haalbaar. De tot 0 ontladen cel is met deze converter geladen. De laadstroom gaat naar <10mA en kan niet meer nauwkeurig worden gemeten door de vermogensopname van de ampèremeter en

de spanningsmeter.

Bij het laden van 4 cellen met een verschillende SOC en een verschillende capaciteit komen deze uiteindelijk allemaal op 3,44V en zijn daarmee 100% in balans.

## Is een diep ontladen LFP cel kapot?

Wanneer is initieel laden nodig?

De geheel ontladen cel is in eerste instantie weer geladen zonder een capaciteitsmeting om te zien of deze zich zou herstellen. Zou de cel zich niet herstellen, dan is de meetwaarde van een capaciteitsmeting heel makkelijk: 0Ah.

De betrokken cel is weer geladen tot 3,4V en blijft netjes op spanning. Voorafgaand aan de test is er een berekening gedaan naar de capaciteit van de cel. De formule daarvoor wordt gevormd door de stroom te turven gedurende de tijd van de ontlading van 3,4V (100% SOC) en het bereiken van 3,0V over de cel (30% SOC). Zou de cel de nominale capaciteit van 180Ah hebben, dan ligt tussen 3,4V en 3,0V ongeveer 70% van die nominale capaciteit en dat is 126Ah, met de nadruk op ongeveer. Bij het volgen van een ontlading en het meten van het capaciteitsverbruik door een belasting weerstand blijkt deze capaciteit op 80Ah te komen in dit gebied. Teruggerekend houdt dit in dat de cel nog maar 120Ah aan capaciteit heeft. Dit werd berekend voordat de diepontlading werd begonnen.

Twee cycli na de diepontlading wordt weer een capaciteitsberekening gedaan. De cel is ontladen via een 'current sink' die een constante stroom van 45A door de belasting weerstand laat lopen. De ontladingstijd is 2 uur tussen de 3,4V en 2,8V. De SOC bij 2,8V is ca 25% en zou voor de nominale waarde van 180Ah van de cel 45Ah bedragen maar zou voor deze cel van 120Ah 30Ah bedragen. Bij een belasting stroom van 45A in twee uur wordt er 90Ah aan lading onttrokken en blijft er nog 30Ah over. Dit betekent dat de cel 90Ah plus de restcapaciteit van 30Ah kan opslaan en dat is gelijk aan de capaciteit bepaling (je mag dat geen meting noemen, want dat is het officieel niet) die er voor de diepontlading is gedaan. Er is daarmee geen capaciteit teruggang van de cel opgetreden. Nu voldoet de cel niet meer aan de oorspronkelijke spec's en daarmee is de meting niet representatief, maar er kan wel worden geconcludeerd dat een totale ontlading van een 'kapotte' LFP cel, deze de cel niet nog 'kapotter' maakt.

Het lijkt dus toch zo te zijn: LFP cellen zijn niet kapot te krijgen of in elk geval niet 'kapotter' dan deze al was. Ja, n=1 en wie er aan twijfelt mag zelf een goede LFP cel tot 0 ontladen om het tegendeel aan te tonen. Verder bevestigt deze bevinding de opmerking van Sunday waarbij hij aangeeft dat zijn LFP accu's na de diepontlading beter waren dan voor de diepontlading.

De cellen worden nu verder ingezet bij metingen met betrekking tot de individuele cellader. Het verschil in capaciteit zal niet worden opgeheven omdat dit juist de zwaarste opgave oplevert voor de cellader.

Het teruglopen in capaciteit van LFP accu's is meestal het gevolg (maar niet altijd) van het losraken van de 'pouches' van de 'bus' in de cel. De nominale capaciteit van de cel was 180Ah en is nu ca 120Ah. Zou de cel zijn samengesteld uit 3 pouches van 60Ah parallel, dan betekent het losraken van één van de pouches een verlies van 60Ah aan capaciteit. Dit is in overeenstemming met de bevindingen op het testlab.

De betrokken cel is de cel waarbij er een verschil in spanning werd geconstateerd indien er op een andere plaats op de accupool werd gemeten. Deze accupool blijkt los te zitten. Dit werd ontdekt bij het afwisselend parallel en in serie zetten van de cellen. Het kan zijn dat het bewegen van de bus-rail

door de druk van de meetpen, het slechte contact tussen pouch en bus maakt en verbreekt en dit zou de verklaring kunnen zijn voor de wisselende spanning. We gaan dit pas weten na een 'LFP cel autopsie'.

## Thermal runaway

Wat ben ik te weten gekomen over 'thermal runaway' bij Li-ion accu's. Ik wist dat dit mogelijk was, maar heel specifiek was ik hier niet mee op de hoogte. Ik ben het internet gaan afzoeken op 'thermal runaway' en één van de bruikbare links was:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_runaway#Batteries](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_runaway#Batteries)

Een nova en super nova explosie van een ster zijn de omvangrijkste vormen van thermal runaway die tot nu toe bekend zijn. Zou er een big bang zijn geweest -en daar lijkt het sterk op- dan is dat de grootste thermal runaway ooit. Een thermal runaway van deze omvang zal niet meer voorkomen tenzij we eerst een 'big crunch' krijgen.

## Thermal runaway bij batterijen en accu's:

Nou daar heb je het gesodemieter! Lithium accu's zijn gevoelig voor thermal runaway. De Li-polymeer accu's zijn de 'ergste', gevolgd door de accu's met Kobalt in het anode materiaal. Lithium Titanaat  $\text{LiTiO}_3$  accu's zijn veel veiliger en het wordt dan opeens ook duidelijk waarom je die dingen wel met 10c(!) mag laden. Het Titanaat is niet sterk reactief in combinatie met water. Lithium Ferro Fosphaat cellen zijn ook niet gevoelig voor thermal runaway, mede doordat er onbrandbaar elektrolyt wordt gebruikt en het niet sterk reactieve Ferrofosfaat wordt gebruikt. Is dit de achterliggende reden dat er geen meldingen zijn van ontplofte  $\text{LiFePO}_4$  cellen? In vliegtuigen mogen geen Kobalt houdende Li-ion accu's meer worden gebruikt vanwege de kans op een ontploffing van de accu. Duidelijker kan ik het niet maken. De  $\text{LiTiO}_3$  en de  $\text{LiFePO}_4$  cellen zijn de veiligste cellen om te gebruiken.

Een thermal runaway start met het warm worden van een cel. Een cel wordt warm door vermogen dat in de inwendige weerstand wordt gedissipeerd. Dit komt voor bij opladen en ontladen van de cel. Het gedissipeerde vermogen is gelijk aan  $I^2R$ . Dit betekent dat een Li-ion accu niet zomaar in de brand vliegt. Er moet iets warm worden door de accu 'in de zon' te zetten (2018: brand in een accu opslag in Nunspeet en brand in een fietsaccu in Wijchen) of door de accu kort te sluiten of te overladen (brand door overladen van de Nokia accu's en in een Boeing).

Alle cellen met Kobalt erin moeten op thermal runaway worden bewaakt met een temperatuurprobe en moeten een vorm van koeling hebben. Dat is te doen door de accu op te bouwen met cellen van de klassieke cilindervorm, zodat er luchtcirculatie tussen de cellen door kan plaatsvinden. In sommige elektrische voertuigen wordt zelfs vloeistofkoeling gebruikt om de thermal runaway te stoppen door aan de accu thermische energie te onttrekken om zo de kettingreactie te dempen. In dit licht is het raar dat sommige autofabrikanten juist de accu's warm laten worden om de terugloop in capaciteit in de winter te compenseren... Ze maken alvast een 'beginnetje' aan de thermal runaway. Ze gebruiken die warmte dan wel voor het ontwasemen van de voorruit, dat wel. Dit vind ik typisch een geval van 'een kwartslag voor afbreken stoppen met aandraaien'.

## Blussen van een accubrand bij $\text{LiFePO}_4$ cellen

Een LFP cel heeft geen brandbaar 'elektrolyt' in zich. Een te warm geworden cel (door overlading of door kortsluiting) 'blaast' de verdampte vloeistof af en de damp of vloeistof die mee komt zal geen vlam vatten en/of exploderen. De kunststof kast waarin de cel zich bevindt kan wel branden tenzij gemaakt van een onbrandbare soort.

De bekabeling van de cel kan wel branden en kan worden geblust met CO<sub>2</sub> of een poederblusser. Het blussen van een elektriciteitsbrand met water wordt in alle gevallen afgeraden, ook als het om een ongevaarlijk lage spanning gaat.

### **Blussen van een accubrand bij LiCoMnO cellen en Li-Polymeer cellen**

Doordat de Lithium-Kobalt verbindingen zo reactief zijn, kun je een accubrand van deze cellen niet blussen met water. Zodra water in contact komt met de Kobaltverbinding van de anode neemt de reactie in hevigheid toe. Poederblussers geven geen voldoende dichte laag om deze accu's goed te blussen. Er bestaat een blusmiddel in poedervorm dat een dichte keramische laag over de brandende accu's achterlaat. Een soort van 'glazuur over aardewerk'. Voorlopig is deze blusmethode de enige die een accubrand van Lithium Kobalt Manganaat accu's kan doven. Het alternatief is voorlopig 'gecontroleerd laten uitbranden'.

Op een boot met deze accu's aan boord ben je dus de Sjaak als je boot afborreelt door een gat in de romp. De kortsluiting van het instromende water zorgt voor het begin van de thermal runaway en zodra de cellen door de toegenomen druk open barsten en het water de cel instroomt, dan zorgt dit voor een toename van de thermal runaway en eindigt je boot in een 'Super Nova'...

Inmiddels bestaat er bij de Nederlandse brandweer zorg over de toename van auto's met LCM cellen in het verkeer. Niet alleen is de spanning van deze accu's (ca 300V) hoger dan de 60VDC grens, ook het feit dat waterhoudende blusmiddelen de brand versterken is een punt van zorg. Verder is de brandweer nog niet standaard uitgerust met het keramische bluspoeder dat bij branden van LCM accu's moet worden gebruikt

Lig je in de box naast een nieuwe elektrisch aangedreven boot met Lithium Kobalt Manganaat accu's en de naam 'Super Nova'... nou dan kun je maar beter een plaatsje opschuiven!

## Floaten... of toch met beide voeten op de grond

'Float charging' is een begrip uit de loodzwavelzuur accu technologie maar overal waar accu's worden gebruikt wordt dit begrip naar voren geschoven om accu's lang buiten gebruik te hebben en het effect van zelfontlading te compenseren.

Zelfontlading komt voor bij bijna alle soorten galvanische cellen, de enige die er veel minder ontvankelijk voor zijn, zijn de Lithium batterijen en -accu's. Een ouderwetse kool-zink batterij is een jaar na fabricage helemaal leeg. De modernere alkaline batterijen houden het niet meer dan 3 jaar vol en zijn dan leeggelopen. Een loodzwavelzuur accu kan maximaal 3 jaar 'op de plank' staan als deze geheel geladen is weggezet. Loodzwavelzuur accu's sulfateren als ze worden ontladen, maar ook als zij worden 'zelfontladen' en een door zelfontlading leeggelopen accu is meestal onherstelbaar beschadigd. De eerste NiCad accu's waren berucht om hun zelfontlading. Met de introductie van de NiMH accu's werd een flinke verbetering bereikt op het gebied van zelfontlading. Lithium batterijen zoals die op moederborden voor computers worden gebruikt, gaan heel lang mee (10 jaar is geen uitzondering). Nu hoeft zo'n knoopcel geen enorme vermogens te leveren dus als je van het stroomverbruik uitgaat zou de cel ook inderdaad wel 10 jaar mee kunnen gaan. Ga je uit van de zelfontlading dan zou bij 5% zelfontlading de Lithium knoopcel met het normale verbruik ingerekend, in 5 tot 6 jaar leeg moeten zijn. Dat zijn ze meestal niet en de recycling moet de cellen van de borden halen voordat deze kunnen worden verwerkt omdat 'sluiting' van deze kleine cellen een grote brand kan veroorzaken. De Lithium batterijen kennen nauwelijks zelfontlading. Herlaadbare Lithium ion cellen hebben vergelijkbare eigenschappen en hebben iets meer zelfontlading dan de lithium knoopcellen. Desondanks kan de moderne Li-ion cel -van welke technologie dan ook- kan 5 jaar 'op de plank' staan en nog steeds geladen zijn.

Float charging is het doorlopend toevoegen van een klein beetje lading om de zelfontlading te compenseren zodat de accu zijn lading behoudt en na de gebruikspauze weer voor 100% kan worden ingezet. Heeft een accu geen zelfontlading of heel weinig zelfontlading, dan is 'floaten' niet zinvol. Float charging werd populair door de NiCad accu's omdat deze een hoge mate van zelfontlading kenden. De beste methode was de NiCad geheel te ontladen en dan weg te leggen om deze dan voor gebruik weer op te laden. Dan had je nooit een opgeladen accu paraat en dat kwam niet goed uit. Zette je de accu in een druppellader dan had je wel een volle NiCad accu ter beschikking. Loodaccu's kennen ook zelfontlading alleen niet in die mate waarin dit bij NiCad accu's voorkomt. Hier komt bij dat een ontladen loodaccu kapot gaat en dat de 'leegstand' uiteindelijk een nieuwe accu gaat kosten. In dit geval is 'floaten' een bescherming van de investering naast het onmiddellijk gebruiksklaar houden van de accu.

Li-ion herlaadbare cellen kennen nagenoeg geen zelfontlading en 'floaten' is niet nodig om de accu gebruiksklaar te houden, tenzij de accu een gebruiksfrequentie heeft van eens in de 4 jaar. Let wel, doorlopende monitoring van de accu betekent ook een doorlopende stroom/lading afname van de accu en doet zich voor als 'zelfontlading', maar is dit niet in de ware zin van het woord.

