

Dit is een afbeelding van een half geladen LFP cel. Alle LiFePO_4 groepen zitten links op de anode. Een aantal van de LiFePO_4 groepen is het Lithium ion kwijt en dat is door het elektrolyt 'overgestoken' naar het grafiet op de negatieve elektrode.

Is de cel geladen, dan zitten alle Lithium ionen in de Ferrofosfaat laag op de positieve elektrode en is er geen Lithium ion meer in het grafiet op de negatieve elektrode.

Is de cel geheel ontladen dan zitten er veel Lithium ionen in het grafiet op de negatieve elektrode en zijn er alleen nog Ferrofosfaat groepen te vinden op de positieve elektrode.

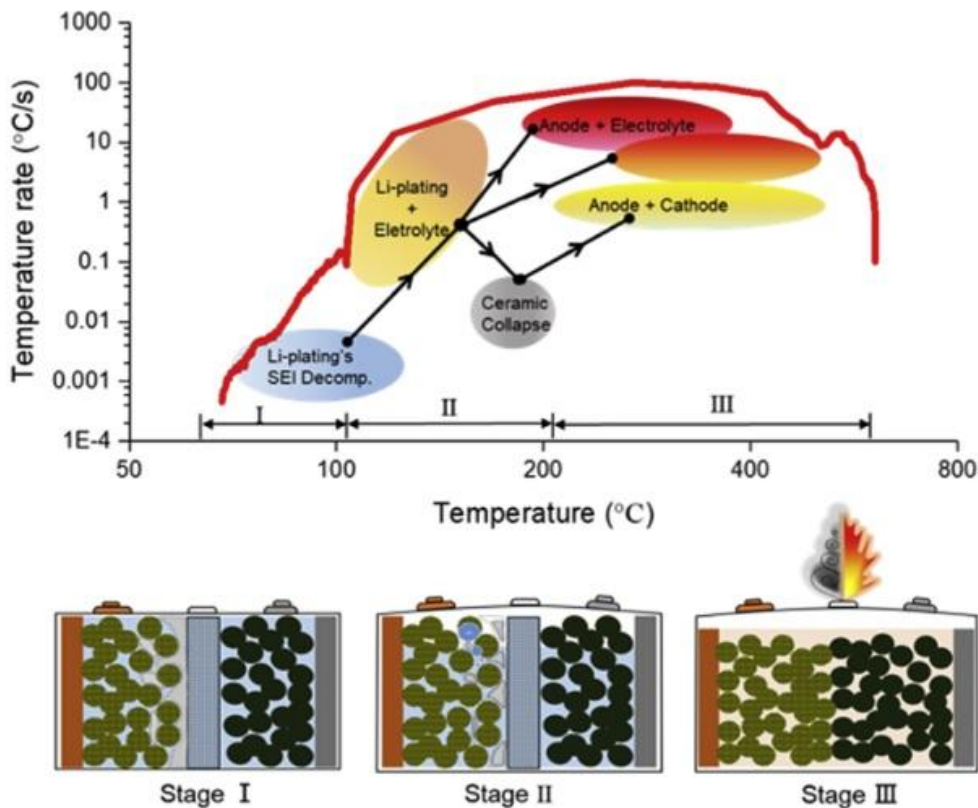
Bij het ontladen van de cel gaan de Lithium ionen naar de met grafiet bedekte koperen elektrode en worden opgenomen in de grafietlaag. De LiFePO_4 laag raakt de Lithium ionen kwijt.

Bij het opladen van een lege cel moeten de Lithium ionen uit de grafietlaag worden los gemaakt en door het elektrolyt en de 'separator' weer naar het ferrofosfaat migreren en daar weer deel uit gaan maken van het LiFePO_4 van een geladen cel. Hiervoor is elektrische spanning nodig en dat is ongeveer 4V.

Anders zullen de Lithium Ionen niet willen migreren. Zijn er eenmaal voldoende Li-ionen 'gemigreerd' om tenminste een spanning van 2 tot 2.5V in de cel op te wekken, dan vindt de migratie plaats vanaf een laadspanning van 2,5V tot de spanning waarbij alle Lithium ionen in het Ferrofosfaat zijn opgenomen of

gebonden. Bij een temperatuur van 25°C is een celspanning nodig van 3,45V om alle Li ionen aan het ferfosfaat te koppelen. De cel is dan tot 100% SOC geladen. Het is mogelijk dan nog laadstroom te laten lopen door de spanning boven de 3,45V te brengen, maar die laadstroom kan geen Lithium ionen meer aan ferfosfaat koppelen omdat er geen vrije plaatsen voor die koppeling zijn. De energie in Wsec (of Joules = $U \times I \times t$) brengt dan geen lading ($I \times t$) meer in de cel en wordt geheel omgezet in warmte. De cel wordt dan een kacheltje.

Als LFP cellen ergens niet tegen kunnen is het tegen temperaturen boven de 60°C. Kan de cel die boven de 3,45V nog een laadstroom verwerkt, de opgewekte warmte niet kwijt dan is die cel op weg naar een 'thermal runaway'.



