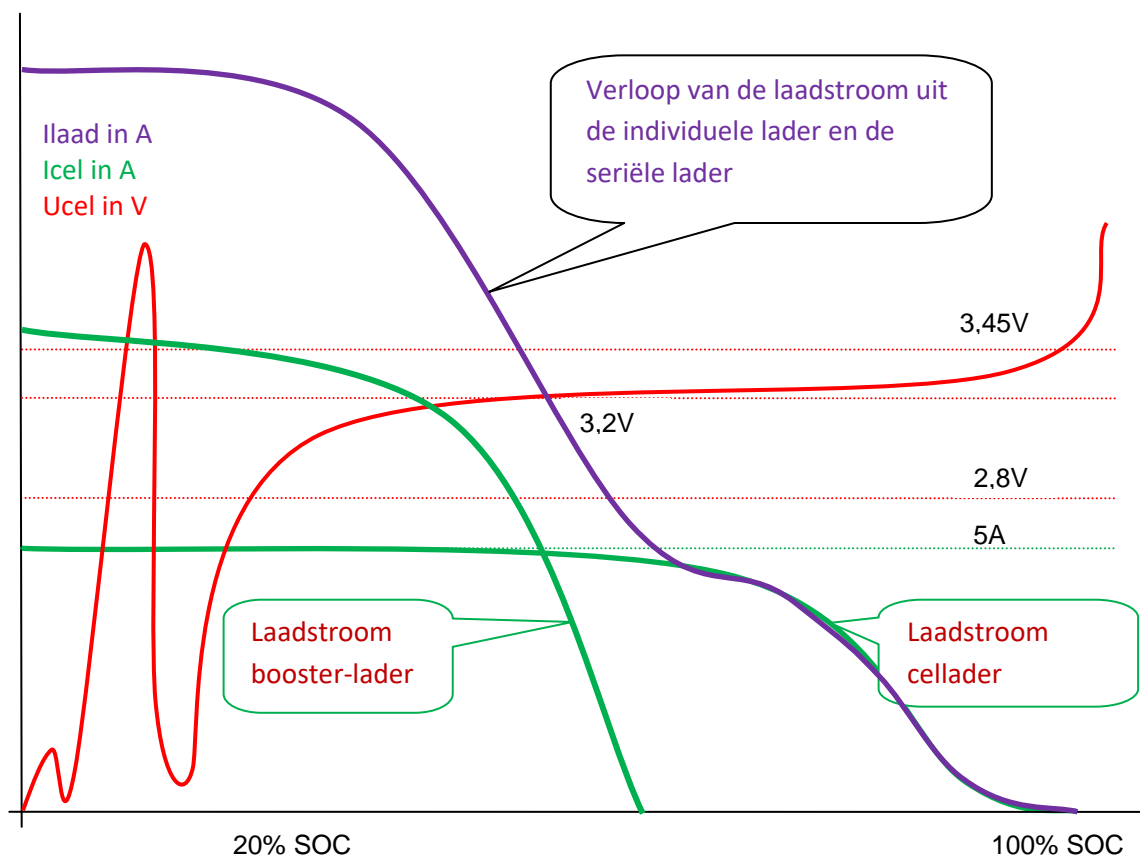


Peper

Dit is geschreven in het Nederlands. Het gebruik van anglicismen, amerikanismen, germanismen, latinismen en barbarismen wordt zoveel mogelijk vermeden. Dit om verwarring bij de technische inhoud tegen te gaan.



Build 1-10-2025

Alles wat je weten wilt over Lithium Ferrofosfaat accu's en niet durft te vragen V2.1

Inhoud

Deel 1: Graaf is alle Theorie	1
Even wat elektriciteitsleer	1
Een beetje natuur-scheikunde	1
Samenstellende delen van een LFP-cel	2
Lithium.....	2
IJzer.....	3
Fosfor.....	3
Zuurstof	3
Yttrium.....	3
Hoe werkt een LFP cel?	4
Laden	4
Eerste laadfase	4
Overgang van eerste naar tweede laadfase.....	5
Tweede laadfase.....	5
Derde laadfase of de 'overlaadfase'	5
Waarom initieel laden met 4V?.....	6
Ontladen.....	7
Nominale spanning.....	7
Inwendige weerstand	8
Op- en ontlad rendement en levensduur.....	8
Monitoren en weergeven van de laadtoestand.....	9
Ladingmeting en monitoring door een coulombcounter	10
Ladingmeting en monitoring door spanningmeting.....	10
Slijtage Li-Ferfosfaat accu's.....	12
Lithium plating, hoe werkt dat?	13
Bij laden:.....	14
De gevolgen van Lithium plating	15
Andere vormen van slijtage	16
Mechanische slijtage	16
Chemische slijtage.....	17
Cellen inklemmen.....	17
Thermal runaway.....	17

Constructie	18
Elektrodes of platen	18
Separator	19
Elektrolyt	19
Bouw.....	19
Initieel laden.....	19
‘Float charge’, ‘naladen’ en ‘druppelladen’	20
Weetjes	20
Bij de eerste keer laden.....	20
Bijladen.....	20
Balancing	20
Temperatuurcoëfficiënt	21
Diep ontlading	21
Zelfontlading.....	21
Theoretisch schema van een herlaadbare galvanische cel	22
Galvanische cel	22
Inwendige weerstand	22
Minimale laadstroom	22
Maximale laadstroom.....	22
Opwarmen van LFP-cellen.....	23
Thermometrie van LFP cellen.....	23
De lader of het laadsysteem.....	24
Serieel of individueel laden	25
Voodoo... ..	27
Het verloop van de celspanning bij het laden van een LFP cel in een tabel	29
Tabel met spanningverloop bij laden met een gestabiliseerde spanningsbron	29
Tabel met het verloop van de celspanning bij het ontladen van een LFP cel	30
Deel 2: Precieze Praktijk	32
Project Accubak voor blokvormige cellen	32
Eigenschappen.....	32
Plaatsing van cellen in een accubak	33
Indeling en aansluiting van cellen in een accubak	34
Het monitoringsysteem.....	35
Project celspanningmonitor / monitoring cellading	35

Bouwen.....	38
Denk erom:	39
Project zelfbouw walstroom lader voor een 12V LFP accubank	41
Wat zijn de mogelijkheden?	41
Specificaties.....	41
Schema	42
Toepassing.....	42
Capaciteit van de accu.....	42
Overlaad beveiliging	43
Temperaturen	43
Voedingsspanning	43
Uitgangsspanning van de lader	44
Bouwwijze	44
Alternatieve bouwwijze.....	44
BOM.....	45
Kabelschoenen	45
Behuizing	45
Gereedschap.....	46
Bouw.....	46
Gebruiksaanwijzing	48
Extra.....	49
Toestelzekering (voedingsspanning-zijde)	49
Hoofdschakelaar (voedingsspanning-zijde).....	49
'Vorstbeveiliging' (voedingsspanning-zijde).....	49
Aanpassing laadstroom	49
12V mobiel energie systeem	51
Project Zonnepanelen lader in CV modus met 3,3V als maximum laadspanning per cel.....	52
Denk erom:	53
Project zelfbouw onderspanning bewakingsysteem.....	54
Werking	54

Deel 1: Grau ist alle Theorie

„Grau, teurer Freund, ist alle Theorie, Und grün des Lebens goldner Baum.“ Johann Wolfgang von Goethe.

Even wat elektriciteitsleer

De **wet van Ohm** beschrijft de relatie tussen spanning, stroom en weerstand. Hierbij geldt dat er 1 Volt spanning nodig is om 1 Ampère stroom door een weerstand van 1 Ohm te laten lopen. In een formule: Spanning = Stroom x Weerstand ($U = I \times R$). Andere formules zijn hier van afgeleid: $R = U / I$ en $I = U / R$.

Elektrisch vermogen heeft als grootte P (van Pouvoir of Power) en wordt uitgedrukt in Watt. In een formule: P (vermogen) = U (spanning) x I (stroom). Door de samenhang in de wet van Ohm is P ook $I^2 \times R$ en ook U^2 / R .

Lading heeft als grootte Q en als eenheid Coulomb en 1 Coulomb is 1 Ampère maal 1 seconde. Capaciteit is de lading die in een accu kan worden opgeslagen. Dit wordt weergegeven in Ah (Ampère uur) en 1A maal 1uur (is 3600 seconden) is dus 3600 Coulomb.

1 Coulomb is ook gelijk aan 1V maal 1 Farad (de eenheid waarin de grootte van een condensator wordt uitgedrukt). Stel je zet 1000VDC op een condensator van 0,001F of 1mF (= 1000µF) dan loopt die condensator vol met ladingsdragers (elektronen) en als de condensator is volgelopen zit daar een lading in van $1000V \times 0,001F = 1$ Coulomb.

In het kort: $1 A \times 1 \text{ seconde} = 1 V \times 1 F = 1$ Coulomb. Nu is een condensator van 1 Farad nog al een onbenullig groot ding, zeker als deze meer dan 500V moet kunnen verdragen. Inmiddels zijn er zg 'supercaps' van wel 5F en 12V en daar kun je een verbrandingsmotor mee starten. Maak geen deukje in een dergelijke condensator als die is geladen, want dan ontploft de condensator door de interne kortsluitstroom. Gebruik je de formule $1 C = 1 V \times 1 F$ dan is de spanning op een cel rekenkundig afhankelijk van de lading in Coulomb in de cel. Je kunt de opgeslagen lading in een condensator of een cel meten door de spanning op de cel of condensator te meten.

Een LiFePO₄ cel waar op staat dat deze een nominale spanning heeft van 3,2V en een capaciteit van 160Ah, zal een lading van 160×3600 Coulomb hebben als de cel 'vol' zit en dan bedraagt de lading van de cel: 576.000 Coulomb.

Energie is het vermogensverbruik in één seconde. Het wordt uitgedrukt in Watt sec of Joule. Gebruik je veel energie dan kan het ook in Mega Joule of kiloWatt hour worden aangegeven.

Bron:

Th. P. van Pelt en E.H. Knol Elektriciteitsleer voor het M.T.O. Deel 1.
R.W. van Hoek en P. Rook Meetinstrumenten deel 1.

Een beetje natuur-scheikunde

Vanderwaalskrachten zijn elektromagnetische krachten die atomen en moleculen bij elkaar houden. Zij zorgen voor cohesie en adhesie van stoffen. Elektrische velden kunnen deze krachten verbreken. Zo kan bijvoorbeeld een Lithium ion uit Lithium Chloride worden losgemaakt (in water) en als een positief geladen ion naar een andere plaats worden gebracht om daar te koppelen aan een elektron of aan een negatief geladen ion.

Link: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Vanderwaalskrachten>

Bij het in water brengen van Lithium Chloride, verliest het lithium atoom het elektron uit de buitenste schil (het Lithium wordt dan een positief ion) en dit wordt dan opgenomen in buitenste schil van het Chloor atoom (het chloor wordt dan een negatief ion). Water is een dipool molecule met een positieve kant en een negatieve kant. Hierdoor worden de Vanderwaalskrachten geneutraliseerd en splitst het Lithiumchloride in een Chloor ion en een Lithium ion. Door twee elektroden in de oplossing te brengen en een elektrische stroom door de oplossing te laten lopen, zullen de positief geladen Lithium ionen aan de negatieve elektrode een elektron opnemen en als metallisch Lithium in een kristalrooster neerslaan en de negatief geladen chloor ionen aan de positieve elektrode een elektron afstaan en als chloorgas in de vorm van belletjes langs de elektrode omhoog komen.

Ga dit niet thuis uitproberen, het ontstane chloorgas is zeer agressief, corrosief en heel slecht voor je longen. Het werd in de eerste wereldoorlog als strijdgas gebruikt en heeft duizenden soldaten het leven gekost door longoedeem.

Samenstellende delen van een LFP-cel

Lithium

Link: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium>

Het in dit universum aanwezige Lithium zou zijn ontstaan bij de Big Bang en een deel ervan is inmiddels vervallen tot Helium. Dit verval gaat heel langzaam en er zal voorlopig Lithium aanwezig zijn in ons universum.

Lithium is een alkalimetaal (zoals Natrium en Kalium) en komt bijna niet voor als pure stof, maar meestal in een verbinding. Verbonden met Chloor (Lithiumchloride) is het een zout en kan het worden gewonnen worden uit zeewater. De voorraad is miljarden tonnen en van een tekort Lithium is voorlopig geen sprake. Lithium Chloride of -Bromide of -Jodide zijn zouten die in steenzout voorkomen. Het komt over de hele wereld voor in steenzout afzettingen op plaatsen waar zoute binnenzeeën zijn opgedroogd.

In de Elzas wordt Sylvinit gedolven waarvan 28% bestaat uit KCl (Kaliumchloride) Dit wordt in water opgelost en is de grondstof voor kaliumverbindingen voor de chemische industrie. Het aandeel NaCl (Natriumchloride, keukenzout) is 58% en wordt gebruikt om op de weg te strooien als pekkel bij gladheid. De rest is 14% aan afval zoals klei, andere zouten waaronder Lithium chloride en Lithium carbonaat. Het restafval met de Lithiumzouten wordt in de Rijn geloosd. Na Düsseldorf gaat de Rijn langzamer stromen en zetten de zouten zich in toenemende mate af op de oevers en vormen een bijdrage aan de verzilting van de landbouwgrond in Nederland. In 2023 is de hoeveelheid zout dat is opgelost in Rijnwater zo hoog geworden, dat het een probleem wordt. (onderzoek Universiteit van Wageningen, WUR) Er is dus meer dan genoeg van - en eigenlijk teveel van - in het water van de Rijn. In hoge concentraties zijn Lithium zouten toxisch, in lage concentraties maken zij onderdeel uit van 'anti depressiva' medicatie voor mensen met een bipolaire stoornis (vroeger heette dat: manisch depressief).

Düsseldorf ligt aan de rivier de Düssel en die stroomt door het Neanderthal... De inwoners van Düsseldorf zijn dus Neanderthalers.

Lithium werd veel gebruikt bij de productie van Deuterium en Tritium ('zwaar water') voor waterstof bommen. Verder is Lithium toegepast in Lithium vet als smeermiddel voor tandwielen en lagers met een hoge belasting.

Wie wil bijverdienen en aan de Rijn of de Waal woont kan een Lithiumproducent worden door met twee koolstaven uit een oude batterij, waarop een zonnepaneel is aangesloten en dat bij een

spanning van 3,04V stroom door het water tussen de koolstaven laat lopen. Door de elektrode potentiaal te gebruiken zal zoveel mogelijk Lithium neerslaan en er zullen veel minder andere metalen neerslaan. Op de negatieve koolstaaf slaat dan het metallisch Lithium neer. Dat kun je er afhaken en aan Lithiumaccu fabrikanten verkopen. Dan worden de Rijn en de Waal wat schoner en treedt er iets minder verzilting van de landbouwgrond op.

De toepassing van Lithium in batterijen en accu's neemt na 2005 een hoge vlucht.

Ijzer

Link: <https://en.wikipedia.org/wiki/Iron>

Komt voor als 'roest' en als magnetiet. De beschikbare hoeveelheid is letterlijk astronomisch veel. De kern van de Aarde is van vloeibaar ijzer en gedraagt zich als een magneet. Er wordt verondersteld dat het element ijzer wordt uitgestoten door 'stervende sterren' bij het ontstaan van een Nova.

Ijzer is nauwelijks giftig, je moet grote hoeveelheden ijzer innemen voordat het toxisch wordt. Als je het samen met EPO (ErythroPOëetine) inneemt kan je bloed te stroperig worden door het hoge aantal rode bloedlichaampjes en het hoge ijzergehalte in die rode bloedlichaampjes.

Fosfor

Link: <https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphorus>

Fosfor wordt gewonnen uit guano (vogelpoep), beendermeel, mest, urine en gier. De kunstmest industrie is de grootste fosfor gebruiker in de vorm van calcium fosfaat. Daarnaast wordt het in de oorlogsindustrie gebruikt voor brandbommen. Het wordt binnen het lichaam gebruikt in combinatie met calcium voor de botvorming. In de natuur is de combinatie met het element zuurstof als fosfaat het meest voorkomend. Hoge concentraties zijn toxisch en irritant voor de luchtwegen. In combinatie met stikstofverbindingen ontstaan er stoffen die met name giftig zijn voor zenuwweefsel en gebruikt worden in pesticiden en strijdgassen. Ondanks de giftigheid is fosfaat biologisch erg belangrijk voor de stevigheid van botten en tanden en de werking van spieren en de groei van het lichaam.

Fosfor is een 'chaotisch element', de elektronen (negatief geladen) horen bij protonen (positief geladen) om de lading binnen het atoom gelijk te maken. Bij fosfor blijven de elektronen niet in de 'elektronen wolk' zoals beschreven in het atoommodel van Bohr. Om de samenhang van lading en massa van het element toch te behouden worden er clusters van fosforatomen gevormd. Deze clustervorming is van groot belang voor de werking van de herlaadbare LFP cellen.

Zuurstof

Link: <https://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen>

Komt voor in de lucht en in oxiden. Binnen de LFP cel is zuurstof een onderdeel van het fosfaat. De beschikbare hoeveelheid zuurstof in het universum is zeer groot. Het kan makkelijk worden gebonden aan waterstof tot water. Zuurstof wordt onder UV licht omgevormd naar Ozon en water omgevormd naar waterstofperoxide. Waterstofperoxide is in lage concentraties al toxisch en veroorzaakt luchtweg ontstekingen.

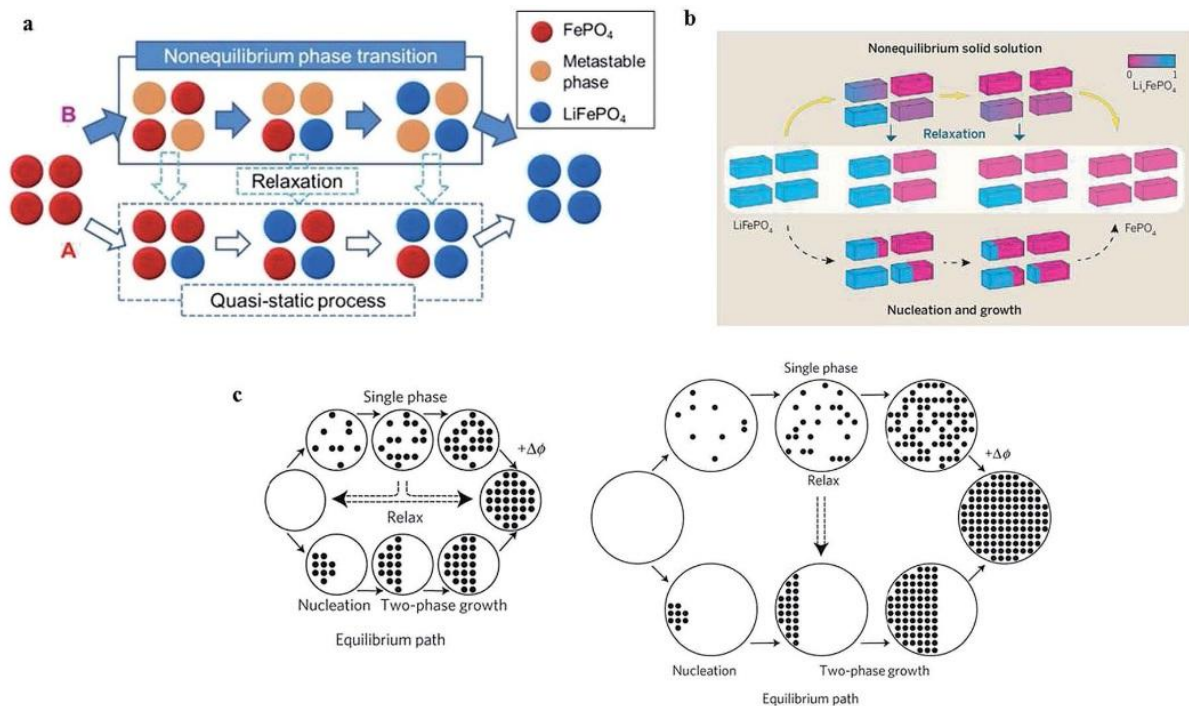
Yttrium

Link: <https://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium>

Yttrium is een 'zeldzame aarde' metaal en wordt gebruikt door de fabrikant 'Winston/Thundersky'. Zij geven aan dat de stof de cel chemisch stabiel maakt door de kathode in de cel te beschermen. Deze stabiliteit zou de cel met name beschermen tegen 'Lithium plating'. Hoe dat in zijn werking gaat is niet duidelijk en deze claim is niet 'hard' te maken. De nominale spanning van de cel is 3,2V, maar

de cel kan tot 4V worden geladen. Het is niet duidelijk of de cel ook op 4V laadspanning kan blijven aangesloten indien de cel is geladen.

Hoe werkt een LFP cel?



Een geladen LFP cel heeft op de plus-plaat LiFePO_4 moleculen. Is de accu ontladen, dan zijn er op de (+)plaat alleen FePO_4 ionen te vinden. De Lithium ionen zijn dan los van de FePO_4 ionen van de plus (+)plaat en bevinden zich op de min (-)plaat en in het elektrolyt. Bij de moderne LFP cellen is de koperen min (-)plaat met grafiet bedekt. Het polymer membrane is bij moderne cellen vervangen door een doorlaatbare keramische scheidingwand. Hierdoor zijn de thermische eigenschappen verbeterd en kan de cel warmer worden dan met een scheiding van een polymeer.

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

Bij het ontladen worden de koppelingen tussen de Li-ionen en de ijzerfosfaationen verbroken waarbij de Li-ionen naar de (-)plaat gaan en er elektronen vrijkomen. Deze vormen de elektronenstroom bij het ontladen.

Laden

Er zijn 3 laadfases te onderscheiden bij LFP-accu's.

Eerste laadfase

In de eerste laadfase van een nieuwe cel gaat het laden 'diffuus' over de (+)plaat. Het is niet altijd zo dat alle ferrofosfaat voor dit eerste laden goed bereikbaar is en in Lithium Ferrofosfaat wordt omgezet. Bij een tweede keer laden kan er meer Lithium Ferrofosfaat worden gevormd dan bij een eerste keer laden.

Het aankoppelen van de Ferrofosfaat groep aan Lithium ionen lijkt een willekeurig patroon te volgen, waarbij er op de (+)plaat 'voorkeur gebieden' zijn. Lading wordt pas opgeslagen in de tweede

laadfase als de Lithiumferrofosfaat groepen geclusterd zijn (naast elkaar liggen), zonder dat er nog Ferrofosfaat groepen (zonder aangekoppeld Lithium) tussen het Lithium ferrofosfaat aanwezig is.

Overgang van eerste naar tweede laadfase

De overgang naar de tweede laadfase met clustering van de LiFePO_4 groepen vraagt een hogere laadspanning en een hoge stroom. De laadspanning moet even boven de 4,0V uitkomen, anders zal de clustering niet beginnen en wordt de cel niet verder geladen. Het clusteren wordt gekenmerkt door het naast elkaar liggen van LiFePO_4 groepen. Clustering is een specifieke eigenschap van het element fosfor.

Het starten met clustervorming wordt aangeduid met 'initieel laden' en als de lader onvoldoende stroom levert en/of niet aan de 4,0V kan komen (door een lage inwendige weerstand van de cel ten opzichte van de inwendige weerstand van de lader), zal er geen clustering plaatsvinden en kan de cel de lading van de eerste laadfase niet vasthouden. Dit is zichtbaar door de celspanning te meten waarbij de spanning langzaam weer terug gaat naar 0V. Een LiFePO_4 cel zal in de eerste laadfase geen lading vasthouden en weer geheel ontladen raken.

Tweede laadfase

Zijn de voorkeursgebieden eenmaal geladen, dan treedt er 'relaxatie' op en ontstaat er clustering van LiFePO_4 op de (+)plaat. Deze clustering zal toenemen totdat er één cluster van LiFePO_4 op de (+)plaat aanwezig is. Dit is de tweede laadfase. Bij de eerste clustering ontstaat door 'tunnelen' een negatieve weerstand en de celspanning daalt. De laadstroom zal daardoor toenemen en er ontstaat oscillatie zoals dat ontstaat bij een tunneldiode. Er zijn er die dan spreken van 'de hartslag' van een LFP cel.

