

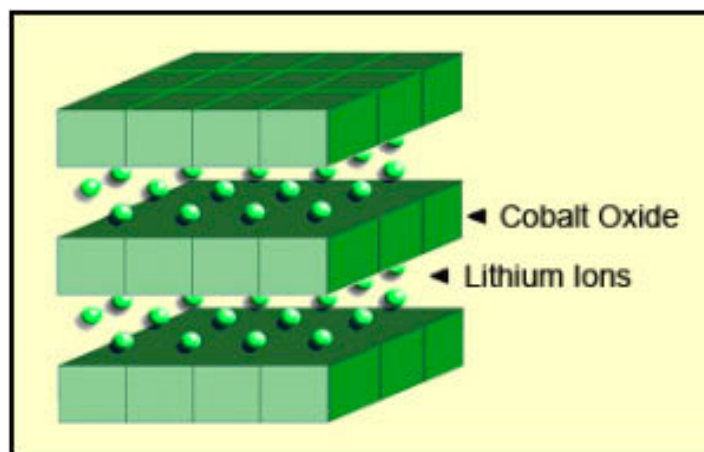
Soorten lithium-ion

Lithium-ion wordt vernoemd naar de actieve materialen; de woorden worden voluit geschreven of afgekort met hun chemische symbolen. Een reeks letters en cijfers aan elkaar kan moeilijk te onthouden en nog moeilijker uit te spreken zijn, en de chemie van batterijen wordt ook aangeduid met afgekorte letters.

Zo heeft lithiumkobaltoxide, een van de meest voorkomende Li-ionen, de chemische symbolen LiCoO_2 en de afkorting LCO. Eenvoudigheidshalve kan voor deze accu ook de afkorting Li-kobalt worden gebruikt. Kobalt is het belangrijkste actieve materiaal dat deze accu karakter geeft. Andere Li-ion-chemistries krijgen vergelijkbare afkortingen. In dit gedeelte worden zes van de meest voorkomende Li-ionen genoemd. Alle waarden zijn gemiddelde schattingen op het moment van schrijven.

Lithiumkobaltoxide (LiCoO_2) - LCO

Door de hoge specifieke energie is Li-kobalt de populaire keuze voor mobiele telefoons, laptops en digitale camera's. De batterij bestaat uit een kathode van kobaltoxide en een anode van grafietkoolstof. De kathode heeft een gelaagde structuur en tijdens het ontladen bewegen lithiumionen van de anode naar de kathode. Bij het opladen keert de stroom om. Het nadeel van Li-kobalt is een relatief korte levensduur, lage thermische stabiliteit en beperkte belastbaarheid (specifiek vermogen). Figuur 1 illustreert de structuur.



Figuur 1: Li-kobaltstructuur.

De kathode heeft een gelaagde structuur. Tijdens het ontladen bewegen de lithiumionen van de anode naar de kathode; bij het opladen gaat de stroom van de kathode naar de anode.