Bij het blijven toevoeren van energie waarbij het niet tot omzetting naar lading (kan) komen neemt de celtemperatuur steeds meer toe. Die toename wordt op de as links weergegeven in °C per seconde. Die toename is grillig en niet lineair. Boven de 60°C begint de Lithium plating en wordt het Ferfosfaat en het grafiet met metallisch Lithium bedekt en er kan dan geen lading meer worden opgeslagen en alle laad energie wordt omgezet in warmte. De temperatuur neemt nog sneller toe.

bereikt die temperatuur de 100°C dan verdampt het elektrolyt naast de vorming van de metallische Lithium laag. De cel gaat bol staan. Bij 160°C gaat de keramische separator tussen de elektroden kapot. Het ferfosfaat komt nu in contact met het koolstof van de negatieve elektrode en nu zijn de rapen gaar! De stroom kan nu ongehinderd toenemen en de temperatuur gaat nog verder omhoog. Door de temperatuur verhoging neemt de druk in de cel zover toe dat de 'pop off' opent en het gasvormige

elektrolyt uit de cel spuit. Is dat elektrolyt brandbaar, zoals bij LCM cellen, dan ontploft de cel en ontstaat er een Lithium brand die te vergelijken is met een aluminium brand. Blus je de cel met water dan zal de zuurstof uit de H_2O zich verbinden met het Lithium en is de brand nauwelijks te blussen. De temperatuur heeft dan de $600^{\circ}C$ bereikt. De thermal runaway is dan 'uitgerend'. Een polyester boot is dan tot de waterlijn afgebrand, een houten boot dito en van een stalen boot drijft er nog een zwart geblakerd wrak tenzij het door het bluswater is gezonken.

Bij branden van een elektrische auto, gebruikt de brandweer tegenwoordig een container vol met water en 'verzuipt' daarin de auto. Dat is in strijd met het idee van de Lithium brand, maar het water kan de thermal runaway stoppen door afkoeling. De auto zelf is Total loss. Je gaat het dus niet redden met een poederblussertje bij een brand van een elektrische auto. In je boot wordt het ook niets. LCM cellen gebruiken het zeer brandbare ether als elektrolyt, daarbij wordt een thermal runaway meestal afgesloten met een soort van vuurpijl. Bij LFP cellen wordt wel ether gebruikt maar een of meer van de waterstof atomen zijn dan vervangen door een halogeen atoom en dan kan het ether niet meer branden. Het elektrolyt van een LFP cel lijkt op de blusstof 'Halon'. Het is voor de hand liggend dat een blusstof niet kan branden.

Overigens, Tesla (pionier op het gebied van elektrische personen auto's) gebruikt in het Model 3 alleen LCM cellen op aanvraag. Standaard worden nu LFP cellen gebruikt. Waarom zou dat zijn, denk je...

Dus jij wilt je LFP accu laden met 3,65V... Dat is boven de 3,45V, dan moet je wel zeker weten dat de lader stopt bij het bereiken van de 3,45V, Zo niet, dan is er een verhoogde mate van Lithium plating van de cellen en zullen zij eerder zijn versleten.

Je zult niet direct te maken krijgen met een thermal runaway. Dat kan alleen als je met een stroombron laadt waar geen spanningsbegrenzing op zit. Laadt je met een spanningsbron, dan is de spanning die je voor het laden gebruikt ook de bovengrens en bij een spanningsbron ligt dat vast. Dat is in te stellen op 3,4V en dan kun je niet hoger komen. Dit is dus intrinsiek veilig laden.

Laadt je met een spanning van 3,4V en dan kun je niet boven die spanning uitkomen en geen Lithium plating hebben. Je cellen gaan dan langer mee. Komt de cel aan een intrinsieke spanning van 3,4V, dan is er geen verschilspanning meer en loopt er geen laadstroom meer en is $I=0$ en $U \times I = 0$ en wordt er in de cel geen warmte ontwikkeld. Lithium plating vindt plaats in 'warme cellen' ($T > 60^{\circ}C$) en voor een thermal runaway bij LFP accu's moet je de cel opwarmen tot $> 100^{\circ}C$. Denk erom dat het daarna heel hard kan gaan!

In één van de linkjes wordt aangeraden LFP cellen niet boven de 70 tot 80% SOC te laden. Dan blijf je in het veilige gebied. 'Ja, je bent niet wijs! Ik heb geen 300Ah cellen gekocht om ze maar tot 260Ah te laden!' In dat geval is de Darwinistische evolutieleer van toepassing: Je gebruikt zoveel accu's dat het onbetaalbaar wordt en je ze niet meer kunt kopen omdat erop de aarde onvoldoende Lithium is om jouw verbruik in Lithium voor accu's te voorzien.

Ik ga mijn DC/DC converters niet meer op trimmen naar 3,4V, 3,3V is beter. Dan kun je ook zonder problemen bij $0^{\circ}C$ laden.

<https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/> Link werkt niet altijd, heeft te maken met rechten