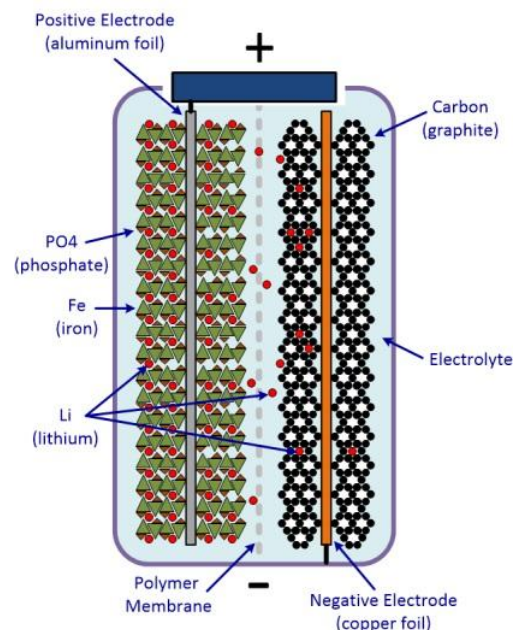
Link: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Tunneldiode>

Is de cel niet geheel ontladen geweest (celspanning is niet onder de 2V gekomen), dan is er nog een resterend cluster van LiFePO_4 groepen aanwezig en zal toename van lading meteen vergroting van het cluster in de cel geven. De clustervergroting kan bij een 'ervaren' LFP cel (al eens geladen en vervolgens belast) vergroting van de capaciteit geven. Naarmate de nominale capaciteit van een cel groter is, zal deze fysiek meer plaats hebben voor een clustervergroting na een aantal keren te zijn geladen.

Derde laadfase of de 'overlaadfase'

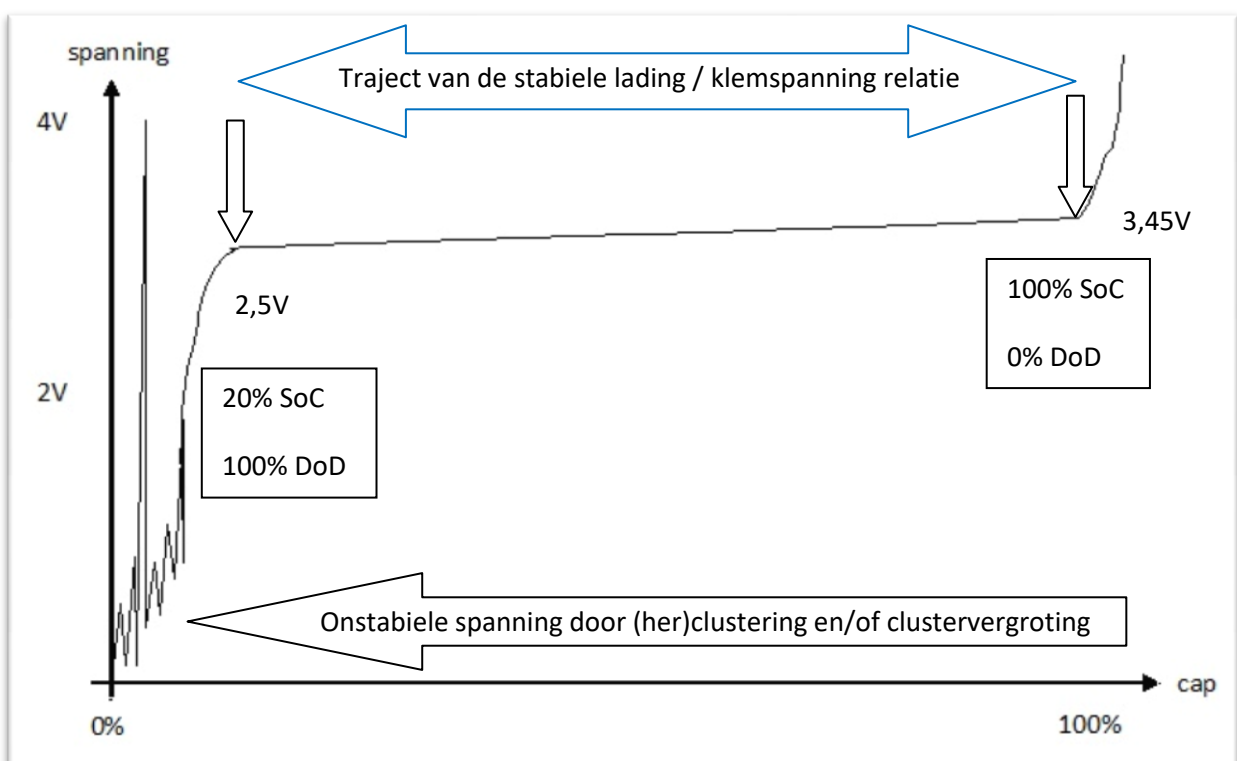
Uiteindelijk zullen bij een opgeladen accu alle LiFePO_4 groepen zijn geclusterd tot één grote kluit en kan er niet verder worden 'geclusterd' door er meer lading in te stoppen. Op dit punt heb je meer spanning nodig om de 'onwillige elektronen' nog in de cel te krijgen. 'Een volle LiFePO_4 cel heeft een klemspanning van 3,45V bij 25°C'. Deze spanning is verbonden aan een cel waarvan alle LiFePO_4 groepen in één cluster zijn gevat. Een hogere celspanning kan wel worden aangelegd en er gaat ook stroom lopen bij die hogere spanning, maar de toegevoerde energie wordt niet in lading en clustervergroting omgezet, maar wordt omgezet in warmte en 'Lithium plating' en zo kun je een LFP cel kapot maken.

Een volle cel accepteert geen lading (geen Coulombs, geen A.sec) meer omdat er geen ferrofosfaat is om nog een Lithium ion aan te koppelen. Een 'volle' cel heeft een spanning van 3,45V en als je met



3,45V laadt zal er geen stroom meer lopen. Verhoog je de laadspanning boven de 3,45V, dan zal er wel weer stroom gaan lopen, maar er komt geen lading meer in een cel of accu. Er loopt wel stroom en omdat het vermogen (P) gelijk is aan de stroom (I) maal de spanning (U) wordt er wel warmte in de cel ontwikkeld en dat is niet weinig. De cel zal dan opbollen omdat er druk in de cel ontstaat. Verder zal een spanning van meer dan 3,45V op een volle cel Lithium atomen uit het Lithium Ferrofosfaat losmaken (de van der Waalskrachten kunnen door de hoge spanning het Lithium niet langer binden aan het ferrofosfaat) en als er dan stroom door de cel loopt zal de stroom de Li-ionen laten neerslaan als metallisch Lithium (net als bij verchromen, verzilveren, vergulden, vernikkelen, cadmeren etc.) Er wordt dan een kooi van Faraday om de plaat aangelegd en de cel is kapot als de laag geheel dicht is. Je kunt dan geen lading meer opslaan in de cel omdat je geen Lithium meer kunt binden aan het ferrofosfaat.

Waarom initieel laden met 4V?



In het gebied tussen 3,00V en 3,45V wordt 80% van de lading van de cel opgeslagen. Boven de 3,45V wordt geen lading opgeslagen, maar al het vermogen van de lader wordt dan in de cel omgezet naar warmte. De spanningscurve in dit gebied tussen de 2,5V en de 3,45V is opvallend vlak ten opzichte van spanningscurven van Ni-Cad, Ni-MH of lood zwavelzuur accu's. Dit is de reden dat LiFePO₄ accu's goed kunnen worden bewaakt (of 'gemonitord') door de spanning van de accu te meten in gebruik. De curve is 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 geheel te laden.

Het zou veilig zijn om de cel te laden met een constante stroom uit een stroombron met een maximale spanning van 3,45V. De cel zou dan niet worden overladen omdat de stroom uit de stroombron naar 0A zou dalen bij het bereiken van de 3,45V.

Dit werkte niet omdat bij het bereiken van ca 1V over een geheel ontladen cel, er een 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 3,45V zal dit niet halen. In het artikel verdedigde de firma Winston de keuze voor 4,2V als initiële laadspanning.

Doordat Winston LiYFePO_4 cellen levert, zou deze curve uniek kunnen zijn voor de door hen gebruikte technologie waarbij Yttrium aan het materiaal van de (+)plaat wordt toegevoegd. Mogelijk is de curve niet van toepassing op de andere LiFePO_4 cellen zonder de toevoeging van Yttrium.

Ontladen

Bij ontladen 'kalft' het cluster op de (+)plaat af waarbij de Lithium ionen op de (-)plaat terecht komen. De ontleding gaat door totdat er geen sprake meer is van een cluster met Lithium ferrofosfaat. Er is nu nog alleen ferrofosfaat op de (+)plaat aanwezig en de Li-ionen zitten op het koolstof van de (-)plaat. De cel kan nu geen lading meer vasthouden omdat er geen sprake meer is van een cluster van lithium ferrofosfaat groepen. Wordt het ontladen van de cel gestopt voordat alle Lithium ferrofosfaat is gesplitst in Lithium en ferrofosfaat, dan zullen de gevormde LiFePO_4 groepen bij het laden direct weer aan het bestaande cluster worden toegevoegd. 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 (+)plaat bevinden en die spanning dan te verbinden met de 'optimale bewaarspanning', de spanning waarbij er nog clusters met ladingsdragers aanwezig zijn. 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..." In 2015 wordt vastgesteld dat de spanningspiek die nodig is om de cel in de fase van het 'clusteren' te brengen. Zolang de cel niet wordt ontladen tot een klemspanning lager dan 1V, blijft er een cluster op de anode aanwezig en kan de cel weer worden geladen zonder dat er een spanningspiek nodig is om de clustervorming te starten. Bij meerdere malen 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 namelijk niet in het ontladingsgedrag van een capaciteit of een inductie. Bij een dergelijk gedrag past geen oplopen van spanning bij het onderbreken van de belasting. Bij een condensator 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 LFP cel na het afkoppelen van de belasting kan worden verklaard indien er een herverdeling van de ladingsdragers naar één cluster op de (+)plaat plaatsvindt.

Nominale spanning

De hoogste spanning voor een LFP cel is de spanning waarbij de lading in Ah of in Coulomb niet meer toeneemt door het opslaan van ladingsdragers. Bij LFP cellen is dat 3,45V. De laagste spanning voor een LFP cel is het punt waarbij de spanning sneller daalt dan daarvoor bij gelijke ontlading.

LFP cellen kennen in de spanningscurve bij ontlading drie punten waarbij deze 'knik' optreedt (van hoog naar laag): 3V, 2,5V en 1,5V. Deze spanningen zijn afhankelijk van de kerntemperatuur van de cel. De '3V knik' is beschouwd als de laagste werkbare spanning en als optimale bewaarspanning voor een LFP cel. De cel werd dan beschouwd als 'ontladen', maar zoals bij een 'lege batterij' kun je er nog steeds 'Joules' uithalen tot de cel geen Lithium IJzer Fosfaat meer heeft en dit allemaal is

omgezet naar IJzer Fosfaat op de (+)plaat en Lithium op de (-)plaat. Bij 2,5V en lager fluctueert de spanning heel sterk, maar er blijft nog energie uit de cel komen. Onder de 1,0V bestaat er geen cluster van LiFePO_4 groepen meer en kan de cel geen lading meer vasthouden en de spanning daalt naar 0V.

De nominale spanning voor een LFP cel is gesteld op 'de helft' van het traject tussen 3V en 3,45V (spanning van een geheel geladen cel) en dat komt neer op 3,2V.

Inwendige weerstand

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

De lage inwendige weerstand betekent dat een lege LFP accu zich voor een lader presenteert als een kortsluiting. Een LFP laadsysteem zal kortsluit vast moeten zijn anders verbrandt de lader.

Op- en ontlaad rendement en levensduur

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

Na 5 jaar gebruik kan het op- ontlaadrendement (door sulfatering) van een loodzwavelzuur accu 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 ontlaadrendement is daarmee 95%. Het is niet verstandig een LFP accu met meer dan 80% van de nominale capaciteit te ontladen omdat de cel dan kan overgaan naar de eerste laadfase.

Bij 100 cycli per jaar is na 5 jaar het op- ontlaadrendement van een LFP accu terug gelopen naar 93% en na 20 jaar of 2000 cycli is het op ontlaad rendement nog 80%, net zo hoog als bij een nieuwe loodzwavelzuur accu. **Deze waarden zijn gemeten in een tijd dat de eindlaadspanning van een LFP cel op 3,7V werd gesteld.**

Inmiddels worden bij een goed BMS en een eindlaadspanning van 3,45V 6000 cycli en meer gehaald. Bij gebruik als 'huisaccu' in een camper, caravan of op een boot met 100 cycli per jaar betekent dit een levensduur van 60 jaar. Inmiddels wordt de levensduur voor een LFP cel op 10.000 cycli gesteld. Dat is 100 jaar bij 100 cycli per jaar. Deze verlenging van de levensduur gebaseerd op het aantal cycli komt voor rekening van de nieuwe inzichten in de eindlaadspanning. De levensduur van een LFP cel overschrijdt nu de levensduur van de mens. (bij 100 cycli per jaar)

De grote verschillen in rendement worden veroorzaakt in de verschillen in de inwendige weerstand van de betrokken technologieën. In deze weerstand wordt bij laden en ontladen warmte ontwikkeld. De ontwikkelde warmte (energie) 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 loodzwavelzuur 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.

Een BMS dat van je vraagt een Peukert-faktor in te voeren, is een BMS dat is ontworpen voor loodzwavelzuur accu's. Wil je het toch gebruiken voor Li-ion LFP accu's, dan geef je een Peukert-factor van één (1 ofwel 'de ideale accu') op. Dit betekent een op/ontlaad rendement van 100%.

Monitoren en weergeven van de laadtoestand

Dit is verwarrend en deze verwarring is het gevolg van het hanteren van twee aanduidingen voor de ladingstoestand van cellen.

SoC (State of Charge) in % waarbij een SoC van 0% betekent dat de cel in de eerste laadfase is terecht gekomen (open klemspanning < 1,5V en dalend, de cel houdt geen lading vast!).

DoD (Depth of Discharge) in % waarbij een DoD van 100% betekent dat de cel geheel is ontladen (SoC ~ 0%) en in de eerste laadfase is gekomen en een DoD van 0% betekent dat de cel maximaal is geladen (SoC = 100%).

De doorsnee accubezitter gaat hierdoor 'geheel de teil in', omdat 100% SoC gelijk is aan 0% DoD maar 100% DoD voor LFP cellen gelijk is aan het percentage SoC bij de overgang van de eerste naar de tweede laadfase. Het is veilig om 100% DoD te stellen bij 2V per cel ('open klemspanning' of onbelaste celspanning). Om dit te doen moet je van elke cel in de accubank de spanning monitoren en moet het ontladen van de accu worden gestopt bij een celspanning van 2V. Let wel, één cel bepaalt dan of de accu 'leeg is'.

Een LiFePO₄ cel waar op staat dat deze een capaciteit van 160Ah heeft, zal een lading van 160 x 3600 Coulomb hebben als de cel 'vol' zit en dan bedraagt de lading van de cel: 576.000 Coulomb. Als de cel vol zit staat er een spanning van 3,45V op de cel. De condensatorcapaciteit van de cel is dan 576000 Coulomb / 3,45V = 166.956,5217391304 of afgerond 166.956.217.391 µF. Een condensator van die capaciteit past niet in een 'tiny house'! Als de cel tot 2V is ontladen, zit er nog een lading in van 2V / 166.956,5217391304F = 83.478,26086956522 Coulomb. Of 83.478,26086956522 / 3600 = 23,18840579710145Ah. Die overgebleven 23Ah kun je beter niet gebruiken voor ontlading, maar reserveren om de cel in de 2^e laadfase te houden. Er blijft dan een beperkt cluster lithium ferrofosfaat op de (+)plaat bestaan en het herladen zal dan zonder opnieuw initieel laden kunnen verlopen.

Verder betekent 4x2V een accuspanning van 8V en dat is vaak te weinig om gloeilampen van 12V te laten werken. LED-verlichting heeft vaak een ingebouwde spanningstabiliserende booster-converter en het is mogelijk dat deze nog wel een tijdje werken.

De capaciteit in Ah van een cel kan worden omgerekend naar Farad, maar de capaciteit van een cel is geen elektrostatisch fenomeen zoals bij een condensator. Het elektrolyt tussen de platen van de cel laat ionisatie toe en daarmee verandert de condensator-capaciteit met de lading en de celspanning. Bij een 160Ah cel zal er ca 24Ah capaciteit niet worden gebruikt. Dit is een verbruik van ca 85% van de cellading zonder de cel in de eerste laadfase te brengen. Op dit punt is de SoC nog 15%. Dit is te beschouwen als het gebruik van de cel als een 'deep cycle' accu.

De meeste fabrikanten geven 2,5V als laagste celspanning op. Dat zou 10V voor een 4-cellen accubank betekenen. Zo eenvoudig is het niet... Bij 3 cellen van 3V (= 9V aan accuspanning) en 1 cel van 1V heb je nog 10V aan accuspanning, maar ben je wel bezig één cel door onbalans in de eerste laadfase te brengen. **Een BMS dat de accubank bewaakt, moet bewaken per cel en niet de hele (in serie geschakelde) accubank.**

De SoC curve begint vanaf 2,8V naar 3,0V naar 3,45V per cel vlak te lopen. Wil je niet in de problemen komen dan schakel je alle verbruikers van je 12V LFP accubank af bij 11,6V. Moet je dan

echt nog de marifoon gebruiken, dan gebruik je een 'override' voor alleen de marifoon. Hozen met de bilge pomp kan dan niet meer en moet je dan echt met de hand gaan doen.

A frightened man and a bucket outclasses a bilge pump

De minimale spanning voor een cel wordt door de fabrikant vaak wel aangegeven, maar zal per merk kunnen verschillen. Een cel van 100Ah bereikt het 100% DoD punt als er 100Ah is afgegeven. Je hoopt dan dat er nog iets van 1,5V aan klemspanning is overgebleven, anders is de cel in de eerste laadfase terecht gekomen en is het niet waarschijnlijk dat je de cel aan boord nog initieel kunt laden! Je moet dan opnieuw de initiële laadprocedure doorlopen en dat vraagt meestal een netaansluiting met 230VAC en een transformator met een gelijkrichter.

Ladingmeting en monitoring door een coulombcounter

Met een elektronische 'seconden teller' gekoppeld aan een 'Ampère teller' kan de stroom van en naar de cel of accu worden geteld. Voor ijking op het 0-punt moet hiervoor de cel of accu geheel worden ontladen. Is de cel of accu ontladen dan wordt het elektronische telwerk gestart en wordt de lading (als State of Charge) van de accu of cel door de coulombcounter bij gehouden.

Het helemaal ontladen van een accu of cel is af te raden omdat dit versnelde veroudering in de hand werkt (is geldig voor alle herlaadbare galvanische cellen).

Een andere mogelijkheid is het ijken van de teller op 100% SoC bij een geheel geladen accu of cel. Hierbij geldt de nominale capaciteit van de cel of accu als de lading van de cel of accu bij 100% SoC. Dit systeem is niet geheel nauwkeurig omdat bij LFP cellen door lithium plating de capaciteit van de cel of accu terugloopt en lager wordt dan de opgegeven nominale capaciteit.

Bij gebruik van een Coulombcounter moet het laden wel stoppen indien de celspanning aan de 3,45V is gekomen! Een 'volle' cel zal bij een laadspanning boven de 3,45V wel stroom doorlaten, maar die stroom brengt geen lading meer in de cel (er is geen Ferrofosfaat meer om Lithium aan te koppelen) terwijl de 'Ampère teller' van de coulombcounter nog steeds ziet dat er stroom door de cel of cellen loopt. Dit maakt de coulombcounter onnauwkeurig in de 'Coulomb boekhouding' en minder geschikt voor monitoring.

Ladingmeting en monitoring door spanningmeting

Een LFP cel kun je beter niet ontladen tot een spanning onder de 2,5V. Als je daarvan uitgaat, is 2,5V het 100% DoD punt. Deze waarden zijn relatief en daarom onafhankelijk van de nominale capaciteit van de cel.

De som van de standaardpotentialen voor Lithium en IJzer is 3,45V. Een geheel geladen LFP cel heeft een onbelaste celspanning (klemspanning) van 3,45V. Dat is dan het 100% SoC punt en het 0% DoD punt.

In de tabel is de geschatte lading van de cel weergegeven bij de reeks van celspanningen tussen 2,5V en 3,45V, aan de hand van de nominale capaciteit van de cel. Er wordt gekozen voor cellen uit de capaciteitsreeks van: 70, 100, 160, 200, 300, 400Ah. In Coulomb hebben de cellen:

70Ah x 3600 = 252.000 Coulomb aan capaciteit.

100Ah x 3600 = 360.000 Coulomb aan capaciteit.

160Ah x 3600 = 576.000 Coulomb aan capaciteit.

200Ah x 3600 = 720.000 Coulomb aan capaciteit.

300Ah x 3600 = 1.080.000 Coulomb aan capaciteit.

400Ah x 3600 = 1.440.000 Coulomb aan capaciteit.

In tegenstelling tot het 100% SoC punt bij loodzwavelzuur cellen, is het 100% SoC punt bij LFP cellen nauwkeurig te bepalen: 3,45V klemspanning bij 100% SoC. Bij het iJken van een Coulombcounter kan hiervan gebruik worden gemaakt.

Voor monitoring van de ladingtoestand van een LFP accu is het beter om de celspanning te monitoren omdat te vermijden situaties juist voor celspanningen zijn gedefinieerd. Zo moet je zien te voorkomen dat de celspanning onder de 2V komt en zien te voorkomen dat de celspanning boven de 3,45V komt. Deze kritische punten zijn onafhankelijk van de capaciteit van de aangesloten cellen en houden hun monitorende waarde bij veroudering van de cellen en teruglopen van de capaciteit.

Klemspanning	2,5V	3,0V	3,1V	3,2V	3,3V	3,4V	3,45V
%SoC / %DoD	15%/100%	50%/50%	60%/40%	70%/30%	80%/20%	>90% / <10%	100%/0%
70 Ah 252kC	15%=11Ah	50%=35 Ah	60%=42Ah	70%=49Ah	80%=56Ah	>90%=>63Ah	70 Ah
100 Ah 360kC	15%=15Ah	50%=50Ah	60%=60Ah	70%=70Ah	80%=80Ah	>90%=>90Ah	100 Ah
160 Ah 567kC	15%=24Ah	50%=80Ah	60%=96Ah	70%=112Ah	80%=128Ah	>90%=>144Ah	160 Ah
200 Ah 720kC	15%=30Ah	50%=100Ah	60%=120Ah	70%=140Ah	80%=160Ah	>90%=>180Ah	200 Ah
300 Ah 1080kC	15%=45Ah	50%=150Ah	60%=180Ah	70%=210Ah	80%=240Ah	>90%=>270Ah	300 Ah
400 Ah 1440kC	15%=60Ah	50%=200Ah	60%=240Ah	70%=280Ah	80%=320Ah	>90%=>360Ah	400 Ah

Fouten discussie

Bij een laadstroom zal de klemspanning op een cel hoger zijn dan de inwendige celspanning. Dit wordt veroorzaakt door de spanningsval over de inwendige weerstand plus de spanningsval over de overgangsweerstand naar de meetpenen.

Bij een belastingstroom zal de klemspanning op een cel lager zijn dan de inwendige celspanning, vanwege de spanningsval over de inwendige weerstand plus de spanningsval over de overgangsweerstand naar de meetpenen.

De waarde voor de DoD in Ah is afhankelijk van de conditie van de cel en kunnen als relatieve waarde worden afgeleid uit de actuele celspanning.

De waardes voor de SoC zijn afgeleid uit de actuele celspanning, maar niet berekend met in acht name van spanningsval of spanningstoename door de invloed van de inwendige weerstand van de cel. Dit wil zeggen dat de geringe stroomafname door het meetsysteem (ca 1mA bij analoge meters en ca 20mA bij digitale meters) invloed heeft op de gemeten waarde. Die invloed wordt kleiner naarmate de nominale capaciteit van de cel toeneemt en de inwendige weerstand van de cel afneemt.