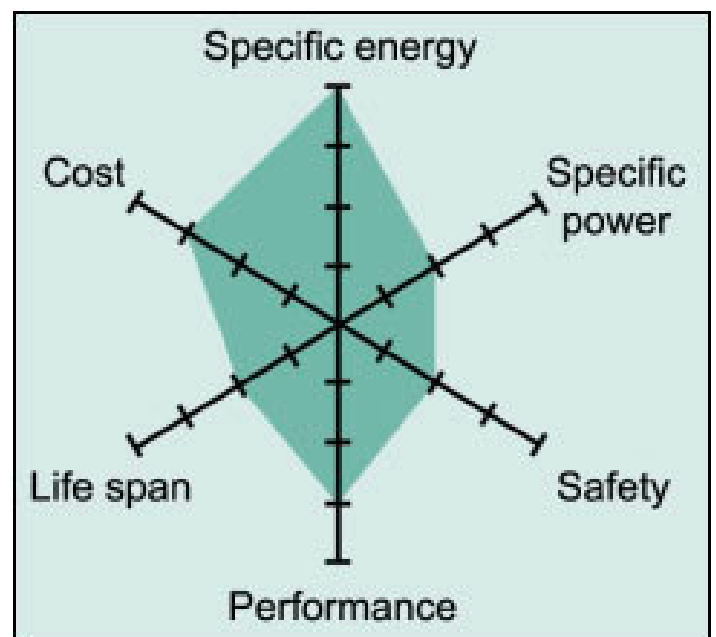
Bron: Cadex

Het nadeel van Li-kobalt is een relatief korte levensduur, lage thermische stabiliteit en beperkte belastbaarheid (specifiek vermogen). Net als andere Li-ion-kobaltmengsels heeft Li-kobalt een grafietanode die de levensduur beperkt door een veranderende vaste elektrolytinterface (SEI), verdikking op de anode en lithiumplating tijdens snelladen en laden bij lage temperatuur. Nieuwere systemen bevatten nikkel, mangaan en/of aluminium om de levensduur, laadmogelijkheden en kosten te verbeteren.

Li-kobalt mag niet worden opgeladen en ontladen met een stroomsterkte hoger dan de C-waarde. Dit betekent dat een 18650-cel met 2.400 mAh alleen mag worden opgeladen en ontladen met 2.400 mA. Het forceren van een snelle lading of het toepassen van een belasting hoger dan 2.400 mA veroorzaakt oververhitting en onnodige stress. Voor optimaal snelladen adviseert de fabrikant een C-rate van 0,8C of ongeveer 2.000 mA. (Zie BU-402: Wat is C-rate). Het verplichte batterijbeveiligingscircuit beperkt de laad- en ontladsnelheid tot een veilig niveau van ongeveer 1C voor de Energy Cell.

De zeshoekige spinnenwebgrafiek (Figuur 2) vat de prestaties van Li-kobalt samen in termen van specifieke energie of capaciteit die betrekking heeft op looptijd; specifiek vermogen of het vermogen om hoge stroom te leveren; veiligheid; prestaties bij warme en koude temperaturen; levensduur die de gebruiksduur en duurzaamheid weergeeft; en kosten. Andere interessante eigenschappen die niet in de spinnenwebben zijn weergegeven, zijn toxiciteit, snellaadvermogen, zelfontlading en houdbaarheid. (Zie BU-104c: De Octagon batterij - Wat maakt van een batterij een batterij).

Li-kobalt verliest terrein aan Li-mangaan, maar vooral aan NMC en NCA vanwege de hoge kosten van kobalt en de verbeterde prestaties door menging met andere actieve kathodematerialen. (Zie de beschrijving van NMC en NCA hieronder).



Figuur 2: Momentopname van een gemiddelde Li-kobalt batterij. Li-kobalt blinkt uit in hoge specifieke energie, maar biedt slechts matige prestaties op het gebied van specifiek vermogen, veiligheid en levensduur. Bron: Cadex

Overzichtstabel

Lithium kobaltoxide: LiCoO_2 kathode (~60% Co), grafietanode Verkorte vorm: LCO of Li-kobalt. Sinds 1991	
Spanningen	3,60V nominaal; typisch werkbereik 3,0-4,2V/cel
Specifieke energie (capaciteit)	150-200Wh/kg. Speciale cellen leveren tot 240Wh/kg.
Opladen (C-snelheid)	0,7-1C, laadt op tot 4,20V (de meeste cellen); typische laadduur 3 uur. Laadstroom boven 1C verkort de levensduur van de batterij.
Ontladen (C-snelheid)	1C; 2,50V cut-off. Ontlaadstroom boven 1C verkort de levensduur van de batterij.
Levensduur	500-1000, afhankelijk van ontladingsdiepte, belasting, temperatuur
Thermische runaway	150°C (302°F). Volledige lading bevordert thermische runaway
Toepassingen	Mobiele telefoons, tablets, laptops, camera's
Commentaar bij update 2019:	Zeer hoge specifieke energie, beperkt specifiek vermogen. Kobalt is duur. Dient als energiegel. Het marktaandeel is gestabiliseerd. Vroege versie; niet langer relevant.

Tabel 3: Kenmerken van lithiumkobaltoxide.

