Voorwoord

Abstract

Inhoudstafel

[Voorwoord 1](#_Toc488072955)

[Abstract 4](#_Toc488072956)

[Gebruikte afkortingen 7](#_Toc488072957)

[Lijst met figuren 7](#_Toc488072958)

[Lijst met tabellen 8](#_Toc488072959)

[1 Inleiding 8](#_Toc488072960)

[2 Probleemstelling en onderzoeksdoelstelling 9](#_Toc488072961)

[2.1 Omkadering 9](#_Toc488072962)

[2.2 Probleem- en doelstelling 10](#_Toc488072963)

[2.2.1 Definiëring van de probleemstelling 10](#_Toc488072964)

[2.2.2 Definiëring van de onderzoekdoelstellingen 11](#_Toc488072965)

[2.3 Overzicht van inhoud 11](#_Toc488072966)

[3 Fundamenten van een batterijen 11](#_Toc488072967)

[3.1 Types batterijen 11](#_Toc488072968)

[3.1.1 Geschiedenis van batterijtechnologie 12](#_Toc488072969)

[3.2 Elektrochemische werking 14](#_Toc488072970)

[3.2.1 Algemene bouw 14](#_Toc488072971)

[3.2.2 Lithium ijzerfosfaat cel 15](#_Toc488072972)

[3.3 Productie van de cellen 17](#_Toc488072973)

[3.4 Cel degradatie 17](#_Toc488072974)

[3.4.1 Degradatie bij Lithium-ion 18](#_Toc488072975)

[3.4.2 Geldt dit ook bij lifepo4? 19](#_Toc488072976)

[3.5 Veiligheid 19](#_Toc488072977)

[3.5.1 Spanning 20](#_Toc488072978)

[3.5.2 Temperatuur 20](#_Toc488072979)

[3.5.3 Stroom 21](#_Toc488072980)

[3.6 Externe bouw 22](#_Toc488072981)

[4 Enkele batterijbegrippen 23](#_Toc488072982)

[4.1.1 Opladen 23](#_Toc488072983)

[4.1.2 Ontladen 23](#_Toc488072984)

[4.1.3 Celcapaciteit 23](#_Toc488072985)

[4.1.4 State Of Charge (SOC) 24](#_Toc488072986)

[4.1.5 Depth Of Discharge (DOD) 25](#_Toc488072987)

[4.1.6 Efficiëntie 25](#_Toc488072988)

[4.1.7 Interne weerstand 25](#_Toc488072989)

[4.1.8 State of health (SOH) 26](#_Toc488072990)

[4.1.9 State of function (SOF) 26](#_Toc488072991)

[4.1.10 Remaining Useful Life (RUL) 26](#_Toc488072992)

[5 Celbalancering 26](#_Toc488072993)

[5.1 Wat is een battery management system (BMS)? 26](#_Toc488072994)

[5.1.1 Inleidend 26](#_Toc488072995)

[5.1.2 Meetopstelling 28](#_Toc488072996)

[5.1.3 Functies 28](#_Toc488072997)

[5.2 Onbalans 28](#_Toc488072998)

[5.3 Actief balanceren 28](#_Toc488072999)

[5.4 Passief balanceren 28](#_Toc488073000)

[6 Literatuurstudie modellering 29](#_Toc488073001)

[6.1 Types modellen 29](#_Toc488073002)

[6.1.1 Elektrochemische en mathematische benadering 30](#_Toc488073003)

[6.1.2 Elektrische benadering 31](#_Toc488073004)

[6.1.3 Empirische benadering 31](#_Toc488073005)

[6.2 Literatuurstudie 32](#_Toc488073006)

[6.3 Wat beïnvloedt het batterijmodel? 33](#_Toc488073007)

[7 Het gebruikte model 33](#_Toc488073008)

[7.1.1 Matrices 34](#_Toc488073009)

[7.1.2 Hysterese 34](#_Toc488073010)

[7.2 Capaciteit 35](#_Toc488073011)

[7.3 Openklemspanning 35](#_Toc488073012)

[7.4 Parametrering 35](#_Toc488073013)

[7.5 Hysterese 35](#_Toc488073014)

[7.6 Kalman filtering 35](#_Toc488073015)

[8 Metingen 35](#_Toc488073016)

[8.1 Capaciteitsmetingen 35](#_Toc488073017)

[8.2 OCV metingen 36](#_Toc488073018)

[8.3 Parametermetingen 36](#_Toc488073019)

[8.4 Hysterese metingen 36](#_Toc488073020)

[9 Programma 36](#_Toc488073021)

[10 Validatie model 37](#_Toc488073022)

[11 Bevindingen en verbeteringsmogelijkheden 37](#_Toc488073023)

[12 Conclusie 37](#_Toc488073024)

[13 Bibiografie 37](#_Toc488073025)

[Bijlagen 39](#_Toc488073026)

Gebruikte afkortingen

Lijst met figuren

Lijst met tabellen

# Inleiding

Energie opslag is een belangrijke component in het transporteren en distribueren van energie. Deze component is met de jaren steeds belangrijker geworden door de behoefte van efficiëntie. bron en meeruitleg/vloeiender ineensteken  
  
Energie kan op verschillende manieren worden opgeslagen (Vliegwielen, supercaps, pompcentrales, waterstof, …) maar batterijen krijgen bij veel applicaties de voorkeur omdat ze een groot toepassingsbereik hebben en een hoge specifieke energie[[1]](#footnote-1).  
  
Op grotere schaal is er nood aan energieopslag om de productie te bufferen van hernieuwbare energiebronnen zoals wind en zonne-energie.  
  
Op midden-grote schaal is er nood aan efficiënte energie opslag voor bijvoorbeeld hybride elektrische voertuigen.  
  
Op kleine schaal is er een nood aan energieopslag voor bijvoorbeeld een gsm.

De laatste decennia is er ook een steeds groter wordende attentie voor het milieu mede door de industriële en technologische revolutie. Bron.   
  
Deze bezorgdheden hebben samen met de stijgende prijs van fossiele brandstoffen bron ervoor gezorgd dat er een overgangsgolf ontstond van brandstof gebaseerde toepassingen naar elektrische toepassingen.   
  
Op kleine schaal zijn brandstof gebaseerde toepassingen dikwijls zeer vervuilend en hebben een laag rendement. Op kleine schaal gebruik maken van elektrische gevoede toepassingen, heeft een hoog rendement. Bovendien kan men elektrische energie die nodig is voor deze toepassingen met een hoger rendement en een kleinere vervuiling per energiehoeveelheid produceren. bron  
  
Deze overgang was/is zeer sterk merkbaar in de voertuigindustrie. Het hart van het voertuig wordt verschoven van brandstof naar de batterij. bronnetje over tesla ofzo of foto

In deze industrie wordt een overgang gemaakt van conventionele verbrandingsmotoren naar hybride elektrische voertuigen (HEV) en Batterij elektrische voertuigen (BEV).  
  
Deze overgang is echter niet zeer vlot gemaakt aangezien er een hoge instapdrempel.  
Deze drempel is ontstaan door de relatief hoge aankoopprijs van elektrische wagens.   
Er is ook het mogelijke rijbereik dat voor angst zorgt bij kopers. Er is meer vertrouwen in brandstof in een tank dan energie in een batterij. Een brandstoftank is bovendien ook veel sneller gevuld dan een batterij opgeladen. Er is ook een minder uitgebreid netwerk van laadstations dan er een netwerk van tankstations is. Bron  
  
Vanuit het oogpunt van een elektrisch ingenieur zijn er niet veel mogelijkheden om deze instapdrempel te verlagen en zo een steentje bij te dragen aan het milieu en de leefomgeving.  
  
Wat als elektrisch ingenieur echter wel mogelijk is, is het onderzoeken en optimaliseren van de performantie en efficiëntie van de energieopslag in batterijen. Dit is nog niet goed

Door de steeds groeiende mogelijkheden binnen deze batterijsector, is het van belang dat engineering deze trend volgt. Bij performante energieopslagsystemen horen performante beheerssystemen.