De waardes zijn op 10% nauwkeurig binnen het spanningsbereik van 3,0V tot 3,45V. In dit bereik loopt de spanningscurve van een cel redelijk vlak en wordt de lading van de cel gerepresenteerd door de spanning. Dit blijft het geval bij capaciteitsvermindering door Lithium plating.

Boven de 3,45V aan celspanning neemt de lading van de cel niet meer toe ook al loopt er een laadstroom. De spanning is hier niet meer representatief voor de lading.

Onder de 3V bestaat er geen betrouwbare spanning-lading relatie meer. Dit wordt veroorzaakt doordat er Lithium ionen uit het Lithium Ferrofosfaat cluster op de (+)plaat naar de (-)plaat gaan en

het cluster kleiner wordt. Door deze 'ontclustering' zijn er grote spanningsvariaties mogelijk en is er geen spanning-lading relatie. Wordt de ontlading van de cel gestopt, dan gaan de 'subclusters' zich 'herschikken' tot één cluster waardoor de celspanning hoger wordt. Door de spanningstijging lijkt het of de lading toeneemt en de cel zich van de belasting 'herstelt'.

Slijtage Li-Ferfosfaat accu's

Strikt genomen kan ik alleen wat zeggen over slijtage van LFP accu's en het is mij niet bekend of dit voor andere soorten Li-ion accu's (LiCoMn, LiTiO of Li-polymer) ook opgaat!

De slijtage grenzen voor li-ion accu's worden bepaald door de capaciteit in Ah te meten en een Li-ion accu die minder capaciteit heeft dan 20% van de nominale waarde, wordt als 'versleten' beschouwd. Je zult dan merken dat de accu eerder leeg is dan 'vroeger' en het kan dat je 'onbalans' constateert. Waar loodzwavelzuur accu's van slijten is wel bekend: de boosdoener is sulfatering van de platen. Dit kan niet worden voorkomen omdat de omzetting van loodoxide in loodsulfaat (op de (+)plaat) en de omzetting van lood in loodsulfaat (op de (-)plaat) nodig is om de opgeslagen lading van de accu te gebruiken.

Waar LFP accu's van slijten is minder bekend.

Dendrieten:

In het verleden is aangetoond dat er 'dendrieten' van lithium door de separator 'groeiden' en dan kortsluiting veroorzaakten. Er is niet aangegeven bij welke soort Li-ion cellen dit gebeurde en het kan zijn dat dit alleen is gebeurd bij Lithium Cobalt Manganaat cellen. Zou dat zo zijn, dan komt deze slijtage kennelijk niet voor bij Lithium Ferfosfaat cellen. Het is ook mogelijk dat de introductie van de keramische separator de groei van dendrieten tegengaat zodat deze vorm van slijtage niet meer bestaat.

Temperatuur toename:

Er is gewezen op temperatuurverhoging door hoge laad en ontladestromen, dit zou slecht zijn omdat de cel daarvan opwarmt, maar hoe het werkt is niet duidelijk. Het laden van reeds vol geladen LFP cellen zou ook slecht zijn, dit is de oorzaak van wat men 'sudden cell death' noemt. Inmiddels is bekend geworden dat 'Lithium plating' de achterliggende oorzaak van 'sudden cell death' is. Verder is bekend dat als je de LFP cellen 'doorlaadt' zoals met loodzwavelzuur cellen wel gebruikelijk is of ze aan een 'float charger' of druppellader zet, dat de LFP cellen sterk in temperatuur toenemen. Een lage laadstroom bij een spanning net boven de spanning van 3,45V per cel is al voldoende om die laadstroom om te zetten in warmte in plaats van lading.

Lage temperatuur:

LFP accu's kunnen beter niet 'onder nul' geladen worden. Waarom niet? Omdat de lage temperatuur ook betekent dat de aan de temperatuur gerelateerde klemspanning mee omlaag gaat. Een LFP cel die bij 20°C 3,4V aan klemspanning heeft, heeft bij 0°C 3,3V aan klemspanning. Dan geldt voor de lader dat er laadstroom nodig is om de cel weer op 3,4V te brengen, maar dat zou bij compensatie van de spanning voor de lage temperatuur betekenen dat de cel op dat moment wordt overladen. Voor dit mechanisme is wel een beetje compensatie in de vorm van warmte ontwikkeling door de 'overladingsstroom' die de cel dan weer opwarmt en waardoor de celspanning dan weer omhoog

gaat en de lader verder laden stopt (in Constant Voltage modus). In Constant Current modus wordt de cel veel warmer omdat de laadstroom niet afhankelijk is van de celspanning.

Lithium plating:

In de Li-ion accuwereld is het buzz word: 'Lithium plating' of in gewoon Nederlands: 'verlithiummen'. Lithium plating is de vorming van een laag van metallisch Lithium op de platen die de Lithium Ferrofosfaat laag en de koolstof laag bedekt. Dit maakt ionen/elektronen uitwisseling onmogelijk. Dat maakt tevens laden en ontladen op delen van de platen onmogelijk en het resultaat is dat de capaciteit van de cel afneemt. Is dit '*de slijtage*' van LFP cellen?

Bij te warm geworden cellen (door overladen?) vindt men Lithium plating.

Bij cellen die zijn overladen (door overladen!) vindt men Lithium plating.

Bij cellen met 'sudden cell death' (door overladen!) vindt men Lithium plating.

Bij cellen met meer dan 300 gebruikscycli (door 300 keer kort overladen?) vindt men Lithium plating.

Bij cellen die 'koud' zijn geladen (temperatuur onder 0°C) vindt men Lithium plating.

Het heeft er alles van dat Lithium galvanisering of Lithium plating '*de slijtage*' vormt van LFP cellen.

Lithium plating, hoe werkt dat?

- Lithium heeft een standaard elektrode potentiaal (spanning t.o.v. Waterstof) van -3,04V bij een temperatuur van 25°C.
- IJzer heeft een standaard elektrode potentiaal (spanning t.o.v. Waterstof) van + 0,41V bij een temperatuur van 25°C.

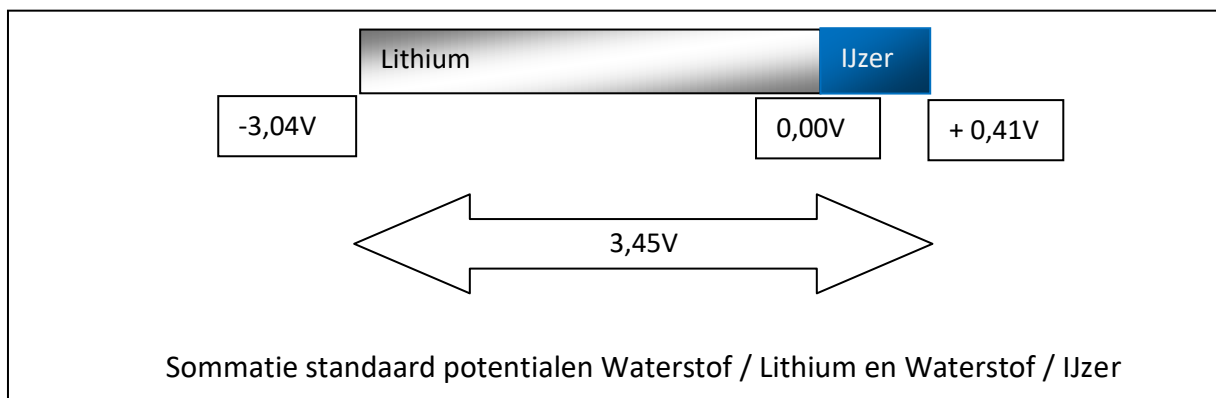
Potentiaal waarden uit Wikipedia:

https://nl.wikipedia.org/wiki/Tabel_van_standaardelektrodepotentialen

Tel deze waarden bij elkaar op, dan is er een potentiaal verschil van 3,45V tussen Lithium en IJzer bij een temperatuur van 25°C.

Een geheel / 100% SoC geladen LFP cel heeft een verschilspanning van 3,45V bij een *kerntemperatuur* (in de cel gemeten temperatuur) van 25°C. Kun je de temperatuur niet in de cel meten... dan kun je geen nauwkeurige metingen doen en moet je de klemspanning als meetwaarde nemen.

De elementen Fosfor en Zuurstof zijn geen metalen en nemen geen deel aan de vorming van elektrodepotentialen.



Bij laden:

Bij het laden van een LFP-cel worden de Lithium ionen aan het Ferrofosfaat gekoppeld tot LiFePO_4 . Zijn alle Li-ionen aan het Ferrofosfaat gekoppeld tot Lithium Ferrofosfaat, dan is de cel geheel geladen (100% SoC of 0% DoD) en is de spanning van de cel 3,45V. Dit is het punt waarbij de cel geen lading meer zal opnemen omdat...

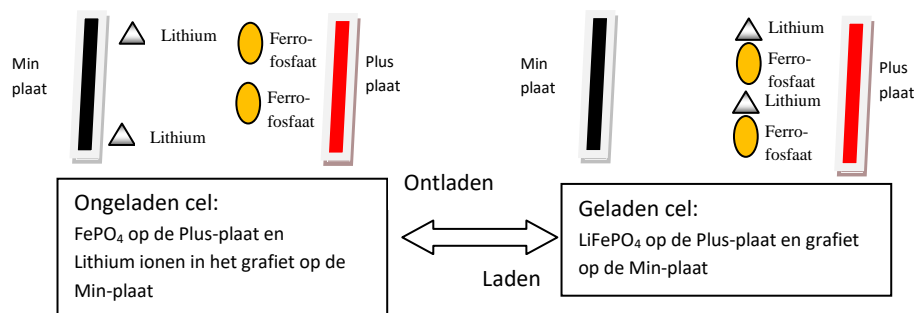
alle Lithium is gekoppeld aan het Ferrofosfaat en er is geen Lithium meer over om te koppelen of

alle Ferrofosfaat bezet is met Lithium ionen en er zijn geen koppelingsplaatsen meer vrij in het Ferrofosfaat.

Zou je bij 100% SoC de laadspanning verhogen boven de 3,45V (per cel) dan worden de Lithium ionen losgemaakt uit het LiFePO_4 want je overschrijdt de elektrodepotentiaal. De hoeveelheid ionen die worden losgemaakt is evenredig aan de spanning op de cel. Omdat je nu boven de spanning van 3,45V bij 25°C komt en er stroom zal lopen, ben je aan het overladen.

Door een laadspanning boven de 3,45V zul je de Lithium ionen uit het Lithium Ferrofosfaat 'trekken'. Door de verhoogde spanning zijn de van der Waals krachten niet meer in staat het Lithium ion aan het Ferrofosfaat te binden en zullen er door de laadstroom elektronen beschikbaar komen om het 'gat' in de buitenste schil van het Lithium ion te vullen en zo 'metallisch' Lithium te vormen.

Het ontstane metallisch Lithium gaat over naar een kristalstructuur zoals bij metalen gebruikelijk is. Het Lithium (atoomnummer 3) heeft in de kern van het atoom 3 protonen (naar het atoommodel van Bohr) en wordt door 3 elektronen ladingneutraal gemaakt (3 positief geladen protonen in de kern t.o.v. 3 negatief geladen elektronen in de schil). Doordat de Lithium ionen nu 'ongeladen' atomen zijn geworden, worden zij niet meer door elektrische velden aangetrokken en vormen zij een Lithium 'laagje' over de elektroden in de cel. Dit werkt als een 'atomaire kooi van Faraday'. Hierdoor is geen ionen wisseling tussen de (+)plaat en de (-)plaat meer mogelijk en is de cel door 'lithium plating' kapot gemaakt. In publicaties spreekt men ook wel over 'dood Lithium' voor het Lithium dat is neergeslagen door Lithium plating.



Wie aan 'trickle charging' of 'float charging' doet (een – al dan niet geringe – laadstroom aanleggen bij een cel of accu met 100% SoC) is dus zelf schuld aan verkorting van de levensduur van zijn Li-ion accu's.

'Is dat nou echt zo belangrijk om op de milliVolt nauwkeurig te laden?' Einstein zei ooit: "God dobbelt niet" toen iemand opmerkte dat er wel eens een uitzondering zou kunnen zijn op zijn relativiteitstheorie... Dus ja, het is belangrijk dat je de eindlaadspanning goed bewaakt en begrenst en ook de kerntemperatuur van de cel een factor laat zijn in de beschouwing van de meetwaarden. Bij het ontladen van de cel worden de Lithium ionen van het Lithium Ferrofosfaat los gemaakt en

verplaatsen zij zich naar de 'min'-elektrode waar zij een negatief geladen elektron afgeven die een elektronenstroom (van min naar plus) veroorzaakt. Het Ferrofosfaat blijft op de 'plus'-elektrode. Een 'volle cel' heeft één groot cluster van LiFePO_4 groepen op de (+)plaat en dit cluster blijft bestaan tot het punt dat er zo weinig Ferrofosfaat - zonder koppeling aan Lithium - op de 'plus' - elektrode aanwezig is dat er geen sprake meer is van een cluster van Lithium ferrofosfaat. Zodra er geen sprake meer is van een cluster, is de cel in de eerste laadfase gekomen en niet meer in staat lading vast te houden. Bij meting van de celspanning zie je dat deze terugloopt naar een spanning van minder dan 1V. De celspanning is op dit punt gedaald onder de 1,5V bij 25°C kerntemperatuur. De ontlaadstroom heeft - voor dit punt wordt bereikt - de cel warmer gemaakt en dit is van invloed op de gemeten spanning. Een BMS zal geen gebruik kunnen maken van de kerntemperatuur van de cel of cellen en zal van de omgevingstemperatuur gebruik maken. Dit geeft een onnauwkeurigheid in het bepalen van het punt van overgang naar de eerste laadfase. Dit zorgt ervoor dat er bij de bepaling van de minimale spanning van een LFP cel een veiligheidsmarge wordt aangenomen van 0,5V tot 1,0V. De meeste fabrikanten houden een spanning van 2V tot 2,5V als minimum waarde voor de celspanning aan bij een omgevingstemperatuur van 20°C. Die omgevingstemperatuur kan door het BMS worden bepaald en bij het bereiken van het 'tripping point' kan het BMS de belasting van de cellen afschakelen zodat de cel (cellen) niet tot de overgang naar de eerste laadfase wordt (worden) ontladen.

De gevolgen van Lithium plating

Het bedekken van de platen met metallisch Lithium gaat zowel het losmaken van Li-ionen uit het Lithium Ferrofosfaat als het opnemen van Li-ionen door het ferrofosfaat tegen. De opslagcapaciteit van de accu neemt af en bij ontladen wordt de nominale celcapaciteit uitgedrukt in Ah niet meer gehaald. De cel zal geen lading meer afgeven of opslaan. Dit zal niet meteen gebeuren. Het is afhankelijk van de stroomsterkte die wordt gebruikt na het punt dat de cel 100% SoC heeft bereikt. Is die stroom laag, dan zal het lang duren voordat de gehele oppervlak van de platen met metallisch Lithium is bedekt. Vaak is het dan mogelijk de cel nog te gebruiken omdat er gaten in de metallische Lithium laag zijn waar de ionenwisseling nog plaatsvindt. De laag ziet er dan uit als een 'plak Leerdammer of Emmentaler kaas', waarbij er nog ionenwisseling plaatsvindt door de gaten in die plak kaas.

Is de stroom hoog, dan kan in één keer de totale oppervlakte van de platen in een cel worden bedekt en is de cel kapot. De laag ziet er dan uit als een 'plak Edammer of Goudse kaas' met misschien een paar gaatjes.



Op de kaasplank:

- links: Leerdammer kaas met veel en grote gaten, er is transport van ionen mogelijk.
- rechts: Goudse kaas zonder gaatjes, er is geen transport van ionen mogelijk.

Een cel met Lithium plating is snel aan de 100% SoC en ook weer snel aan de 0% SoC. De capaciteit is sterk teruggelopen en wordt bepaald door de afmeting van 'de gaten in de kaasplak', in die gaten is nog ionen uitwisseling mogelijk. Bij het laden van de cellen in een serieschakeling zal er door het verschil in capaciteit onbalans ontstaan doordat de cellen met lithium plating minder capaciteit hebben en eerder 'volgeladen' zijn maar ook eerder 'leeggelopen' zijn. De eerste reactie zal zijn om de cel langer aan de lader te zetten... Dat zal de cel snel geheel kapot maken omdat het langdurig laden met een lader die meer dan 3,45V als laadspanning gebruikt, de gaten in de Lithium laag snel vol maakt en uiteindelijk de platen van de cel geheel bedekt zijn met metallisch Lithium. De cel is dan definitief kapot.

Er zijn publicaties over 'Lithium stripping' om het metallisch Lithium van de platen af te halen en het weer terug te voeren in de laag met Lithium Ferrofosfaat. Geen van de publicaties maakt melding van een duidelijk succes zoals een percentage toename van de capaciteit na het 'strippen'.

Lithium plating wordt vaak gezien als onoverkomelijke slijtage door het gebruik van de cellen. Dit is niet terecht. Lithium plating is geen slijtage, maar onkunde in de behandeling van LFP cellen bij het gebruik.

Andere vormen van slijtage

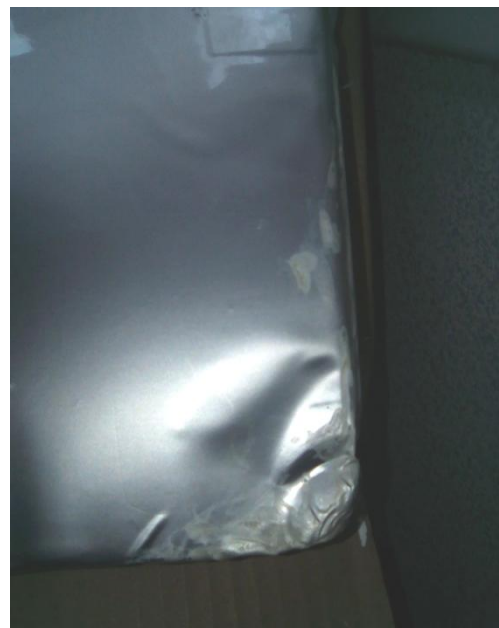
Welke slijtage van Li-ion cellen is er mogelijk?

Mechanische slijtage

Er zijn geen meldingen van andere vormen van mechanische slijtage aan LiFePO_4 cellen dan waarbij de cellen door de inwerking van mechanische krachten worden vernield (spijkers in de cel slaan). In het bijzonder wordt vermeld dat de celpolen door het uitzetten van de cel door gasdruk, uit het kunststof worden getrokken. Dit heeft geleid tot het lostrekken van de 'lippen' van de 'pouches' van een cel uit de busbar (bij cellen met meer dan één pouch). Meet je de celspanning van een cel en verandert deze als je tegen de polen van de cel duwt, dan heb je een cel waarvan één of meer 'pouches' van de 'bus' is losgeraakt.

De cel is bij de productie gasdicht en het elektrolyt zal niet verdampen en uit de cel verdwijnen tenzij de gasdichte wand wordt geperforeerd. Gebeurt dit, dan zal het elektrolyt langzaam uit de cel verdampen en het Lithium in de cel als eerste oxideren. Hierdoor neemt het volume van de inhoud van de cel toe en de cel bolt op. De cel kan geen lading meer opnemen en is definitief kapot.

De Chinese posterijen zijn niet erg zachtvaardig voor de pakketten. Door 'gooi en smijtwerk' door de Chinese posterijen kreeg ik 4 LFP pouch cellen van 90Ah in een totaal gekneusde verpakking. De cellen waren door materiaal moeheid van het aluminium lek geraakt. In minder dan een maand was alle elektrolyt verdampt en oxideerde de celinhoud aan de buitenlucht. De cel wordt 'dik' en de inhoud wordt dik en hard door oxidatie aan de lucht en er is geen spanning over de cel meetbaar. De cel is kapot door mechanische slijtage.



90Ah LFP Pouch cel

Chemische slijtage

Er is melding van het ontstaan van zuren in de cel, waardoor de cellen kapot zijn gegaan. Is de cel goed gesloten, dan is het ontstaan van een zuur in de cel niet mogelijk door het aanwezige elektrolyt. Is de cel open door beschadiging van de behuizing, dan is zuurvorming mogelijk. De primaire oorzaak is dan mechanische slijtage.

Cellen inklemmen

Indien pouches heel ruim in hun behuizing zitten, kan het elektrolyt 'naar onder' in de pouch zakken. Het 'uitzakkende' volume wordt groter naarmate de ruimte in de behuizing groter wordt. Zolang de ruimte in de behuizing niet groter wordt door uitzetting is er niets aan de hand.

Leg je een cel op het (grote) zijvlak, dan is het mogelijk dat de platen aan de bovenzijde geheel of gedeeltelijk 'droog' komt te staan en niet meer kan deelnemen aan de opslag van lading. Zet je de cel op één van de zijvlakken of het ondervlak, dan moet er veel elektrolyt naar 'onderen zakken' voordat er een aanmerkelijk deel van het plaatoppervlak aan de bovenzijde 'droog komt te staan'. Het is niet waarschijnlijk dat je een cel 'op de kop' zult zetten, want dan kun je de polen van de cel niet aansluiten. Zou je een truckje weten om dat toch te doen, dan zit de 'pop-off' van de cel meestal ook onderin en bij het openen onder druk spuit dan meteen het elektrolyt uit de cel en is deze kapot. Cilindrische cellen zijn hier in het voordeel. In de eerste plaats kan een wand van een cilinder meer druk verdragen dan de wand van een kubus (zonder te vervormen) en in de tweede plaats is er maar één zijvlak (zonder oriëntatie). De 'pop-off' van een cilindrische cel zit meestal naast de (+)pool. De pop-off ziet er meestal uit als een gaatje en kan van buitenaf door een folie zijn afgedekt. Je kunt de cel 'staand' op de minpool monteren en ook liggend. Het maakt bij liggende montage niet veel uit of de pop-off aan de bovenzijde of de onderzijde zit.

Het inklemmen van cellen met een voorgeschreven druk is heel moeilijk bij cilindrische cellen en tevens overbodig. De bouw in de vorm van een cilinder maakt de cel druk bestendig en de pop-off zal eerder openen dan dat de cel bol zal gaan staan.

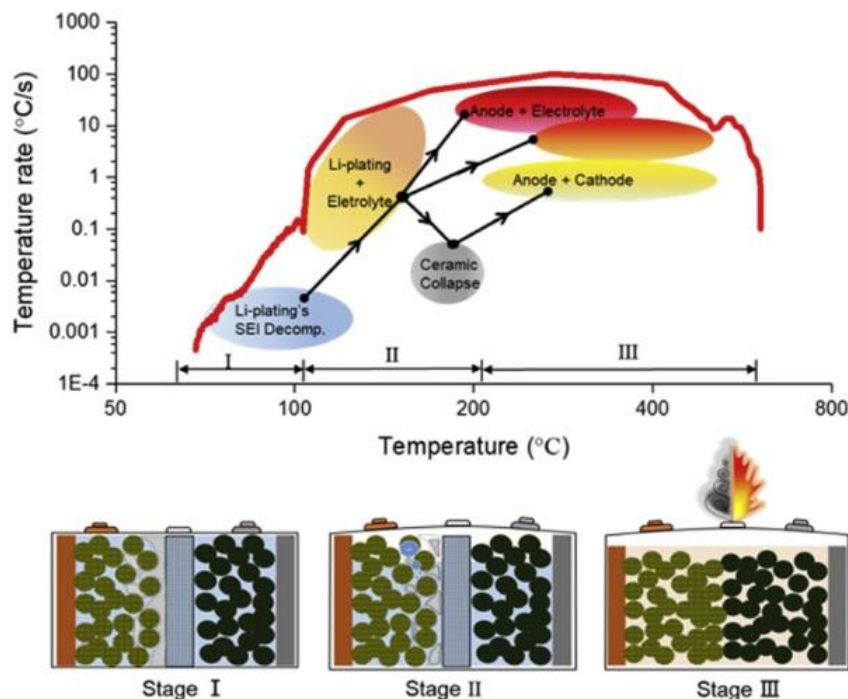
Het inklemmen van blokvormige cellen wordt wel gedaan om het opbollen van de behuizing tegen te gaan. Het uiteindelijke resultaat is dan dat je niet kunt zien dat de cel bol is gaan staan en dat de pop-off eerder door de druk wordt geopend. De cel is dan wel kapot al staat deze niet bol.