Li-ion accu's zijn gevoelig voor 'overladen' en het aanbrengen van een float charge op een volle Li-ion accu is gelijk aan overladen. Of de accu hier last van heeft wordt geheel bepaald door de laadstroom die bij het 'floaten' wordt gebruikt. Is die stroom 0, dan is er geen sprake van het toevoegen van lading aan de accu en kan de accu niet worden overladen. Om te spreken van 'float charge' moet er lading aan de accu worden toegevoegd. De accu 'op spanning houden' zonder dat er stroom loopt en er lading wordt aangebracht, is geen 'float charging' en kan de accu ook niet overladen.

Het aanleggen van een float charge is een overblijfsel van de NiCad en NiMH en de Loodzwavelzuur accu's. Het gebruik van een 'float charge' ligt ook vast in ons gedrag als pleziervaartschippers. We komen zaterdagmorgen op de boot en we willen na het innemen van de victualie meteen van wal steken, want het weekend duurt maar twee dagen en dat willen we ten volle benutten. Wat we zeker niet willen is wachten totdat de service accu 'vol' zit en dus wordt deze sinds de vorige vaart direct na aankomst 'gefloat', dan kunnen we meteen de haven uit en aan het weekend op het water beginnen.

Voor Li-ion accu's geldt: 'laat ze vol achter, dan zijn ze nog steeds vol als je weer terugkomt' en dat is voor de doorgewinterde loodaccu gebruiker geheel tegen de haargroeirichting in.

Het kan nog erger, je laat de accu 'half leeg' achter en gaat na het weekend zorgeloos naar huis. Bij een doorgewinterde loodaccu gebruiker kan dit aanleiding geven tot een insult, bij andere 'loodaccuschippers' wordt je uitgemaakt voor onverantwoordelijk of een zorgeloze gek. Zij zijn zo gewend dat er iets in het vat moet zitten en dat dit vat ook helemaal vol moet zitten, dat dit niet in hun denkwijze voorkomt of zelfs kan voorkomen.

Is dit onverantwoordelijk? Een zeilschipper uit Workum: "Met de loodaccu's deed ik ongeveer 6 jaar. Ze zaten altijd aan de lader als ik 'binnen' was en ik voer altijd met volle accu's uit. Nu met de Li-ion accu's leg ik deze niet meer aan de lader, maar als ik weer op de boot kom zijn deze niet merkbaar leger! Voordat ik bij Kornwerderzand aankom -dat stukje vaar ik meestal op de motor- zijn de Li-ion accu's weer helemaal vol en dat komt niet door de zonnepanelen, want die heb ik niet. De acculader voor de nieuwe accu's gebruik ik alleen na zonsondergang als de kajuitverlichting en de koelkast aanstaat. Tot nu toe is eigenlijk de motor voldoende om de accu's vol te houden en hoef ik de accu's maar zelden te laden."

### **Kan 'float laden' kwaad?**

Bij loodaccu's niet echt. Een loodaccu heeft zelfontlading en met een goed ingestelde float lader geeft net zoveel lading af als de accu aan zelfontlading verliest.

Wat als de 'float lader' voor de loodaccu te laag staat afgesteld? Dan komt er minder lading binnen dan dat er met de zelfontlading verdwijnt. Dat is nog altijd gunstiger dan zonder float lading de accu te laten staan.

Wat als de 'float lader' te hoog staat afgesteld? Dan wordt de accu warm en verdampt er elektrolyt en daarnaast ontstaat elektrolyse van het elektrolyt. Het knalgas dat nu ontstaat heeft maar een kleine vonk nodig om te ontploffen en een accubrand te veroorzaken.

In dit geval help je een onderhoudsvrije loodaccu naar een vroegtijdig einde, want je kunt het verdampte elektrolyt niet aanvullen. (ja, daar zijn wel wat truckjes voor, maar dat valt niet onder de normale omgang met loodaccu's, dat is meer 'Zen en de kunst van accu onderhoud bij onderhoudsvrije accu's').

Bij Li-ion accu's kan het wel kwaad! Zij hebben nauwelijks zelfontlading en zodra de accu 'vol' is wordt deze door de 'float lading' overladen. De cellen worden warm en het elektrolyt vergast en de druk in de accu wordt zo hoog dat deze bol gaat staan en in enkele gevallen zal het gasvormige elektrolyt worden 'afgeblazen' via een veiligheidsklep. Bij enkele soorten Li-ion accu's is het elektrolyt brandbaar en het door de temperatuursverhoging gevormde gas is dat ook. In deze situatie is een klein vonkje genoeg om de accu te laten ontploffen en een accubrand te veroorzaken.

'Float lading' van in serie geschakelde li-ion cellen zorgt voor de z.g. 'onbalans' in de celspanning van de samenstellende cellen. Door de serieschakeling van de cellen krijgen deze te maken met dezelfde laadstroom. De cellen met de laagste capaciteit zijn dan het eerste 'vol'. De laadstroom blijft gelijk en

de reeds 'vol geladen' cellen worden 'overladen', hun elektrolyt gaat 'vergassen' door de hoge temperatuur in de cel en er ontstaat 'sudden cell death'. Het gebruik van een limiter voorkomt dit omdat deze de spanning over de individuele cel begrenst. Alle beschrijvingen van 'sudden cell death' zijn bij cellen in serieschakeling, die niet zijn gecontroleerd op identieke capaciteit en niet worden beschermd door limiters.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van een lader per cel die is begrensd op de maximale celspanning, dit is vergelijkbaar met de werking van een limiter bij het laden van cellen in serie. Een volle cel kan dan niet worden overladen omdat er geen voldoende hoge spanning voor wordt afgegeven.

"Maar dat is dan toch 'floaten'?" Nee dat is het niet. Er loopt bij die spanning geen stroom meer door de cel en dat is nodig om lading binnen te brengen en de cel eventueel te overladen.

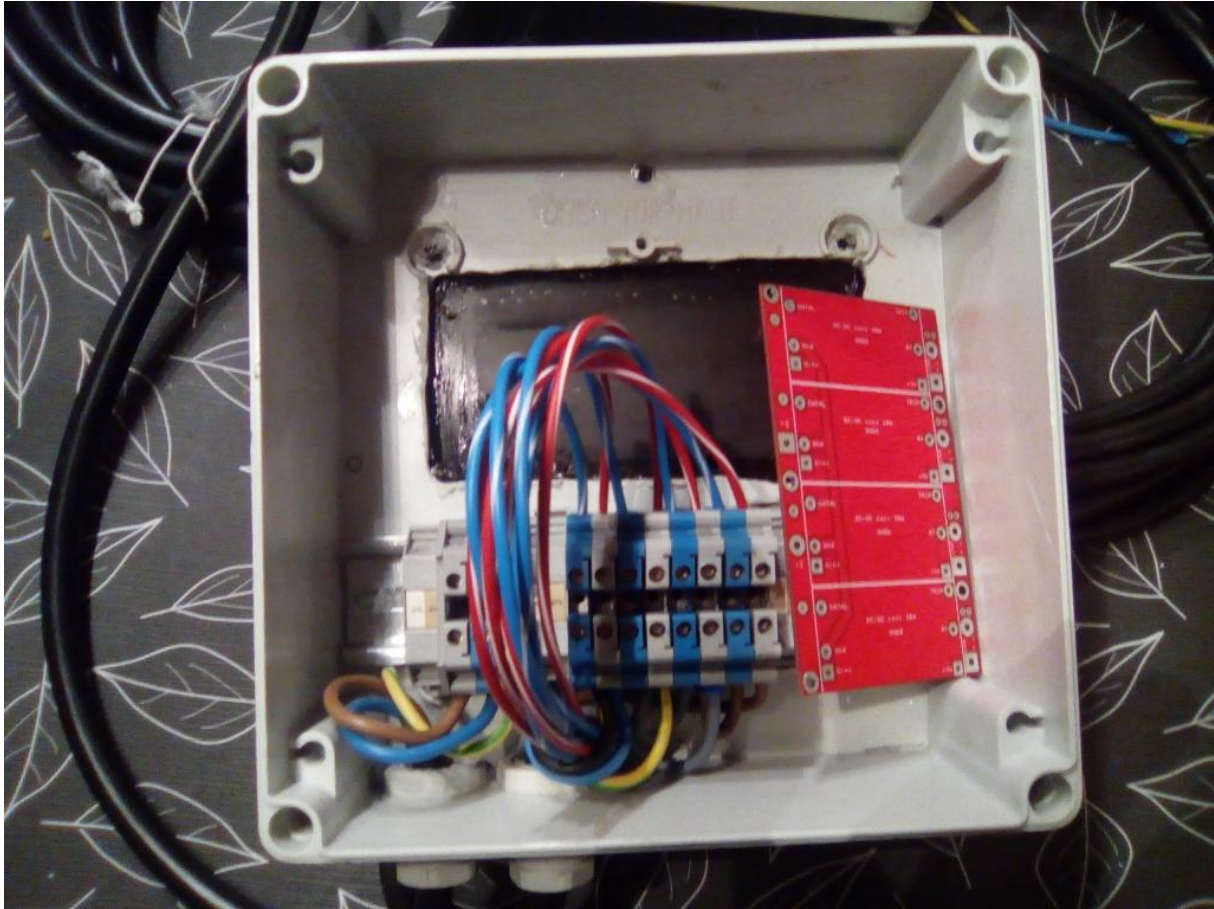
"Kun je de cel 'eeuwig' op die spanning houden?" Daar heeft het alle schijn van, maar dat is nog niet uitgetest. Natuurkundig betekent 'geen stroom' ook geen lading (= stroom x tijd) maar ook geen vermogen (= stroom x spanning). Geen vermogen betekent geen warmte en daarmee ook geen vergassen van het elektrolyt en geen druktoename in de cel. Geen warmte betekent geen temperatuurstoename en geen vergassen van het elektrolyt en geen 'sudden cell death'.

Ik ga het testen. Ik heb een standaard installatiebehuizing voorzien van een koelblok van 'koninklijke omvang' en de kast aan de rugzijde voorzien van een venster. Om de IP76 classificatie niet meteen helemaal te ondermijnen, heb ik het koelblok met MS Polymeer lijm/kit achterop de kast vastgemaakt.



I Koelblok op de rug van een installatiekast.

In de kast zit verder een rails met rijgklemmen zodat het printje met de converters onafhankelijk kan worden aangesloten. Het printje wordt met de converters tegen het koelblok gemonteerd zodat de ontwikkelde warmte goed kan worden afgevoerd.



#### II Kast met rijgklemmen en de converter print.

De converters 'slaan af' bij een te hoge temperatuur en daarmee is koeling niet noodzakelijk, maar de converters blijven langer in bedrijf als de ontwikkelde warmte wordt afgevoerd.

Er wordt een 4 x 72Ah LFP accu aangesloten op vier 30W Mornsun converters. De converters worden ingesteld op een vaste uitgangspanning van 3,4V. De Mornsun converters worden gevoed door een 15V SMPS die oorspronkelijk werd gebruikt voor een LCD monitor. De stekker gaat in de wandcontactdoos 'and now we wait'. Eén maal per week worden de celspanningen gemeten en genoteerd. Dan wordt de accu 'van de lader' gedurende een half uur belast met een 55W halogeen lamp (hierbij wordt  $4,5A \times 0,5h = 2,25Ah$  aan de accu onttrokken). Daarna worden de celspanningen weer gemeten en genoteerd. De accu krijgt een week de tijd om weer op te laden.

#### Foutcondities

- De accu kan in een week niet meer geladen worden tot de oorspronkelijke 3,4V per cel of 13,6V voor de gehele accu. (het oplaad/ontlaad rendement is dramatisch verslechterd.)
- De cellen hebben een onderling spanningsverschil van meer dan 100mV. (Er is een zeer groot verschil in celcapaciteit ontstaan.)
- Er staan cellen bol of er zijn cellen via het veiligheidsventiel 'ontgast'. (Er zijn cellen overladen en er is 'Sudden Cell Death' opgetreden.)

De test start 1 december.

Gaat dit goed, dan betekent het dat LFP accu's, die met een individuele cellader worden geladen gedurende de tijd tussen 2 vaartochten op die cellader aangesloten kunnen blijven op de walstroom en vol zullen 'staan wachten' op de volgende afvaart. Is dit nodig? Niet voor de LFP accu's, wel voor de loodaccuschippers die niet van hun oude gewoontes af kunnen komen.

Verder zou dat ook betekenen dat een zonnepaneel blijvend op de installatie kan worden aangesloten, want de cellen kunnen niet worden overladen. Mooi toch? Je stapt zondagavond van de boot af en als je vrijdag weer aan boord komt, zit de accu weer vol. Nou, ja dan moet je niet vergeten hebben de kajuitverlichting uit te doen en de marifoon af te zetten.

"En de koelkast!" Nou dat hangt er vanaf, een koelkast die goed is geïsoleerd en niet wordt geopend, gebruikt maar heel weinig vermogen. Heb je voldoende vermogen aan zonnepanelen 'op het dak', dan kan de koelkast gewoon 'aan' blijven. Kom je vrijdagavond laat aan boord en je vraagt "Schat, staat de Bokma koud?" Dan zou je als antwoord kunnen krijgen: "Ja en je vreten ook!"

## Na een week

Situatie op 1 december:

Vier 72Ah LFP cellen met een aluminium behuizing in serie. De celspanningen zijn 3,25, 3,28, 3,24 en 3,25V. Net iets boven de nominaalspanning. De cellen zijn nieuw en nog niet gebruikt. De spanning in serie: 12,9V (even checken met de som van de celspanningen... Ja, dat lijkt helemaal te kloppen).