# Probleemstelling en onderzoeksdoelstelling

## Omkadering

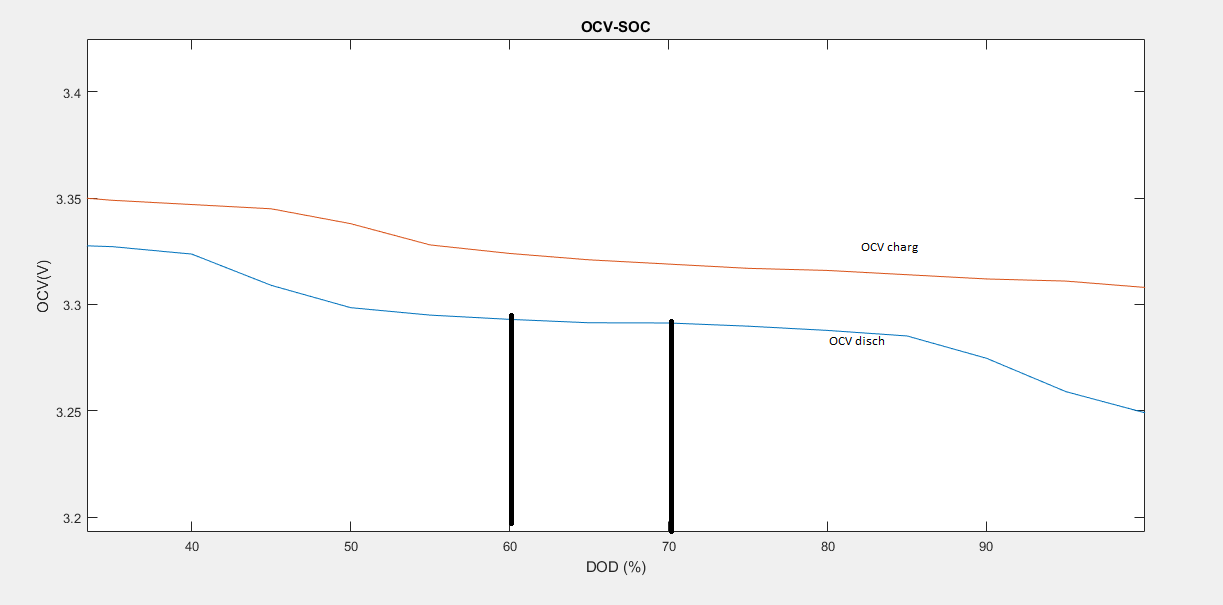
Deze thesis is een voortvloeisel van het TETRA project LBATTS (Lithium-ionbatterijen voor tractie- en stationaire toepassingen).   
  
LBATTS doet onderzoek naar de optimalisatie van lithium gebaseerde batterijtechnologieën.   
  
“De optimalisatie gebeurt via gewichtsreductie door het inzetten van lichte innovatieve materialen zoals phase change materials (PCM) enerzijds en thermisch beheer door de introductie van warmtebuffering in deze materialen anderzijds. Dit zou moeten leiden tot verhoogde prestaties en rendement.

## Probleem- en doelstelling

### Definiëring van de probleemstelling

In het kader van het project LBATTS[[2]](#footnote-2) zijn Winston Lithium ijzerfosfaat cellen aangekocht.   
Deze cellen zijn voorzien van zeer nauwkeurige spanningsmeetapparatuur die met een nauwkeurigheid van minder dan 1mV, de spanning kan uitlezen. [[3]](#footnote-3)  
  
Elke cel bevat een State of Charge (SOC) of lading.   
Het vergt hoge meetnauwkeurigheid en een goed batterijmodel om de SOC zeer accuraat in te schatten als een cel halfvol geladen is. Hierdoor wordt er bijna altijd gebalanceerd[[4]](#footnote-4) bij het einde van een laad- of ontlaadcyclus. De spanningsmeting mag hier minder nauwkeurig zijn om accuraat de SOC in te schatten.

Door deze zeer hoge meetnauwkeurigheid wordt in principe midden-SOC balancering mogelijk. Bij midden -SOC balancering wordt het mogelijk om op elk moment en tijdstip de cellen te balanceren. Dit biedt dus mogelijkheden die er niet zijn als men enkel volgeladen of leeg geladen cellen kan balanceren.   
  
Ter verduidelijking

  
Het verschil in Uocv,disch is enkele mV voor een een SOC verschil van 10%.[[5]](#footnote-5)

### Definiëring van de onderzoekdoelstellingen

Theoretisch lijkt midden-SOC balancering veelbelovend omdat men niet meer genoodzaakt is om te balanceren bij ontladen of volgeladen cellen.

Het doel van deze thesis is de ontwikkeling en validatie van een SOC-schattingsalgoritme. Dit algoritme wordt ontwikkeld aan de hand van een model dat opgesteld wordt uit een uitgebreide literatuurstudie.

## Overzicht van inhoud

# Fundamenten van een batterijen

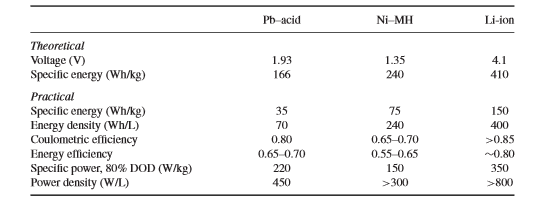
Indien u geen kennis heeft als lezer over de fundamenten van batterijen kan het handig zijn dit door te nemen. Indien u als lezer wel al kennis heeft over batterijen, laat u dan niet terugdeinzen om dit hoofdstuk niet te lezen want het was mijn doel een zeer uitgebreid deel te schrijven over de fundamenten. In dit hoofdstuk wou ik ook aspecten van cellen aanhalen die ik niet bestudeer in mijn thesis. Beter verwoorden

In dit hoofdstuk zullen de basisbeginselen van batterijen worden toegelicht. Er wordt ook ingegaan op elektrochemie aangezien een batterij een elektrochemische energiebron is.

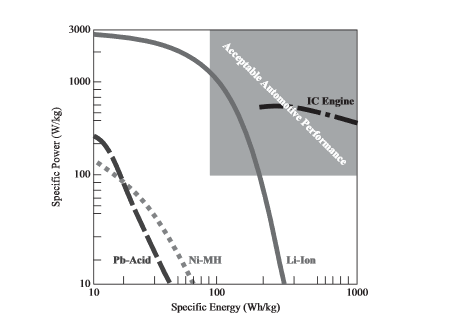
## Types batterijen

Er bestaan verschillende types batterijen gebaseerd op verschillende scheikundige elementen. Hieronder worden enkele bekende oplaadbare batterijen beschreven. Er bestaat nog een veel breder gamma aan niet oplaadbare batterijen. Deze worden niet beschreven aangezien in de masterproef gebruik wordt gemaakt van een Lithium-ijzersulfaat accu die oplaadbaar is.

### Geschiedenis van batterijtechnologie

Hieronder worden enkele van de meest gekende en gebruikte batterijtechnologieën beschreven. De drie types in de onderstaande tabel zijn de meest gekende en gebruikte batterijtechnologieën.

Bron: battery system enginring christopher D rahn



Bron: battery system enginring christopher D rahn

#### Loodzuur accu (uitgevonden 1859)

Dit is een veelgebruikt type cel die een technologie gebruikt die al heel lang geleden is ontwikkeld. De specifieke energie van dit soort accu is het laagst van alle oplaadbare accu's: 30 Wh/kg. Het specifiek vermogen is vrij hoog: 220 W/kg desondanks lage energiedichtheid wordt deze accu toch nog veel gemaakt en gebruikt door de lage productiekost en lage aankoopprijs en de grote elektrische stroom die hij kan leveren.

#### Alkaline batterij (uitgevonden 1949)

De alkaline batterij is een eenvoudig maar zeer gekend type wegwerp/niet oplaadbare batterij. Deze heeft een specifieke energie van 100 Wh/kg.

#### Nikkelmetaalhydride-accu (uitgevonden 1960)

Eerst was er het Nikkelcadmium accu dat gebruik maakt van de giftige stof cadmium.[[6]](#footnote-6) Ze worden tegenwoordig bijna niet meer gemaakt.   
  
Nikkelmetaalhydride is een later uitgevonden variant die geen gebruik maakt van de giftige stof Cadmium. De Ni-MH geeft meer mogelijkheden in specifieke energie (75 Wh/kg) maar heeft één groot nadeel. Deze batterijtechnologie heeft last van hoge zelfontlading 20-30% per maand.