Cellen openen de pop-off door drukverhoging en dat heeft verhoging van de temperatuur als oorzaak. Geef je de cellen wat speelruimte, dan is het verstandig dit te doen door het aanbrengen van siliconenvellen van ongeveer een millimeter dikte. Van kunststoffen is siliconenrubber een hele goede warmte geleider zonder een elektrische geleider te zijn. Op deze wijze wordt de in de cel ontwikkelde warmte makkelijker naar buiten afgevoerd of over de accubank verdeeld.

Thermal runaway

Bij het laden boven het punt van 100% SoC kan laadstroom geen lading meer in de cel opslaan. In eerste instantie ontstaat er Lithium plating. In tweede instantie wordt het toegevoerde laadvermogen niet meer omgezet in lading, maar in warmte en door de cel gedissipeerd. De temperatuur in de cel neemt toe en het elektrolyt vergast waardoor de druk in de cel toeneemt. Heeft de cel een 'pop-off', dan zal deze openen en de druk afblazen. Bestaat het elektrolyt uit een brandbaar ether, dan ontstaat er nu een felle brand met mogelijk een explosie.

Bestaat het elektrolyt uit een onbrandbaar gemaakt ether dan zal er niet waarschijnlijk brand ontstaan en de cel zal 'ontgassen'. Blijft de laadstroom aanwezig, dan zal de temperatuur in de cel verder toenemen waardoor de stoffen in de cel zullen oxideren. Door dit oxideren neemt de temperatuur verder toe tot uiteindelijk ook het keramiek in de cel kapot gaat.



Het omhulsel van de cel barst / smelt open. Nu kan er zuurstof uit de buitenlucht bij de stoffen in de cel komen en neemt oxidatie nog verder toe en de temperatuur eveneens. Dit noemt men de 'thermal runaway'. De eerste bekende thermal runaway is de Nokia telefoon geweest die was uitgerust met LiCoMnO cellen en die in de lader ontplofte.

Constructie

Elektrodes of platen

Bij de fabricage van LFP-cellen werden er in eerste instantie vlakke / gladde metalen platen gebruikt. Een koperen plaat voor de 'min' en een aluminium plaat voor de 'plus'. Bij metingen ontdekte men dat ook de aluminium ionen deel kunnen nemen aan de ionenwisseling en er een Aluminium ionenaccu ontstaat. Om dit tegen te gaan werd er metallisch Lithium met het aluminium gelegeerd. De 'plus' elektrode (of (+)plaat) bevat al het actieve materiaal van de cel.

De koperen 'min'-plaat 'vangt' de Lithium ionen op en is de bron van de elektronenstroom die van de 'min'-plaat via de belasting naar de 'plus'-plaat gaat.

Het oppervlak van de platen is bepalend voor de kwantiteit van opslag van een cel. In eerste instantie werd het oppervlak van de platen door 'opruwen' vergroot en kregen de cellen meer opslagcapaciteit dan bij 'gladde platen'. Dit opruwen was geen verbetering van de mechanische stevigheid. De methode werd vervangen door gebruik van de 'prismatische'-platen. Deze zien eruit als een wafelblad en zijn daardoor mechanisch sterker terwijl ze een groter oppervlak hebben.

Na 2010 werd de koperen 'min'-plaat bedekt met een laagje grafiet (koolstof). Dit was beter in staat elektronen uit het Lithium op te nemen (t.o.v. koper) en verlaagde daardoor de al lage inwendige weerstand van de LFP cellen nog verder. Het oplaad / ontlad rendement van de LFP accu wordt nu alleen overtroffen door de Lithium Titanaat cellen en de 'supercap' condensatoren, die een nog lagere inwendige weerstand kennen.

Separator

Bij de eerste LFP cellen werd de separator gevormd door een membraan van een elektrisch isolerend polymeer. Tussen de plus en de min plaat zit tegenwoordig een keramische separator. Deze separator laat elektrolyt door en via dit elektrolyt kunnen de Lithium ionen bij het ontladen naar de (-)plaat waar ze worden opgenomen in de koolstoflaag. Bij het laden zullen deze Lithium ionen weer naar de plus plaat gaan waar ze weer worden opgenomen door het ferrofosfaat.

Door de separator van keramiek te maken is deze zeer goed bestand tegen hoge temperaturen. Mechanisch sterk is de keramische separator niet en bij het uitzetten van de cel door warmte kan de separator in stukken breken en is het mogelijke resultaat een kortsluiting tussen de min en plus plaat. Door deze kortsluiting wordt de cel snel warmer en kan de 'thermal runaway' ontstaan.

Elektrolyt

Bij de introductie van de moderne Li-ion cellen zoals de Lithium polymeer cellen en de Lithium Cobalt Manganaat cellen, werd aangegeven dat het elektrolyt een 'organische vloeistof' bevatte. Bij het 'optrekken van het rookgordijn' (vanwege de patentstrijd tussen de uitvinders van de LiCoMnO cellen en de LiFePO cellen) bleek deze organische vloeistof een 'Ether' te zijn. Ether is een zeer vluchtige vloeistof die explosief - brandbaar is. Hierdoor werd het gebruik van LCM cellen in de luchtvaart verboden en ook het luchttransport van de cellen werd aan strenge regels onderworpen. LFP cellen hebben ook een elektrolyt waarin ether zit, maar dit is 'gehalogeneerd' (een deel van de waterstof ionen is vervangen door een Fluor, Chloor en / of Broom ion). Dit is een truckje dat bekend is uit de wereld van de vetoplossers waar TriChloorEtheen (kortweg Tri) en TetraChloor koolstof (kortweg Tetra of 'vlekkenwater') onbrandbare vetoplossers zijn.

De eigenschap die de gehalogeneerde ethers en de 'gewone' ethers gemeen hebben is de vluchtigheid. Een kleine temperatuurverhoging doet de ethers snel overgaan van vloeistof naar gas.

Bouw

Het gebruik van keramiek voor de mechanische constructie van de cel maakt dat de cel ook goed tegen hogere temperaturen kan. De moderne LFP cellen verdragen temperaturen tot 70°C. De temperatuurgrens van een cel wordt niet zozeer bepaald door het gebruik van het keramiek, maar door de druk die het vergassende elektrolyt bij een hoge temperatuur op de celwand brengt. Dit doet de cel opbollen en dit valt het minste op bij een cilindrische cel. Een rechthoekige cel kan zich minder goed tegen 'opbollen' verzetten en zal 'dikker' worden en zich in de 'accubak' vastklemmen. Een steeds warmer wordende cel zal zijn 'geraamte' uiteindelijk door uitzetting kapot maken en openbarsten. Nu kan de cel eindigen in een 'thermal runaway' waarbij de temperatuur in de cel tot boven de 500°C kan oplopen. Het blussen met water kan het water splitsen in zuurstof en waterstof en daardoor contraproductief zijn zoals bij een 'aluminiumbrand'. Het 'groots afkoelen' met water is wel een mogelijkheid en dat zal bij een boot uiteindelijk automatisch gebeuren als deze in het water ligt. Je krijgt dan wel een hoop rotzooi op de bodem van het water.

Initieel laden

Is de cel gebouwd, dan moet deze worden geladen voordat er lading in de cel kan worden opgeslagen. In ongeladen toestand is het Lithium niet aan het Ferrofosfaat gebonden en dit gebeurt pas nadat er lading in de cel is gebracht.

De lading wordt pas vastgehouden als er bij het initieel laden minimaal één cluster is gevormd.

'Float charge', 'naladen' en 'druppelladen'

Dit zijn begrippen uit de wereld van de loodzwavelzuur accu's. Vind je deze woorden terug in handleidingen van accu's of acculaders, dan moet je achterdochtig worden. Deze begrippen worden gebruikt om aan te geven dat er bij het bereiken van de eindlaadspanning een kleine laadstroom aanwezig blijft om achtergebleven loodsulfaat te splitsen naar zwavelzuur en zuiver lood (op de 'min'-plaat) en naar zwavelzuur en loodoxide (op de 'plus'-plaat).

Er is geen zwavelzuur of lood in een LFP cel aanwezig en het aanhouden van een laadstroom door een 'volle' cel zal er toe leiden dat een LFP cel kapot zal gaan aan 'Lithium Plating'. Hoe snel dit plaats vindt is afhankelijk van de stroom die er loopt bij een spanning boven de 3,45V. Hoe hoger de spanning, hoe meer Lithium ionen worden losgemaakt uit het Lithium Ferrofosfaat. Hoe hoger de stroom hoe meer Lithium ionen aan een elektron worden gekoppeld en deel uit gaan maken van de lithiumlaag op de platen.

Je bepaalt zelf of de cellen goed houdt. Aan de wal kun je wel nieuwe kopen, maar op het water halverwege de Antillen is een Li-ion accu winkel erg zeldzaam.

Weetjes

Bij de eerste keer laden

is er een lader nodig die bij 4V voldoende laadstroom kan leveren om de clustering op de platen te laten beginnen. Daarna heb je een dergelijke lader alleen nodig als alle cellen zover zijn ontladen dat de celspanning onder de 1V is gekomen en de cel in de eerste laadfase is gekomen. Een cel in de eerste laadfase kan geen lading vasthouden en de klemspanning zal dalen naar een waarde onder de 0,5V.

Heeft de eerste clustering plaatsgevonden, dan is de cel in de tweede laadfase gekomen. In de tweede laadfase zal de spanning over de cel dalen naar ongeveer 1V (bij gebruik van een stroombron). Wordt de lader afgekoppeld, dan blijft er ongeveer 1V aan spanning op de cel aanwezig. De cel is dan in de tweede laadfase aangekomen en kan met een constante spanning van 3,45V verder worden geladen.

Als de cel geheel is geladen en de 3,45V celspanning is bereikt, stopt de laadstroom want er is onvoldoende spanningsverschil tussen lader en cel om nog laadstroom te laten lopen. De cel kan aangesloten blijven op de lader en er zal geen Lithium plating ontstaan omdat er geen stroom loopt die de Lithium ionen in de cel zal verplaatsen om in de vorm van metallisch Lithium neer te slaan.

Bijladen

Een cel in de tweede laadfase kan altijd worden bijgeladen uit een stroombron met een maximale spanning van 3,45V. Het cluster op de platen groeit dan aan tot het punt dat het cluster de plaat geheel bedekt. Dit gebeurt bij het bereiken van een celspanning van 3,45V en bij een lader met een laadspanning van 3,45V stopt het laden dan omdat er tussen de lader en de cel onvoldoende spanningsverschil is om nog stroom te laten lopen. Wordt de cel op dat moment belast dan wordt een deel of de totale laadstroom door de belasting opgenomen, eventueel aangevuld door stroom uit de cel. Na het belasten zal het laden weer worden voortgezet tot de celspanning weer gelijk is aan de laadspanning van 3,45V en de laadstroom '0' is.

Balancing

Balancing of balanceren is ook een begrip uit de loodzwavelzuur technologie. Bij grote accubanken bestaande uit veel cellen in serie ontstond op den duur een spanningverschil tussen de cellen omdat

er bij het laden in verschillende mate loodsulfaat op de celplaten achterbleef. Door de cellen te overladen en zo alle loodsulfaat te regenereren tot zuiver lood (op de (-)plaat) en loodoxide (op de (+)plaat) werd de celspanning van alle cellen en de celcapaciteit weer identiek. Dit werd in eerste instantie ook op de LFP cellen toegepast. Dit betekende een snel einde voor de eerste LFP cellen door Lithium plating.

Door elke cel individueel met een constante laadspanning van 3,45V te laden vindt in het hele traject 'balancing' plaats. Uiteindelijk komen alle cellen uit op een spanning van 3,45V, ongeacht de actuele capaciteit van de cel. Het is niet nodig de balancing bij individuele cellading te bewaken, immers de celspanning zal niet boven de eindlaadspanning komen en bij een celspanning onder de 3,45V zal een grotere laadstroom lopen om ze op 3,45V te brengen en zo te balanceren.

Temperatuurcoëfficiënt

Energie in elektriciteitopslagsystemen is gebaseerd op de beweging van de atomen of de deeltjes in de kern van de atomen (kernspin, orbitaal snelheid van de elektronen en atoom verplaatsingsnelheid). Bij het absolute nulpunt (-273°C) is er geen beweging meer en daarmee ook geen opgeslagen energie meer. Er is dan ook geen klemspanning meer (geldt voor alle batterijen, opslagcondensatoren en accu's). De opgeslagen energie is dan uit de cel verdwenen en opgenomen door de 'koeler'.

Dit geeft een temperatuurcoëfficiënt van 3,45V over een traject van 298°C of 0,01193 Volt (ca 12mV) per graad Celsius (per cel). Bij een 4 cellen 12V accu is dat ca 48mV per graad Celsius.

Er wordt gesuggereerd dat de temperatuurcoëfficiënt van Li-ion cellen in de tractieaccu van elektrische voertuigen veel hoger is en dat de actieradius in de winter kleiner is. Dit is niet correct, bij een EV wordt het interieur direct 'uit de accu verwarmd' en wordt niet de 'afvalwarmte' van de verbrandingsmotor gebruikt. De verlichting is in de winter ook langer in gebruik en wordt ondirect gevoed uit de tractieaccu. Dit maakt het verbruik van elektrische energie in de winter hoger ten opzichte van in de zomer en verkleint de actieradius.

Diep ontlading

Om te voorkomen dat een cel te diep wordt ontladen mag deze niet in de eerste laadfase terechtkomen. Alle belasting van de cel moet worden afgeschakeld indien de celspanning onder de 2V (bij 25°C) komt. Is het mogelijk dat de omgevingstemperatuur lager dan 0°C bereikt (boot met een metalen romp op de kant), dan is het raadzaam om de cel bij een hogere onderspanning (bv 2,5V of zelfs 2,8V) al af te schakelen.

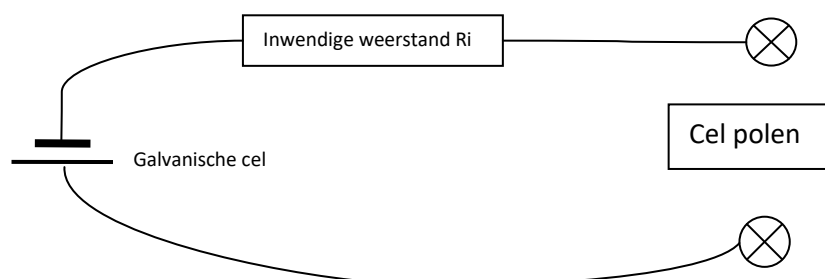
Zelfontlading

Zelfontlading van LFP cellen is zeer gering. Dit op voorwaarde dat de cellen niet worden aangesloten op een lader met een bewaking / meetsysteem. Bij een set van 4 200Ah cellen, die tot 3,36V werden geladen, was de spanning bij één cel na een jaar identiek (3,36V) en bij de andere cellen werd na een jaar 3,34V gemeten. De meting na het laden en de meting na een jaar werden niet met dezelfde meter verricht en hebben daarom wel een mogelijke meetfout.

Blijven cellen aangesloten op een meetsysteem (ook meetsystemen die zijn ingebouwd in een lader of BMS) ter bewaking van de SoC, dan kunnen de cellen zich wel ontladen met de kleine stroom die het meetsysteem vraagt en zal een cel van 70Ah na 5 jaar zijn ontladen tot onder de grens tussen de tweede en eerste laadfase. De berekende meetstroom van de aangesloten lader is $<5\text{mA}$. Om deze vorm van ladingafname (het is geen zelfontlading, maar een kleine belasting) te compenseren raadt een fabrikant aan de cel elk halfjaar te laden.

Temperatuurdaling doet lading in een cel afnemen, maar temperatuurstijging voegt geen lading aan de cel toe. (Je kunt de cel niet boven de barbecue opladen.) Temperatuurschommelingen kunnen de verklaring vormen voor het afnemen van de lading bij LFP cellen die zijn afgekoppeld en buiten gebruik zijn gesteld.

Theoretisch schema van een herlaadbare galvanische cel



Galvanische cel

Bevat lading en heeft ten gevolge van die lading een spanning. Die spanning en de polariteit van die spanning is te meten op de celpolen. Omdat de meetstroom heel laag is, zal de spanningsval over de inwendige weerstand ook zeer laag zijn.

De lading wordt uitgedrukt in Coulomb en $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$ (Ampère maal seconde). Voor accu's en batterijen wordt de lading meestal uitgedrukt in Ampère maal uur of Ah en dat is gelijk aan 1 Ampère maal 3600 seconden of 3600 Coulomb.

Staat de condensator of galvanische cel lading af aan de belastingweerstand, dan neemt de spanning af. Op deze wijze vertegenwoordigt de spanning (in combinatie met de temperatuur) de lading van de cel.

Inwendige weerstand

Alle galvanische cellen hebben een inwendige weerstand. De inwendige weerstand van Li ion accu's is laag ten opzichte van loodaccu's en NiCad en NiMH cellen. Dit betekent dat het rendement van laden en ontladen bij Li ion cellen hoger is dan bij de andere accutechnologieën. Bij de LiCo (Lithium Cobalt) cellen is de weerstand het hoogst, daarna komt de LiCoMnO (Lithium Cobalt Manganaat) accu. De weerstand wordt nog lager bij de LiFePO₄ (Lithium Ferrofosfaat) accu en de laagste inwendige weerstand wordt (voorlopig) gehaald door de LiTiO (Lithium Titanaat) accu. Hoe lager de inwendige weerstand, des te hoger de laadstroom/ontlaadstroom die kan worden toegestaan. De inwendige weerstand is fysiek aanwezig op de (+)plaat omdat daar het Lithium Ferrofosfaat zit.

Minimale laadstroom

Er bestaat niet zoiets als een minimale laadstroom om een LFP-cel te laden. Elke laadstroom, hoe laag dan ook, brengt lading in een cel. Pas als de stroom naar nul is gedaald, wordt de cel niet meer geladen.

Maximale laadstroom

De laadstroom warmt de cel op. De stroom door de inwendige weerstand is daarvan de oorzaak. Het vermogen dat in warmte wordt omgezet is gelijk aan $I^2 R_i$. De inwendige weerstand R_i is bij LFP cellen laag en dat betekent dat er veel laadstroom kan lopen waarbij er maar weinig warmte wordt opgewekt. Voor LFP cellen kan er zonder oververhitting worden geladen met een stroom van $3c$ (= drie maal de waarde van de stroom in de capaciteitsaanduiding in Ah van de cel), zolang de laadspanning niet boven de 3,45V komt.

Opwarmen van LFP-cellen

De ontlaadstroom loopt door de R_i van de cel en verwarmt de cel door vermogensverlies in de inwendige weerstand. Dit vermogensverlies kan worden berekend uit het kwadraat van de ontlaadstroom maal de inwendige weerstand van de cel ($I^2 \times R_i$). Bij een ontlaadstroom van 2A en een inwendige weerstand van $6\text{m}\Omega$ wordt dat $2^2 \times 0,006 = 0,024\text{W}$. Dit is een gering vermogen en dat komt door de invloed van de lage inwendige weerstand.

In geval van een laadstroom van 2A geldt hetzelfde want de weerstand blijft hetzelfde.

De laadstroom wordt veroorzaakt door het verschil tussen de klemspanning van de cel en de laadspanning van de lader. Voorbeeld: klemspanning van de cel: 3,00V laadspanning: 3,45V, verschil is 0,45V. Dit spanningsverschil zorgt voor een laadstroom van ($U/R=I$) $0,45\text{V} / 0,006\Omega = 75\text{ Ampère}$ (als de lader en de draden dat aan kunnen!). Het laadvermogen dat de lader op dat moment wil leveren is: $U \times I$ ($0,45\text{V} \times 75\text{A}$) of 33,75W. Dan komt er elke seconde 33,75 Watt.seconde aan energie of 75 Ampère.seconde of Coulomb aan lading in de cel. Ter illustratie: 40 Watt.seconde of Joule aan energie zet je hart stil als de stroom door het hart langer dan 10 seconden duurt.

Is de cel geladen dan is de klemspanning 3,45V en de laadspanning 3,45V, Het verschil is 0,00V en dan loopt er een laadstroom van $0,00\text{V} / 0,006\Omega = 0,00\text{A}$. Er is dan geen laadstroom en daarmee ook geen opwarming van de cel.

Je hebt een lader die aangeeft de cel tot 3,65V te laden. De lader geeft trots aan dat deze een laadvermogen kan geven van maar liefst 100W. Bij een laadspanning van 3,65V is dat een laadstroom van $100\text{W} / 3,65\text{V}$ ofwel 27,4A. Nou, da's wel effe lekker: bijna 30A. Dan laad je dus de cel elke seconde met 27,4 A.s of 27,4 Coulomb op.

Er is een maar... Een LFP cel is bij het bereiken van 3,45V klemspanning 100% geladen en heeft geen mogelijkheid van opslag meer want 'vol is vol'! Het hele laadvermogen dat de lader afgeeft (100W) wordt dan door de cel omgezet in warmte, de temperatuur van de cel stijgt snel door deze 100W, de druk in de cel neemt toe en de cel gaat 'bol staan'.

Omdat er geen lading meer in de cel kan worden opgenomen, wordt de laadstroom gebruikt voor Lithium plating. Daar gaat je goeie geld.

Ondertussen wordt de cel warmer en warmer totdat het elektrolyt wordt afgeblazen en er brand ontstaat omdat de Vaseline op de polen van de cel in de fik vliegt. De celtemperatuur komt nu boven de 100°C en de cel is op weg naar een 'thermal runaway'.

Wil je een 'root cause analysis'? Dit alles kan alleen maar gebeuren als je een laadspanning van meer dan 3,45V toestaat. Kom je niet boven die spanning, dan kan de lader niet voldoende energie leveren om de cel op te warmen.

Oh ja: gebruik nooit het brandbare vaseline of 'petroleum jelly' in elektrische installaties. Je gaat toch ook niet met een brandend kaarsje naar een gaslek zoeken?

Thermometrie van LFP cellen

Wil je de kerntemperatuur van LFP cellen meten, dan is dat een lastige zaak. De kerntemperatuur is gedefinieerd als de temperatuur van de elektroden of 'platen' in de cel. Wil je dat meten, dan moet je een gat boren in de cel om daar een thermometer in te steken. Het elektrolyt zal dan vergassen, het Lithium in de cel zal aan de buitenlucht oxideren en de cel is kapot.

Fabrikanten van Li-ion cellen kunnen de cellen speciaal uitrusten met een temperatuur sonde en dan kun je de kerntemperatuur met deze sonde uitlezen.

Bij een aluminium celbehuizing zal de temperatuur van de buitenkant de kerntemperatuur dicht

benaderen, bij een kunststof celbehuizing zal er een groot verschil zijn tussen de temperatuur van de buitenkant van de cel en de temperatuur in de cel.

De celpolen zijn van metaal en dat is een goede warmtegeleider. Doordat er stroom door moet lopen is de doorsnede van de celpolen groot en dit bevordert ook de warmtegeleiding. De 'plusplaat' van de cel bevat het actieve materiaal en de inwendige weerstand de een cel en zal in gebruik de meeste warmte ontwikkelen. De pluspool van de cel staat daardoor in direct thermisch contact met de 'inwendige warmtebron' van de cel.



10KΩ NTC weerstand voor temperatuurmeting, vastklemmen onder de poolbout of poolmoer van de (+)pool. Dit geeft de beste thermische verbinding met de warmtebron in de cel (de (+)plaat met de inwendige weerstand). De gevonden temperatuur bij laden of bij belasting is altijd lager dan de kerntemperatuur van de cel.

De lader of het laadsysteem

Uitdrukking uit de Achterhoek:

“Twee eien laojen mien bèter op as unne gelijkrichter”

‘Deze lader is geschikt voor loodaccu’s en Li-ion accu’s’.