Lithium mangaanoxide (LiMnO_4) - LMO

Li-ion met mangaanspinel werd voor het eerst gepubliceerd in het Materials Research Bulletin in 1983. In 1996 bracht Moli Energy een Li-ion-cel op de markt met lithiummangaanoxide als kathodemateriaal. De architectuur vormt een driedimensionale spinelstructuur die de ionenstroom op de elektrode verbetert, wat resulteert in een lagere interne weerstand en een betere stroomverwerking. Een ander voordeel van spinel is de hoge thermische stabiliteit en verbeterde veiligheid, maar de cyclus- en

kalenderlevensduur zijn beperkt.

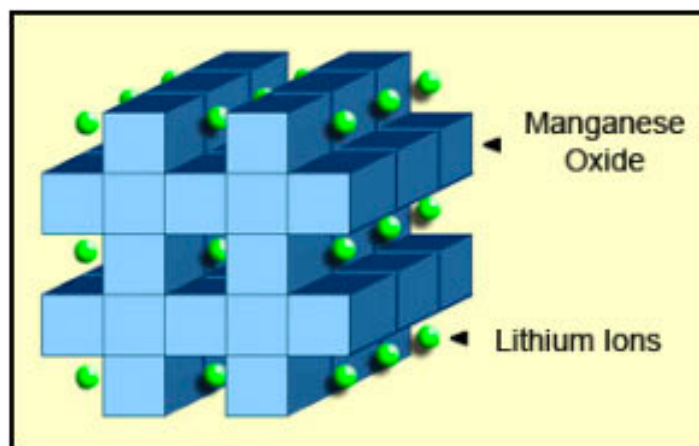
De lage interne celweerstand maakt snel opladen en ontladen met hoge stromen mogelijk. In een 18650-pakket kan Li-mangaan worden ontladen bij stromen van 20-30 A met een matige warmteontwikkeling. Het is ook mogelijk om één seconde laadpulsen tot 50 A toe te passen. Een continue hoge belasting bij deze stroom zou warmteontwikkeling

veroorzaken en de celtemperatuur mag niet hoger zijn dan 80°C (176°F). Li-mangaan wordt gebruikt voor elektrisch gereedschap, medische instrumenten en hybride en elektrische voertuigen.

Figuur 4 toont de vorming van een driedimensionaal kristallijn raamwerk op de kathode van een Li-mangaan batterij. Deze spinelstructuur, die meestal bestaat uit diamantvormen die in een rooster zijn verbonden, verschijnt na de eerste vorming.

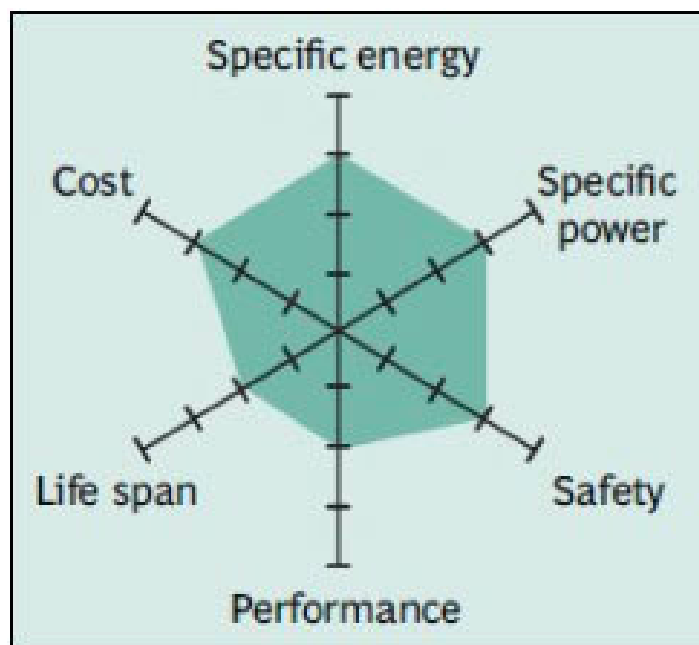
De meeste Li-mangaanbatterijen worden gemengd met lithiumnikkelmangaankobaltoxide (NMC) om de specifieke energie te verbeteren en de levensduur te verlengen. Deze combinatie brengt het beste in elk systeem naar boven en voor de meeste elektrische voertuigen, zoals de Nissan Leaf, Chevy Volt en BMW i3, wordt gekozen voor LMO (NMC). Het LMO-gedeelte van de batterij, dat ongeveer 30 procent kan zijn, zorgt voor een hoge stroomstoot bij het accelereren; het NMC-gedeelte zorgt voor het lange rijbereik.