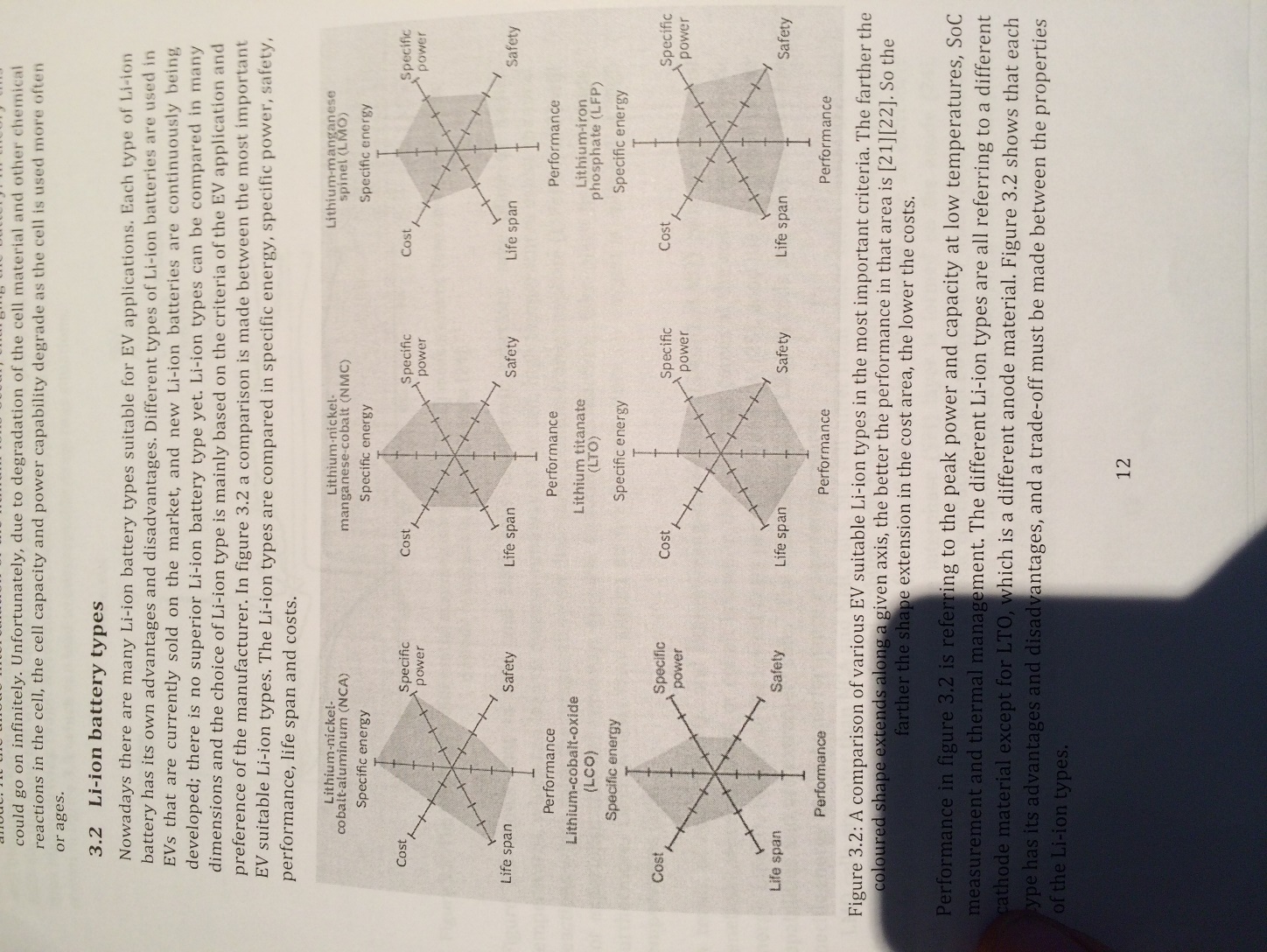
#### Lithium-ion accu’s (uitgevonden 1990)

Deze hebben de hoogste energiedichtheid. De vermogensdichtheid hangt echter sterk af van het katodemateriaal.

Elektronica voor GSM’s maakt voornamelijk gebruik van Lithium-Cobalt-oxide(LiCoO2) accu’s die een hoge energiedichtheid (Wh/liter) hebben omdat deze accu’s maar weinig volume in beslag mogen nemen. De specifieke energie van LiCoO2 bedraagt ongeveer 200 Wh/kg. Het specifieke vermogen ongeveer 180 W/kg.

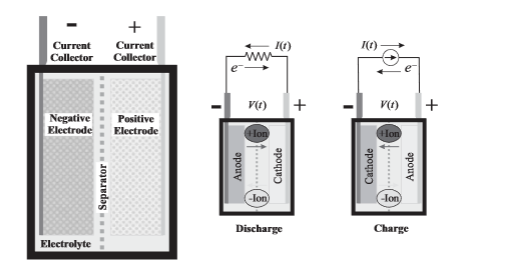
De lithium ijzerfosfaat accu’s zijn veruit de meest robuust, kosten het minste[[7]](#footnote-7) en hebben een goede levensduur en vinden vandaar toepassingen in bijvoorbeeld marine of elektrische golfkarren waar alle andere lithium-ion accu’s niet geschikt onverantwoord zijn. Ze geven een specifiek vermogen van max. 900 W/kg en een specifieke energie van 90Wh/kg.  
  
Er zijn nog veel andere Lithium-ion accu’s zoals LiMn2O4 , LiNiMnCoO2 ,Lithium-ion-polymeer, LiFePO4, LiNiCoAlO2,Li4Ti5O12… Deze hebben elk bepaalde eigenschappen die hen voordelen en nadelen geeft naar toepasbaarheid.

Lithium-ion accu’s zijn aan het groeien in populariteit. Ze bieden momenteel de meeste mogelijkheden in energiedichtheid, efficiëntie en levensduur maar het is momenteel nog een vrij dure technologie.[[8]](#footnote-8)



## Elektrochemische werking

### Algemene bouw

Een cel heeft altijd twee polen die buitenkomen uit de cel. De + en – pool. Deze zijn zichtbaar langs buiten op de cel en staan in contact intern met respectievelijk de positieve en negatieve elektrode. Afhankelijk van de stroomrichting wordt de desbetreffende pool een anode of kathode genoemd.

Deze elektroden zijn altijd vast of poreus[[9]](#footnote-9). Dit elektrolyt kan vast of vloeibaar[[10]](#footnote-10) zijn afhankelijk van het type cel.   
  
De separator zorgt ervoor dat enkel ionen transport mogelijk is tussen de twee elektroden en geen elektronen transport.

#### Ontladen

Als men ontlaadt zal de positieve elektrode zich gedragen als kathode en de negatieve elektrode als anode.   
  
Door elektrochemische spanning aan de polen ontstaat er elektronentransport van de – naar de + pool. Hierdoor ontstaat er intern ook ionentransport van – naar de + pool. Aan de elektroden ontstaan er dan redox reacties om transport van elektronen en ionen door te laten gaan.

#### Opladen

Als men oplaadt zal de positieve elektrode zich gedragen als anode en de negatieve elektrode als kathode. De elektronen worden nu naar de - pool geforceerd waardoor intern een ionentransport van + naar – pool ontstaat.  
De negatieve elektrode ondergaat hierdoor een oxidatiereactie waarbij de negatieve elektrode oplost in het elektrolyt om een positief ion en een elektrode te vormen. De positieve elektrode doet aan een reductiereactie door het afgeven van positieve ionen waarbij het elektronen krijgt.

Het ionentransport door het elektrolyt en het elektronentransport door extern circuit laat toe om energie op te slagen of af te geven.

### Lithium ijzerfosfaat cel

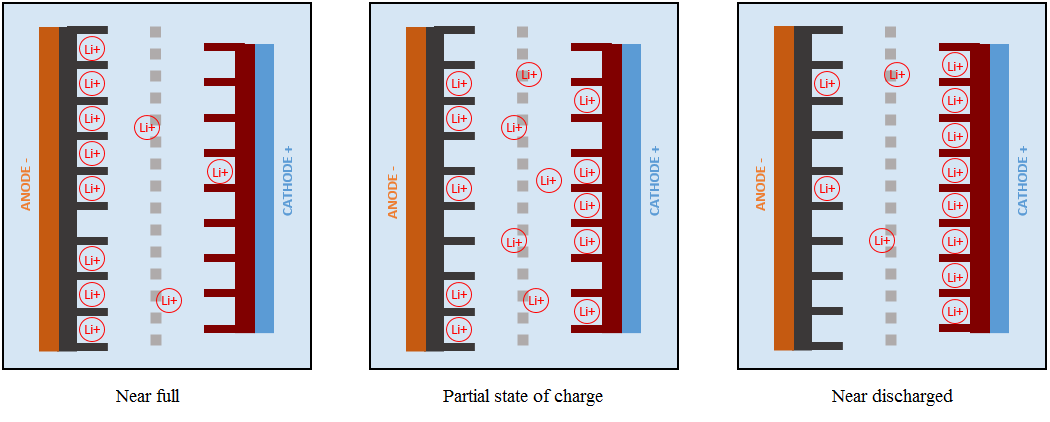
Lithium-ion accu’s zijn aan het groeien in populariteit. Ze bieden momenteel de meeste mogelijkheden in energiedichtheid, efficiëntie en levensduur maar het is momenteel nog een vrij dure technologie

#### Internal structure of a lithium iron phosphate battery cell in a partly-charged state.Interne bouw

Het gebruikte celtype in deze masterproef bestaat uit Lithium ijzersulfaat-cellen.