Voedingspanning van de lader: 19,2V. Dit is een SMPS lader voor een HP notebook met een zwevende (geïsoleerde) uitgang, die volgens de 'sticker' 6,8A kan leveren. Dat is ca 130W en mooi voor 4 30W converters die samen 120W in de cellen gaan stoppen (als daar ruimte is!)

De 4 converters worden parallel aangesloten en de spanning van de HP lader wordt op de ingangen gezet. De spanning van de SMPS blijft op 19,2V staan er wordt onvoldoende stroom uit de lader getrokken om een meetbare spanningsval te veroorzaken.

De converter uitgangen leveren onbelast 3,32, 3,36, 3,33 en 3,31V. Alles binnen de opgegeven tolerantie. De opgetelde uitgangsspanning van de converters in serie is 13,2V ofwel 4 x 3,3V. Alles lijkt nog steeds te kloppen. Er is nog geen 'trim up' weerstand aangesloten en ik begin '3Noreen style' met een eind laadspanning van 3,3V. Hierbij worden de cellen niet verder dan 80% SOC geladen.

De stekker eruit en de cellen worden aangesloten (boutje iets losdraaien en de vorktong eronder en weer vastdraaien). Even zien of er iets gebeurt of veranderd door het aansluiten van de cellen... Nee, helemaal niets, geen rook, vlammen of geknetter. De gemeten celspanningen staan nu op de uitgangen van de converters. De stekker er weer in en weer even zien of er iets gebeurt... Nee, niets bijzonders. De celspanningen zijn inmiddels naar rond de 3,3V opgelopen en kennelijk levert de lader een kleine laadstroom die ervoor zorgt dat de celspanning toeneemt.

Ik meet geen stroom naar de cellen omdat het geringe verbruik van de ampèremeter de meting zal beïnvloeden door een kleine spanningsval en hierdoor de spanning op de accu lager wordt. Dat wil ik niet omdat ik juist deze spanning zo nauwkeurig mogelijk wil weten.

De schakeling werkt en wordt weggezet in m'n hobbyhok met de stekker erin.

Ik ben heel benieuwd naar hoe dit zal aflopen en ga elke dag even de celspanningen meten of niet één van de cellen uit de pas gaat lopen. Na drie dagen ben ik daar helemaal klaar mee want het lijkt of de cijfers op de meter 'in beton zijn gegoten' ze veranderen nog geen 10mV.

## Zaterdag 8 december

Op 8-12 doe ik weer een meting van de spanningen:

Voedingspanning uit de SMPS: 19,2V

Celspanningen: 3,31, 3,34, 3,32 en 3,31V

Totale accuspanning: 13,2V

Dat is dus niet wereldschokkend of het moest zijn dat het wereldschokkend constant is.

Met de lader werkend sluit ik een 55W H4 koplamp aan, uitkijken, het ding wordt meteen gloeiend heet. Van de vier cellen zakt de celspanning bij 2 met 10mV. Kennelijk vult de lader en de converter meteen het afgenomen vermogen aan en brandt de lamp eigenlijk op de HP SMPS. De uitgangspanning van de SMPS is 19,0V en met 55W heeft de SMPS het iets moeilijker, maar het is niet echt ernstig.

De stekker wordt eruit gehaald en de halogeenlamp blijft aangesloten en branden. Het is aan de lichtintensiteit niet te zien dat de lader is afgeschakeld.

Na vijf minuten (300 sec) wordt de celspanning weer gemeten en alle celspanningen liggen nu 30 tot 40mV lager. De cellen zijn belast geweest en hebben lading afgegeven. Nadat de halogeenlamp is uitgeschakeld gaan de celspanningen met 10mV omhoog en is er kennelijk een recuperatie van de ladingsdragers op de anode en kathode als de stroom uit de cel wordt onderbroken.

De stekker van de lader gaat er weer in en het laden wordt weer hervat. De celspanningen worden weer gemeten en in de tijd tussen het insteken van de stekker en de meting op de aansluiting van de cel zijn alle cellen weer terug op 3,3V en nog een paar mV.

Hier zie je dat het duidelijk gaat om een 'Constant Voltage' lader. De ingestelde spanning wordt weer snel bereikt, ook al is daar een relatief hoge stroom voor nodig.

Tja, dit is voor de cellen nauwelijks uitdagend... De spanning blijft met 100mV onder de spanning van 3,45V bij 100% SOC en dat de cellen hier geen probleem mee hebben is niet echt verassend. Een trimweerstand van 47k wordt in gesoldeerd en de onbelaste uitgangspanningen van de converters komen in het bereik van 3,43 tot 3,47 te staan.

Het duurt wel 3 minuten en dan staan de cellen allemaal op 3,41 tot 3,45V en zijn ze kennelijk weer vol.

Concluderend:

Ik zou de rest van mijn leven kunnen besteden aan een poging om LFP cellen kapot te krijgen als ik ze op een constante spanning van 3,3V per cel aansluit. Nou, ik heb wel wat beters te doen!

Bij een belasting met ca 55W moet de 130W lader worden uitgeschakeld om ook werkelijk de cellen te belasten.

Wijziging meetprotocol:

De eind laadspanning is nu op 3,4V ingesteld om boven de 95% SOC te kunnen komen.

De belasting van de cellen wordt nu gedaan met 105W (de twee gloeidraden van een H4 lamp parallel), waarbij de 130W lader is uitgeschakeld.

Ik wens de cellen een 'prettige maaltijd' toe en 'tot volgende week'.

## Tussenstand voor de kerstvakantie

De cellen hebben na de aanpassing van de uitgangsspanning van de converters, nu 2 weken aan de lader gestaan. Na een week waren ze van 3,3V naar 3,4V geladen (3,404V, 3,410V, 3,407V en

3,412V). De lader doet er een dag over om van 3,2 naar 3,3V te laden (72Ah cellen, maximum laadstroom 9A). Na de verhoging van de eind-laadspanning naar 3,4V (3,421V) wordt die spanning pas na een week bereikt, hetgeen goed past bij de asymptotisch verlopende laadcurve.

Na 2 weken sinds de aanpassing staan de cellen op 3,416V (Dit is de cel met 74Ah capaciteit) en de anderen (capaciteit 72, 72, 73Ah) staan op 3,420V en hebben hun eind-laadspanning bereikt. Er loopt geen meetbare stroom (<1mA) naar de cellen. Het spanningsverschil is te klein om de spanningsval over de mA meter te compenseren en dan ook nog een laadstroom van meer dan 1mA te laten lopen. Zonder de mA meter ertussen zou nog wel een laadstroom mogelijk zijn, maar heel groot zal deze niet zijn. Belangrijk is dat geen van de cellen boven de 3,45V komt, hetgeen als de klemspanning voor een volle LFP cel geldt. Met een onbelaste klemspanning van 3,421V van de lader, gaat er bij een klemspanning van 3,420V van de cel en een  $R_i$  van 60mOhm gaat er  $0,001 / 0,06 = 16\text{mA}$  aan laadstroom lopen en dat nog op voorwaarde dat de toleranties en de nauwkeurigheid van de meting de zaak niet verzieken.

De cellen gaan met deze spanningen de kerstvakantie in. Ze blijven aan de (walstroom) lader en ze worden niet periodiek ontladen of gecontroleerd. Net alsof de boot 14 dagen aan 'de wal' ligt. Over 14 dagen is het dan 'de dood of de gladiolen!'

Dan ga ik de opgave voor de lader moeilijker maken door twee 72Ah cellen in serie te zetten met twee 200Ah cellen en ze individueel met een converter te laden. Dit is een extreme vorm van onbalans die niet vaak zal voorkomen, maar wel kan voorkomen. Indien de laders het redden om na een maand de cellen toch op 3,416V te krijgen is de test geslaagd.

## Na een maand aan de lader

Recapitulerend:

Op 1 december start de test met 4 LFP cellen in serie. De spanning van de cellen ligt net boven de 3,2V en de cellen zijn halfvol.

De cellen worden aangesloten op de individuele cellader met 3,3V als eind laadspanning. Nog dezelfde dag wordt de celspanning van 3,3V bereikt en de lader levert op basis van te weinig spanningsverschil nog nauwelijks laadstroom.

Na een week staan de cellen nog steeds op 3,3V en er loopt geen meetbare laadstroom ( $I < 1\text{mA}$ ) Het meetprotocol wordt aangepast en door 47k trimweerstand op te nemen in elke converter wordt de eind laadspanning omhoog gebracht tot 3,4V. Die spanning wordt pas twee dagen later bereikt en na een week is de laadstroom kleiner dan 1mA.

Drie weken later is de spanning onveranderd en de laadstroom is nog steeds niet te meten.

Concluderend:

Het individueel laden met een CV lader voor elke cel levert een gelijke spanning voor elke cel op. Dat betekent voor LFP cellen dat zij relatief 'even vol' zijn en daarmee procentueel dezelfde SOC hebben en 'in balans' zijn.



Door de constante laadspanning van 3,4V loopt er bij 3,4V celspanning geen meetbare stroom ( $I = 0$ ) omdat het spanningsverschil tussen laadspanning en celspanning 0 is. Bij 0mA laadstroom is de uitkomst van de vergelijkingen  $I.t$  en  $I^2.R$  en  $I^2.R.t$  - nul en wordt er geen lading, vermogen of energie geleverd die iets aan de cellen in goede of slechte zin kan veranderen.

Vier individuele laders aan 4 cellen laden deze cellen sneller op dan een seriële lader met hetzelfde laadvermogen en dezelfde vermogens toevoer. Dit komt door dat een opgeladen cel geen laadstroom meer vraagt en de ingangstroom van de betrokken converter terugloopt naar de ruststroom. Het verschil tussen de laststroom en de ruststroom op de ingang kan nu voor de andere converters worden gebruikt om de nog niet vol geladen cellen te laden.

Dit maakt de individuele cellader bij uitstek geschikt voor het laden van LFP cellen die niet zijn gematched op capaciteit, via de onregelmatige toevoer van energie uit een zonnepaneel.

Ik ga de lat wat hoger leggen.

Er is een cellader 'van de productieband' gekomen (net voor de kerst) en deze heeft 14 dagen de tijd gehad om mijn 'steampunk' accu 4 x LFP 90Ah cellen (van voor de prismatic technologie) te laden. De lader werkt naar behoren en volgens de spec's van de converter lader. De 'steampunk' accu gaat er af en...

Ik ga 2 CALB (China Airline Lithium Battery of Zhōngguó hángkōng lǐ diànrú, 中国航空锂电池) LFP cellen van 200Ah in serie zetten met 2 LFP cellen van 72Ah. Diànrú is Mandarijn voor accu, letterlijk is diàn 'iets elektrisch' en chí betekent 'hart of ziel' een accu is een 'elektrische ziel' in het Chinees en wordt geschreven als: 电池.

Ik ga de 72Ah cellen een tijdje ontladen met de H4 lamp met de 2 55W gloeidraden parallel om een behoorlijk verschil in celspanning te veroorzaken tussen de geheel opgeladen CALB cellen en de 72Ah LFP cellen bij 50% SOC. De foto illustreert de mismatch in capaciteit op duidelijke wijze.

De verwachting is dat de lading vanuit de laptop voeding wordt herverdeeld op basis van de relatieve



SOC van de cellen. De 72Ah cellen met hun lage spanning zullen de hoogste laadstroom opnemen en het snelst in spanning stijgen. Bij serieel laden zou dit heel snel leiden tot overladen en overlijden van de kleinste cellen. Gezien het grote capaciteitsverschil in de cellen, is dit een zware opgave, die niet zonder limiters en het verkwisten van veel vermogen door een seriële lader kan worden gedaan.

## Muntjes

Ik was aan het wachten op de schoorsteenvegers om de schoorsteen van de houtkachel te laten vegen en ik heb de wachttijd bekort door nog wat te zoeken naar geheugen effect en zelfontlading van Li-Cobalt mangaanaat cellen. Dan kom je altijd bij de 'battery academy' terecht. Amerikaanse site boordevol weetjes en vergelijkingen van eigenschappen van accu's.

Zoeken op memory effect en self discharge en dan zie je lijstjes waarin accu's met hun eigenschappen met elkaar worden vergeleken. Bij al die lijstjes werden ook de LiCo, LiCoMnO, LiFePO en LiYFePO cellen met elkaar vergeleken en daar stond dat LFP cellen een lage Ri hadden (nou, dat wist ik al een tijdje) en LiTiO cellen een extreem lage Ri hadden (dat was mij inmiddels ook bekend) en dat de LiCM cellen een 'moderate' lage Ri hadden. Dat was mij niet bekend. Ik ben er altijd van uitgegaan dat de Ri van LFP en van LCM cellen verhoudingsgewijs overeenkomstig waren. Toen ben ik gewond geraakt omdat ik ineens onder een hele bult muntjes kwam te liggen!

Als je accu's met een 'gemiddelde' Ri gaat laden en je wilt dat snel doen, moet je meer spanning aanleggen dan de spanning van de accu als deze geladen is, want je moet gaan compenseren voor het spanningsverlies door de stroom door de Ri van de accu. Heb je een hele lage Ri, dan kun je dus wel laden met de spanning die overeenkomt met de rustspanning van een volle cel. Het gevaar is wel dat de spanning van buiten de cel behoorlijk hoger is en op het moment dat de laadstroom naar 0 gaat wordt de spanningsval over de Ri ook nul en daarmee gaat de spanning over de cel behoorlijk omhoog (tenzij de lader de spanning laat dalen). Loodaccu's hebben een rustspanning van 2,3V bij

een volle cel, maar om ze snel te laden worden ze op 2,42V aangesloten... Ze blijven daarop aangesloten ook als de cel 'vol' is en dan verdampen en elektrolyseren ze hun elektrolyt. Dat gebeurt dus ook bij LiCM cellen! Alleen er is geen elektrolyse en een LiCM cel wordt dan warm en kan zelfs ontploffen. Dit is wat je er voor over moet hebben om de cellen snel te laden. Bij een LCM cel-pack wordt een thermosensor opgenomen om de laadstroom te stoppen als de cel te warm wordt. Heel verstandig!