Nou, dat geloof ik alleen als ik kan zien dat de celspanning per cel wordt aangegeven en de celspanning bij laden niet boven de 3,45V per cel kan komen in de stand: ‘LFP-accu’. In alle andere gevallen moet je naast de accu zitten tijdens het laden en alle celspanningen bewaken en de stekker er uittrekken als een cel boven de 3,45V komt.

‘Deze lader heeft een IU karakteristiek met absorptie laden’.

Da’s mooi, maar dat zegt helemaal niets, behalve dat dit een lader is die met een toverspreuk is geschikt gemaakt voor het laden LFP accu’s. Ik geloof niet aan toveren.

‘Bij instellen van de accucapaciteit van de aan te sluiten accu, gaat onze lader over naar FLOAT met een float current van 0,01c als de accu is geladen.’

Dat is mooi voor een loodzwavelzuur accu maar het is ‘de moord’ voor een Lithium Ferrofosfaat accu. Float-laden met een stroom van 0,01c boven 100% SoC betekent het bewust opwekken van Lithium plating bij LFP accu’s. Het betekent ook dat je zelf moet monitoren of de LFP cellen op 3,45V zijn gekomen om daarna de cellen van de lader af te koppelen.

‘Bij onze li-ion lader kun je de BULK, ABSORPTION en FLOAT-spanning zelf instellen!’

Er zijn wel 7 soorten Li-ion cellen... Welke bedoel je? **LFP cellen!** Dat is mooi als je de spanning op 3,45V per cel kunt instellen. Kan dat niet... dan is die lader ongeschikt voor LFP Li-ion cellen.

‘Wij hebben een snellader voor Li-ion cellen!’

Er zijn wel 7 soorten Li-ion cellen... Welke bedoel je? **LFP cellen!** Dat is heel mooi, maar het is waarschijnlijk dat je de cellen heel snel laadt en ook heel snel kapot laadt, omdat dat snelladen meestal een hogere laadspanning dan 3,45V per cel hanteert.

Goede eigenschappen voor een LFP lader:

De laadspanning komt nooit boven de 3,45V per cel. Je kunt de cel dan 24/7 aan de lader laten! De cel kan niet worden overladen omdat daar een spanning hoger dan 3,45V per cel voor nodig is.

De lader heeft een thermische beveiliging voor de temperatuur van de lader.

De lader heeft een beveiliging die de laadstroom onderbreekt bij een omgevingstemperatuur lager dan 0°C.

De lader heeft een stroombegrenzer die de laadstroom begrenst als de lader een te hoge stroom levert en de lader te warm dreigt te worden.

Serieel of individueel laden

Er zijn niet veel elektrische installaties die met 3V tot 3,5V werken en er zullen een aantal cellen in serie moeten worden gezet om een voldoende hoge spanning voor het werken van elektrische apparaten te krijgen.

Aanvankelijk waren de gebruikte voedingsspanningen veelvoud van 1,5V vanwege de spanning van de Zink-Kool batterijen. Bij de opkomst van de loodzwavelzuur accu heeft men systemen opgezet met veelvoud van 2,1V zoals 6,3V, 12,6V en 25,2V. Om het systeemdenken te handhaven, zijn batterijbanken voor LFP cellen aan de spanning van Loodzwavelzuur cellen verbonden en zijn er voor een nominale spanning van 3,2V per cel accubanken mogelijk van 6,4V (2 LFP cellen in serie), 12,8V (4 cellen in serie), 25,6V (8 cellen in serie), 38,4V (12 cellen in serie) en 51,2V (16 cellen in serie). Door de fluctuatie van de spanning bij loodaccu banken heeft de gebruikte apparatuur een tamelijk grote tolerantie voor de voedingsspanning een zullen ze ook werken op LFP accubanken.

Een loodaccu van 12,6V (6 cellen) gaat bij een laadspanning van 13,8V het water van de zwavelzuur oplossing van het elektrolyt splitsen in waterstofgas en zuurstofgas. Bij auto's is de laadspanning 14,2 tot 14,5V en dit geeft een afname van het volume van het elektrolyt door het zogenaamde 'koken' van de accu. Het 'verkookte' volume kan worden aangevuld met gedestilleerd water als de accu daarvoor de mogelijkheid heeft. Voor stadsauto's die korte afstanden rijden en daardoor vaker moeten starten werd de laadspanning verhoogd tot 15V, zodat er meer laadstroom loopt en de accu sneller geladen is. Bij lange ritten zal de loodaccu dan vaker met gedestilleerd water moeten worden opgevuld. De hogere inwendige weerstand van de loodaccu speelt hierbij ook een rol, hierdoor wordt de laadspanning lager als er meer laadstroom loopt en zal de spanning niet ver boven de 13,8V komen.

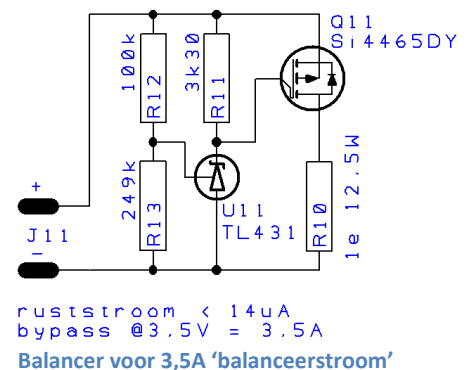
Vier maal 3,45V is ook gelijk aan 13,8V en zou de alternator van een auto zich hier strikt aan houden, dan zou elke 12,6V loodaccu één op één vervangen kunnen worden door een 12,8V LFP accu.

Serieel laden

Staan de cellen van een accubank in serie dan zal de laadspanning zich verdelen over de cellen in de serieschakeling. Is de accubank ooit geladen geweest, dan heeft de nog aanwezige celspanning invloed op de verdeling van de laadspanning over de cellen. De laadstroom is voor de cellen in serieschakeling gelijk, maar bij een variërende



LFP accubank van 16 100Ah cellen (51,2V nominaal, maximale laadspanning 55,2V bij 3,45V per cel)

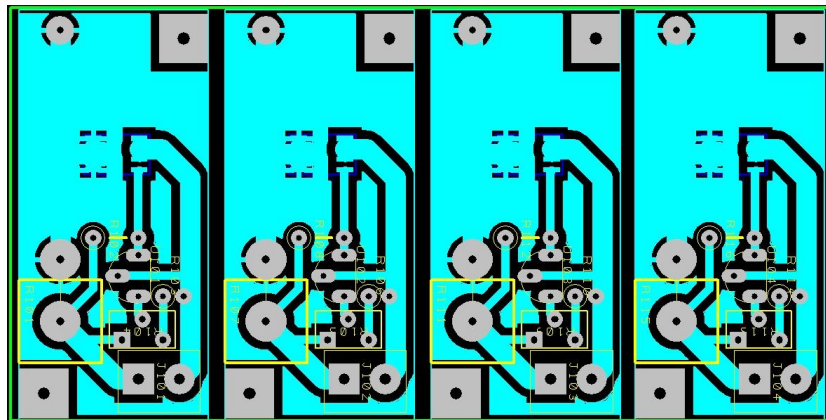


celspanning is het laadvermogen dan per cel ook variërend. Dit zal leiden tot spanningsverschil tussen de cellen ofwel 'onbalans'.

Dit is tegen te gaan door over elke cel een 'balancer' te plaatsen die bij een in te stellen waarde voor de spanning een groot deel van de laadstroom om de cel heen te leiden.

Door de laadstroom om de cel heen te leiden zal er minder lading in de cel komen en de spanning over de cel lager blijven. Naarmate de spanning over de cel daalt, zal de stroom door de MOSfet en de weerstand afnemen. De maximale stroom door de schakeling is 3,5A bij 3,5V celspanning.

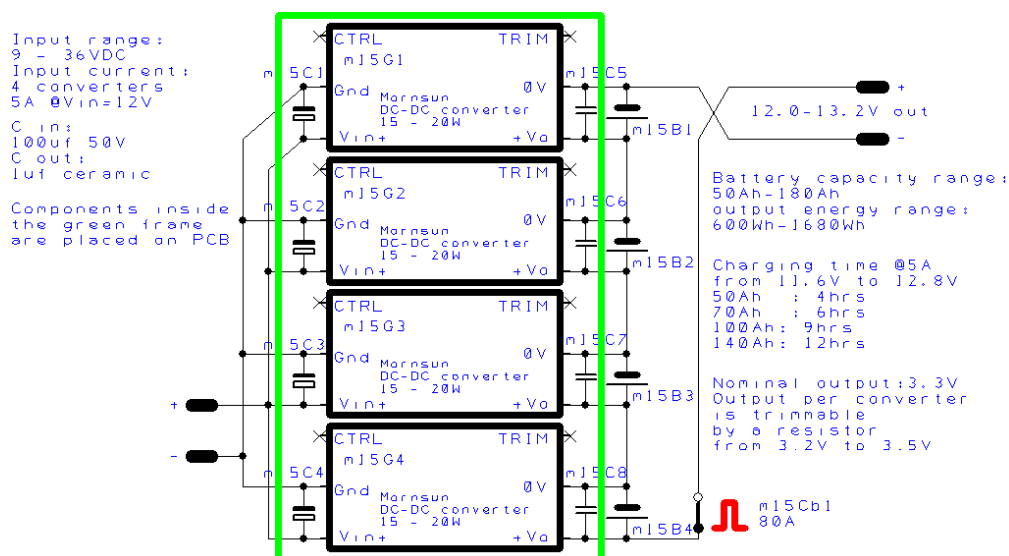
Bij gebruik worden de balancers warm, met name de 12,5 Watt weerstand. Balancers per cel werken ook goed bij sterk wisselende energietoevoer zoals bij de inzet van windturbines voor het laden van een accubank uit windenergie. Bij een EV waar de motor ook teruglevert bij 'recuperatief remmen' Houden balancers per cel de celspanning nauwkeurig onder de waarden voor Lithium plating.



Op de bovenstaande gedrukte schakeling wordt gebruik gemaakt van een 'multiturn' instelbare weerstand, zodat de spanning waarbij de stroom wordt omgeleid instelbaar is. Dit maakt de balancer ook toepasbaar voor Lithium Cobalt Manganaat cellen met een hogere eindlaadspanning.

Individueel laden

Een andere mogelijkheid is voor elke cel een lader te maken die de laadstroom voor de cel laat afhangen van de celspanning.



met een top – top spanning van 3,45V zorgt er alleen maar voor dat het laden langer duurt. Gebruik je gepulst laden met een hogere spanning dan 3,45Vt-t, dan ontstaat er Lithium plating zodra de celspanning boven de 3,45V komt.

Door pulsend te laden voorkom je lithium plating...

Door pulsend te laden kun je het loodsulfaat van de platen van een loodaccu verwijderen... Dit is niet op LFP accu's van toepassing en daarmee onjuist.

'Conditioning'

Wordt gebruikt bij loodzwavelzuur accu's om met pulsen van meer dan de maximale laadspanning openingen in de loodsulfaat laag te maken. Hierdoor wordt de loodsulfaat laag makkelijker omgezet in lood en loodoxide. Dit kan zover gaan dat het loodsulfaat van de platen losraakt en onder in de accubak valt.

In een LFP accu is geen loodsulfaat en 'Conditioning' zal er alleen toe leiden dat de accu kapot gaat door Lithium plating.

'BULK'

Bulk laden wordt gebruikt om loodzwavelzuur cellen binnen een bepaald celspanning traject van een hogere laadstroom te voorzien om de accu snel te laden. Door de hogere inwendige weerstand van een loodaccu wordt de loodaccu sneller warm en zal het 'accuwater' uit de cellen verdampen. Het bulkladen moet worden begrenst om de loodaccu niet 'droog' te laden.

Een LFP accu heeft een zeer lage inwendige weerstand en heeft geen bulk-traject nodig om snel te worden geladen. Het enige dat 'bulk laden' met een hogere laadspanning en –stroom veroorzaakt is Lithium Plating op het moment dat de accu de eind laadspanning bereikt.

'IU laad algoritme'

De 'I' staat voor stroom en de 'U' staat voor spanning. Door bij een loodaccu met een relatief hoge inwendige weerstand de regeling te baseren op de stroomsterkte kan er in het begin van het laadtraject –als de accu nog weinig lading heeft en de temperatuur van de accu nog laag is– een hogere laadstroom worden toegestaan dan 0,1 c. Pas als de lading in de accu is toegenomen gaat de lader over op laden aan de hand van een 'eind laadspanning' om de accu niet te overladen. Het resultaat is dat de accu snel geladen is en de vorming van loodsulfaat wordt tegen gegaan.

Dit algoritme zou ook voor LFP cellen kunnen worden gebruikt indien de waarden voor stroom en spanning worden aangepast. Kan dat niet, dan ga je met een 'loodaccu algoritme' een LFP accu laden. De kans dat dit goed blijft gaan is klein.

'FLOAT'

Bij het ontladen van een loodzwavelzuur accu wordt er loodsulfaat op de platen gevormd. Poreus loodsulfaat zal bij het laden van de accu weer worden omgezet naar lood en loodoxide. Blijft de accu lang ongeladen, dan wordt het loodsulfaat 'vaster' en minder poreus. Om deze reden worden loodaccu's zo snel mogelijk na het ontladen weer geladen. Wordt de accu niet gebruikt, dan neemt de capaciteit door zelf ontlading af. Ook dit 'zelf ontladen' zal loodsulfaat op de platen vormen.

Door de loodaccu doorlopend van een kleine laadstroom te voorzien, zal het gevormde loodsulfaat weer worden omgezet in lood en loodoxide en zo de capaciteit van de accu verbeteren. Bij LFP accu's neemt de Lithium plating door de aanwezig blijvende laadstroom toe tot de accu platen geheel zijn bedekt met metallisch Lithium.

Het verloop van de celspanning bij het laden van een LFP cel in een tabel

Dit is een LiYFePO_4 cel met een nominale capaciteit van 160Ah en een nominale spanning van 3,2V. De cel heeft een zwarte 'min' pool om aan te geven dat de koperen 'min' plaat met een laagje koolstof is bedekt om een nog lagere R_i te halen. De R_i van de cel is $0,073\Omega$ (opgave fabrikant). De cel is ontladen tot 0,00V. De omgevingtemperatuur is 18°C en de cel is in de eerste laadfase.

De cel wordt met een 4V lader geladen totdat de celspanning (onbelast) op 2V is gekomen. De cel is nu in de tweede laadfase en nu volgt een

gecontroleerd laadtraject met 'Constant Voltage' spanningsbron van 3,45V.

De cel wordt geladen door een 'Switching Mode Power Supply' (SMPS) met een uitgangspanning van 3,3V die door een trimpotentiometer (meerslags) omhoog wordt geregeld tot 3,45V onbelast. De SMPS heeft een uitgangstroom van 20A en kan 60W uitgangsvermogen leveren. Bij een uitgangstroom $> 20\text{A}$ treedt de stroombegrenzer in en beperkt de stroom tot 20A. Hierbij daalt de uitgangspanning van de SMPS en neemt de



uitgangstroom af.

De reeks meetwaarden van de celspanning loopt van 2,00V op in stappen van 100mV naar uiteindelijk 3,45V. De celweerstand blijft constant omdat de positieve temperatuurscoëfficiënt van aluminium-lithium elektrode wordt gecompenseerd door de negatieve temperatuurscoëfficiënt van de koolstoflaag op de koper elektrode. De temperatuurscoëfficiënten zijn niet gelijk maar gaan pas een meetbaar verschil geven boven de 50°C . Dit is een te vermijden temperatuur voor LFP cellen. Let wel: de waarden voor de laadstroom en het laadvermogen worden berekend uit de inwendige weerstand en het spanningverschil tussen de actuele celspanning en de constante laadspanning van 3,45V. De invloed van de temperatuurscoëfficiënt ($11\text{mV}/^\circ\text{C}$) op de actuele celspanning wordt hierbij verwaarloosd.

De cel bereikt het 100% SoC punt als de spanning op de cel de 3,45V heeft bereikt, zijnde de wiskundige som van de standaard elektrode potentialen van Lithium en Ferrum (ijzer).

De lader zal zijn volle vermogen leveren (60W) bij een R_i van $35\text{m}\Omega$ en een spanningsverschil van 1,45V. Daarbij zal de stroombegrenzer de stroom onder de 20A houden. Bij toename van de temperatuur van de lader zal de vermogensbeveiliging de stroom afschakelen en wachten tot de temperatuur lager is geworden en dan weer inschakelen. Dit kan een aantal malen plaatsvinden bij een 'lege' cel met een lage R_i en een lage klemspanning. Naarmate de klemspanning (en de SoC) hoger wordt, neemt de laadstroom af.

Tabel met spanningverloop bij laden met een gestabiliseerde spanningsbron

Schakelende voedingen of SMPS'-en (Switching Mode Power Supply) kunnen grote vermogens leveren om een cel te laden. De uitgangspanning wordt constant gehouden (onafhankelijk van de belasting) gehouden. Voor gebruik als enkele cellader is een 3,3V versie voldoende. Deze kan middels een trimweerstand op 3,45V worden afgesteld waardoor het overladen van een cel niet kan voorkomen.

U _{cel} V	ΔU V	Laadstroom $I_{in} = \Delta U / R_i$	Laadvermogen $P_{in} = I_{in} \times U_{laad}$	Verlies $P_v = I_{in}^2 \times R_i$	Opmerkingen Bij laden. $R_i = 0,073\Omega$ $U_{laad} = 3,45V (U_{constant})$
2,00	1,45	19,863A	68,527W	28,801W	
2,10	1,35	18,493A	63,800W	24,965W	
2,20	1,25	17,123A	59,074W	21,403W	
2,30	1,15	15,753A	54,347W	18,115W	
2,40	1,05	14,383A	49,621W	15,102W	
2,50	0,95	13,013A	44,894W	12,362W	
2,60	0,85	11,643A	40,168W	9,896W	
2,70	0,75	10,273A	35,441W	7,704W	
2,80	0,65	8,904A	30,718W	5,787W	
2,90	0,55	7,534A	25,992W	4,143W	
3,00	0,45	6,164A	21,265W	2,773W	
3,10	0,35	4,794A	16,539W	1,677W	
3,20	0,25	3,424A	11,812W	0,856W	
3,30	0,15	2,054A	7,086W	0,308W	
3,40	0,05	0,684A	2,359W	0,034W	
3,45	0,00	0A	0W	0W	

De laadstroom blijft net onder het maximum van 20A. Bij een cel met hogere capaciteit en een lagere R_i zal de laadstroom hoger dan 20A worden en werkt de stroombegrenzer.

De SMPS lader kan maximaal 60W leveren en zal bij een laadstroom van 19A warm worden en bij een te hoge temperatuur zal de thermische beveiliging 'inkomen'.

Bij een lege cel is het laadverlies in de cel het hoogst. Tegen het einde van het laadproces (vanaf een celspanning van 3,20V tot 3,45V) is de celstroom laag en het door de cel gedissipeerde vermogen kleiner dan 12W.

De cel warmt voelbaar op bij verliesvermogens van 10W of meer. Een 12V boordnet met 4 160Ah cellen produceert bij laden 120W aan verliesvermogen en moet goed worden gekoeld/geventileerd. Is de 100% SoC bereikt (celspanning 3,45V), dan wordt de stroom 0 en het gedissipeerde vermogen 0W. Geen stroom betekent: geen Lithium plating en geen vermogen betekent geen temperatuur verhoging.

De stroombegrenzer is geen 'stroomafkapper' er blijft stroom lopen. Er is - om laadverliezen te beperken - een mogelijkheid de laadstroom te regelen door PWM / pulsbreedte modulatie.

Stijgt de celspanning door de toename van de lading in de cel, dan daalt de celstroom.

Wordt de cel tijdens het laden belast, dan daalt de celspanning en neemt de ΔU toe, waardoor de laadstroom en het laadvermogen ook toenemen. Een deel van de laadstroom of zelfs de gehele laadstroom aangevuld met stroom uit de cel zal door de belasting lopen. Neemt de belasting af, dan kan er weer laadstroom door de cel lopen en wordt de cel weer opgeladen.

Tabel met het verloop van de celspanning bij het ontladen van een LFP cel

De ontlaadstroom blijft onder het maximum van 25A door de inzet van een 25A smeltpatroon.

U_{cel} V	Ontlaadstroom $I_{\text{uit}} = U_{\text{cel}} / R_{\text{load}}$	Ontlaadvermogen $P_{\text{uit}} = I_{\text{uit}} \times U_{\text{cel}}$	Verlies: $P_v = I_{\text{uit}}^2 \times R_i$	Opmerkingen Bij ontladen. $R_i = 0,073\Omega$ $R_{\text{load}} = 0,138\Omega$
3,45	25,000A	86,250W	45,625W	
3,40	24,637A	83,765W	44,309W	
3,30	23,913A	78,912W	41,743W	
3,20	23,188A	74,201W	39,250W	
3,10	22,463A	69,635W	36,834W	
3,00	21,739A	65,217W	34,498W	
2,90	21,014A	60,940W	32,235W	
2,80	20,289A	56,809W	30,049W	
2,70	19,565A	52,825W	27,943W	
2,60	18,840A	48,984W	25,911W	
2,50	18,115A	45,287W	23,955W	

In de inwendige weerstand van de cel wordt bij 25A een verlies van 45,625W gedissipeerd. Dit zal met zekerheid de cel opwarmen.

Tegen het einde van het ontladproces (vanaf een celspanning van 3,00V tot 2,50V) is de celstroom laag en het door de cel gedissipeerde vermogen kleiner dan 35W. Het opwarmen neemt nu af.

Een 12V boordnet heeft 4 cellen en zal in vollast ca 200W aan warmte produceren en moet voldoende worden geventileerd / gekoeld.

Omdat dit rekenkundige exercities zijn, zijn hierbij geen mensen, dieren of cellen overladen, overbelast, oververhit of op andere wijze onaangenaam behandeld. Het invalideren van cellen door deze berekening is uitgesloten.

Deel 2: Precieze Praktijk

Project Accubak voor blokvormige cellen

Eigenschappen

Elektrisch geleidend:

Door het doorlopend bewegen van een boot komt het schavielen van kabels, stagen, schoten en leidingen veel voor. Is een accubak van metaal, dan bestaat de mogelijkheid dat de isolatie van een kabel door schavielen defect raakt en er door het contact van de aders met de metalen accubak kortsluiting ontstaat. Aangezien de stroomsterkte bij kortsluiting zeer hoog zal zijn is de kans op brand evenredig groot. Een metalen, elektrisch geleidende accubak heeft geen voorkeur.

Ventilerend:

Door ventilatie wordt verhoging van de temperatuur in de accubak tegen gegaan. Bij hoge laadvermogens en grote vermogensafname worden cellen warm en zonder ventilatie kan dat **te** warm zijn.

Bij temperaturen boven de 70°C zal het elektrolyt van vloeistof totaal overgaan in gas. Dit gas kan via een pop-off worden afgeblazen en in de accubak ophopen. Dit gas is bij LFP-cellen onbrandbaar, maar ongezond. Binnen de temperatuur range van 0 tot 50°C zal een LFP cel geen gas afblazen.

Mechanisch sterk:

De accu of cellen in de accubak zijn zwaar en vaak doorlopend aan trilling onderhevig. De accubak moet voldoende stevig zijn om de inhoud veilig op zijn plaats te houden zonder dat er door verschuiven kortsluiting kan ontstaan.

Onbrandbaar of brandvertragend:

Omdat LFP cellen geen brandbaar elektrolyt bevatten is het niet nodig om ze in een onbrandbare of brandvertragende behuizing te plaatsen. Bij een thermal runaway is er van brandvertraging geen sprake omdat dan de temperatuur in de cel tot 700°C kan komen en de boot of andersoortig voertuig geheel zal verbranden.

Te gebruiken materialen:

Trespa volkern is temperatuur bestendig tot 1200°C en vormt een goede keuze voor het maken van een accubak. De versie van 6mm dikte is sterk genoeg voor de zijwanden en deksel van de bak. De bodem van de bak kan van 12mm dik Trespa worden gemaakt zodat



de zijwanden met machine schroeven M4 rondom tegen de dikke bodem kunnen worden geschroefd. De machineschroeven kunnen worden getapt in de 12mm bodem (denk om de tap, deze snijden soms moeizaam in Trespa en dan kunnen ze afbreken, zie de resten dan maar weer uit het Trespa te krijgen!)