Dit celtype bestaat uit de drie functionele componenten van een elektrochemische cel.  
  
Ten eerste is er de negatieve elektrode die uit sterk geleidend koper bestaat die met een laag grafiet eraan gebonden.  
  
Ten tweede is er de positieve elektrode die uit aluminium bestaat waar een lithium ijzerfosfaat coating aan gebonden is.  
  
Het elektrolyt is een Lithiumzout opgelost in een organische oplossing. Deze oplossing is snel ontvlambaar en volledig geabsorbeerd in de elektrode coatings en de separator. [[11]](#footnote-11)

De op- en ontlading van lithiumbatterijen werkt aan de hand van de relocatie van lithium-ionen. Hieronder is het ontladen een lithium ijzerfosfaat cel afgebeeld.



Men ziet dus de anode en kathode in oranje en blauw. Deze noemt men de stroom-collectoren. Deze hebben meestal een hoge geleidbaarheid. Bij dit type cel wordt er gebruik gemaakt van Aluminium en koper.[[12]](#footnote-12)  
  
De lagen of de coatings op de elektroden noemt men meestal de actieve materialen.  
  
Tussen de elektroden bevindt zich de separator die enkel ionentransport toelaat.  
  
De lithium ionen zich als het ware hechten aan het actieve materiaal. Dit proces noemt men intercallatie of de-intercallatie.[[13]](#footnote-13)

In de negatieve elektrode krijgt men reactie met het grafiet:  
  
In de positieve elektrode krijgt men reactie met het ijzerfosfaat:  
  
Deze redox-reacties zullen bepalend zijn voor de celspanning die ontstaat. Lithium-ion cellen hebben een vrij hoge celspanning. Afhankelijk van het actief materiaal bij de positieve elektrode kan de nominale celspanning van 2.5 tot 3.7 V variëren.[[14]](#footnote-14)  
  
De energieopslag in een lithium-ion batterij werkt dus aan de hand van het volgende principe: zowel de kathode en de anode kunnen lithium-ionen binden. Tijdens het laadproces zal een geïnduceerde veld ervoor zorgen dat ionen van kathode naar anode verplaatsen. Tijdens het ontladen gaan de ionen terug naar de kathode en geven energie vrij in die proces.

## Productie van de cellen

De opbouw van lithium-ijzersulfaat batterijen hangt ook af van de fabrikant maar als er verschillen optreden is dit meestal bij de compositie van het elektrolyt. Dit beïnvloedt de performantie en de levensduur van de cel het meest omdat zo de groei van de SEI-layer wordt beïnvloed. Deze beïnvloedt ook de capaciteitsvermindering van de cellen. Door deze SEI-layer die dus groeit, verliest de batterij gradueel aan capaciteit.

Formatiecycli

Batch afwisselend

## Cel degradatie

Met cel degradatie wordt bedoeld dat cellen aan maximaal leverbare capaciteit en maximaal leverbaar vermogen verliezen afhankelijk van enkele chemische fenomenen. Deze fenomenen kunnen versterkt worden door het uitbuiten van de cel met extreme gebruikstoestanden.   
  
Cel degradatie is echter niet enkel afhankelijk van mishandeling van de cellen maar ook van het aantal laadcycli en stockage tijd.

Structuureel zijn zowel het grafiet en het ijzerfosfaat zeer stabiele materialen met of zonder de aanwezigheid van het lithium. Dit zorgt ervoor dat de batterijen zo’n goede levensduur hebben tegenover andere lithium-ion accu’s.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00876555/document>

**Aging Mechanisms of LiFePO4 Batteries Deduced by Electrochemical and Structural Analyses**

<https://www.dropbox.com/sh/nna9kgq4s9dxwtu/AADGImmQ_hswNwzUvWSgJINaa?dl=0&preview=H8+BMS.pdf>

### Degradatie bij Lithium-ion

#### Solid Electrolyte Interphase (SEI)

De SEI laag ontstaat in de formatiecycli van de fabrikant. Dit is een laag die bestaat uit vast elektrolyt die aanwezig is op de negatieve elektrode. Deze ontstaat door de reactie tussen elektrolyt en en de elektrode. Deze is nodig voor een stabiel gedrag van de cel.   
  
Deze laag blijft echter groeien bij toename van laadcycli en bij stockage. De temperatuur zal de groei van deze laag ook versnellen.[[15]](#footnote-15) Deze laag zal de intercalatie van de lithium-ionen tegenhouden waardoor er capaciteitsverlies ontstaat.  
Deze laag laat bij het einde van de levensduur zeer weinig lithium door waardoor de capaciteit zeer klein wordt en de cel onbruikbaar.

#### Lithium corrosie

Lithium aanwezig in het

#### Contact verlies

SEI contactverlies ofz dropbox

#### Lithium plating

Lithium plating

De oplaadsnelheid is ook een factor waarbij opgelet moet worden. Lithium plating is een fenomeen waarbij bij het opladen niet alle lithium ionen kunne worden geabsorbeerd in de anode. Hierdoor ontstaat een Lithium metaal dat op het oppervlak (meestal aan de randen) van de elektrode zit. Dit proces is onomkeerbaar en zorgt voor een permanent capaciteitsverlies.  
  
Dit fenomeen kan ontstaan door 1)een te hoge laadsnelheid, 2) bij te lage temperatuur laden waardoor de absorptie snelheid van de kathode sterk vermindert, 3) druppelladen

In het slechtste geval gaat men dus snelladen bij een lage temperatuur en daarna druppelladen.

### Geldt dit ook bij lifepo4?

## Veiligheid

Een batterij is een gevaarlijk voorwerp. Desondanks de lage spanning die cellen afleveren bezitten ze toch enorme hoeveelheden energie. Belangrijk is het definiëren van de zogenaamde Safe operating Area (SOA). Dit is een belangrijk en gekend begrip in de batterijwereld.   
  
De SOA bepaalt de grenzen waarbinnen een bepaalde cel kan getest worden. Als men buiten deze grenzen gaat kan zowel omgeving als de batterij zelf beschadigd worden.

[**http://batteryuniversity.com/learn/archive/four\_renegades\_of\_battery\_failure**](http://batteryuniversity.com/learn/archive/four_renegades_of_battery_failure)

Deze grenzen worden bepaald door stroom, temperatuur en spanning.  
  
Safety in boek

De SOA( Safe operating area) van Li-ion cellen zijn afhankelijk van temperatuur spanning en stroom.  
  
-Overspanning 🡪 barst in vuur.  
-Ontladen beneden een spanning geeft schade.  
-Ontladen buiten temperatuurrange = slecht, deze range is nog kleiner bij opladen.  
-electrolyte is licht ontvlambaar  
-te snel laden of ontladen 🡪 lifetime reduced.  
-schade als er te hoge pulsstroom is.  
  
LiC2 gaat in thermische runaway zonder aditionele protectie.  
  
**LiFePO4 is intrinsiek immuun aan thermische kettingreacties. Deze kan alleen thermisch onstabiel worden door externe factoren**.

### Spanning

Ten eerste moet voorkomen worden dat de celspanning de bovengrens niet overschrijdt.   
Uit <https://www.youtube.com/watch?v=p21iZVFHEZk> Het overladen van een cel zal ervoor zorgen dat deze begint uit te zetten en er zal ook stoom uit de veiligheidsklep komen. Uiteindelijk zal dit leiden tot een breuk na 15 minuten overladen volgens de bron.  
  
Ten tweede moet voorkomen worden dat de celspanning de ondergrens van de spanning niet overschrijdt. <http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm#breakdown>

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/202190/local_202190.pdf>

zwellen en tijd grafiekje

### Temperatuur

-Voorkomen dat de temperatuurlimiet niet overschreden wordt. Deze bedraagt   
  
  
-Voorkomen dat de celspanning niet beneden een minimum gaat.  
-Voorkomen dat de laadsnelheid niet overschreden wordt.  
-Voorkomen dat de ontlaadsnelheid niet overschreden wordt.