Maar nu, door de gestopte laadstroom wordt er geen warmte meer opgewekt en het cel-pack koelt af en er kan weer laadstroom lopen die niet veel anders doet dan de cel weer opwarmen totdat deze weer thermisch wordt afgeschakeld. Het resultaat is dat je met laden door een overspanning de cel wel snel vol hebt, maar dat door die overspanning de cel ook snel warm wordt om dan weer te worden beschermd door de thermische beveiliging, die dan weer afkoelt en dan gaat er weer laadstroom lopen... enzovoort.

Een individuele cellader die is afgeregeld op een eind laadspanning die gelijk is aan de celspanning in rust, heeft geen laadstroom als de cel 'vol' is. Het is bekend dat de laadstroom dan nul wordt en dat de cel niet warm wordt door overladen. Bij een stroom van nul is er ook geen lading, vermogen of energie die de cel kan vernielen.

Als je dus de Li-ion cellen van je boormachine o.i.d aan de snellader legt en je laat ze daar opgeladen worden, komen ze in een 'overladen, stop vanwege temperatuur verhoging, na afkoeling weer overladen, stop etc.' cyclus terecht. Bij elke keer overladen lever je weer een beetje levensduur in.

En dan valt alles op zijn plek:

We willen de cellen weer snel vol hebben=>

Dan laden we met een hogere spanning dan de geëigende eind laadspanning=>

Dat geeft een overvolle cel die door de extra energie warm wordt=>

Dan wordt de lader thermisch uitgeschakeld=>

Na afkoeling schakelt de lader weer in>

De cel wordt weer warm=>

en dat vernielt dan weer de cel.

Ik kan dus tot mijn dood LFP cellen aan een spanning leggen die gelijk is aan de rustspanning en de cellen zullen niet kapot gaan. Door hun lage Ri zullen LFP cellen bij CV laden eerder vol zijn dan de LCM cellen met hun wat hogere Ri.

Het is nu ook duidelijk waar de beweringen vandaan komen over dat 'de lader moet worden afgekoppeld'. Dat is inderdaad verstandig als het gaat om een lader die meer spanning geeft dan de klemspanning van een cel in rust om het laadproces te versnellen.

Haastige spoed is nooit goed! Snelladen... is kapot laden! Dat heb ik altijd al beweerd! En het gaat op voor elke soort accu!

Eigenlijk kan ik de test nu stoppen. De cellen komen nooit boven de 3,4~V en zullen dat in de toekomst ook niet doen want de lader kan niet verder.

Voor de goede orde en omdat ik me dat had voorgenomen blijven de cellen aangesloten op de lader tot er 3 maanden voorbij zijn.

## Bij het einde van de test

De vier 72Ah cellen staan nu 12 weken aan de lader. De spanningen veranderen met hooguit 10mV. Hierbij is er een correlatie met de temperatuur. Bij een lagere temperatuur is er ook een lagere celspanning. Een belasting met een 12V halogeen lamp van 55W kan 12 uur worden volgehouden voordat de accu van 13,6V naar 12V is terug gelopen. De 130W smps computervoeding heeft dan 2 dagen nodig voordat de converter de celspanning weer op 3,4V hebben gebracht. Aan het einde van de eerste dag is de cel weer op 3,3V gekomen (13,2V voor de hele accu) en aan het einde van de tweede dag is de celspanning op 3,4V en de accuspanning weer op 13,6V.

Elke week weer dezelfde uitslagen...

Bij de 'steampunk' accu blijft de voeding er continu op staan en wordt er niet ontladen. Dit om de accu zo lang mogelijk met de door sommige als nadelig beschouwde eind laadspanning van 3,4V te 'confronteren'. Na een maand is de celspanning van alle cellen 3,41~V en veranderd deze niet.

Elke week weer dezelfde uitslagen...

De derde opgave is het opladen van cellen met een zeer verschillende capaciteit. De 72Ah cellen zijn begonnen op 3,24V en zitten na een dag weer vol (3,42~V). Hoewel de 200Ah cellen tijdens de testperiode nooit helemaal vol werden geladen (tot 3,41~V), werden de 72Ah nooit overladen (spanning hoger dan 3,45V). Door de volgeladen kleine cellen, werd alle lading naar de 200Ah cellen gestuurd en gebruikt om deze te laden. De laadstroom is dan rond de 9A en van de 130W die de computervoeding kan leveren wordt ongeveer 70W gebruikt voor het laden van de procentueel 'leegste' cellen. De lader brengt de ongelijke cellen toch in balans en zonder vermogensverlies door limiters. Zelfs bij een fors capaciteitsverschil worden de 'kleinste' cellen niet overladen.

## Conclusies

Werking:

De 4 converter laadmethode is veilig voor de LFP cellen bij langdurig laden en levert bij afvaart na 2 of 3 weken aan de walstroom een geheel geladen accu op om mee te varen.

De continue laadtijd is van 1 december tot 28 februari geweest. De cellen zijn nooit boven de 13,6V geweest en de overladersbeveiliging heeft zonder fouten gewerkt.

Invloed op de levensduur:

In de elektriciteitsleer zijn geen mogelijkheden om bij een spanningsverschil van nul en een daardoor stroomloos systeem nog lading, vermogen of energie in een cel te brengen. ( $\Delta U = 0$  daardoor  $I = 0$ ) er is daarmee ook geen lading, vermogen of energie om de cel te vernielen of de capaciteit voortijdig te verlagen.

Bij het laden via zonnepanelen zullen de cellen nooit worden overladen omdat dit door de begrensde spanning van de converter per cel wordt bewaakt. Het wordt nu veilig mogelijk de accu via de zonnepanelen doorlopend te laten laden en geen walstroom te gebruiken, tenzij de accu de volgende ochtend 'vol' moet zijn. Door het dag en nacht ritme zal er geen sprake zijn van 'doorlopend op spanning houden' van de cellen van de accu.

Bronnen van elektrische lading:

Het opladen via de wisselstroom dynamo van de motor is met een 4 converter lader veilig te doen.

Het van de wisselstroom dynamo opgenomen vermogen blijft beperkt tot het totaal opgenomen vermogen van de converters en het doorbranden van de dynamo door een lage inwendige weerstand van de cellen wordt tegen gegaan door de thermische begrenzing en de stroom begrenzing in de converters.

Door de 'wide range input' van de converters is elke vermogens bron met een spanning van 10 tot 36V goed om de cellen te laden.

Voor hen die de accu spanningsvrij willen maken: zet de schakelaar voor de ingang van de converters op '0'.

Pas over 20 jaar gaan we weten of het 'op spanning houden van de accu' in de praktijk nadelig is geweest voor de capaciteit van de accu.

## 'Es sind die leeren Stöcke die den Hönig bringen'

Ofwel de invloed van reeds aanwezige lading bij individueel en gelijktijd in serie laden van LFP cellen.

Serie laden van LFP cellen brengt het gevaar van overladen van de cellen met de geringste capaciteit uit de serie. De laadstroom loopt door alle cellen en blijft door alle cellen lopen ook al is de cel met de laagste capaciteit 'vol'. Doordat de laadstroom blijft lopen wordt deze cel overladen en dit is de oorzaak van 'sudden cell death'. In beschrijvingen van 'sudden cell death' wordt de manier van laden of niet benoemd of de cellen worden serieel geladen.

Serieel laden maakt het mogelijk om tijdens het laden tevens de cellen te gebruiken en is daarom populair, het is zoiets als 'tanken in de vlucht'.

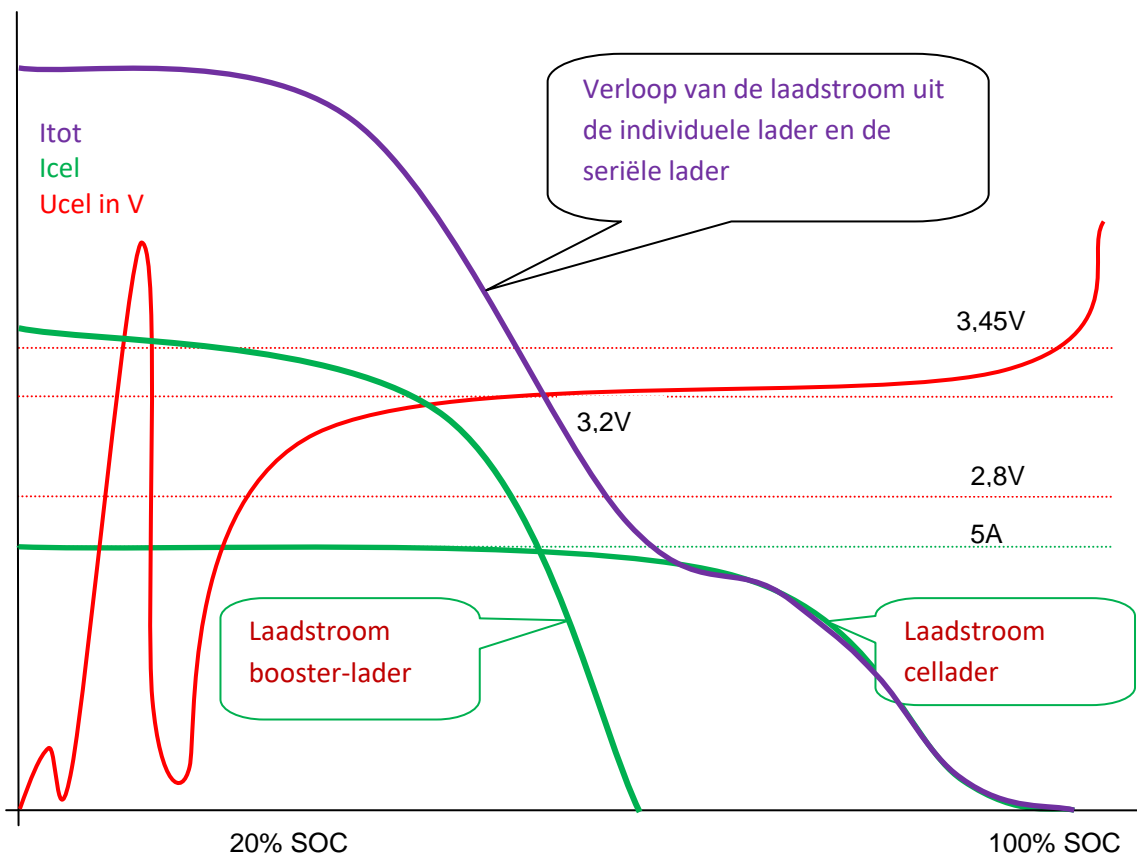
Parallel laden van cellen maakt van alle cellen één cel van een zeer grote capaciteit, maar een lage spanning en die is meestal te laag om de apparatuur aan boord naar behoren te laten werken. Dan is het onmogelijk om de accu die wordt geladen tijdens dat laden te gebruiken. De capaciteit van de gecombineerde cellen is dan zo groot dat overladen fysiek bijna niet mogelijk is. De inwendige weerstand van de gecombineerde cellen is zo laag, dat de lader 'tegen een kortsluiting staat aan te kijken' en deze beslist kortsluit vast moet zijn.

Individueel laden van cellen maakt het mogelijk de cellen in serie te laten staan en tijdens het laden te blijven gebruiken. Elke cel heeft nu zijn eigen lader en die lader is afgeregeld op een laadspanning die gelijk is aan de klemspanning van een 'volle' cel. Zo is het onmogelijk de cel te 'overladen' aangezien er bij een volle cel geen spanningsverschil meer is om een laadstroom te laten lopen. De beveiliging tegen overladen is ingebouwd in dit systeem van laden. Een nadeel is dat je dan evenveel laders aan boord moet hebben als je cellen aan boord hebt. Voor die laders geldt een beperking en dat is de laadstroom. De laders staan, bij een lege cel, 'tegen een kortsluiting aan te kijken' en zullen een bijna eindeloos hoge stroom willen leveren. Dat geeft warmte ontwikkeling en verlies van lading. Het betekent ook dat een lege cel bij het laden met een constante spanning de hoogste laadstroom toelaat. Het zijn de lege cellen die de meeste lading opslaan. ('Es sind die leeren Stöcke die den Hönig bringen', zoals de Duitse imkers zeggen. 'het zijn de lege honingkamers die voor de honing zorgen'). Het snel laden vraagt niet alleen een hogere spanning om een hogere laadstroom te bewerkstelligen, maar ook een lege cel die een lage klemspanning heeft. Bij het laden met een constante stroomsterkte wordt hieraan voorbij gegaan. De stroombron blijft bij elke spanning de ingestelde stroom leveren, ook als de cel al vol zit. Bij een CC lader moet er dus een punt komen dat de regelaar zegt: 'kappe nah' (op z'n Haags) omdat anders een cel wordt overladen. De 'constant current' lader moet op dat moment een 'constant voltage' lader worden.

Je kunt het ook omdraaien: de lader heeft een constante spanning en die is precies zo hoog als de klemspanning van een volle cel. Sluit je op een dergelijke lader een lege cel aan, dan zal er bij de lage celspanning een hele hoge stroom gaan lopen. De lader wordt dan warm door die hoge laadstroom en als er geen begrenzing is van de laadstroom tot een veilige waarde, verbrand je de lader of je verbrandt de bron (wisselstroom dynamo bv) die de laadstroom levert.

Door de constante laadspanning zul je de cel niet kapot maken, er loopt geen stroom meer als de celspanning gelijk wordt aan de laadspanning.