Deze constructievorm is ook te gebruiken bij 6 en 18mm multiplex, zei het dat je dan houtschroeven in plaats van machineschroeven moet gebruiken.

MS Polymer kit lijmt en kit tegelijk en levert een waterdichte verbinding op.



Trespa accubak voor 4 50Ah LFP cellen en RvS M8 Accupolen binnen de omtrek van de bak. Voorin de bak zit de elektronica voor het laden en voor de onderspanning bescherming. De keuze van de kleuren is die zoals gebruikt door de Stijlgroep. (Mondriaan cs)

Het is ook mogelijk een kunststof installatie behuizing te gebruiken als accubak. Je kunt dan een geheel mobiele elektrische installatie maken die uitgerust is met zware connectors voor hoge stroomsterkten. Het voordeel is dat je dan de accu met lader, monitoring en al uit de boot kunt nemen en vrij bent in waar je de accu laadt.

Installatie behuizingen zijn meestal van slagvast ABS en 'spatwaterdicht'. Werk je netjes en voer je de kabels via kabelwartels naar buiten dan kun je het niveau van 'spatwaterdicht' bereiken.

Plaatsing van cellen in een accubak

Er zijn verschillende behuizingen van LFP cellen, de meest kwetsbare zijn de 'pouches'. Omdat hierbij een aansluiting aan de lip van een pouch moet worden gemonteerd. De pouch is dicht 'geseald' en de 'pouch' is kwetsbaar en kan worden geperforeerd waarbij het elektrolyt vervliegt. De cel is dan kapot.

Er zijn celbehuizingen van diep getrokken aluminium waarin de pouches met busbars voor de min en de plus aansluiting worden vast gekit. De aluminium behuizing is vormvaster dan alleen een pouch maar de aluminium behuizing gaat bij een drukopbouw door warm worden snel 'bol' staan. De aluminium behuizing wordt meestal 'ingepakt' in een kunststoffolie en dit vormt een elektrische isolatie. Die isolatie is niet erg stevig en bij een verbinding tussen de plus of de min van de cel en de aluminium behuizing kan de behuizing spanning voerend zijn. Bij perforatie van de folie en een brug naar een metalen accubak kan er kortsluiting ontstaan met de daaraan verbonden problemen als zelfontlading van een of meer cellen in de accubak. Om de cellen tegen de gevolgen van perforatie van de folie te beschermen heeft het de voorkeur de accubak van elektrisch isolerend materiaal te maken. Er zijn siliconen 'bakmatten' (1,5mm dikke siliconen vellen) en zij zijn elektrisch isolerend maar thermisch redelijk goed geleidend. Dit vormt een goede elektrische scheiding tussen de cellen in een aluminium behuizing onderling en een elektrische scheiding met de metalen accubak. Tevens voorkomt het siliconenrubber dat de cellen in de metalen accubak gaan rammelen en zo kapot stoten.

Er zijn celbehuizingen van glasvezel versterkt kunststof. Deze behuizingen zijn brandwerend en bestand tegen temperaturen van meer dan 400°C. Deze cellen kunnen in een frame worden geplaatst en hebben dan geen gesloten accubak. De ventilatie door de omgevingslucht zorgt dat de cellen worden gekoeld. Bij plaatsing in een dichte accubak geeft de geribbelde buitenkant enige ruimte voor stroming in de accubak ontstaat. De cellen met een kunststof behuizing kunnen 'koud' tegen elkaar en de wand van de accubak worden geplaatst. Ook deze cellen gaan bij hoge temperaturen door overladen en overbelasting 'bol' staan. Het is mogelijk ze dan meer 'ruimte te geven' en die ruimte op te vullen met een siliconen vel tegen rammelen. Een andere mogelijkheid is het aanbrengen van een aluminium plaat tussen de cellen die 20mm hoger is dan de cellen. Er ontstaat dan een 'radiator' voor de opgewekte warmte in de cellen.

Er is geadviseerd de cellen samen te klemmen om een goede verdeling van het elektrolyt in de cel te bewerkstelligen. Dit is alleen nuttig bij 'pouch' cellen, bij aluminium behuizingen en glasvezel versterkte kunststof behuizingen is dit niet effectief. Bij toename van de druk in de cel door verwarming is het enige dat wordt bereikt een sneller openen van de afblaasopening of pop-off.

Houten accubak met 4 70Ah LFP cellen

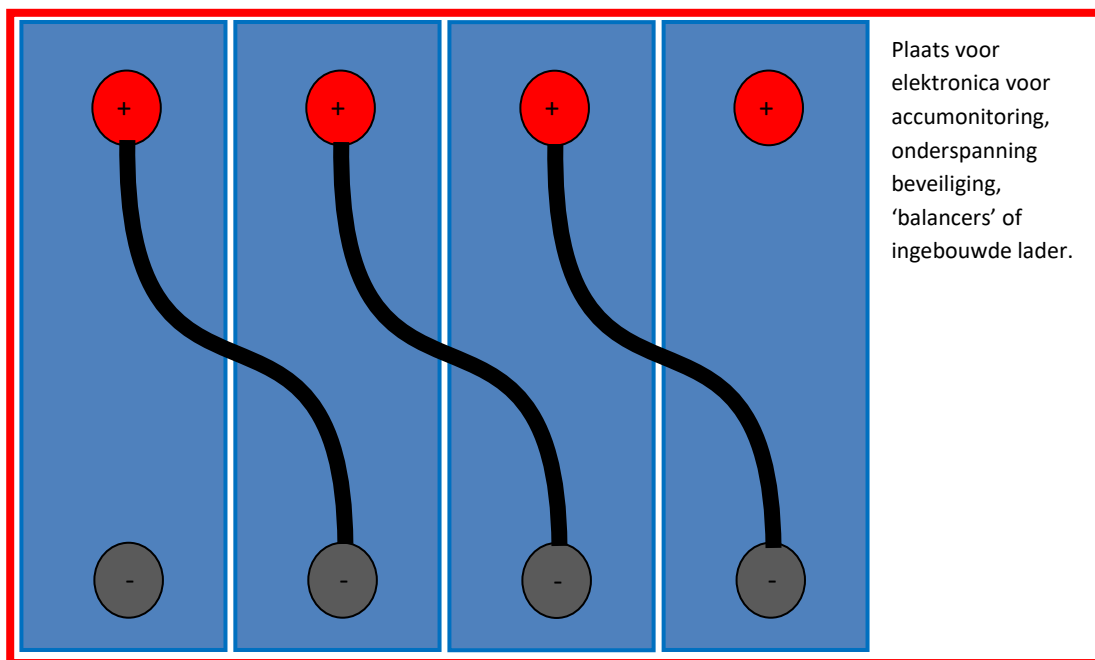
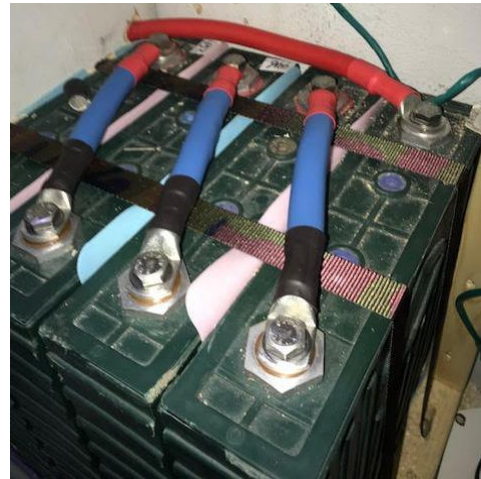


Indeling en aansluiting van cellen in een accubak

Het is mogelijk de cellen 'om en om' in de accubak te plaatsen. De celpolen worden dan met een koper of aluminium strip doorverbonden. Een dergelijke strip moet dan een boogje hebben om 'rek en krimp' op te vangen bij temperatuurwisseling van de cellen. Dit geeft de laagste weerstand voor de accu door de kortste aansluitingen. Een andere mogelijkheid is de cellen 'naast elkaar' te zetten (Plus celpolen aan dezelfde kant en Min celpolen aan de 'overkant') en de Plus en de Min pool met een stuk kabel te verbinden zodat er meer ruimte voor het 'uitzetten' van de cellen ontstaat.

Bij het monteren van een 6mm Trespa deksel kunnen in de deksel standaard DIN – ISO accupolen worden gemonteerd.

Dan lijkt het geheel op een 'gewone' accu en wordt het mogelijk dat de accu wordt verwisseld met een loodaccu en dan zal de LFP accu kapot gaan. Bij het opnemen van 2 M8 RvS slotbouten als accupolen in de zijwand of in de Trespa deksel is het duidelijk dat de 'gewone' accupool klemmen niet passen en is een vergissing onwaarschijnlijker (maar nooit onmogelijk).



Bij het bouwen van de accubak moet je wel secuur de maten opnemen van de cellen voordat de wanden en de bodem aan elkaar worden gezet.

Het monitoringsysteem

Eenvoudig cellading bepalen door celspanning te meten.

Door de vlakke spanning/lading curve wordt de lading in de cel goed gerepresenteerd door de klemspanning van de cel. Hieraan zit wel een voorwaarde, de meetpunten moeten wel op de celpolen zijn aangesloten om een zo laag mogelijke spanningsval bij belasting en een zo klein mogelijke verhoging van de spanning bij laden te geven.

Op deze manier aansluiten maakt dat alleen de heel lage inwendige weerstand een heel kleine rol speelt bij het monitoren van de waarden.

De waarden worden alleen na het drukken op een knop getoond en verbruiken een lage stroom bij tonen van de waarde op het meetinstrument.

Door dit systeem kan de meter ook buiten gebruik aangesloten blijven want er is geen stroomverbruik in rust. Om het systeem vast gemonteerd in de boot te laten wordt het aangesloten met een 5 aderige kabel op een 5 polige contactstop op de accubak. De accubak kan dan als eenheid in en uit de boot worden genomen (bijvoorbeeld voor overwintering in een gegarandeerd vorstvrije ruimte).

Spanning meten

Je gaat naar de accubank toe en meet met een multimeter de spanning van elke cel in de bank. Is er een groot verschil in de spanning per cel (meer dan 50mV) dan is er sprake van onbalans. Meestal wordt dit dan bij de eerstvolgende laadcyclus wel 'weggebalanceerd' als er gebruik wordt gemaakt van een balancerende lader.

Dat betekent dan wel dat je met enige regelmaat in je 'machinekamer' moet zijn voor die meting. Heb je een vast aangelegd meetsysteem met een 'blauwtand' zendertje, dan kan het via je mobieltje met een app. Er wordt dan ook een trendcurve van de accuspanning weergegeven. Er zijn ook systemen die meerdere kanalen weergeven zodat cellen individueel gemeten worden en een eventuele onbalans snel wordt opgemerkt.

Heb je dat niet, dan kun je met een meerstanden schakelaar met een meter over de cellen meten en de celspanning aflezen. Ik ben een liefhebber van wijzertjes en doe dat dan graag analoog, maar digitaal kan natuurlijk ook. Ik ben een fan van analoog omdat je dan een nulpuntonderdrukking kunt maken en ook een meer grafische indruk van de situatie hebt. Met een scherm kan dat ook.

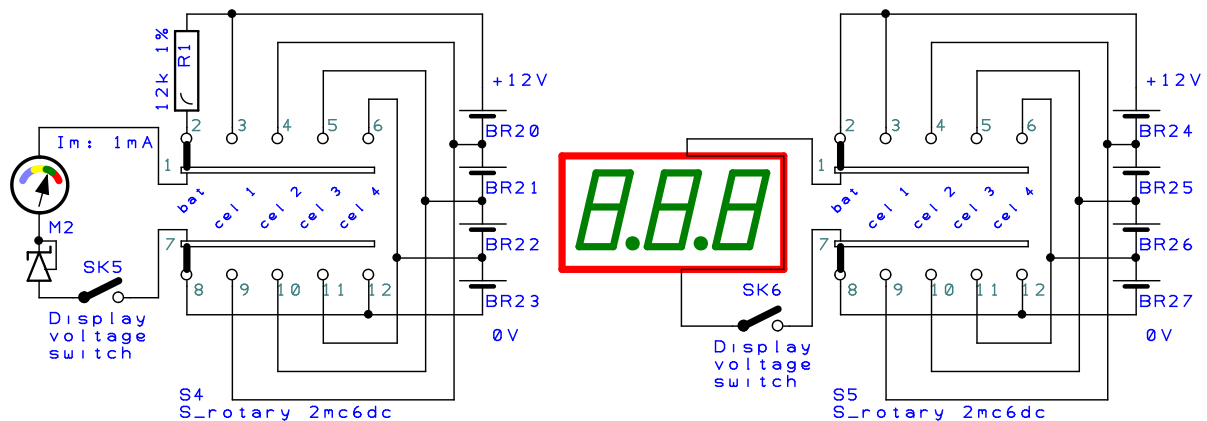
Project celspanningmonitor / monitoring cellading

De verschillen in de celspanning bij een accubank zijn afhankelijk van de lading van een cel. Die lading op zijn beurt is weer afhankelijk van de temperatuur van (in) de cel. De lading uit zich in de celspanning. Lading (I.t) is ook uit te drukken in C.U en aangezien de C (als capaciteit in Farad) bijna constant is, is de spanning van een cel een goede graadmeter voor de lading in de cel. Maar... die spanning is afhankelijk van de temperatuur en daarmee is ook de lading in de cel afhankelijk van de temperatuur. Daaruit volgt dat onbalans in lading ook weer afhankelijk is van de temperatuur. Dat wil zeggen als je de lading in een accubank wilt

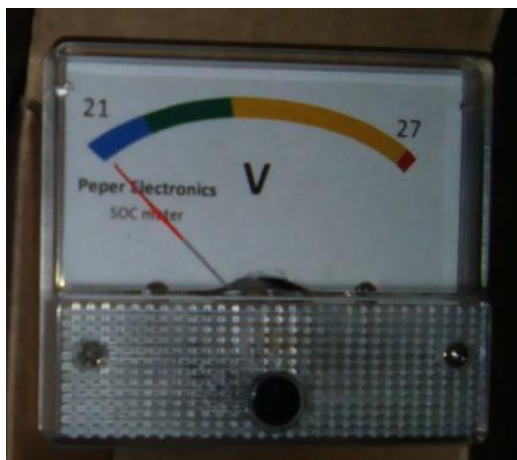


bepalen, dat alleen kan als je rekening houdt met de individuele cel(kern)temperatuur of dat je de celtemperatuur verregaand gelijk houdt met de andere cellen. Doe je dat niet, dan is de uitslag van de ladingmeting niet precies, maar wel indicatief. Meet je de lading per cel, dan is de uitslag betrouwbaarder omdat de celtemperatuur wordt verdeeld door het zich verplaatsende vloeibare elektrolyt in de cel.

De getoonde blue tooth meter werkt met 1 kanaal en kan dus niet de individuele celspanning meten. Het systeem gebruikt echter maar 1 mA. Is je dat nog teveel, dan zet je er gewoon een schakelaar tussen die het systeem uitschakelt.



Schema analoge en digitale celspanningsmeter voor een 4 cel accubank



De 5 standenschakelaar geeft een keuze voor een individuele meting van elke cel en een stand om de totale accuspanning weer te geven.

De draaispoelmeter gebruikt 1mA voor het werk, maar als je niet kijkt is dat nutteloos stroomverbruik al is het maar een klein beetje. Zonder op de display drukknop te drukken is er geen aanwijzing en geen stroomverbruik.

De draaispoelmeter wijst 0 tot 1V aan, maar door een ic begint de meter pas aan te wijzen bij een spanning van 2,5V en stopt dan bij 3,5V. Een LFP cel kan beter niet onder de 2,5V worden ontladen en beter ook niet boven de 3,45V worden geladen. De range die de meter bereikt is daarmee precies goed.

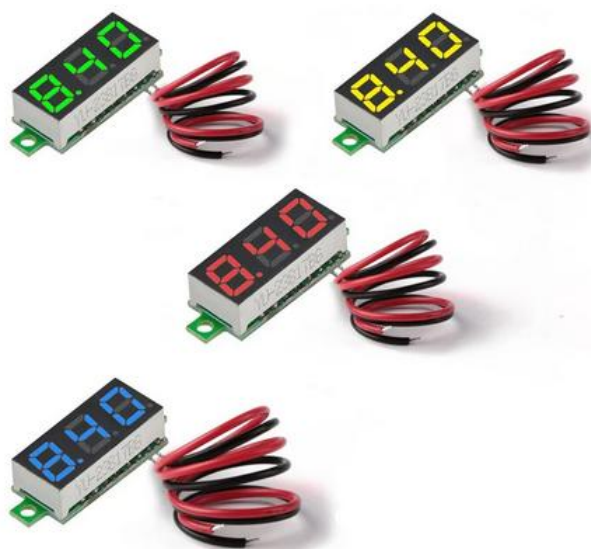
Voor het meten van de totale accuspanning is 3,5V te weinig. Er moet dan een serieweerstand worden gebruikt om het meetbereik aan te passen. Een weerstand van 12.000Ω 0,1W is dan de mogelijkheid om de meter van 2,5V (nul) tot 14,5V (volle schaal) aan te laten geven.

In een oude Tjalk, Aak of een Schouw is een digitale voltmeter een anachronisme maar er zijn mogelijkheden om een stoere, ouderwets uitzijnde

paneelmeter te gebruiken. Haal dan voorzichtig het meetsysteem uit het kastje. Met Typ-ex of een witte pen kun je dan 'Hua', het typenummer, de 'class' aanduiding en de 'V' weghalen en de laatste vervangen door '% x 100'. De meter geeft dan bij 2,5V '0%' aan ten teken dat je de cel beter niet verder kunt ontladen. Er is verder nog 'artwork' mogelijk, zoals een blauw gebied tussen '0' en '0.4'. Dit is dan het gebied tussen 2,5V en 2,9V. Tussen 2,9V en 3,1V (vanaf 0.4 tot 0.6) past een geel gebied. Tussen 3,1V en 3,4V (vanaf 0.6 tot 0.9) past een groen gebied. Vanaf 0.9 tot 1.0 kom je aan de spanning van meer dan 3,40V en dat is 'overladen' en daar past een rood gebied.

Je kunt ook het schaalteje voorzichtig losschroeven en op de achterkant een witte adressticker plakken en een eigen schaalverdeling maken met een walvis, zeehond, octopus of narwal. Daarna de adressticker 'trimmen' langs de rand van het aluminium en presto!

Elke draaispoelmeter met een schaal van 0V tot 1V kan worden gebruikt. Het gebruikte vermogen is afhankelijk van de stroom door de meter nodig voor de volle uitslag. Er zijn systemen van 50µA, 100µA, van 1mA en 10mA. Een meter van 50µA moet zeer licht zijn geconstrueerd, dit kan op een stampende of slingerende boot tot schade aan het systeem leiden. Het vermogen voor een dergelijk systeem is slechts $1V \times 50\mu A = 50\mu W$. In het voorbeeld wordt een 1mA systeem gebruikt. Dat is robuuster en zal bij zeegang niet snel kapot gaan. De meter verbruikt $1V \times 1mA = 1mW$. Op een wijzerinstrument kun je de schaal achter de wijzer van kleuren voorzien en als je voorzichtig bent kun je de wijzer van 'Glow in the dark' verf voorzien en werkt het ook in het donker. Je kunt het net zo bont maken als je wilt.



Twee draad DVM met LED's in de oplicht kleuren rood, groen, geel of blauw (2,4V tot 40V, meetspanning is tevens voeding)

Een DVM zal meten tussen 000V en 999V en gebruikt dan voor een 7-segments LED aanduiding van 3 digits ongeveer 20mA. Die stroom komt dan meestal uit een 9V blokbatterij. Is het een 3 digit meetsysteem, dan kan het ook zonder batterij (twee draad systeem) maar dan is er voor het oplichten van het display tenminste 2,5V nodig, anders blijven de cijfers 'zwart'. De decimale punt schuift automatisch naar rechts als de spanning boven de 9,99V komt. Hele dure DVM's hebben leuke trucjes zoals kleurverandering van het display (boven de 3,4V wordt het display rood, onder de 2,5V wordt het display blauw, tussen de 2,5 en 3,0V is het display geel en tussen de 3,0 en 3,4V is het groen).



Er zijn kleine schermpjes te koop met een ingebouwd meetsysteem met 6 kanalen. De systemen zijn oorspronkelijk bedoeld voor loodaccu's van 6 cellen. De 4 cellen van een LFP of LCM accu kunnen ook worden gemeten en gemonitord. De meter wordt gevoed tussen de '-' en de '1' aansluiting en vraagt daar 1V voor. Het energieverbruik van het systeem is mij niet bekend, maar een 'stroom slurper' zal het wel niet zijn. Bij het

aansluiten van 4 cellen op '1', '2', '3' en '4' komen er 4 balkjes in beeld met elk de spanning van een cel. Bij een gelijke lengte van de balkjes is eenvoudig te zien dat de cellen in de bank in balans zijn.

Voor de totaalspanning moet je gaan rekenen, je kunt niet zonder meer kanaal 5 of 6 gebruiken voor de meting van de totaalspanning, dat geeft geknetter en een rookwolkje.

Er bestaan meetsystemen die via een app meerdere kanalen op een smartphone kunnen laten zien en bovendien het spanningverloop van alle cellen kunnen loggen. Dat loggen is nodig om veilig te varen en niet tegen een boei te knallen als je tijdens solo varen de accuspanningen bekijkt. In een auto en zelfs op de fiets mag je ook niet op je smartphone kijken als je achter het stuur zit en rijdt.

Voor het bepalen van de ladingstoestand van de hele accubank zijn er monitoring systemen die 'Coulomb counters' worden genoemd en doormiddel van een shuntweerstand de laadstroom en de belastingstroom 'loggen' en zo de lading van de accubank weergeven.

Bouwen

Onderdelen lijst DVM uitvoering:

Draaischakelaar

Met de draaischakelaar worden de cellen geselecteerd voor meting.

Er zijn 5 standen, 4 voor 4 cellen en de 5^e voor de hele bank.

Digitale voltmeter

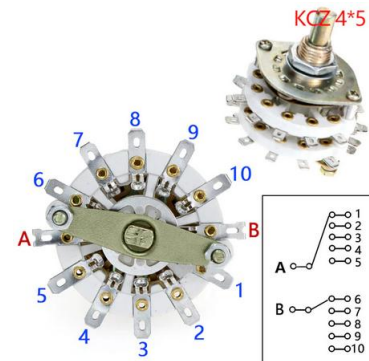


De DVM licht pas op bij 2,5V.

Een zwart display betekent dat de cel een gevaarlijk lage spanning heeft bereikt en geladen moet worden.

Daarom de 'veilige' kleur groen.

Bij meting van de accubank spanning schuift de decimale punt automatisch op. 30V is de maximale waarde,



daarboven brandt de meter door.

Het stroomverbruik hangt af van het aantal segmenten dat oplicht, "8.88" vraagt bijna 20mA en verbruikt ca 177mW.

Druknop



Ik geef mijn motivatie voor de knop: Kleur rood zodat je niet waarschijnlijk zonder reden op de knop drukt. Type knop: zo vlak mogelijk (zoals de zwarte), dan loop je minder verwondingen op als je er per ongeluk tegen aan botst.

Enkel maakcontact wat bij loslaten weer verbreekt. Schakelstroom: meer dan 20mA en kleiner dan 50mA.

Soepel draad (0,1 tot 0,2mm²) Uit het 'centraal magazijn'. Doorsnede 0,1mm² is voldoende maar 0,2 is sterker. Neem een soepele leiding omdat er op een schip altijd trillingen zijn en er grotere kans is op vermoeidheidsbreuk bij massieve draad.

Gereedschap: soldeerbout en tin en een telefoontang (puntbektang) is ook handig.

Onderdelen lijst analoge uitvoering:

Draaischakelaar

Met de draaischakelaar worden de cellen geselecteerd voor meting. Er zijn 5 standen, 4 voor 4 cellen en de 5^e voor de hele bank.