### Stroom

Thermische explosie kan bij een LiFePO4 bijna niet voorkomen omdat de temperaturen die nodig zijn om het zuurstof te laten vrijkomen door dissociatie uit de LIFePO4 heel hoog zijn. De ontsteektemperatuur om een ketting van exotherme reactie te krijgen is het hoogst bij deze LiFePO4.  
Ook is de maximumtemperatuur die bereikt kan worden na een ontploffing bij dit type het laagst van alle soorten Lithiumbatterijen. Dit type lithium-batterij is mede dankzij deze reden een van de veiligste van zijn soort.

<https://electronics.stackexchange.com/questions/164103/if-li-ion-battery-is-deeply-discharged-is-it-harmful-for-it-to-remain-in-this-s>

Vanwege het ontvlambare elektrolyt dat onder druk staat, is het mogelijk dat Li-ion-accu's bij een defect tot zelfontbranding komen door het vrijkomen van zuurstof.

diepontladen

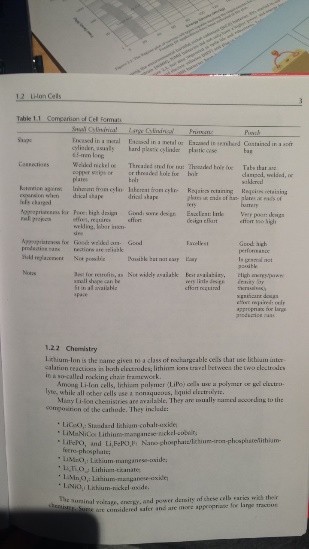
overladen

<https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate>

## Externe bouw

Er zijn drie bekende bouwvormen die gebruikt worden voor lithium-ion cellen.  
  
\*Cilindrisch  
\*Prismatisch  
\*Pouch  
  
Elk type heeft voor en nadelen afhankelijk van wat de toepassing is.  
  
  
Cilindrische cellen hebben het voordeel dat ze meer geschikt zijn voor kleine toepassingen dankzij hun bouwvorm. Ze zijn ook zeer geschikt voor retrofits dankzij hun kleine vorm.  
  
Zowel Pouch als Prismatische cellen hebben dezelfde applicaties. Ze worden voorzien voor energieopslag en meer vermogende toepassingen.  
  
Pouch cellen zwellen wat op gedurende hun levensduur en zien gemakkelijker af van hoge temperaturen of vochtigheid dan prismatische cellen maar ze hebben en hogere levensduur.

In deze thesis wordt gebruik gemaakt van het prismatische celtype.



<https://www.slideshare.net/JingDeng1/epic-slides-jing-jdeng>

<http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_battery_cells>

# Enkele batterijbegrippen

Zelfgeschreven boek checken word document

### Opladen

CC till cutoff CV till current threshold

### Ontladen

CC till cuttoff

### Celcapaciteit

Celcapaciteit is de hoeveelheid lading die beschikbaar is als de cel is volgeladen. Deze definitie is relatief vaag waardoor de capaciteit meestal op drie verschillende wijzen wordt bepaald.

#### Nominale capaciteit: opgegeven door fabrikant

De nominale capaciteit is een waarde die opgegeven wordt door de fabrikant. Deze capaciteit wordt bepaald door het volladen(0 tot 100%) of leegladen(100 tot 0%) van de cel gedurende 1 uur lang bij kamertemperatuur bij een bepaalde stroomwaarde.

#### C-rate

De stroomwaarde die dit ervoor zorgt dat de cel wordt vol- of leeg geladen in dat uur wordt ook wel de C-rate genoemd. Een cel met een nominale capaciteit van 100Ah heeft dus een C-rate van 100A.

#### Totale capaciteit: totale hoeveelheid lading die in een cel kan

De Totale capaciteit is de maximale hoeveelheid lading die men uit een volledig volgeladen cel kan trekken met een constante ontlaadstroom die zo laag mogelijk is. [[16]](#footnote-16)

#### Leverbare capaciteit: totale hoeveelheid lading die leverbaar is in een bepaalde gebruikstoestand

Het is belangrijk de capaciteit goed te definiëren zodat er geen verwarring ontstaat.

### State Of Charge (SOC)

De State of Charge of SOC is de hoeveelheid lading die nog beschikbaar in vergelijking met de hoeveelheid lading die beschikbaar is als de cel is volgeladen.   
  
De overgebleven lading is afhankelijk van temperatuur, spanning, zelfontlading, cel veroudering en ontlaadstroom.

Alhoewel deze definitie zeer duidelijk lijkt, wordt deze in literatuur toch op verschillende manieren bepaald door gebruik van verschillende definities voor de hoeveelheid lading die beschikbaar is als de cel is volgeladen of de celcapaciteit.

#### Aan de hand van nominale capaciteit

In veel literatuur wordt SOC gedefinieerd door de hoeveelheid lading die nog beschikbaar te vergelijken met de nominale capaciteit opgegeven door de fabrikant.[[17]](#footnote-17) bron

Dit impliceert dus dat een volgeladen cel 100Ah aan lading heeft en een leeg geladen cel 0Ah aan lading. Het is echter mogelijk om meer lading in de cel te krijgen zonder buiten de SOA te werken waardoor er bij berekeningen een negatieve SOC of een SOC van hoger dan 100% zou kunnen ontstaan. Dit wilt niet zeggen dat SOC op deze manier voorstellen slecht is. Het is minder precies.

#### Aan de hand van de totale capaciteit

Er is ook veel literatuur te vinden waarin SOC wordt gedefinieerd door de hoeveelheid lading die nog beschikbaar is te vergelijken met de totale capaciteit.

#### Aan de hand van de leverbare capaciteit

In veel literatuur gebruikt men ook de leverbare capaciteit. Afhankelijk van de snelheid waarmee ontladen (ontlaadstroom) gewenst is, zal de leverbare capaciteit variëren. Men noemt deze

#### Gebruikte SOC

Het is van belang dat SOC op een éénduidige manier wordt gedefinieerd. Bij het verder verloop van deze thesis zal steeds worden gebruikt tenzij anders vermeld.

### Depth Of Discharge (DOD)

Depth Of Discharge is een tweede belangrijk begrip in batterij-engineering. Deze parameter is een maatstaf voor de hoeveelheid lading die uit een cel is genomen. Deze wordt uitgedrukt in Ah. Deze parameter kan ook in percentages worden uitgedrukt maar is meer bruikbaar met de eenheid Ah.   
  
Deze parameter wordt meer gebruikt voor het bepalen van levensduur van cellen waarbij meer informatie verschaft wordt door DOD dan SOC bij bijvoorbeeld diep ontladen of cycling.

### Efficiëntie

Charging discharging en energy

### Interne weerstand

### State of health (SOH)

### State of function (SOF)

### Remaining Useful Life (RUL)

# Celbalancering

<https://www.dropbox.com/s/4gwgn7dt5ekhwpm/BMS.pdf?dl=0>

## Wat is een battery management system (BMS)?[[18]](#footnote-18)

### Inleidend

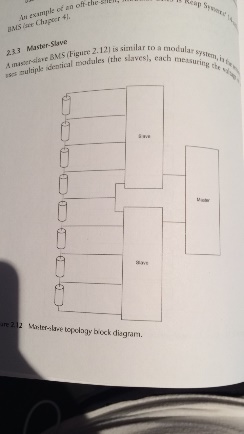
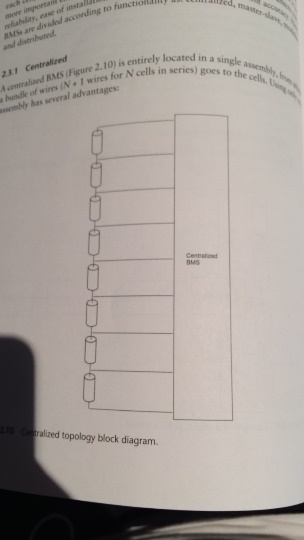
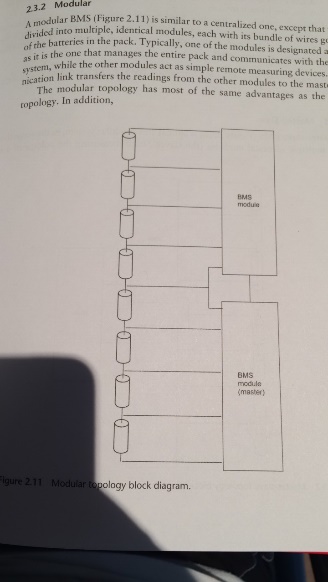
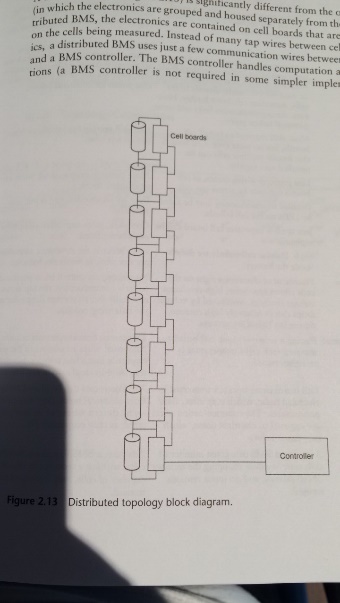
Als men een elektrische batterijbank gaat vergelijken met een lichaam kan men stellen dat een batterij managementsysteem het “brein” is. De batterijbank die energie levert of opneemt kan men dan vergelijken met het menselijke lichaam.