De converter die wordt gebruikt heeft een ingebouwde stroombegrenzer en deze gaat werken als de stroom 10% hoger wordt dan de nominaal vermeldde waarde. Zou ondanks de stroombegrenzer de temperatuur van de converter alsnog te hoog worden, dan slaat deze af tot de temperatuur weer daalt. De beveiliging van de converters is daarmee dubbel. Het houdt ook in dat door deze beveiliging van de converters tevens de wisselstroomdynamo wordt beschermd tegen doorbranden door te hoge vermogens afname en dat is mooi meegenomen! Overigens vormt dit geen bescherming van de wisselstroomdynamo tegen doorbranden als deze in een slecht of niet geventileerd motorcompartiment zit waar het uitlaatspruitstuk ook nog warmte aan die ruimte afgeeft.



Laadcurven voor stroom (groen) en spanning (rood) bij het laden van een LFP cel met een stroombegrensde CV lader (zoals de 15W Mornsun DC-DC converter).

Naarmate de cel 'voller' wordt, neemt de laadstroom af om bij 100% SOC nul te worden.

Een seriële bulk-boost lader kan een laadstroom van 1c in de cel stoppen, zolang de spanning van de cel onder de 3,2V is.

De beperking van de laadstroom maakt het in korte tijd 'volproppen' van een cel onmogelijk. Er zijn schippers die tijdens het wachten op het openen van de spoorbrug, koffie willen drinken uit hun 230V koffiezet apparaat dat op een 12VDC-230VAC inverter is aangesloten. Daar is niets op tegen... tenzij ze gedurende de vaart op de motor onder de spoorbrug door, de accu meteen weer vol willen hebben. Dat zal om verschillende redenen niet gaan.

Ten eerste levert de wisselstroomdynamo onvoldoende vermogen om in die korte tijd van de doorvaart de startaccu en de service accu weer bij te laden.

Ten tweede zijn de converters begrensd op een maximale stroom en thermisch begrensd op een maximale temperatuur (begrenzers zitten ook op vrachtwagens! De chauffeur heet dan Max Laadvermogen. 😊 )

Ten derde zou de accu wel eens niet zo leeg kunnen zijn en er kan dan geen hoge laadstroom lopen.

## Het opportunistisch laadsysteem

Veel schippers willen een opportunistisch laadsysteem dat de cellen zo snel mogelijk laadt als er vermogen en energie beschikbaar is. Zij willen dan ook meteen een hoge laadstroom 'op de meter' hebben. Ze realiseren zich dan meestal niet dat de hoge laadstromen alleen zullen optreden als de cellen leeg zijn, iets wat ze zoveel mogelijk willen voorkomen en waar ze ook gelijk in hebben als het zou gaan om loodzwavelzuur cellen.

Veel schippers willen ook een opportunistisch laadsysteem dat in eerste instantie de stroom uit de zonnepanelen gebruikt voor de apparaten aan boord en de accu niet ontlad. Dit is niet mogelijk, er kan geen splitsing of selectie worden gemaakt in 'rode elektronen uit het zonnepaneel zijn voor de accu en paarse elektronen uit het zonnepaneel zijn voor de apparaten'.

Als er stroom wordt gebruikt en de zon schijnt op de zonnepanelen, komt deze voor een deel uit de zonnepanelen en voor een ander deel uit de accu. De verdeling tussen accustroom en paneelstroom is afhankelijk van de zonnestraling op het paneel ofwel het 'zonnevermogen' en het afgenomen vermogen.

Als er geen stroom wordt gebruikt en de zon schijnt op de zonnepanelen, gaat alle stroom uit de zonnepanelen in de accu zolang de accu niet helemaal vol is.

Als er een klein beetje stroom wordt gebruikt en de zon schijnt op de zonnepanelen, zal dit door de iets hogere laadspanning van de zonnepanelen geheel of voornamelijk uit de zonnepanelen komen en niets of heel weinig uit de accu.

Als er een klein beetje stroom wordt gebruikt bij individuele celladers zonder een opportunistische seriële lader, komt deze stroom via de celladers direct uit de zonnepanelen.

De Mornsun wide range DC/DC converters leveren 15, 20 of 30W aan vermogen op de uitgang. Bij een uitgangsspanning van 3,3V is dat een nominaal waarde voor de laadstroom van 4,5A bij de 15W converter, 6,1A bij de 20W converter en 9,1A bij de 30W converter. Met een omzettingsrendement van 80% betekent dat er 18,75W in een 15W converter moet worden gestopt. Voor een 12V installatie van 4 LFP cellen is er dan 4 maal 18,75W ofwel 75W op de ingang nodig om de converters op hun top te laten werken. Dat mag wel meer zijn, maar de converters zullen niet meer dan hun maximale laadstroom aan de uitgang leveren.

Even naar de andere kant van de DC/DC converter... Bij een omzettingsrendement van 80% is er voor een 30W converter 37,5W nodig om de maximale laadstroom eruit te halen. Bij een 12V installatie is dat 150W aan ingangsvermogen. Je hebt dan 150Wp aan zonnepaneel vermogen nodig voor een optimale aanpassing van het zonnepaneel op de laadinstallatie.

Bij een vast zonnepaneel dat niet op de zon kan worden gericht, kun je dan hooguit een half uur per dag 150Wp uit het zonnepaneel halen en dit omzetten naar lading voor de accu. Kun je het zonnepaneel richten en per half uur in de optimale stand brengen, dan kun je wel 6 uur 150Wp uit het zonnepaneel halen.

Nu is het niet zo dat een 150Wp paneel 'buiten het optimale halfuurtje' helemaal niets levert en raakt de accu toch nog wel vol. Dit systeem is heel veilig, ongeacht de mate van toevoer kunnen de cellen niet worden overladen omdat de lader dat niet kan.

Naast de zonnepanelen kan de lader zonder problemen worden gevoed uit de wisselstroom dynamo van de motor, ook als de zonnepanelen actief leveren. Alles is automatisch en 150W vermogensopname uit de dynamo is ongeveer een stroomsterkte van 10A en daar zal de dynamo niets van krijgen.

## Vermogen van het zonnepaneel in relatie tot de individuele celladers

Tot nu is het zo dat het vermogen van de zonnepanelen het vermogen van de converter-laders bepaalt:

Spanningsbereik ingang	Afgegeven en opgenomen vermogen bij:		Accucapaciteit in Ah energieopslag in kWh	
	9-24V 12V service accu	15W converters: 60W	75W	50 tot 100Ah
20W converters: 80W		100W	70 tot 120Ah	0,84 tot 1,44kWh
30W converters: 120W		150W	100 tot 200Ah	1,2 tot 2,4kWh
9-24V 24V service accu	15W converters: 120W	150W	50 tot 100Ah	1,2 tot 2,4kWh
	20W converters: 160W	200W	70 tot 120Ah	1,68 tot 2,88kWh
	30W converters: 240W	300W	100 tot 200Ah	2,4 tot 4,8kWh
9-24V 48V service accu	15W converters: 240W	300W	50 tot 100Ah	2,4 tot 4,8kWh
	20W converters: 320W	400W	70 tot 120Ah	3,36 tot 5,76kWh
	30W converters: 480W	600W	100 tot 200Ah	4,8 tot 9,6kWh

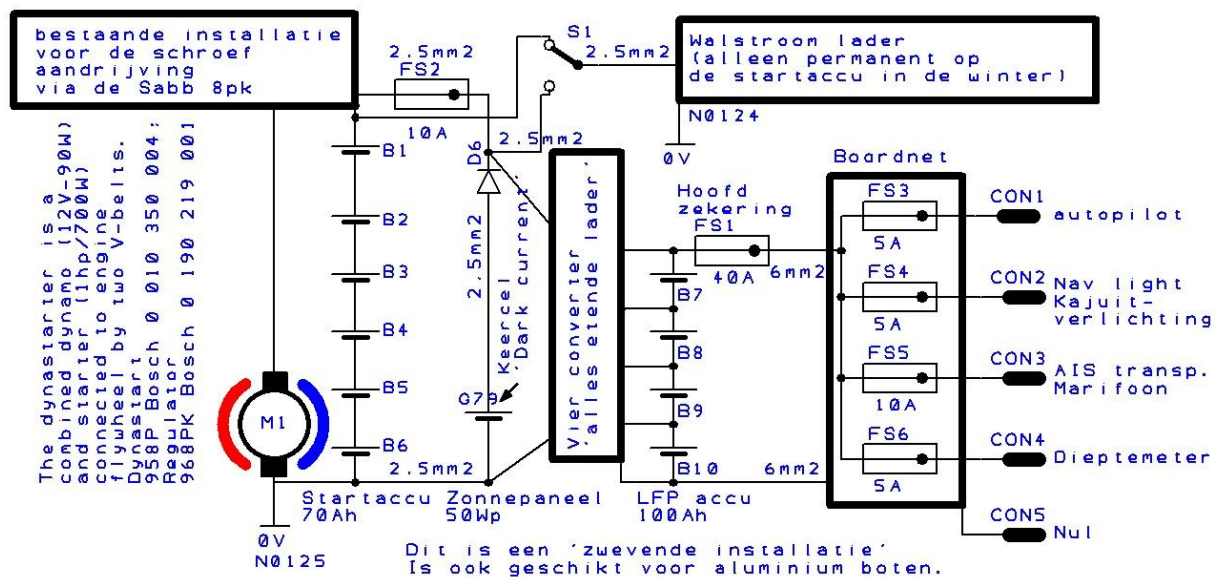
Er zullen niet veel schippers zijn die meer dan 300Wp aan zonnepanelen zullen installeren omdat er meestal onvoldoende ruimte voor is. Ook 48V boordspanning of hoger zal niet vaak voorkomen behalve bij 'elektroschippers'. De installatie is dan per cel 'laadspanning begrensd' en overladen kan niet optreden.

Stel, je hebt een 27 voets Halcyon met een 8pk Sabb dynastart diesel die 90W bij 13,8V uit de dynamo haalt. Hiermee laadt je de startaccu en zou je de serviceaccu kunnen laden. Verder heb je een 50Wp zonnepaneel aan boord om de service loodaccu van 70Ah te laden en anders moet je de motor starten om stroom te draaien.

Dan kun je met een 4 converter lader met 15W converters 75W aan laadvermogen voor een LFP accu verwerken. Die converters 'zuigen' dan het 50Wp paneel zo'n beetje 'vacuüm'. Een extra 'opportunistische' seriële lader is niet nodig, want zelfs onder de gunstigste condities wordt het laadvermogen uit het zonnepaneel nooit hoger dan 50W.

De 90W die de dynastart levert (bij vol toerental) is maar 15W aan surplus vermogen en wie het onderste uit de kan wil zou dat vermogen via een buck/step down converter serieel aan kunnen brengen tot 13V is bereikt. Veel complexere installatie met maar beperkt voordeel. De Sabb kan heel goed via de 15W converters de accu laden en je hoeft ook niet bang te zijn dat de dynamo doorbrandt vanwege het hoge afgenomen vermogen van de converters.

Verder heb je nog een eenvoudige acculader om de startaccu met walstroom te laden als deze onverhoopt leeg is gestart. Door de 'wide range input' van de converters kun je deze lader dan ook gebruiken om de service accu met walstroom te laden als met somber weer de stuurautomaat een aanslag heeft gepleegd op de energievoorraad in de service accu en de reglementen je verbieden om de dieselmotor te starten.



Alleen je hebt geen Halcyon 27 met een 8pk Sabb en je hebt net 250Wp aan zonnepanelen geïnstalleerd... Met vier 15W converters kun je maar gebruik maken van 75Wp.

Dan wordt 125W niet gebruikt net als de zon de meeste energie binnenbrengt, bummer, dat komt slecht uit!

Nu is het wel zo dat een 250Wp paneel langer 75Wp levert dan een 75Wp paneel maar met de zon haaks op het paneel kun je net die 175W aan surplus niet in de accu 'prakken'. Op zich niet erg, want de LFP accu zit toch al vol na het uitvaren van de haven.

Ga je over op 30W DC/DC converters, dan kun je bij 80% efficiëntie ca 150Wp in de accu stoppen. maar de installatie zou zo opportunistisch moeten zijn dat bij de optimale zonnestand er ook het maximale uit wordt gehaald. Je zou wat met die 100Wp kunnen doen als je accu leeg genoeg is... Houdt er rekening mee dat je dan ook die laatste 'kruimels' zonnevermogen wel in de accu moet kunnen stoppen, want als de accu vol zit, gebeurt er niets! Dat is mogelijk, heeft het meetlab uitgevonden.

Je sluit het paneel op de converter ingangen aan en als de zon goed staat en de accu is leeg, dan wordt bij ca 17V 150W uit het paneel gebruikt om te laden.

Als je het paneel nu op een buck of stepdown-converter aansluit kun je daarmee de paneelspanning terug brengen naar 13,2V en direct op de + en de - van de accu aansluiten en de 'eerste 60% SOC' erin stoppen met die 175W die het surplus is. Het aftoppen van de accu tot 100% SOC verloopt via de converters. Dit kan voor de zonnepanelen en voor de stroom uit de wisselstroomdynamo. Daarvan is de spanning meestal lager, maar zolang deze 1V boven de 13,2V komt weet een buck-converter die nog wel netjes omlaag te regelen. Voor de goede werking van een buck-converter heeft deze minimaal 1 Volt spanningsverschil nodig.

Een wisselstroomdynamo voor een loodzwavelzuur accu levert bij stationair draaien vaak maar net 12V en bij 'het toerental van het hoogste koppel' (is voor iedere motor verschillend) rond de 14,5V. Dat is 1,3V boven de 13,2V en geeft de buck-converter voldoende ruimte om de spanning netjes op 13,2V te regelen.