Li-ion-onderzoek richt zich vooral op het combineren van Li-mangaan met kobalt, nikkel, mangaan en/of aluminium als actief kathodemateriaal. In sommige



Figuur 4: Li-mangaanstructuur.

De kathode-kristalvorming van lithiummangaanoxide heeft een driedimensionale raamwerkstructuur die na de initiële vorming verschijnt. Spinel biedt een lage weerstand maar heeft een meer gematigde specifieke energie dan kobalt. Bron: Cadex



Figuur 5: Momentopname van een pure Li-mangaan accu. Hoewel de algehele prestaties matig zijn, bieden nieuwere ontwerpen van Li-mangaan verbeteringen op het gebied van specifiek vermogen, veiligheid en levensduur. Bron: Boston Consulting Group

architecturen wordt een kleine hoeveelheid silicium aan de anode toegevoegd. Dit zorgt voor een capaciteitsverhoging van 25 procent; de winst gaat echter meestal gepaard met een kortere levensduur omdat silicium groeit en krimpt tijdens het laden en ontladen, wat mechanische spanning veroorzaakt.

Deze drie actieve metalen en de siliciumversterking kunnen eenvoudig worden gekozen om de specifieke energie (capaciteit), het specifieke vermogen (belastbaarheid) of de levensduur te verbeteren. Terwijl consumentenbatterijen gaan voor een hoge capaciteit, vereisen industriële toepassingen batterijsystemen met een goede laadcapaciteit, een lange levensduur en een veilige en betrouwbare service. =capabilities, deliver a long life and provide safe and dependable service.

Summary Table

Lithium mangaanoxide: LiMn_2O_4 kathode. grafietanode Verkorte vorm: LMO of Li-mangaan (spinelstructuur) Sinds 1996	
Spanningen	3,70V (3,80V) nominaal; typisch werkingbereik 3,0-4,2V/cel
Specifieke energie (capaciteit)	100–150Wh/kg
Opladen (C-snelheid)	0,7-1C typisch, 3C maximaal, laadt op tot 4,20V (meeste cellen)
Ontladen (C-snelheid)	1C; 10C mogelijk met sommige cellen, 30C puls (5s), 2,50V cut-off
Levensduur	300–700 (afhankelijk van lozingsdiepte, temperatuur)
Thermische runaway	250°C (482°F) typisch. Hoge lading bevordert thermische runaway
Toepassingen	Elektrisch gereedschap, medische apparatuur, elektrische aandrijflijnen
Commentaar bij update 2019:	Hoog vermogen maar minder capaciteit; veiliger dan Li-kobalt; vaak gemengd met NMC om de prestaties te verbeteren. Nu minder relevant; beperkt groeipotentieel.

Tabel 6: Kenmerken van lithium mangaanoxide

Lithiumnikkelmangaankobaltoxide (LiNiMnCoO_2) - NMC

Een van de meest succesvolle Li-ionsystemen is een kathodecombinatie van nikkel-mangaan-kobalt (NMC). Net als Li-mangaan kunnen deze systemen op maat worden gemaakt om te dienen als energiecel of als krachtcel. Bijvoorbeeld, NMC in een 18650-cel voor gematigde belasting heeft een capaciteit van ongeveer 2.800 mAh en kan 4A tot 5A leveren; NMC in dezelfde cel dat is geoptimaliseerd voor specifiek vermogen heeft een capaciteit van slechts ongeveer 2.000 mAh maar levert een continue ontlaadstroom van 20A. Een anode op basis van silicium gaat tot 4.000 mAh en hoger, maar met een verminderde laadcapaciteit en kortere levensduur. Silicium toegevoegd aan grafiet heeft als nadeel dat de anode groeit en krimpt bij laden en ontladen, waardoor de cel mechanisch instabiel wordt.