*“Een Battery management systeem (BMS) is elk elektronisch systeem dat een herlaadbare batterij (cel of bank) managet door: het beschermen van de batterij van buiten de Safe Operating Area (SOA) te werken, monitoren van de toestand, berekenen van secundaire data, weergeven van die data, controleren van de toestand en/of balanceren.” Vrij vertaald uit* [*https://books.google.be/books?id=fGdklAEACAAJ&redir\_esc=y*](https://books.google.be/books?id=fGdklAEACAAJ&redir_esc=y)

Het brein van een batterij bank heeft volgens de (bron boek) meeste literatuur 6 mogelijke functies.

#### Monitoring

Een BMS zal ten eerste instaan voor de monitoring van de drie belangrijke parameters van een een batterij bank.   
  
Deze drie parameters zijn de individuele cel spanningen, de stroom door iedere cel en de temperatuur in iedere cel. Deze parameters kan men vergelijken met de signalen die het brein krijgt van zijn lichaam. [[19]](#footnote-19)  
  
Voor het meten van deze parameters is meetapparatuur voorzien bepaalde nauwkeurigheden.   
  
De belangrijkheid van de meetnauwkeurigheid is afhankelijk van wat men wilt bereiken met het BMS. Om simpel weg te detecteren of een cel vol of leeg geladen is, is een meetnauwkeurigheid van 100mV reeds geschikt. Om een zeer accurate schatting te maken van de ladinginhoud van een cel is een nauwkeurigheid van 1mV of beter vereist.[[20]](#footnote-20)  
  
Deze meetapparatuur kan op verschillende wijzen in contact staan met het brein. De manier waarop deze in contact staat met het brein wordt de topologie van een BMS genoemd.  
  
Er zijn verscheidene topologieën zoals gecentraliseerd, modulair, gedistribueerd en master-slave.



#### CC-CV- laden

Een belangrijke functionaliteit van een BMS is het laden. Men mag niet zomaar een oplaadbron aan een batterij leggen en verwachten dat deze stopt met laden als de cellen volgeladen zijn.   
  
Het laadprofiel dat typisch wordt aangelegd door een BMS, is het CC CV laden.

### Meetopstelling

De bestudeerde batterij bank bestaat uit vier in serie geschakelde cellen.

### Functies

## Onbalans

## Actief balanceren

## Passief balanceren

# Literatuurstudie modellering

## Types modellen

Batterij management systemen zijn sterk afhankelijk van accurate batterij modellen.  
Het model moet zowel geschikt zijn voor statisch als dynamisch gedrag. Belangrijk is ook dat het model een goede voorspelling kan maken bij een wijd bereik van state of charge, temperatuur en stroom.

Er zijn reeds zeer veel modellen gepubliceerd die het gedrag van Lithium ion cellen voorspellen. Deze modellen kunnen in drie categorieën worden onderverdeeld afhankelijk van de wijze waarop de cel bestudeerd wordt:  
  
\* Elektrochemische en mathematische modellen  
\* Empirische modellen.  
\* Elektrische modellen.

Als elektrisch ingenieur is het vanzelfsprekend dat de elektrische modellen de voorkeur genieten alhoewel het zeker interessant is om de andere modellen ook kort toe te lichten.  
  
Er zijn twee types modellen die bij elektrische en elektrochemische modellen veel gebruikt worden:  
  
\*Impedantie-gebaseerde modellen  
\*Thévenin-gebaseerde modellen  
  
Ze maken allebei gebruik van equivalente circuit modellen.

### Elektrochemische en mathematische benadering

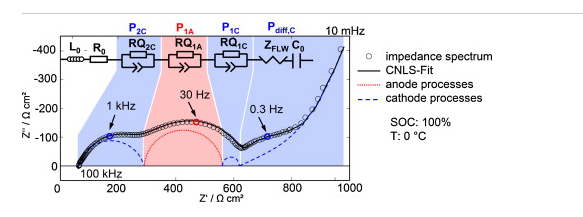
#### Elektrochemische modellen

Deze modellen zijn gebaseerd op elektrochemische reacties en ionen transport. Deze beïnvloeden de potentialen van de kathode en de anode die zorgen voor een klemspanning.  
  
Om deze elektrochemische modellen te bestuderen moet men een hoog aantal chemische parameters[[21]](#footnote-21) bepalen en over een grondige kennis van verschillende materiaal eigenschappen beschikken. Het bepalen van deze chemische parameters vereist bovendien gespecialiseerde testen die tijdverslindend en complex zijn.  
  
Deze elektrochemische testen bieden wel veel preciezer modellen met meer mogelijkheden. Zo kan men bijvoorbeeld het verlies van actief lithium-ion materiaal bestuderen om capaciteitsverlies en levensduur te bestuderen. Dit is met elektrisch modellen niet mogelijk zonder zeer veel empirische testen.

#### Impedantie-gebaseerde modellen

Alhoewel een impedantie-gebaseerd model in sé elektrisch is, wordt het veel gebruikt door elektrochemische ingenieurs om elektrochemische processen met een equivalent circuit model te beschrijven.

Deze modellen worden door EIS metingen gekarakteriseerd. EIS wordt uitgelegd bij metingen.



#### Mathematische benadering

Deze modellen zijn gebaseerd op de elektrochemische modellen en gaan dieper in op massa transport en thermodynamica. Een voorbeeld is het modelleren van intercallatie. Bibliografie Een ander voorbeeld is het thermisch 3D modeleren van lithium cellen. Bibl

### Elektrische benadering

Op deze elektrische modellering wordt dieper ingegaan. Deze modelering gebeurt aan de hand van elektrische componenten zoals weerstanden, spoelen, condensatoren en diodes.

#### Thévenin-gebaseerde modellen

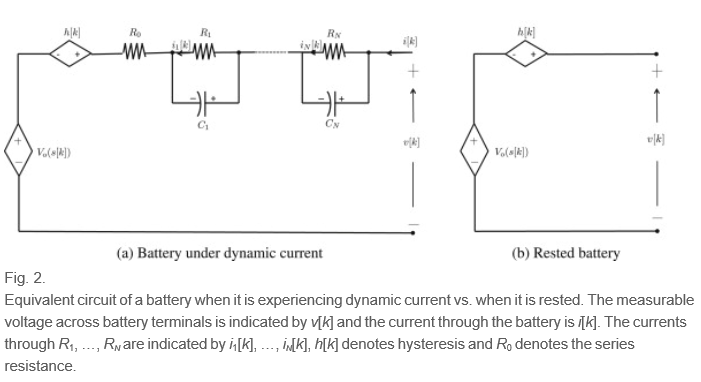
Thévenin-gebaseerde modellen worden voornamelijk door elektrische ingenieurs gebruikt. Deze modellen worden opgesteld met een thévenin-equivalent circuit en worden gekarakteriseerd door de spanningsrespons van stroom-, temperatuur- en ladingsvariaties.  
  
Dankzij de eenvoudigere structuur van Thévenin-gebaseerde modellen kunnen deze gemakkelijk geïntegreerd worden in eender welk BMS. Er is geen zwaar rekenvermogen vereist zoals bij de andere elektrochemische en mathematische benaderingen meestal wel het geval is.   
  
Het grote voordeel van Thévenin-gebaseerde modellen is dat de interne structuur van de cel niet moet bestudeerd worden door het gebruik van een ECM. Deze testen moeten wel uitgevoerd worden bij elektrochemische en mathematische modellen.

### Empirische benadering

Deze modellen make meestal gebruik van zeer grote datasets met metingen. Deze metingen worden dan gefit om verbanden te vinden tussen verscheidene parameters. Deze verbanden zijn meestal niet gegrond met fysische verbanden en geven problemen door de niet-lineariteit van de parameters.