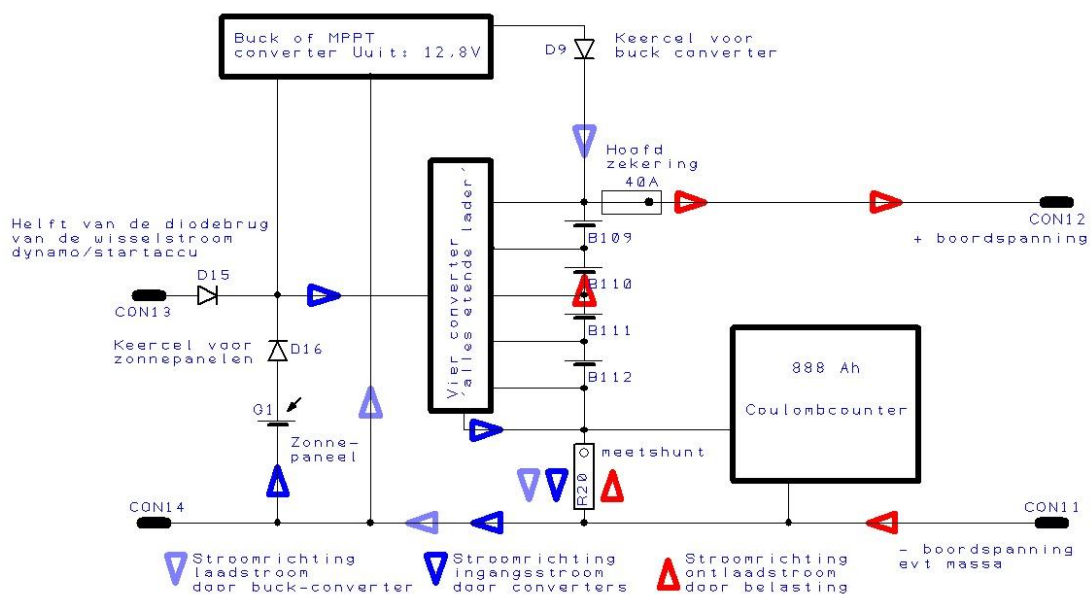
De buck-converter zal met de ter beschikking staande energie de LFP accu nooit verder dan 70% SOC opladen. De accu kan niet worden overladen. Is de accu al aan 70% SOC, dan wordt deze niet geladen via de buck-converter, 'het zijn de lege honingkamers die voor de honing zorgen'. Dit is serieel laden

en zijn de cellen van de accu van ongelijke capaciteit, -om welke reden dan ook- dan zou er een groot verschil in celspanning kunnen optreden omdat de 'kleinste cel' eerder een hoge spanning heeft en 'vol' zit en toch de laadstroom 'door de strot geduwd' krijgt. Door bij 70% SOC te stoppen (= celspanning van 3,25V of een accuspanning van 13,2V) is dit niet waarschijnlijk, maar niet onmogelijk.

De 4 converters voor individueel laden kunnen worden gevoed uit dezelfde bron als de seriële lader (buck-converter) en de DC/DC converters laden tot 3,4V per cel of 99% SOC of 13,6V accuspanning. Aangezien de individuele laders dit per cel doen en dit ook per cel regelen (de cel met de hoogste spanning krijgt de minste stroom), kan er tot 13,2V accuspanning wel een verschil in celspanning zijn, maar van 13,2V tot 13,6V wordt dit vereffend tot een identieke celspanning door de individuele laders. De seriële lader werkt dan niet meer, die stopt bij 13,2V.

"Ja ho effe, dan wordt de accu maar tot de helft geladen!" Nee, de seriële lader gaat maar tot de helft, de individuele lader gaat door tot de cellen allemaal op 3,4V zijn gekomen.

Met een coulombcounter wordt het schema dan zo:



Is de accu al op 12,8V of hoger, dan kunnen alleen de converters de accu optoppen tot 100% SOC (of zoveel minder als je veilig vindt in verband met de levensduur). De step-down/buck-converter werkt als seriële lader tot 70% SOC, daarboven werken de converter laders als individuele laders en houden de cellen veilig voor overladen. De converters zijn dan een 'ladend' BMS geworden.

Ja, in theorie klinkt het leuk, maar werkt het ook zo?

Ja, het werkt zo, het lab heeft het uitgetest. Er zijn vier cellen van verschillende capaciteit op een regelbare gestabiliseerde voeding aangesloten. De spanning van de voeding wordt op 13V onbelast afgeregeld en er loopt een laadstroom (de cellen zijn ontladen). Met een tweede gestabiliseerde voeding worden de converters gevoed. Deze worden gevoed met 24V omdat de converters daar het hoogste rendement (ca 90%) hebben. De converters hebben een vaste uitgangsspanning van 3,45V voor elke cel. De converter laadstroom wordt met een Hall generator Ampèretang gemeten.

Zonder de seriële lader leveren de converters de maximale stroom passend bij de klemspanning van de cellen. Op het moment dat de seriële lader wordt ingeschakeld gaat deze een laadstroom leveren

passend bij de accuspanning en doen de converters een stapje terug en laden met een lagere stroom. Wordt de spanning van de seriële lader terug geregeld, dan neemt de stroom uit de converters toe. Binnen het 'veilige gebied van 12 tot 13V' werken de laders naadloos complementair. Bij het bereiken van 13,1V accuspanning stopt de seriële lader en werken alleen de converters nog als laders tot 3,4V celspanning of 13,6V accuspanning. De converters stoppen met laden als de cellen op 3,4V zijn aangekomen, de stroom naar de cellen wordt 0 en zit de accu vol en komt er niets meer bij, tenzij er eerst wordt afgenomen.

Er blijft de vraag: Is het veilig voor de cellen? Daarop kan met ja worden geantwoord.

Aangezien het om 'CV' laden gaat is er geen sprake van een veilige laadstroom maar van een veilige eind laadspanning. De seriële lader mag tot 3,2V per cel er wel een stroom van 1c in stoppen om dan verder door de converters met 5A 'af te toppen' tot de cellen vol zijn. De twee systemen leveren weliswaar de totale laadstroom, maar worden door de spanning van de accu begrensd. Zou er een scenario te bedenken zijn waarbij met een groot capaciteitsverschil tussen de cellen er toch een cel kan worden overladen? Ik heb nog geen truc kunnen bedenken... op voorwaarde dat beide systemen tegelijk werken! Zou dat werken, dan zijn de goedkoopste 15W converters voldoende om een veilig systeem op te zetten met een seriële bulk/boost lader en een individuele cellader om af te toppen.

## Use cases

### Walstroom laadsysteem (systeemspanning 12V)

Het laadsysteem bestaat uit een SMPS met 180VAC – 230VAC input en 13,2VDC output. Dit is een fanloos model en maakt geen lawaai. De koeling van de SMPS verloopt via de aluminium behuizing. De SMPS is echter van IP40 klasse en niet waterdicht, dat is niet fijn bij 230V. De voeding is via een geaard stopcontact.

De uitgang is geïsoleerd en er is isolatie tot 1000V tussen de 230V kant en de 13V kant. Om de mate van 'waterdichtheid' te vergroten wordt het hele laadsysteem in een IP76 waterdichte kast gebouwd en van kabelwartels voorzien.

De kast zal de SMPS ook thermisch isoleren en daarom krijgt de deksel van de kast een opening die weer wordt afgedekt met een aluminium extrusie koelblok. De SMPS wordt op dit koelblok gemonteerd, precies in het gat van de deksel. Het koelblok wordt waterdicht op het deksel gekit/gemonteerd met een MS-polymer kit/lijm.

De 4 converter print komt ook met de converters tegen dit koelblok, zodat deze ook hun warmte goed kunnen afvoeren.

De SMPS voedt de converters met 13,2V en de converters hebben een uitgangsspanning van 3,42~V om de vier cellen individueel te laden.

De SMPS kan ook de hele accubank serieel laden tot 13,2V door de boost charger schakelaar te bedienen, dit kan alleen tezamen met de 4 converter lader omdat deze het laatste traject naar 3,4V celspanning en de balancering op de eind laadspanning verzorgt.

De lader heeft 3 maanden continu aangestaan in een test en heeft geen meetbaar nadeel in capaciteitsdaling of instabiliteit opgeleverd.

Van het diodeblok van de dieselmotor komt ook een aansluiting naar de converters, zodat deze direct laadstroom kan leveren als de motor draait. De converters zorgen voor een optimale spanning voor de vier cellen. Er wordt een blokkeerdioden toegepast om te voorkomen dat er stroom van de wisselstroomdynamo naar de uitgang van de SMPS loopt.

Er is geen zonnepaneel aan boord. Deze kunnen wel worden aangesloten. Er moeten dan wel 'dark current blocking' diodes in de zonnepanelen zijn opgenomen.

De accubank bestaat uit 4 200Ah cellen.

Monitoring:

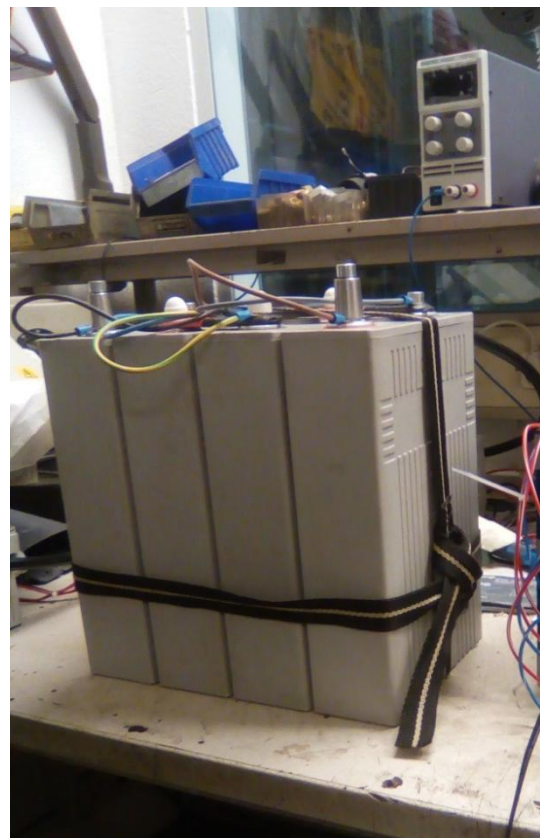
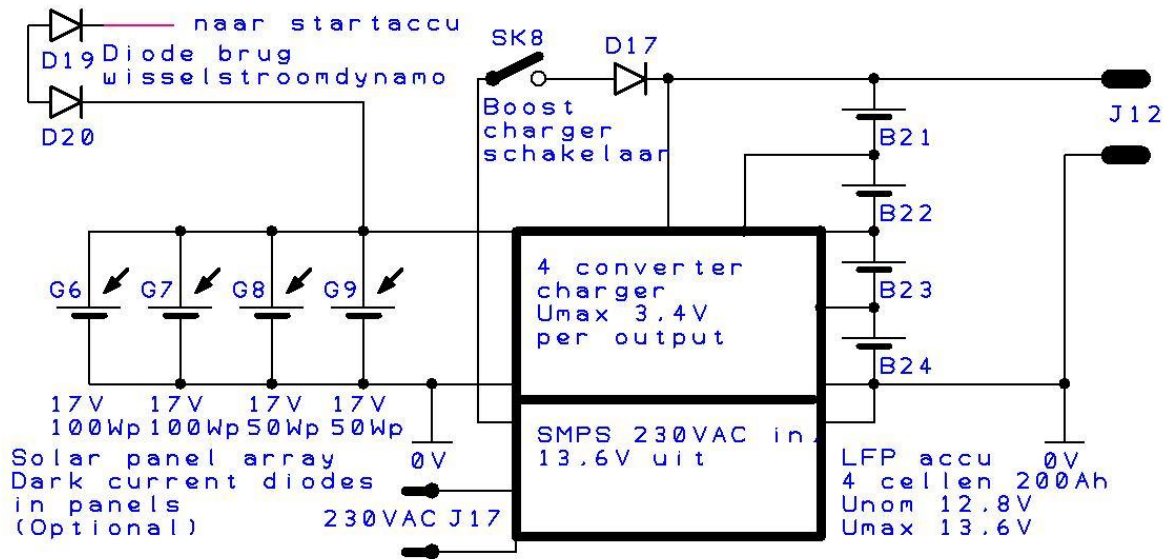
Verklikker LED (geel) voor het bereiken van voldoende ingangsspanning voor de 4 converters,

Accu monitor

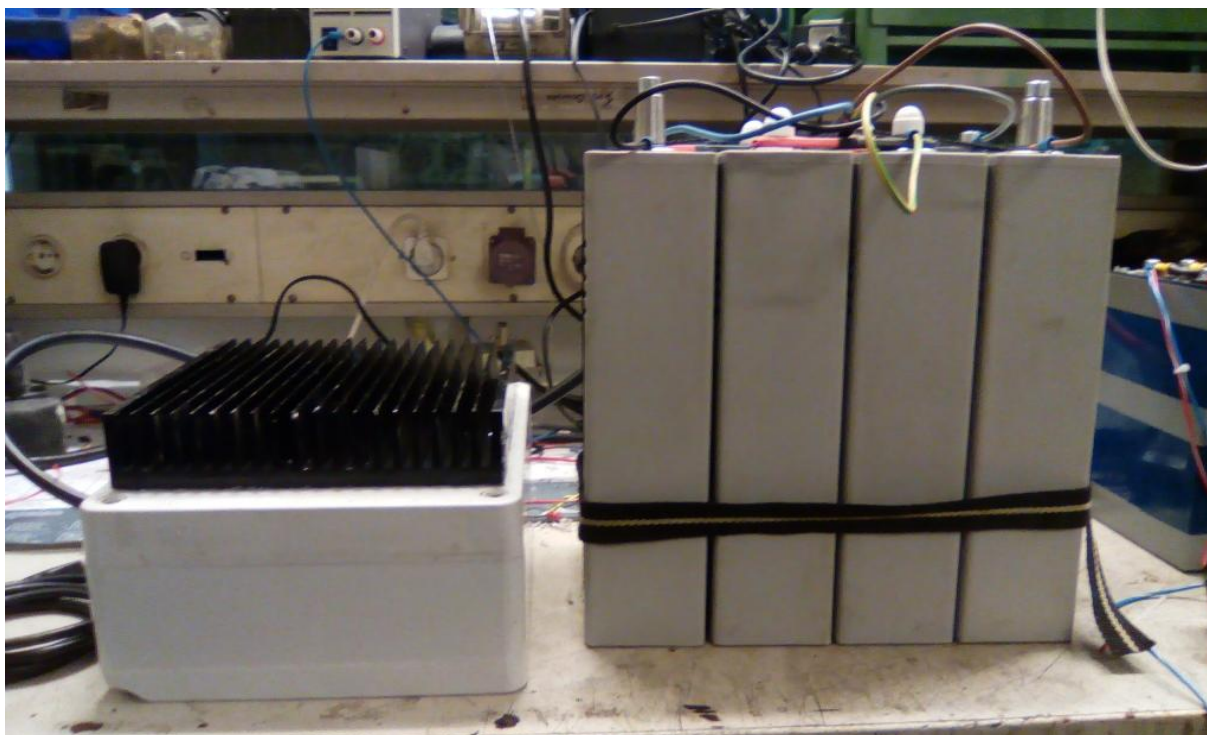
Vier bi-color LEDS als celspanning indicatie.