Het geheim van NMC schuilt in het combineren van nikkel en mangaan. Een analogie hiervan is keukenzout waarvan de hoofdingrediënten, natrium en chloride, op zichzelf giftig zijn, maar het mengen ervan dient als keukenzout en conserveringsmiddel. Nikkel staat bekend om zijn hoge specifieke energie maar slechte stabiliteit; mangaan heeft het voordeel dat het een spinelstructuur vormt voor een lage interne weerstand, maar biedt een lage specifieke energie. Het combineren van de metalen versterkt elkaars sterke punten.

NMC is de batterij bij uitstek voor elektrisch gereedschap, e-bikes en andere elektrische aandrijvingen. De kathodecombinatie is meestal een derde nikkel, een derde mangaan en een derde kobalt, ook wel 1-1-1 genoemd. Kobalt is duur en beperkt beschikbaar. Accufabrikanten verlagen het kobaltgehalte met een aantal compromissen op het gebied van prestaties. Een succesvolle combinatie is NCM532 met 5 delen nikkel, 3 delen kobalt en 2 delen mangaan. Andere combinaties zijn NMC622 en NMC811. Kobalt stabiliseert nikkel, een energierijk actief materiaal.

Nieuwe elektrolyten en additieven maken opladen tot 4,4 V/cel en hoger mogelijk om de capaciteit te verhogen. Figuur 7 toont de kenmerken van de NMC.

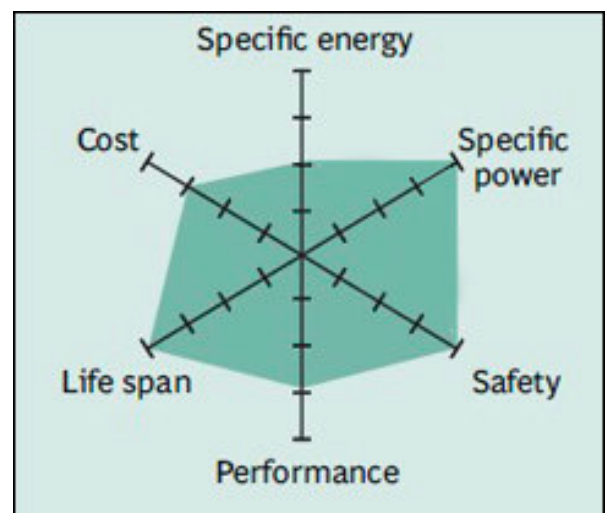


Figure 7: Momentopname van NMC.

NMC heeft goede algemene prestaties en blinkt uit in specifieke energie. Deze batterij is de meest geschikte optie voor het elektrische voertuig en heeft de laagste zelfopwarmingssnelheid. Bron: Boston Consulting Group

Er is een verschuiving naar Li-ion met NMC-mengsels omdat het systeem economisch kan worden gebouwd en goede prestaties levert. De drie actieve materialen nikkel, mangaan en kobalt kunnen gemakkelijk worden gemengd voor een breed scala aan toepassingen voor auto's en energieopslagsystemen (EES) die vaak moeten worden gebruikt. De NMC-familie wordt steeds diverser.

Overzichtstabel

Lithiumnikkelmangaankobaltoxide: LiNiMnCoO_2 . kathode, grafietanode Verkorte vorm: NMC (NCM, CMN, CNM, MNC, MCN vergelijkbaar met verschillende metaalcombinaties) Sinds 2008	
Spanningen	3,60V, 3,70V nominaal; typisch werkingsbereik 3,0-4,2V/cel, of hoger
Specifieke energie (capaciteit)	150-220Wh/kg
Opladen (C-snelheid)	0,7-1C, laadt op tot 4,20V, sommige gaan tot 4,30V; typisch 3 uur opladen. Laadstroom boven 1C verkort de levensduur van de batterij.
Ontladen (C-snelheid)	1C; 2C mogelijk op sommige cellen; 2,50V cut-off
Levensduur	1000-2000 (afhankelijk van lozingsdiepte, temperatuur)
Thermische runaway	210°C (410°F) typisch. Hoge lading bevordert thermische runaway
Kosten	~\$420 per kWh[1]
Toepassingen	E-bikes, medische apparaten, EV's, industrieel
Commentaar bij update 2019:	Biedt hoge capaciteit en hoog vermogen. Dient als hybride cel. Favoriete chemie voor veel toepassingen; marktaandeel neemt toe. Toonaangevend systeem; dominante kathodechemie.