Drukknop



Ik geef mijn motivatie voor de knop:
Kleur rood zodat je niet waarschijnlijk zonder reden op de knop drukt. Type knop: zo vlak mogelijk (zoals de zwarte), dan loop je minder verwondingen op als je er per ongeluk tegen aan botst. Enkel maakcontact wat bij loslaten weer verbreekt. Schakelstroom: meer dan 20mA en kleiner dan 50mA. Bij indrukken loopt de meterstroom door de contacten van de knop en zal nooit meer dan 25mA zijn.

IC TL431 (programmeerbare zenerdiode)

Analoge voltmeter (draaispoelmeter 1V volle uitslag bij 1mA stroom door de meter.

Er zijn heel veel mogelijkheden voor een 1V meetsysteem. Het getoonde systeem heeft extra montage ruimte in het meetsysteem en dat is handig voor het opnemen van serie of shunt weerstanden of de programmeerbare zenerdiode. Voor 'rammelbestendigheid' kan het IC met een druppel cyano acrylaat lijm worden vastgeplakt in de behuizing. Het is voor mij het analoge systeem van keuze. Het acryl glas aan de voorkant zit vast met 'klikvingers'. De 2 schroefjes op de achterzijde openen de meter en geven toegang tot de draaispoel en een voorschakel weerstand. Er is meestal ruimte genoeg om het IC aan te brengen en aan te sluiten. Kijk uit met solderen, bij langdurig verhitten zal de kunststof smelten.

De vermogensopname van het meetsysteem met IC zal ongeveer $3,5V \times 1mA = 3,5mW$ bedragen.



11k serieweerstand (metaalfilm 0,25W, tolerantie 1%)



Soepel draad ($0,1 - 0,2mm^2$) Uit het 'centraal magazijn'. Neem een soepele leiding omdat er op een boot altijd trillingen zijn en er grotere kans is op vermoeidheidsbreuk bij massieve draad.

Gereedschap: soldeerbout en tin en een telefoontang is ook handig.

Denk erom:

laadconverters en ladingmonitors gebruiken een heel klein beetje stroom uit de accu voor hun werk. Bij laadconverters wordt dit meteen weer aangevoerd als de accu aan de lader staat. Laat de accu niet aan de lader staan als de accu niet wordt geladen.

Bij de analoge en digitale meters voor de celspanning is er een knop die moet worden ingedrukt om de benodigde stroom door het meetsysteem te laten lopen. Deze meters kunnen wel op de cellen aangesloten blijven omdat er alleen stroomverbruik is als er op de knop wordt gedrukt.

Project zelfbouw walstroom lader voor een 12V LFP accubank

In plaats van 'walstroom' lader kan het ook een 'camping' lader (voor caravans of campervans) zijn.

Wat zijn de mogelijkheden?

Er bestaat niet zoiets als een 'te kleine accu', wat wel bestaat is een te hoge ontlading of te zware belasting. Wordt de totaal-stroom uit de accu hoger dan 50A, overweeg dan over te stappen op een 24V installatie met 24V gebruikers. Hierdoor wordt de gebruikte stroom lager en het risico op brand geringer.

Bepaal van de installatie wat de gemiddelde stroom is die er afgenomen gaat worden. Dit vormt de waarde van de laadstroom en de capaciteit van de cellen.

Bepaal van de installatie hoe veel de gevraagde lading per 24 uur maximaal zal zijn.

Bepaal de tijd van autonomie van de installatie.

Vanuit de bepaalde waarden kunnen de noodzakelijke eigenschappen van de accubank worden bepaald. De leugens die u gelooft bij het bepalen van stroom en lading komen als een boemerang op u terug als u met de installatie gaat werken.

Specificaties

Alleen voor LFP accu's met 4 cellen (waarbij de celpolen bereikbaar zijn).

Capaciteit te laden accu: van 70 tot 200Ah (laadstroom 0,3c tot 0,1c).

Laadtijd:

voor een tot 2,5V per cel ontladen 70Ah accu: 3 uur,

voor een tot 2,5V per cel ontladen 100Ah accu: 5 uur,

voor een tot 2,5V per cel ontladen 200Ah accu: 10 uur.

Bij gelijktijdig gebruik als voeding wordt de laadtijd evenredig met het verbruik van de aangesloten apparaten verlengd.

Beveiligd tegen overladen van de accu. De lader kan 24/7 aan de accu staan zonder deze te overladen. Automatisch balanceren tijdens het laden.

Bij celspanningen onder de 2V wordt de laadstroom te hoog en slaat de lader af. Reset vindt plaats door het verbreken van de verbinding met het net.

Laadsysteem: individueel celladen met een eind laadspanning van 3,40V voor elke cel.

Laadprincipe: constante spanning, stroom begrenst op 20A. De cel met de laagste spanning (en de laagste opgeslagen lading) krijgt de meeste stroom (balancerend laden).

Fanloze koeling aan omgevingslucht. Thermische afslag bij oververhitting.

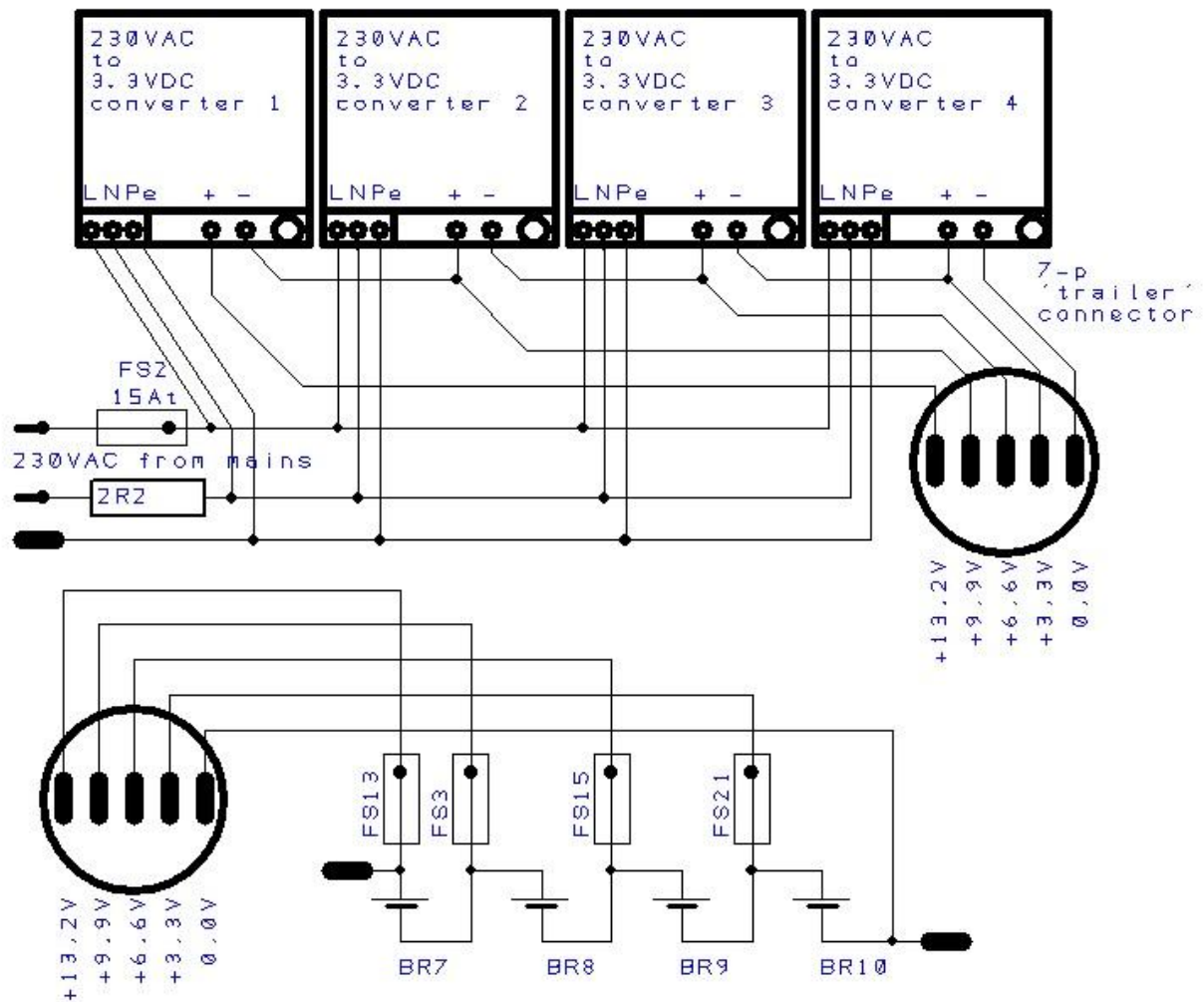
Omgevingstemperatuur opslag: -50°C tot +70°C

Omgevingstemperatuur bedrijf: +5°C tot +50°C

Voedingsspanning: 85VAC tot 265VAC 50Hz, stroomopname: 8,4A bij 230VAC, startstroom: <16A door opname serieweerstand.

Efficiëntie van de genoemde converters: < 95% > 80%.

Schema



Toepassing

Lader voor een 12V accubank voor kleine kajuitzeilboot tot 20ft met ca 500W trolling motor. Bij 100Ah accucapaciteit, 3 kwartier op vol vermogen varen.

Lader voor een service (of 'huis') -accu (boot of campervan) vanaf 70Ah tot 200Ah (opslag van 864Wh, 692Wh netto bij 72Ah) tot (2400Wh, 1920Wh netto bij 200Ah).

Netvoeding voor een 12V boordnet met LFP buffer accu met een intermitterend verbruik van 20A (bijvoorbeeld met een thermostatisch inschakelende koelkast of een ventilator of brandstofpomp van een dieselmotor).

Capaciteit van de accu

De op- en ontladestroom waarbij een LFP accu geen merkbare warmte ontwikkelt, ligt onder de 0,3 maal de stroom in de capaciteitsaanduiding van de accu in Ah (0,3c). Er is bij deze laadstroom geen koeling van de cellen nodig. De maximale laadstroom die de lader kan afgeven is 20A en daarmee is de kleinste, veilig te laden accu voor dit systeem een 70Ah accu. Er is geen bovengrens voor de accucapaciteit, een LFP accu met een hogere capaciteit doet langer over het laden.

Overlaad beveiliging

Bij aansluiting op het net en gedurende een jaar laden is met deze methode geen afname van de capaciteit van de cellen gemeten. Door de converters wordt nooit meer dan de ingestelde laadspanning aangeboden en worden de LFP cellen tot ongeveer 70% (3,3V)-90% (3,4V) SoC geladen. Overladen en de daarmee verbonden Lithium plating treedt niet op. Door het individueel laden van de cellen van de accu tot 3,4V waarbij de cel met de minste opgeslagen lading de meeste lading krijgt toegevoegd (hetzij in laadstroom dan wel in laadtijd). Naarmate de cel meer lading heeft opgeslagen neemt de spanning van de cel toe en ontstaat er uiteindelijk een gelijke celspanning over de aangesloten cellen in het gebied van 3,3V tot 3,4V.

Bij een celspanning lager dan 2V zal de laadstroom beperkt blijven tot 20A. De lage inwendige weerstand van de LFP cellen zijn voor de converters een 'kortsluiting' en de kortsluit beveiliging zal worden aangesproken. Het verlies in de converters zal de temperatuur in de converters doen toenemen tot de thermische afslag wordt aangesproken. De output van de converter wordt dan nul en de cel wordt niet geladen. De andere cellen (met een hogere celspanning en daardoor een lagere laadstroom) worden dan wel geladen en een 'slechte cel' laat dan de laagste spanning zien. Door de aansluiting met het net te verbreken, reset de converter zich, kan afkoelen en dan opnieuw starten. Dit is niet de 'hiccup' regeling zoals bij sommige DC-DC converters, waarbij de converter zichzelf opnieuw start als deze is afgekoeld.

Een onder de 2V ontladen cel zal met een speciale lader moeten worden opgeladen tot deze boven de 2,5V is gekomen.

Temperaturen

De koeling van de converters zonder fan of blower, is via het aluminium frame waarop de converters zijn gemonteerd. De schakelende mosFET's en de synchrone gelijkrichter zijn op dit aluminium frame gemonteerd, zij staan hun warmte direct af aan dit frame. De converters zijn voor de optimalisatie van de koeling op een aluminium koelblok geplaatst. Hierdoor zal de temperatuur bij belasting van de converters lager blijven dan bij plaatsing op een thermisch isolerende ondergrond.

De opslagtemperatuur is die van de opslagtemperatuur van de converters. De bedrijfstemperatuur is teruggebracht tot de bedrijfstemperatuur van LFP cellen.

Aantekening hierbij: De spanning van LFP cellen is afhankelijk van de temperatuur. Bij een lage temperatuur (0°C) heeft een geladen cel die bij 25°C een spanning heeft van 3,4V nog 3,4V – $(25^\circ \times 0,01V = 0,25V) = 3,1V$ op de polen staan. Zou je de cel dan opladen tot 3,4V, dan ben je aan het overladen. Dit komt pas naar voren als de cel weer opgewarmd is naar 20°C. Dan gaat de spanning omhoog naar 3,8V, hetgeen te hoog is voor een LFP cel. Dit veroorzaakt de Lithium galvanisering en brengt beperking in levensduur met zich mee. In een afgesloten ruimte zal de temperatuur meestal niet onder 0°C komen. Eventueel kan er een thermosstatische schakelaar worden opgenomen die de lader uitschakelt bij temperaturen lager dan 5°C. Deze is niet in dit ontwerp opgenomen.

Voedingspanning

De grote range van de voedingspanning maakt de lader wereldwijd toepasbaar. Bij aansluiting in havens met een hoge netbelasting, slechte en geoxideerde contacten of grote spanningsvariaties, zullen de converters dit zoveel als mogelijk compenseren en toch de 20A uitgangsstroom proberen te leveren.

Volgens de specificaties van de fabrikant zou ook een DC spanning van 100VDC tot 220VDC de converters laten werken. Dit is niet uitgetest en wordt derhalve niet aanbevolen.

De startstroom of 'rush in current' wordt veroorzaakt doordat de wisselspanning/-stroom eerst wordt gelijkgericht en dan een condensator oplaadt. Er kan een 'soft start' worden gemaakt door in de netleiding een weerstand van 2,2 Ohm 15W op te nemen. Wordt er een lang (>3m) netsnoer van 0,75mm² gebruikt, dan is deze weerstand niet nodig.

Uitgangsspanning van de lader

De lader heeft vier individuele uitgangen die galvanisch van elkaar en van het net gescheiden zijn. Dit maakt de lader geschikt voor het laden van 4 LFP cellen van ongelijke capaciteit of leeftijd. Voor het individueel laden van een accubank van 4 LFP cellen zijn de uitgangen van de converters gecascadeerd ('gestapeld' in serie gezet) en met verschil vereffening lijnen met de accubank verbonden. Zo krijgen de cellen een gelijke spanning aangeboden in het hele laadtraject. Hiervoor is een 5-aderige leiding nodig. Deze kan permanent op de cellen worden aangesloten, maar dan is er 'gesleutel' nodig om de accu of de lader uit het voer of vaarttuig te verwijderen. Om te voorkomen dat 5 losliggende aansluitingen sluiting maken wordt een 'aanhanger' stekker gebruikt, waarvan 5 van de 7 pennen op de laders worden aangesloten. Hiermee worden de aansluitingen onderling geïsoleerd en wordt voorkomen dat los liggende aansluitingen kortsluiting veroorzaken.

Deze stekker past dan weer in een contactdoos zoals die bij de trekhaak van een auto zit. De contactdoos kan op de accubak worden gemonteerd zodat lader een makkelijk aan te sluiten en los te maken verbinding heeft. Aangezien er 5 van de 7 contacten worden gebruikt, is het mogelijk de stekker en de contactdoos met 1 of 2 paspennen uniek te maken voor de lader en de accubak zodat iemand niet de lader op de aanhanger contactdoos van een auto kan aansluiten (als ik het kan bedenken, kan het ook gebeuren).

Bouwwijze

Kunststof kast van voldoende afmetingen om de converters en de rijgklemmen in te monteren.

Naar eigen inzicht bouwen (IP 20 rating) in een zelf te maken kast of in een kunststof kast bouwen (kan tot IP76 rating).

Bij een metalen achterwand of een metalen montageplaat in de kast kunnen de converters het best hierop worden gemonteerd. Dit is in combinatie met de thermische beveiliging van de converters voldoende.

Alternatieve bouwwijze

De converters kunnen ook worden gestapeld als de getoonde bouwwijze te breed of te lang is voor een goede toepassing. Onder elke converter komt dan een 2mm dikke aluminium koelplaat die de ontwikkelde warmte naar buiten geleidt. De aluminium plaat moet minimaal 20 mm buiten de converter omtrek uitsteken om als koelvin voor de converter te dienen.

BOM

4 smps converters 230VAC input 3,3VDC output (bijvoorbeeld: AliExpress. Selecteer de 3V uitvoering)



US \$14.59 ~~US \$24.31~~ -40%

Onmiddellijke korting: US \$1.00 korting per US \$24.00 v

US \$1.00 korting op US \$24.00 : [Ontvang coupons](#)

Kleur: 3V Power Supply

3V Power Supply

5V Power Supply

9V Power Supply

12V Power Supply

15V Power Supply

18V Power Supply

24V Power Supply

36V Power Supply

48V Power Supply

vermogen: 20A

1A

2A

3A

5A

6A

7A

8A

10A

12A

15A

16A

20A

22A

25A

30A

33A

40A

Rijgklemmen op rails, 3 x grijs en 3 x blauw en 3 x geel/groen. Rijgklemmen tot 2,5mm² draaddoorsnede. (De plaatselijke elektriciteitswinkel, elektro installateur)

Netsnoer 3 aderig 3 x 0,75mm². (De plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

1 x 7 polige aanhanger stekker. (de plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

(1 x 7 polige aanhanger contactdoos. Deze hoort eigenlijk bij de accu.)

2m 5-aderig aanhanger snoer van 1,5mm². (de plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

1 x 1m geel-groen 0,75mm². (de plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

1 x 1m bruin 0,75mm². (de plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

1 x 1m blauw 0,75mm². (de plaatselijke elektriciteitswinkel, bouwmarkt)

Tubetje siliconen kit voor het monteren van de converters op de metalen koelplaat. (bouwmarkt)

Tubetje siliconen vet om de litze van de draden iets in te vetten voordat deze in de kabelschoenen of kabelogen wordt gekrompen. (bouwmarkt)

Kabelschoenen

20 x 3mm oog, rood voor de celpool leidingen op de converters en de ingang. (de plaatselijke elektriciteitswinkel)

12 x adereind hulzen voor 0,75mm² voor in de rijgklemmen van de bruin, blauw en geel/groene leidingen. (de plaatselijke elektriciteitswinkel)

Behuizing

Eigen keuze. Zoek bij AliExpress met het sleutelwoord: 'ABS junction box' of kijk bij een lokale installateur of bij Conrad naar 'installatie behuizing'.

De behuizing bepaalt voor een groot deel de elektrische veiligheid. Maak je die zelf, dan zul je de mate van waterdichtheid moeten aantonen om er een IP (Ingres Protection) klasse aan toe te kennen. Doe je dat niet dan kom je niet verder dan IP20 ofwel 'niet waterdicht, alleen voor gebruik in huis'.

De getoonde installatie is een 12V 20A lader voor gebruik in Suriname en is voorzien van een 'oversized' koelblok voor gebruik in de tropen.

Plaats je het geheel in een waterdichte montagekast (IP76) en gebruik je kabelwartels, dan kun je IP60 of hoger halen (vroeger heette dat 'spatwaterdicht'). Je mag dan geen openingen in de kastwand maken voor koeling etc. Zijn je kabelwartels waterdicht gemonteerd (met rubber ring, eventueel met kit) en de kabels ook waterdicht (met aangespoten stekkers), dan is een IP76 klasse haalbaar en is de kast geheel waterdicht ('geschikt voor gebruik buitenshuis').

Wil je de behuizing 'opleuken' met 'carbon look', dan kan dat ten koste gaan van de waardering in de IP klasse. Een polycarbonaat deksel op de kast geeft als voordeel dat je de ledjes op de converters kunt zien en er een indicatie is van de werking van de converters. In Suriname geven ze aan een dergelijke kast de voorkeur. Verder zou je voor elke cel een voltmeter in de kast kunnen plaatsen die de celspanning aangeeft zodat je geïnformeerd bent over de ladingstoestand van de accubank. De IP klasse van de kast blijft dan intact.

Gereedschap

Kabeloog 'crimper' voor 'geel, blauw en rood'.

Ader eindhulzen 'crimper' voor adereind hulzen voor 0,75 en 1,5mm².

Schroevendraaier.

Fitting schroevendraaier ('spanningzoeker').

Digitale multimeter of digitale voltmeter om de uitgangsspanning per converter op 3,4V in te stellen.

Bouw

Op de metalen montageplaat moet voldoende ruimte zijn voor de 4 converters en de rail voor de rijgklemmen. Vormt deze montageplaat een onderdeel van de kast, haal de montageplaat er dan eerst uit. Plaats eerst alle onderdelen los op de montageplaat om te zien of er voldoende ruimte is voor de converters en de rail voor de rijgklemmen. Laat voldoende ruimte tussen de converters en de klemmen zodat je de bedrading niet met een pincetje er tussen hoeft te proppen.

De rail kun je met polyurethaan lijm of MS polymer kit op de metalen montageplaat plakken, maar er moet wel een elektrische verbinding met de rail komen door een schroefverbinding tussen plaat en rail. Bij het aansluiten van de veiligheidsaarde op de daarvoor bedoelde klemmen, wordt deze ook met de rail verbonden en wordt de rail en de montageplaat ook geaard.

Nu kun je de converters op hun plaats brengen (let op dat de converters geen schroefgaten bedekken die voor de bevestiging van de montageplaat in de kast nodig zijn). Maak de montageplaatsen voor de converters goed schoon zodat er een zo groot mogelijk contactvlak ontstaat tussen de converter en de montageplaat. Siliconenkit is een van de beste warmte geleidende kunststoffen die er op dit moment zijn en een dun laagje ervan verbetert de warmtegeleiding tussen de converter en de montageplaat.

De hechting van de siliconenkit is goed genoeg om de converters te monteren zonder schroeven te gebruiken. Ben je daar niet van overtuigd, dan kunnen de converters tevens met M3 boutjes en moertjes op de montageplaat worden gemonteerd. Gebruik in elk geval de siliconenkit voor de verbeterde warmte geleiding naar het grote oppervlak van de montageplaat.

Hoogspanningskant:

Plaats de rijgklemmen op de rail. De volgorde van plaatsing is niet kritisch, maar over het algemeen worden de 'aardklemmen' als 'opsluit klemmen' gebruikt. Zij dekken dan de klemmen die mogelijk een gevaarlijk hoge AC spanning voeren af. Wil je de overbrugging verbindingen gebruiken, dan zit je wel vast aan het monteren van 2 grijze en 2 blauwe klemmen naast elkaar.

Het is een goede gewoonte eerst te beginnen met het aansluiten van de geel-groene draden voor de veiligheidsaarde. Gebruik voor de bedrading de geel-groene draden en geen andere kleur codering.

Eventuele service is een stuk eenvoudiger indien de kleurcoderingen van de draden overeenkomt met de functie van die draden.



Elke converter wordt apart met een klem op de aard-rail aangesloten. Hoewel er niet vaak (hopelijk nooit) stroom door deze draden zal lopen, moet je de functie ervan niet licht opvatten. Wees dus zorgvuldig met het aankrimpen van kabelogen en ader eindhulzen. Knip de draden op lengte, strip de isolatie eraf en vet de 'litze' licht in met een beetje siliconenvet. Dit voorkomt oxidatie en het warm worden van de verbinding bij stroomdoorgang. Steek de draden in het kabeloog of de adereind huls en krimp deze vast.

Laat het netsnoer liggen tot het laatst. Dat voorkomt problemen als iemand 'alvast de stekker in het stopcontact doet' (als ik het kan bedenken, kan het ook gebeuren).