(niet in schema opgenomen)

Schema en fysieke uitvoering:



LFP 12V 200Ah service accu met individuele cellader en SMPS netvoeding voor 'opportunistisch laden' vanuit het lichtnet. Laden via een wisselstroomdynamo is ook mogelijk.



#### Bill of materials

aantal	onderdeel	Verkrijgbaar bij
1	Fanless SMPS 230V->13,4V	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	PCB voor de lader	
5	printkroonsteentjes	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	Mornsun URB2403LD-30WR3 converters	
1	Aluminium koelblok	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	Elektrolytische condensator 470uF 50V	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	Tantaal condensator 10uF 6,3V	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	100A hoofdzekering	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	LFP cellen (vanaf 100 tot 200Ah) naar keuze	www.ev-power.eu
1	Accumonitor naar keuze	Conrad, AliExpress e.v.a.
	Montage hardware en div. kabelschoentjes, Rijgklemmen rails	Gamma, Praxis, Hornbach e.v.a.
	Soepele leiding 2,5mm <sup>2</sup> en 6mm <sup>2</sup>	Conrad, AliExpress, Installateur
1	Behuizing van staal of kunststof, kabelwartels	Conrad, AliExpress, Installateur e.v.a.

#### Benodigd gereedschap:

Soldeerbout met fijne punt,

Colophonium soldeertin,

Krimptang voor kabelschoentjes,

Schroevendraaiers (ten minste een fittingschroevendraaier of 'spanningszoeker')

Boormachine, Multitool voor gaten maken in de behuizing, boor 2,3mm en M3 tap voor bevestigingsgaten voor de print en de SMPS op het koelblok.

#### Bouwvolgorde:

Soldeer de onderdelen op de print.

Controleer of alle onderdelen in de behuizing passen en deze dan nog dicht kan.

Monteer de rails voor klemmenreeks in de behuizing.

Maak de opening in het deksel zodat de converters en de SMPS direct op het koelblok kunnen worden gemonteerd.

Plak met een 'drupje' siliconenkit het koelblok op de converters. Druk de converters krachtig op het koelblok om de laag siliconenkit zo dun mogelijk te maken. Schroef de converterprint vast. Schroef de SMPS vast. Elektrische isolatie is hier niet nodig, de converters zijn met het huis tot 1000V geïsoleerd, de SMPS heeft een PE aansluiting. Deze wordt doorverbonden met de PE draad van het netsnoer.

Monteer alle bedrading in het deksel van de behuizing.

Monteer de kabelwartels en aansluitingen van de invoer in de behuizing.

Bedraad de converterprint (bij 30W converters is 2,5mm<sup>2</sup> voldoende draaddoorsnede)

Sluit de bedrading aan en let daarbij goed op de polariteit. Gebruik voor de leidingen naar de accu minimaal 2,5mm<sup>2</sup> aan koperdoorsnede.

## Converter van 24V naar 12V en power back up voor een 24V boordnet

Of

Portable service accu systeem voor een kleine boot.

Voor de wat grotere boten met een hoger energiegebruik wordt in toenemende mate 24V als boordspanning gebruikt. Hoewel in automotieve apparatuur 24V meer en meer voorkomt, is er ook nog veel 12V apparatuur, vooral in het lagere prijssegment.

Voor kleine boten is een 12V trolling motor (in het Chinees wordt dit met een 'elektrische peddel' aangeduid) meestal voldoende om haven uit en haven in te varen. Dit kan dan alleen met een motor met een laag vermogen en bij een hogere vermogenswens moet dan toch een 24V motor worden ingezet om de kabels naar de motor niet al te zwaar te maken.

Als op een zeilboot de service accu uitvalt zou je de 12V startaccu als back up kunnen gebruiken. Dit verplicht je dan om apparatuur te gebruiken met dezelfde systeemspanning als de startaccu en dat is in de meeste gevallen 12V.

Als je elektroschipper bent op een zeilboot met een tractieaccu van 24, 48 of 72V ga je een converter nodig hebben om de 12V apparatuur op deze accubank met een hogere spanning te laten werken. Daar komt bij dat de tractieaccu op enig moment leeg kan zijn en dan werkt de converter ook niet meer.

Als de motor aan boord niet meer wil starten om welke reden dan ook, kun je niet meer 'stroom draaien' en kan de service accu niet meer worden bijgeladen.

Scenario's waarbij een back up systeem in elk geval de marifooncommunicatie, GPS met plotter en AIS 'up and running' kan houden.

Binnen de SOLAS richtlijnen wordt aangegeven dat de kritische apparatuur aan boord een geheel eigen elektriciteitsvoorziening moet hebben. Ik reken de marifoon en een GPS systeem tot die kritische apparatuur. Reeds van een accusysteem voorziene apparatuur (smartphone, tablet en notebooks), kunnen ook werken als de service accu uitvalt en hebben daarmee hun energievoorziening bij uitval van de serviceaccu al gegarandeerd.

Met de 'alles etende' lader en een accu van 20Ah tot 70Ah is een dergelijk systeem samen te stellen. De capaciteit van de accu bepaalt de autonomietijd en omdat de laadstroom uit de 'grote service accu' komt is de mogelijkheid tot laden aanwezig tot deze accu uitvalt.

De lader van de back up accu kan laden via de service accu, de wisselstroom dynamo, zonnepanelen, walstroom, windmolen en hydrogenerator. Dit is niet kritisch.

Voor de kleine 'weekender' jachten is een back up van 70Ah wellicht groter dan de service accu en kan het geheel als service accu dienst doen, afhankelijk van het verbruik. Er is dan geen sprake meer van 'back up'. Het laden verloopt dan via walstroom (stekker transformator), zonnepaneel, wisselstroom dynamo of andere energiebronnen die DC kunnen leveren tussen de 10V en 36V.

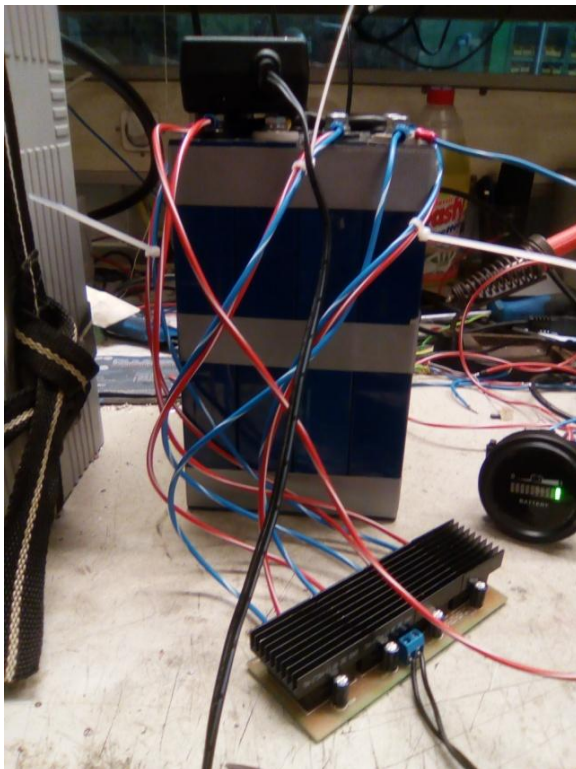
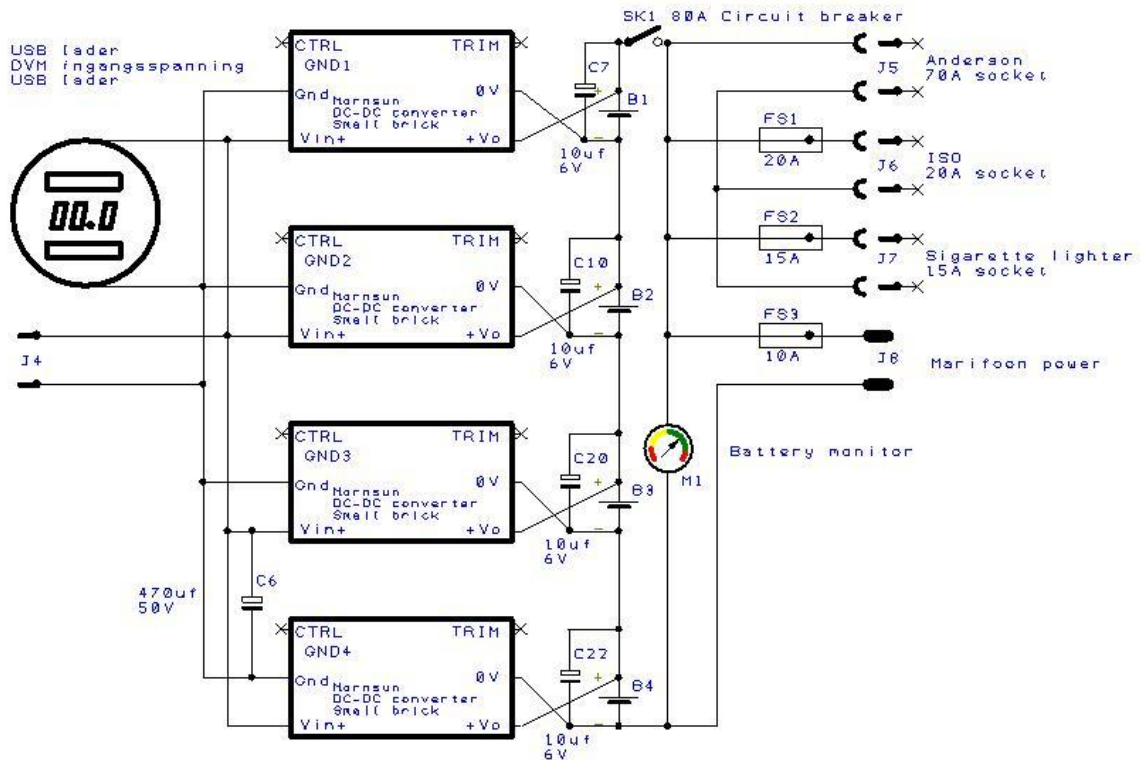
De input wordt gemonitord door een DVM die is ingebouwd in een wide range USB converter naar 5V. Deze is bedoeld voor het laden van apparaten die inwendig een accu hebben en hun eigen back up vormen.

De input levert direct aan de 4 converters en deze laden de 4 cellen van de LFP accu.