Tabel 8: Kenmerken van lithiumnikkel-mangaan-kobaltoxide (NMC)

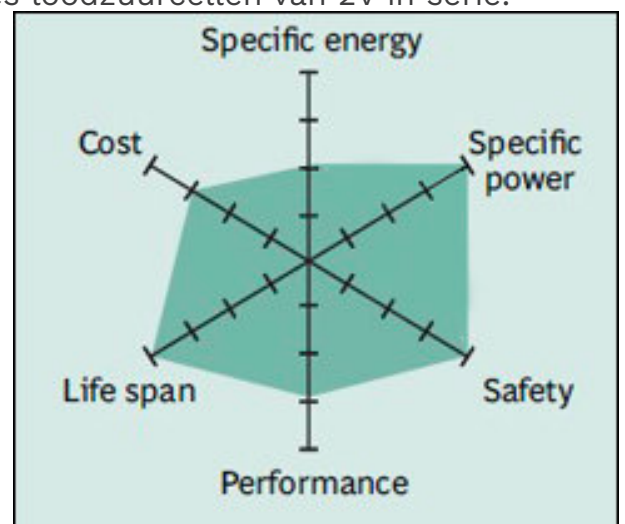
Lithiumijzerfosfaat (LiFePO_4) - LFP

In 1996 ontdekte de Universiteit van Texas (en andere medewerkers) fosfaat als kathodemateriaal voor oplaadbare lithiumbatterijen. Li-fosfaat biedt goede elektrochemische prestaties met een lage weerstand. Dit wordt mogelijk gemaakt door fosfaatkathodemateriaal op nanoschaal. De belangrijkste voordelen zijn een hoge stroomsterkte en een lange levensduur, naast een goede thermische stabiliteit, verbeterde veiligheid en tolerantie bij misbruik.

Li-fosfaat is beter bestand tegen volledig opladen en wordt minder belast dan andere lithium-ionsystemen als deze langere tijd op een hoge spanning worden gehouden. (Zie BU-808: Hoe verleng ik lithiumbatterijen). Als tegenprestatie verlaagt de lagere nominale spanning van 3,2 V/cel de specifieke energie tot onder die van kobalt-gemengd lithium-ion. Bij de meeste batterijen vermindert koude de prestaties en verkort een hoge opslagtemperatuur de levensduur, en Li-fosfaat vormt hierop geen uitzondering. Li-fosfaat heeft een hogere zelfontlading dan andere Li-ion-batterijen, wat evenwichtsproblemen kan veroorzaken bij het ouder worden. Dit kan worden beperkt door cellen van hoge kwaliteit te kopen en/of geavanceerde besturingselektronica te gebruiken, die beide de kosten van het pakket verhogen. Zuiverheid bij de productie is belangrijk voor een lange levensduur. Er is geen tolerantie voor vocht, anders levert de accu slechts 50 cycli. Figuur 9 vat de eigenschappen van Li-fosfaat samen.

Li-fosfaat wordt vaak gebruikt om de loodzuur startaccu te vervangen. Vier cellen in serie produceren 12,80V, een vergelijkbare spanning als zes loodzuurcellen van 2V in serie. Voertuigen laden loodzuur op tot 14,40V (2,40V/cel) en handhaven een toplading. Toplading wordt toegepast om het volledige laadniveau te handhaven en sulfatering op loodzuuraccu's te voorkomen.