## Literatuurstudie

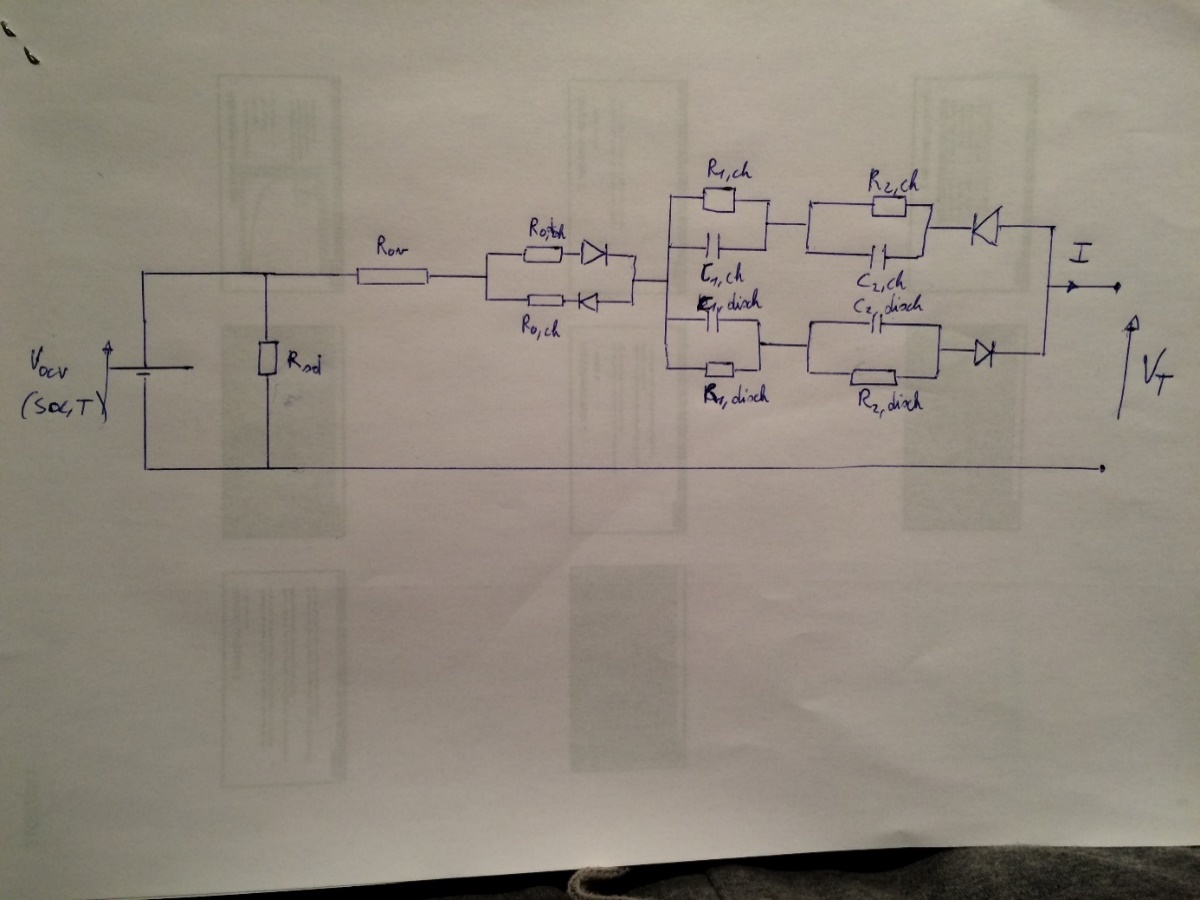
Modelvalidatie is ook zeer belangrijk. Dit houdt in dat er testen worden uitgevoerd en wordt gecontroleerd of de meetwaarden overeenstemmen met verwachting van het model. De afwijking van de schatting op de experimentele data moet geminimaliseerd worden.

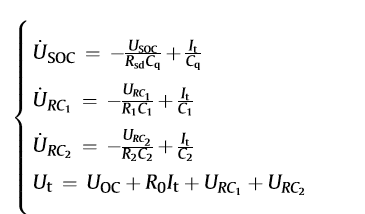
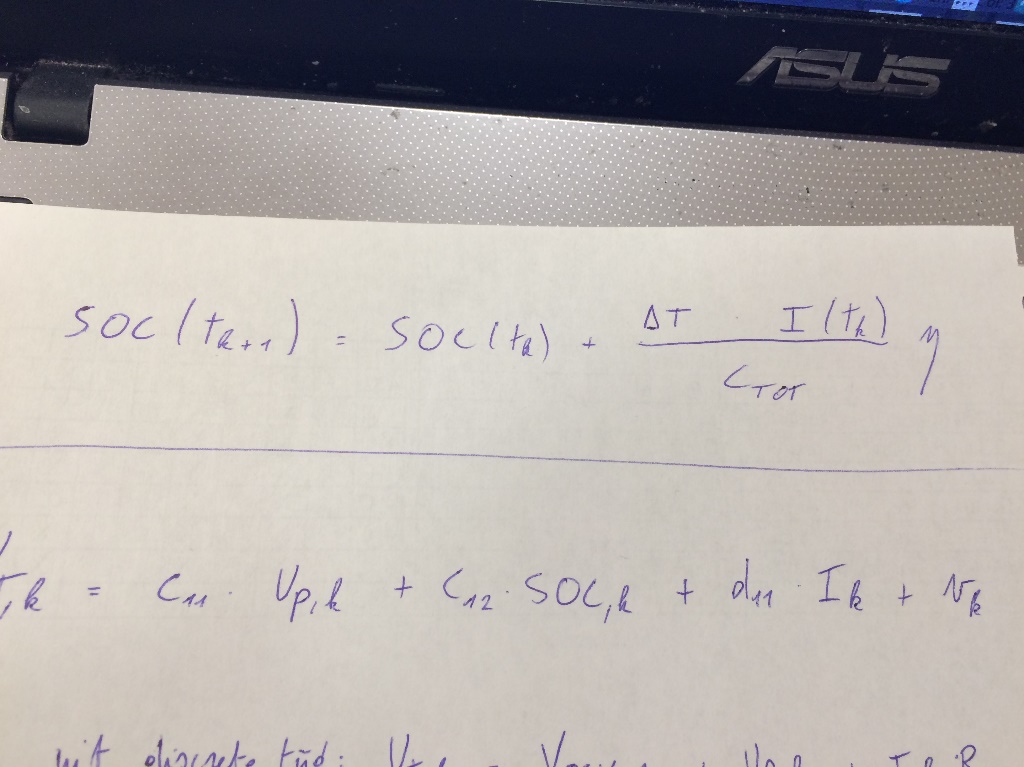
Om conclusies te maken over modelering is het belangrijk om van een uitgebreid overzicht gebruik te maken van alle bestaande modellen. Vanwege de complexiteit van elektrochemische en mathematische modellen worden deze niet opgenomen.  
  
De voornaamste elektrische modellen worden besproken.