De stroom uit de accu wordt afgenomen via een 80A circuitbreaker die tevens de hoofdschakelaar is. Na de hoofdschakelaar volgen zekeringen, voor elke 'groep' één zekering. De uitgangen zijn in elk

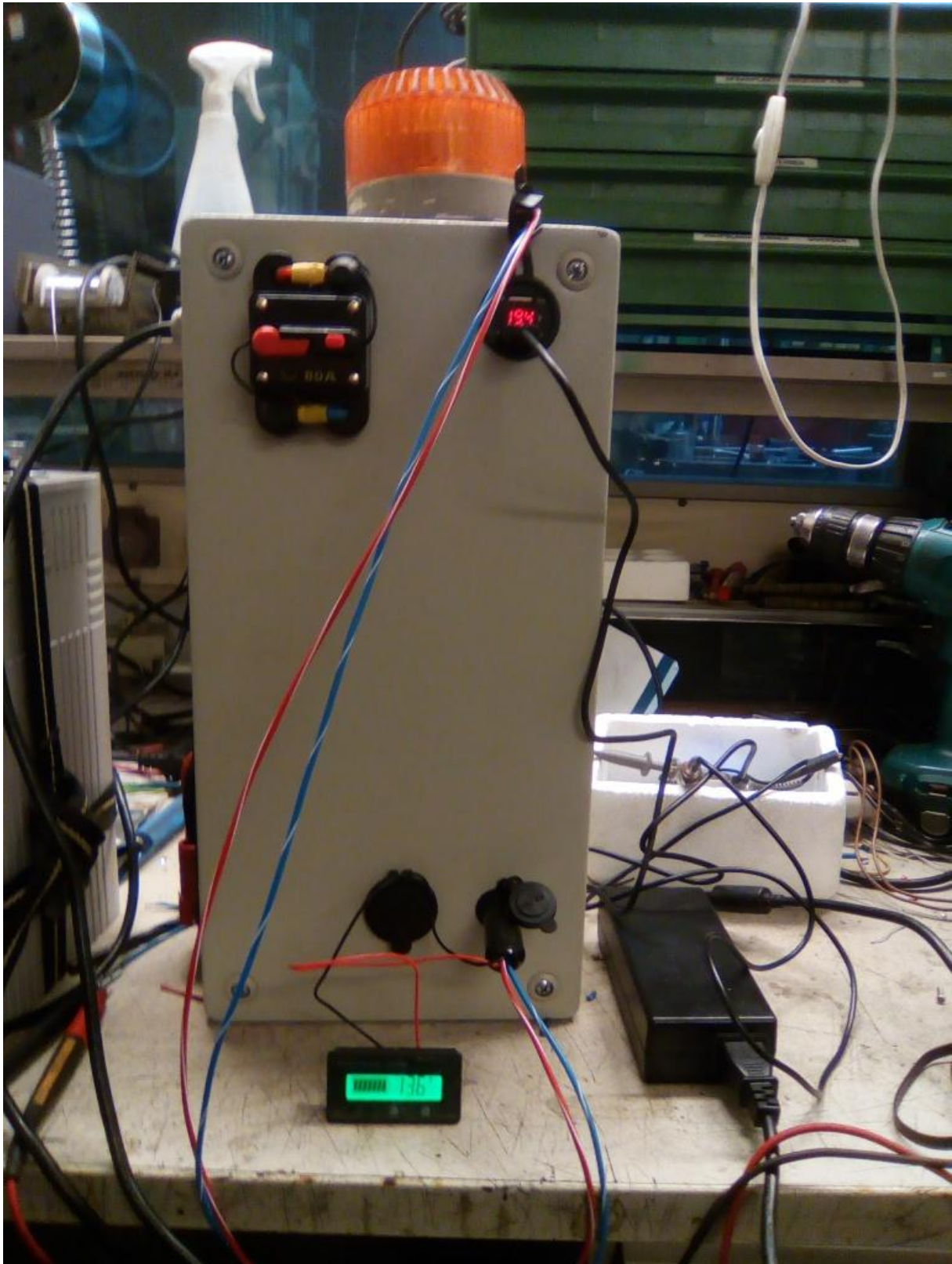
geval één ISO contact tot 20A en één sigaretten aansteker contact tot 15A. Kabel of draad aansluitingen via kabelwartels zijn ook mogelijk.

Monitoring van de accu verloopt via een standaard batterij monitor met aanduiding in spanning of in procenten en een bargraph.



Testopstelling met 72Ah accubank en een 4 x 15W converter print met koelblokkjes op de converters. De converters worden gevoed door een oude 19V notebook voeding (op de accu te zien). De testopstelling zal 3 maanden zonder onderbreking aan de lader staan en de cellen tot 3,4V laden. De accu wordt gemonitord door een goed verkrijgbare 10-LED bargraph accumonitor. In de start-up wordt gemeten om welke accuspanning het gaat in de bereiken 12-24V, 36V en 48-72V. In het 12V bereik loopt de bargraph helemaal naar links als de accuspanning onder de 10V komt en gaat er een rood en geel LED-je afwisselend branden. Bij ontlading tot 1,5V per cel, zijn de 4 converters in staat de accu weer geheel tot 13,6V of 3,4V per cel te laden. Daarom is afgezien van een diep ontladingsbeveiliging, zodat gebruik tot de laatste mA mogelijk is.

## Uitvoering voor in vivo testen



Stalen kast met 4 LFP cellen van 72Ah gevoed door een oude notebook voeding (19,4V) met 3 uitgangen:

Anderson connector 70A (links aan de zijkant van de kast)

een sigarettenaansteker aansluiting en

een ISO connector (Hella stekker)

Boven links de circuit breaker (80A) en boven rechts de ingangsspanning monitor en 2 USB laadaansluitingen voor smartphone en tablet computer.

Extern is een accumonitor en een strobe light aangesloten.

De zekeringen zijn 'fusible links' en zijn inwendig in de kast aangebracht.

#### Bill of materials

aantal	onderdeel	Verkrijgbaar bij
1	USB lader met DVM 11V tot 30V	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	PCB voor de lader	
5	printkroonsteentjes	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	Mornsun URB2403YMD-15WR3 converters	
1	Aluminium koelblok	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	Elektrolytische condensator 470uF 50V	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	Tantaal condensator 10uF 6,3V	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	80A circuitbreaker	Conrad, AliExpress e.v.a.
1	Anderson connector	Conrad, AliExpress e.v.a.
3	Zekeringhouders voor 5x20 zekeringen	Conrad, AliExpress e.v.a.
4	LFP cellen (vanaf 20 tot 70Ah) naar keuze	<a href="http://www.ev-power.eu/LiFePO4-small-cells">www.ev-power.eu/LiFePO4-small-cells</a>
1	Accumonitor naar keuze	Conrad, AliExpress e.v.a.
	Montage hardware en div. kabelschoentjes, plaatjes isolerend materiaal (Trespa, polycarbonaat) Velcro bandjes om de accu tegen de achterzijde van de behuizing te bevestigen.	Gamma, Praxis, Hornbach e.v.a.
	Soepele leiding 1,5mm <sup>2</sup> , 2,5mm <sup>2</sup> en 6mm <sup>2</sup>	Conrad, AliExpress, Installateur
1	Behuizing van staal of kunststof, kabelwartels	Conrad, AliExpress, Installateur e.v.a.

#### Benodigd gereedschap:

Soldeerbout met fijne punt,

Colophonium soldeertin,

Krimptang voor kabelschoentjes,

Schroevendraaiers (ten minste een fittingschroevendraaier of 'spanningszoeker')

Boormachine, Multitool voor gaten maken in de behuizing,

#### Bouwvolgorde:

Soldeer de onderdelen op de print.

Plak met een 'drupje' siliconenkit het koelblok op de converters. Druk de converters krachtig op het koelblok om de laag siliconenkit zo dun mogelijk te maken. Elektrische isolatie is hier niet nodig, de converters zijn met het huis tot 1000V geïsoleerd.

Controleer of alle onderdelen in de behuizing passen en deze dan nog dicht kan.

Monteer de onderdelen die bereikbaar moeten zijn (meters, contactdozen, schakelaars en zekeringhouders) in het deksel van de behuizing.

Bedraad alle onderdelen in het deksel van de behuizing.

Monteer de kabelwartels en aansluitingen van de invoer in de behuizing.

Monteer de Velcro bandjes om de accu te bevestigen en plak de plaatjes voor de montage studs tegen de achterwand van de behuizing (bij een metalen kast moet dit plaatje van een isolerende achterzijde zijn voorzien).

Bedraad de converterprint (bij 15W en 20W converters is  $1,5\text{mm}^2$  voldoende draaddoorsnede)

Plaats de accu's en de converter print in de behuizing. De converterprint zit met de converters op het koelblok en het koelblok kan weer met siliconenkit op de behuizing worden vastgezet. Bij het vastzetten met MS polymeer kit is de bevestiging nog sterker. Bij een metalen behuizing heeft een dunne laag siliconenkit de voorkeur aangezien dit een betere warmtegeleider is dan MS Polymeer kit en de metalen behuizing nog een deel van de koeling voor zijn rekening kan nemen.

Sluit de bedrading aan en let daarbij goed op de polariteit. Gebruik voor de leidingen naar de accu minimaal  $6\text{mm}^2$  aan koperdoorsnede, zowel in de plus als de min. Pas na de zekeringen voor de toestel aansluiting kan  $2,5\text{mm}^2$  draaddoorsnede worden gebruikt.

## Afsluiting

Wat is er vastgesteld?

Het grootste gevaar voor de levensduur van een LFP accu is deze te behandelen als een loodaccu en de laadtechnologieën voor loodaccu's toe te passen.

'Sudden cell death' is niet plotseling, het treedt op bij accu's waarvan de cellen in serie worden geladen. Indien de cellen van een limiter zijn voorzien, kan dit niet gebeuren. Het surplus aan laadvermogen wordt dan omgezet in warmte.

LFP cellen balanceren zichzelf bij laden en ontladen tussen 20% en 99% SOC en hoeven niet te worden gebalanceerd door een puls lading zoals bij loodzwavelzuur accu banken.

Cyclisch gebruik (laden en dan ontladen tot 'bijna leeg' en daarna pas weer laden) is een techniek die wordt gebruikt bij LiCo cellen om het geheugen effect tegen te gaan. Bij LFP cellen is er geen geheugen effect en cyclisch gebruik is overbodig. De melding dat cyclisch gebruik de levensduur verlengt kan niet worden bevestigd.

Drie trap laadsystemen zijn onnodig ingewikkeld en zelfs gevaarlijk voor de levensduur van LFP accu's. Met name de 'float charge' zal een LFP accu overladen en vernielen. Float charge is door de geringe zelfontlading van LFP cellen onnuttig.

LFP accu's hebben geen bulk fase of absorptie fase. Door de lage inwendige weerstand kan de cel het best 'Constant Voltage' worden geladen, waarbij in het geval van zeer diep ontladen cellen een lader met stroombegrenzer moet worden gebruikt ter bescherming van de lader.

Het laden met de maximaal toegestane celspanning van 3,65V zal de cel met zekerheid vernielen als deze boven de 90% SOC komt. De hoogst gebruikte spanning om te laden tijdens het onderzoek is 3,5V geweest.

LFP cellen kunnen in het gebied van 30% tot 70% SOC een laadstroom van 1c aan zonder warm te worden. Boven de 70% SOC kan de cel met die hoge laadstroom snel de 99% SOC overschrijden en zo warm worden dat de cel bol komt te staan.

Individueel cel laden is veilig en bij een afregeling op een eind laadspanning van 3,4V kan er geen 'sudden cell death' ontstaan, omdat de cel niet boven de maximale laadspanning kan komen. In een test zijn gedurende 3 maanden 3x4 cellen dag en nacht op 3,4V gehouden zonder enige te meten schade.

Het op/ontlaad rendement van LFP cellen loopt van 95 tot 98%. Het is niet onderzocht of dit door veroudering verandert. Veroudering heeft wel invloed op de capaciteit.

Voor het in gebruik teruglopen van de celcapaciteit is in de literatuur geen duidelijke reden gegeven, er wordt opgegeven dat 'piekbelastingen' de cellen doet slijten (de fysische invloed hiervan is onbekend of niet beschreven).

Bij 'sudden cell death' wordt de warmte ontwikkeling en het 'ontgassen' door deze warmte als oorzaak aangegeven, maar er is geen onderzoek hiernaar.

Piekbelastingen zijn snelle ontladingen en tezamen met snelladen wekken zij warmte op in de cel en er zijn daarmee aanwijzingen dat het warm worden van een cel de enige oorzaak is voor slijtage in de vorm van afname van de levensduur en de capaciteit.

De ontwikkelde warmte is gelijk aan  $I^2 \cdot R \cdot t$  en de cellen met de laagste inwendige weerstand hebben de beste voorwaarden voor een lange levensduur.

Een levensduur van 2000 cycli geldt als normaalwaarde voor LFP cellen.

Bij gebruik tussen 20% en 80% SOC worden 6000 cycli als levensduur gemeld.

Bij gebruik van een coulombcounter met instelbare Peukert factor moet deze op '1' (voor ideale accu) worden ingesteld.

Een geheel ontladen LFP cel (klemspanning < 1000mV) moet weer opnieuw initieel worden geladen. Schade aan de cel of vermindering van capaciteit is bij 4 gevallen van totale ontlading met een tijdsduur van 24 uur, niet voorgekomen.

Tijdens het initieel laden wordt de cel snel warm en moet het initieel laden worden onderbroken. Is een celspanning van 2V bereikt bij het initieel laden, dan kan de cel weer volgens de normale werkwijze zonder warm te worden, worden geladen.

Bij ontladen tot een celspanning van 1,5V is opnieuw initieel laden niet nodig gebleken, met 30W Mornsun converters werd één 330Ah cel in een serie van 16 cellen, vanaf 1,5V in één dag naar 2,1V geladen, de volgende dag naar 2,7V geladen, op de 4<sup>e</sup> dag werd de 3,3V bereikt. De 15 andere cellen hadden een celspanning tussen de 3,25V en de 3,43V

Tot 3,0V onderbreekt de thermische beveiliging van de converter het laden regelmatig, maar stopt niet. De laadstroom is 9,5A tot de 3V wordt bereikt. Boven de 3,0V onderbreekt de thermische beveiliging het laden niet meer.

LFP cellen worden bij gebruik in het gebied van ontladen met 3c en opladen met 1c, niet warm zolang de maximum laadspanning van 3,45V per cel wordt gerespecteerd. Thermal runaway komt bij gebruik binnen deze grenzen niet voor.

Het elektrolyt van LFP cellen is onbrandbaar en de cellen kunnen niet ontploffen. Er is geen Kobalt verbinding in een LFP cel die met water een chemische binding aangaat. Het enige dat een LFP cel kapot kan maken is overladen of mechanisch beschadigen.

Individueel celladen met wide range input converters kan worden aangevuld met serieel CV laden. Voorwaarde is dat de laadspanning bij serieel laden de 3,3V per cel niet te boven komt. Het is de op een output van 3,4V afgeregelde converter die het sterk uit de pas lopen van de celspanningen voorkomt en die werkt als een limiter, maar zonder extra vermogensverbruik.

Ik ben een grenzeloze optimist en vanaf mijn roze wolk zie ik:

Little wing.

Well she's walking through the clouds  
With a circus mind  
That's running wild  
Butterflies and zebras and moonbeams  
And fairly tales,

That's all she ever thinks about,

Riding the wind

Jimi Hendrix,