Monteer nu alle blauwe draden op de N aansluiting van de converters en in de blauwe klemmen. Monteer nu alle bruine draden op de L aansluiting van de converters en in de grijze klemmen. In dit geval mag ook zwarte draad worden gebruikt. Zwart is de kleur voor de 'schakeldraad' en die kan spanningvoerend zijn. Zet de zekeringhouder op de rail en sluit deze aan.

Plaats de soft start weerstand tussen de blauwe klemmen.

Voer het netsnoer door een wartel naar binnen en sluit deze **TIJDELIJK** op de daarvoor bedoelde rijgklemmen aan. Begin met de geel-groene draad, vervolgens de blauwe draad en als laatste de bruine draad. Steek de stekker in de wandcontactdoos (er staat nu 230V op de schakeling!)

De 4 ledjes op de converters moeten nu oplichten. Meet met een digitale voltmeter de spanning op de uitgang van de converters en regel de spanning zo nodig af op 3,4V. (nooit hoger dan 3,45V).

Na afregeling de stekker uit de wandcontactdoos halen en het netsnoer losmaken van de rijgklemmen. Nu ga je verder met het aansluiten van de laagspanningskant.

Laagspanningskant:

Leg nu de 'door lus' verbindingen op de converters aan. De uitgang van de converters zijn vaak dubbel (soms zelfs drievoudig) en het doorlussen kan met 2,5mm² vinyl installatiedraad. Sluit 4 aders van het 5-aderig snoer aan op de 'plus' uitgang van converter '1', '2', '3', '4' en sluit een 5^e ader aan op de 'min' van converter '4'.

Nu is de montageplaat ver genoeg bedraad om in de kast te worden gemonteerd.

Plaats nu de montageplaat in de behuizing en bevestig deze met de daarvoor bedoelde schroeven.

Voer de 5-aderige leiding door een wartel naar buiten de behuizing. Voer het netsnoer door een wartel naar binnen en sluit deze op de daarvoor bedoelde rijgklemmen aan. Begin met de geel-groene draad, vervolgens de blauwe draad en als laatste de bruine draad.

Sluit de kast.

Gebruiksaanwijzing

Laden:

Sluit eerst de accu op de lader aan en houdt hierbij rekening met de polariteit van de aansluitingen. De lader is kortsluit beveiligd, maar 20A geeft bij kortsluiting een behoorlijke 'vonk' en zou een brandbare damp makkelijk kunnen ontsteken. De lader kan dan kortsluit vast zijn, de cellen zijn dat beslist niet. Het wordt meestal niet gedaan, maar een zekering bij de accu in de aansluitingen voor de laders is een goed idee. Bij een 20A laadsysteem hoort dan een 20A zekering. Zou er nu door een 'mishap' stroom via de aansluiting van de lader uit een cel willen lopen, dan blijft die stroom beperkt tot 20A.

De groene ledjes op de 4 converters lichten op bij aansluiting van de 5 aders op de accu.

Steek nu de stekker in de wandcontactdoos en laadt de 4 cellen.

Stoppen met laden:

Trek de stekker uit de wandcontactdoos.

Verbreek daarna de verbinding van de lader met de accu.

Extra

Toestelzekering (voedingsspanning-zijde)

De netverbinding kan bestaan uit een toestelsnoer (aangesloten stekkers) en een 3-polig toestel chassisdeel met ingebouwde zekeringhouder. De gebruikte toestelzekering is dan een 15At zekering.

Hoofdschakelaar (voedingsspanning-zijde)

Bij een niet waterdichte behuizing is het toevoegen van een hoofdschakelaar zonder meer mogelijk. Let er wel op dat deze schakelaar bij inschakeling de startstroom moet verwerken.

Wil je een IP76 uitvoering, dan moet je een IP76 geclassificeerde schakelaar gebruiken en die kunnen prijzig zijn en vragen extra aandacht bij de inbouw.

'Vorstbeveiliging' (voedingsspanning-zijde)

LFP accu's kunnen niet bevriezen. Ze mogen echter niet bij temperaturen onder de 5°C met een laadspanning van 3,3V of hoger worden geladen. Er zijn thermostatische schakelaars (Clixon) die de 230V toevoer onderbreken bij een bepaalde temperatuur en zo op 5°C kunnen worden ingesteld. De accu kan dan niet bij een te lage temperatuur worden geladen.

Aanpassing laadstroom

Er zijn andere converters die een hogere laadstroom kunnen leveren.



Wil je die gebruiken, dan zul je ook de bedrading op die hogere stroom aan moeten passen.

Voor 40A laadstroom. Deze converter is zonder ventilator.

Voor de ingangsspanning moet met een schakelaar op de converter een bereik worden geselecteerd. De efficiëntie van de converter is net onder de 80% (79,5%). Stroomopname bij 230V in vollast is 3,4A per converter en 13,6A voor de hele lader. Dit vraagt aan de hoog/netspanningskant om minimaal 1,5mm² draaddoorsnede. De startstroom loopt op tot 16A per converter, bij gelijktijdig opstarten van 4 converters moet een soft start weerstand worden aangebracht zodat de netzekering niet meteen afschakelt. Je kunt een toestelzekering van 15A

traag gebruiken.

Voor een laadstroom van 40A moet je minimaal 4mm² draaddoorsnede aan de laagspanningskant gebruiken. Het beste is 4mm² siliconen leiding te gebruiken. Dat is lekker soepel en kan beter tegen een hogere temperatuur.



Gebruik je zekeringen bij de aansluiting op de accu, dan moeten deze 40At zijn.

Voor 60A laadstroom.

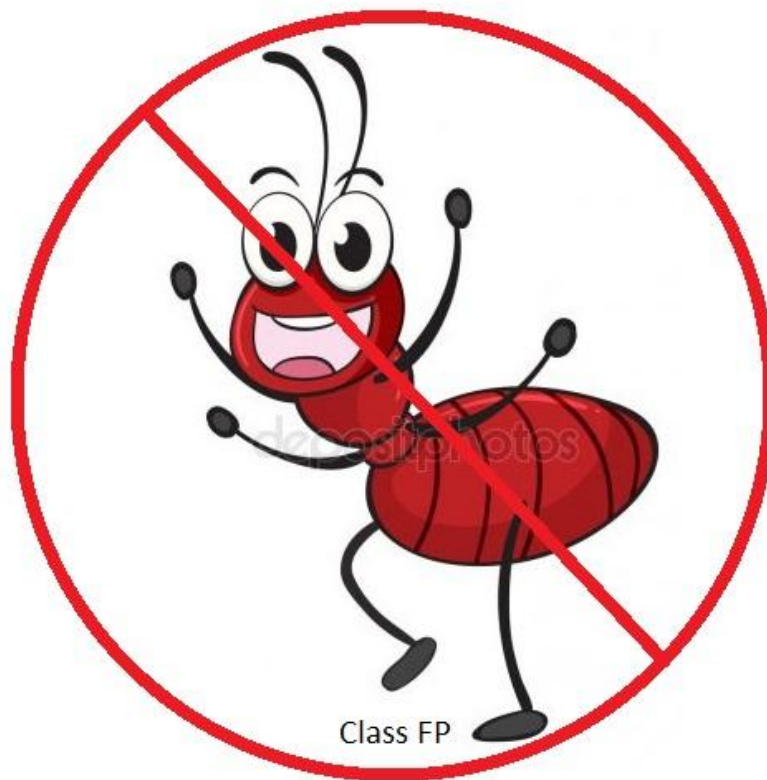
Deze converter is met ventilator en er moet een speciale voorziening worden aangebracht om koellucht van buiten de behuizing aan te voeren. In dit geval is IP76 als beschermingsklasse niet haalbaar.

Voor de ingangspanning moet met een schakelaar op de converter een bereik worden geselecteerd. De efficiëntie van de converter is 83%. Stroomopname bij 230V in vollast is 2,2A per converter en 8,8A voor de gehele lader. Dit vraagt aan de hoogspanningskant om minimaal $1,5\text{mm}^2$ draaddoorsnede. De startstroom loopt op tot 60A per converter, bij gelijktijdig opstarten van 4 converters moet een soft start weerstand worden aangebracht zodat de netzekering niet meteen afschakelt. Je kunt een toestelzekering van 15A traag gebruiken.

Voor een laadstroom van 60A is 6mm^2 aan draaddoorsnede aan de laagspanningskant nodig. Hier kan een siliconen leiding worden gebruikt, lekker soepel en het kan tegen een hogere temperatuur dan PVC leiding.

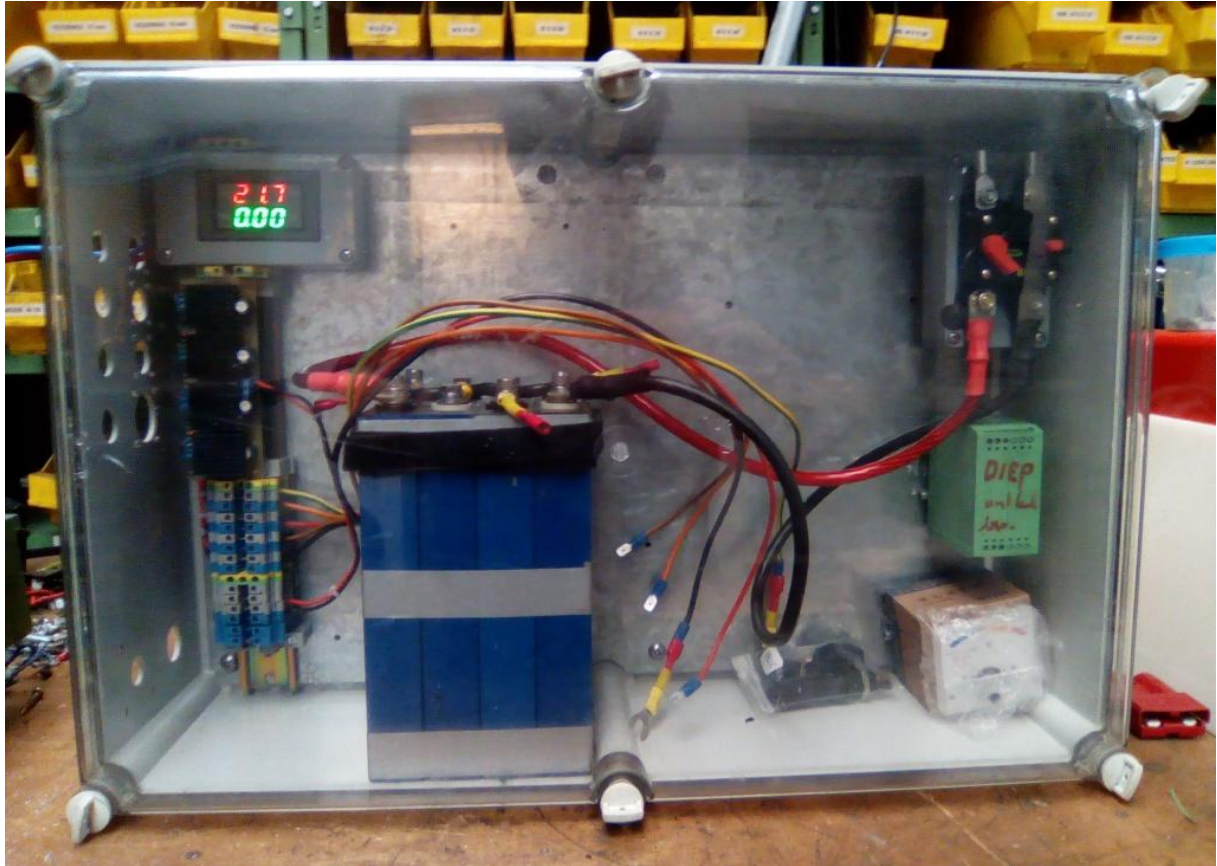
Gebruik je zekeringen bij de aansluiting op de accu, dan moeten deze 60At zijn.

Door de gevraagde ventilatie is het moeilijk boven de IP 20 te komen tenzij er een koelblok voor warmte geleiding van 'binnen naar buiten' zorgt. Voor Suriname moet de behuizing ook nog FP zijn...



Formi protection
Ant-proof casing

12V mobiel energie systeem



12V 70Ah mobiel energie systeem met laptop voeding als netstroom lader, aansluiting zonnepanelen mogelijk.

Capaciteit tot 200Ah LiFePO₄ cellen uitbreidbaar.

Vier individuele celladers tot 3,3V.

Diep ontlading beveiliging.

Max. uitgangstroom via Anderson stekkerverbinding: 25A.

Dit is het proefmodel. De versie met vier 200Ah cellen (hieronder) is in gebruik als 'Jungle Power System' in Suriname.



Project Zonnepanelen lader in CV modus met 3,3V als maximum laadspanning per cel

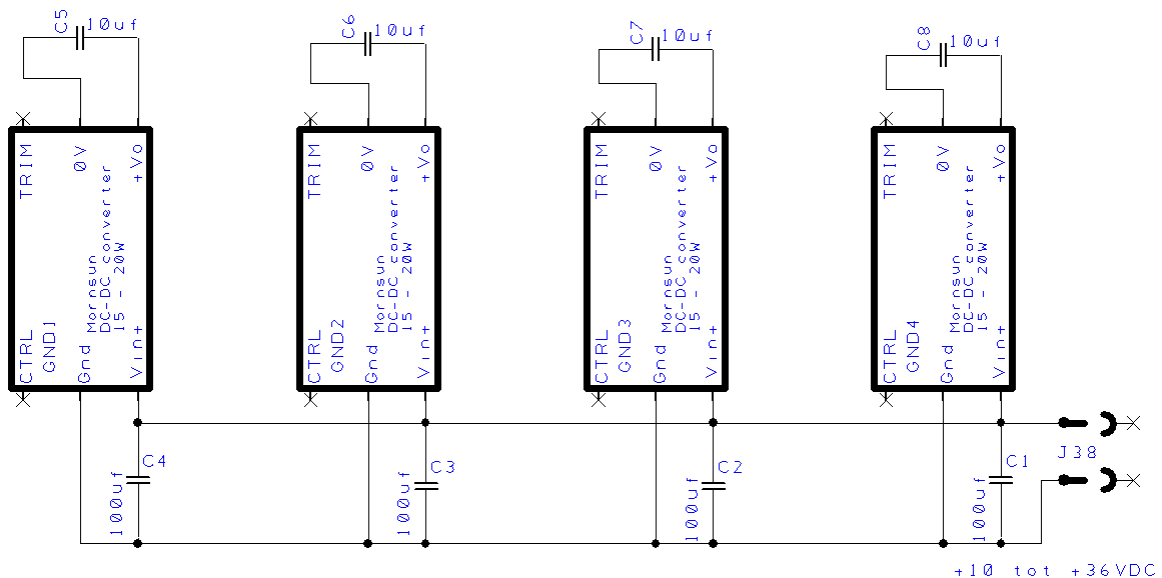
Toepassing van dit systeem:

Draagbaar 12V energieopslag systeem voor verlichting, telefoon en computer (notebook) gebruik, voor gebruik in 'tiny home', op een camping, in vakantiehuisjes, campervans en boten en andere plaatsen waar geen of onregelmatig netspanning is.

Voor gebruik als UPS voor kritische apparaten als communicatie apparatuur (marifoon, GPS), noodverlichting en navigatielichten.

Eigenschappen:

Het systeem bestaat uit 3 modules; een lader, een celspanningmonitor, een LFP accu met een onderspanningbewaking.



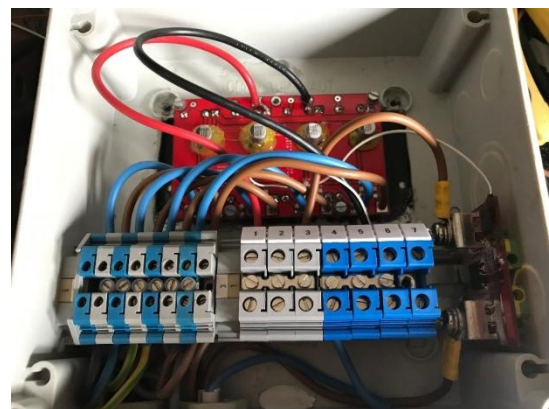
Het laadsysteem

Het laadsysteem wordt opgebouwd rond 4 DC/DC converters met een maximale ingangspanning van 36V en een minimale spanning van 10V (bij belasting). De uitgangspanning is 3,3V (default waarde), maar kan worden aangepast tussen 2,8V en 3,9V door het opnemen van een trimweerstand voor elke converter. Dit is een hardwarematige aanpassing.

Door 3,3V als eindlaadspanning te gebruiken zijn er geen extra componenten nodig en is de constructie en het gebruik eenvoudig. Een laadmonitor is niet nodig omdat de lader geen mogelijkheid heeft tot overladen vanwege de vast ingestelde eindlaadspanning per cel.

De laadspanning kan de ingestelde waarde niet overschrijden en is geschikt voor 24/7 aansluiten op de lader zonder dat dit 'Lithium plating' kan veroorzaken.

De converters zetten 85% van het vermogen van de zonnepanelen om vanaf een ingangspanning van



4 celladers met keercel in een installatie behuizing. De kast is 'gevensterd' voor een koelblok aan de achterkant.

10V tot 36V. Bij daling van de spanning onder de 10V (door belasting van de zonnepanelen en/of door vermindering van zoninstraling) slaan de converters af en bij een ingangspanning boven de 10V slaan zij weer aan.

Door het verlagen van de spanning van de zonnepanelen tussen 36V en 10V naar 3,3V uitgangspanning, hebben de converters een vergelijkbare functie met een MPPT regelaar en in deze opzet is dat een MPPT regelaar per cel naar 3,3V per cel.

Voor de regeling van de uitgangspanning vraagt elke converter 100µA aan meetstroom. Bij gebruik wordt deze stroom door de converter geleverd. Zonder stroomtoevoer wordt deze stroom aan de cel onttrokken.

Dit stroomverbruik van het meetsysteem kan worden gestopt door de lader los van de accu te koppelen door de 7-polige contactstop ('aanhangerstekker') uit de contactdoos op de accubak te trekken.

De lader heeft een ingebouwde overspanningbescherming en hoeft daarvoor geen monitoring te hebben. Bij de inzet als noodstroom voorziening is er ook geen onderspanningbeveiliging nodig omdat als je 'afborrelt' je toch niet meer bovenkomt om de accu te laden.

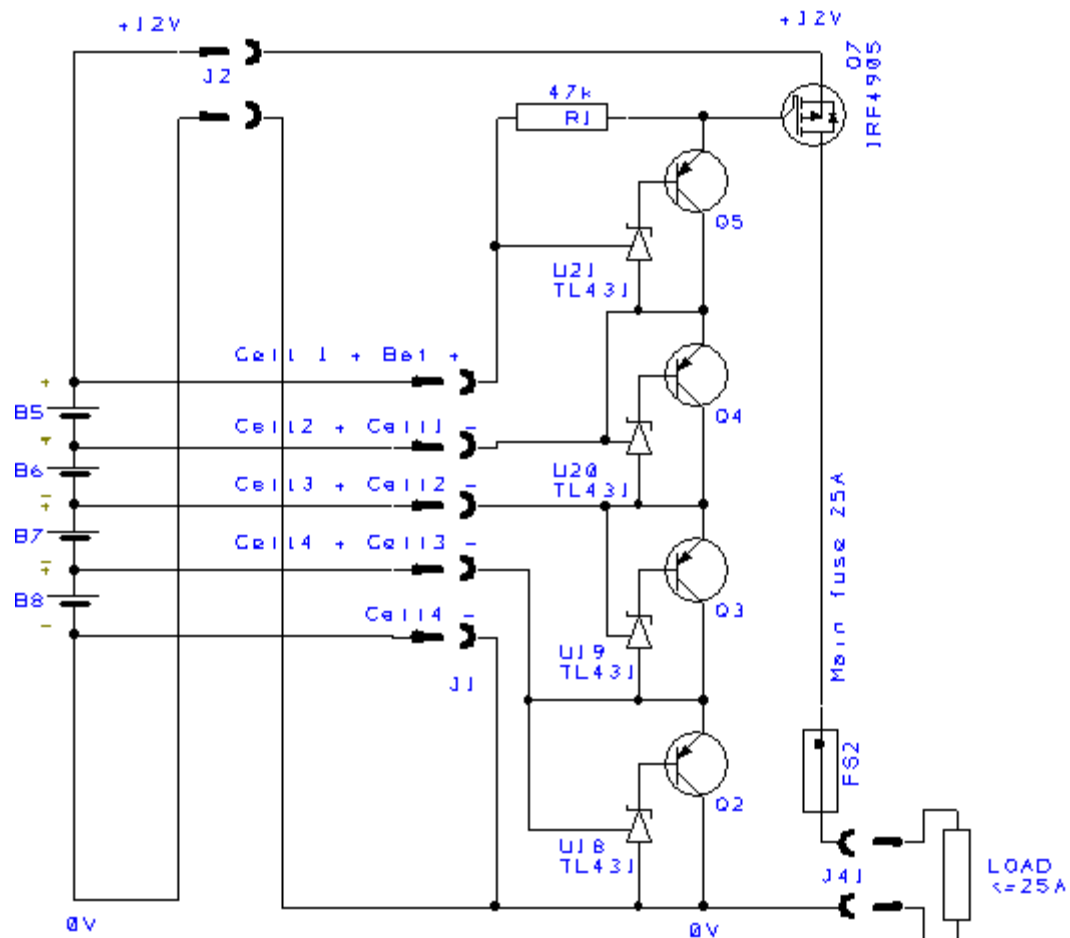
Denk erom:

laadconverters en ladingmonitors gebruiken een heel klein beetje stroom uit de accu voor hun werk. Bij laadconverters wordt dit meteen weer aangevoerd als de accu aan de lader staat. Laat de accu niet aan de lader staan als de accu niet wordt geladen.

Bij de analoge en digitale meters voor de celspanning is er een knop die moet worden ingedrukt om de benodigde stroom door het meetsysteem te laten lopen. Deze meters kunnen wel op de accu aangesloten blijven omdat er alleen stroomverbruik is als er op de knop wordt gedrukt.

Project zelfbouw onderspanning bewakingsysteem

De LFP cellen mogen niet geheel ontladen worden en in de eerste laadfase terecht komen. Bij meting van de individuele celspanning wordt deze vergeleken met een referentiespanning van 2,5V en bij een daling van de celspanning onder de 2,5V wordt de belastingstroom afgeschakeld. De lader blijft in werking zodat de cellen wel kunnen worden geladen via de zonnepanelen en/of de alternator/dynamo. Zijn alle(!) cellen boven de 2,7V geladen, dan wordt de belastingstroom weer ingeschakeld tot de spanning op één of alle cellen onder de 2,5V is gekomen. Door dit systeem ontstaat naast beveiliging tevens 'balancering' van de spanning bij de onderwaarde van de lading in de cellen.



De comparatoren (in de TL431 IC's) gebruiken $10\text{ }\mu\text{A}$ per cel en de actuator (de IRF4905 P-MOSfet) $250\text{ }\mu\text{A}$ voor de hele accu en kunnen buiten het gebruik van het systeem worden afgekoppeld. Dat is niet ingewikkeld, je trekt gewoon de stekker van de (meet) verbinding eruit. Je kunt er ook een 5-polige aan/uit schakelaar voor gebruiken en deze op de accubak monteren. Is de schakeling in werking, dan wordt er maximaal $(4 \times 3,45\text{V} \times 20\text{ }\mu\text{A}) + (13,8\text{V} \times 250\text{ }\mu\text{A}) = 0,003450069\text{W}$ of $3,46\text{mW}$ verbruikt. Dat is onnodig als er niet gebruik wordt gemaakt van de accu en het systeem kan worden uitgezet door de 5 polige schakelaar om te zetten of de 5 polige stekker eruit te trekken. De MOSfet laat dan geen belastingstroom door.

Werking

Op elke cel is een programmeerbare zenerdiode aangesloten die doorlaat indien de spanning op de cel hoger is dan 2,5V. De stroom ($<0,25\text{ }\mu\text{A}$) door de programmeerbare zenerdiode brengt de PNP

Schema autonoom 12VDC systeem