Andere modellen bespreken

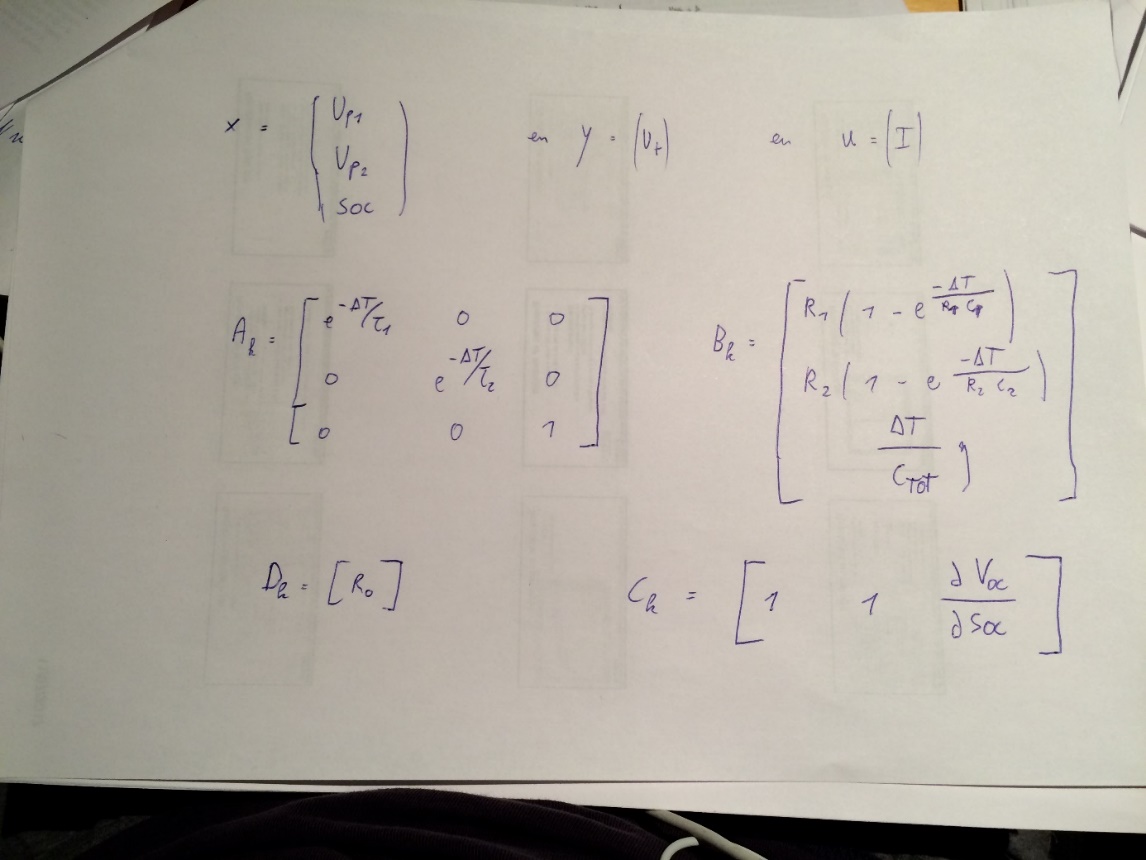
## Wat beïnvloedt het batterijmodel?

# Het gebruikte model

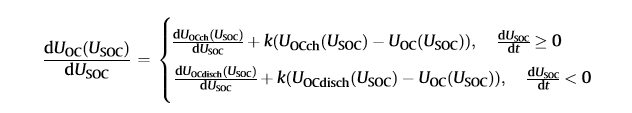


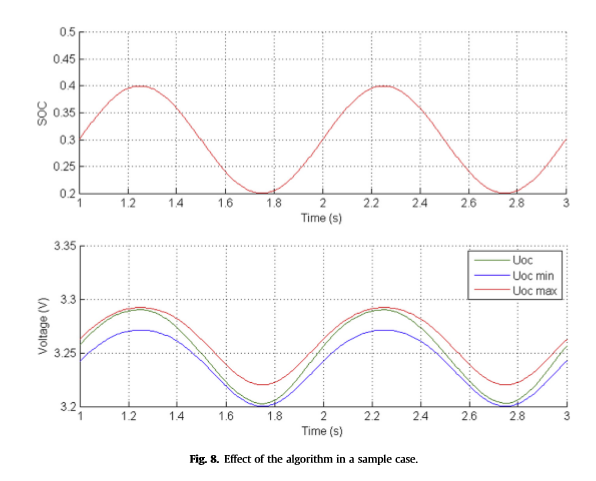
  


### Matrices



### Hysterese

  
  
Eenvoudige hysteresis modellering maar ik snap niet helemaal goed met k factor



## Capaciteit

## Openklemspanning

## Parametrering

## Hysterese

## Kalman filtering

# Metingen

## Capaciteitsmetingen

## OCV metingen

## Parametermetingen

Hppc

## Hysterese metingen

# Programma

Uitleg programma

# Validatie model

# Bevindingen en verbeteringsmogelijkheden

# Conclusie

# Bibiografie

Bijlagen

karerl

Faculteit industriële ingenieurswetenschappen

Gebroeders De Smetstraat nr 1

9000 Gent, België  
tel. +32 9 265 86 10  
iiw.gent@kuleuven.be  
[www.kuleuven.be](http://www.kuleuven.be)

1. Specifieke energie is hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen per kilogram van het opslagmedium. [↑](#footnote-ref-1)
2. Zie 1.2 Omkadering voor meer info over het optimalisatieproject LBATTS. [↑](#footnote-ref-2)
3. De spanning is de belangrijkste factor. Deze moet heel precies zijn om accuraat SOC te kunnen schatten. [↑](#footnote-ref-3)
4. Wat is balanceren? Balanceren is het gelijk houden van de State of charge van elke cel.  
    [↑](#footnote-ref-4)
5. Betere figuur gebruiken lol [↑](#footnote-ref-5)
6. Cadmiumdampen zijn in zeer kleine concentraties al zeer gevaarlijk en giftig. [↑](#footnote-ref-6)
7. De elementen Nickel en Cobalt worden niet gebruikt. Deze beïnvloeden de prijs van de cel sterk maar ook de mogelijkheden in specifieke energie. [↑](#footnote-ref-7)
8. De Winston LiFePO4 cellen die gebruikt zijn in deze thesis kosten XXX euro voor 1 cel van 100Ah met 3.3V. Tegenover een Loodzuur accu kost 220 euro voor 100Ah en 12V. (Loodzuurcellen worden niet verkocht. Men koopt altijd een accu.) [↑](#footnote-ref-8)
9. Porositeit van elektroden laat toe dat het elektrolyt met een groter oppervlak in contact staat met de elektroden. [↑](#footnote-ref-9)
10. Loodzuur accu’s zijn van het natte celtype en gebruiken dus vloeistof als elektrolyt. NiCd-accu’s zijn van het droge celtype en gebruiken dus vaste stof als elektrolyt. Er bestaan tegenwoordig ook loodzuur accu’s die een gel als elektrolyt gebruiken. Dit geeft praktisch meer mogelijk dan vloeistoffen in niet afgesloten ruimten. De types met vloeistoffen hebben wel superieure elektrische eigenschappen. [↑](#footnote-ref-10)
11. De hierboven afgebeelde cel is volledig ontladen met al het lithium aanwezig in de kathode en het elektrolyt. [↑](#footnote-ref-11)
12. Als interne weerstand bestudeerd wordt, mag men de interne weerstand niet aanschouwen als een gelijkmatige weerstand. Het verschil in type materiaal voor de stroomcollector is één van de redenen waarom men dit niet zo mag aanschouwen. [↑](#footnote-ref-12)
13. Hier zien in literatuur ook veel modellen over te vinden. [↑](#footnote-ref-13)
14. Ter vergelijking; Loodzuur accu’s hebben een nominale celspanning van 2.0V. NiMH hebben een nominale celspanning van 1.2V. LiFePO4 hebben een nominale celspanning van 3.3V. [↑](#footnote-ref-14)
15. Belangrijk om te weten is dat lithium-ion accu’s nooit volgeladen worden opgeslagen in een magazijn. Tegen het einde van de laadcyclus heeft de kathode niet veel lithium ionen meer. De hoeveelheid vrije lithium ionen in het elektrolyt begint nu ook te verminderen en de cel spanning begint snel te stijgen. De elektroden worden nu ook meer chemisch reactief ten opzichte van het elektrolyt. Deze chemische reactiviteit is schadelijk voor de cel en hoe langer deze conditie bestaat, hoe meer interne degradatie het veroorzaakt. Een hoge gebruikstemperatuur versnelt dit proces.mss beter plaats geve [↑](#footnote-ref-15)
16. Typisch kiest men hiervoor C/20, C/25 of C/30  
    Er wordt een lage ontlaadstroom gekozen opdat de interne spanningsval weinig invloed zou [↑](#footnote-ref-16)
17. Deze bedraagt voor de Winston LiFepo4 cel 100Ah. [↑](#footnote-ref-17)
18. Deze inleiding geldt algemeen voor een BMS. Later wordt de gebruikte meetopstelling besproken. [↑](#footnote-ref-18)
19. Dit is niet de wijze waarop gemonitord wordt bij de testopstelling. Dit geldt algemeen waarbij een desbetreffend batterijpakket kan bestaan uit een netwerk van zowel serie als parallel cellen. Bij de meeste batterij pakketten wordt er echter meestal de totale stroom door het gehele pakket gemonitord. Als temperatuurmeting neemt men tenminste de gemiddelde temperatuur van het pakket als temperatuurmonitoring per cel teveel gevraagd zou zijn. [↑](#footnote-ref-19)
20. Dit geldt specifiek Lithium-ijzerfosfaatcellen. Dergelijke hoge nauwkeurigheid is niet bij alle cel technologieën nodig om een accurate schatting te maken van State of Charge(SOC). [↑](#footnote-ref-20)
21. Een voorbeeld van parameters zijn diffusie en migratie coëfficiënten. [↑](#footnote-ref-21)