Met vier Li-fosfaatcellen in serie bereikt elke cel een maximale spanning van 3,60 V, wat de juiste volledige laadspanning is. Op dit punt moet het opladen worden afgebroken, maar het opladen gaat door tijdens het rijden. Li-fosfaat verdraagt enige overlading, maar als de spanning gedurende langere tijd op 14,40V wordt gehouden, zoals de meeste voertuigen doen tijdens een lange autorit,



Figuur 9: Momentopname van een typische Li-fosfaatbatterij. Li-fosfaat heeft een uitstekende veiligheid en lange levensduur, maar een matige specifieke energie en een hoge zelfontlading. Bron: Cadex

kan Li-fosfaat onder druk komen te staan. De tijd zal leren hoe duurzaam Li-fosfaat zal zijn als vervanging van loodzuur in een gewoon oplaadsysteem. Koude temperaturen verminderen ook de prestaties van Li-ion en dit kan in extreme gevallen de startcapaciteit beïnvloeden.

Overzichtstabel

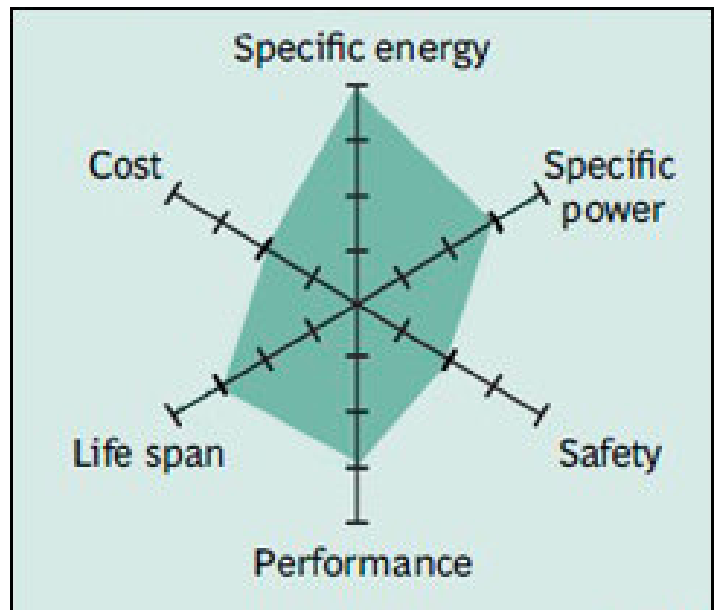
Lithium-ijzerfosfaat: LiFePO_4 kathode, grafietanode Verkorte vorm: LFP of Li-fosfaat Sinds 1996	
Spanningen	3,20, 3,30V nominaal; typisch werkbereik 2,5–3,65V/cel
Specifieke energie (capaciteit)	90–120Wh/kg
Opladen (C-snelheid)	1C gemiddeld, opladen tot 3,65V; typische oplaadtijd 3 uur
Ontladen (C-snelheid)	1C, 25C op sommige cellen; 40A puls (2s); 2,50V cut-off (lager dan 2V veroorzaakt schade)
Levensduur	2000 en hoger (gerelateerd aan ontladingsdiepte, temperatuur)
Thermische runaway	270°C (518°F) Zeer veilige batterij, zelfs als deze volledig is opgeladen
Kosten	~\$580 per kWh[1]
Toepassingen	Draagbaar en stationair waarbij hoge belastingsstromen en uithoudingsvermogen nodig zijn
Commentaar bij update 2019:	Zeer vlakke spanningsontladingscurve maar lage capaciteit. Een van de veiligste Li-ionen. Gebruikt voor speciale markten. Hoge zelfontlading. Vooral gebruikt voor energieopslag, matige groei.

Tabel 10: Kenmerken van lithium-ijzerfosfaat

Zie Lithium Mangaan IJzerfosfaat (LMFP) voor mangaan-versterkt L-fosfaat.

Lithiumnikkel-kobalt-aluminiumoxide (LiNiCoAlO₂) - NCA

De lithiumnikkel-kobalt-aluminiumoxide batterij, of NCA, bestaat al sinds 1999 voor speciale toepassingen. Het heeft overeenkomsten met NMC door een hoge specifieke energie, redelijk goed specifiek vermogen en een lange levensduur. Minder positief zijn de veiligheid en de kosten. Figuur 11 vat de zes belangrijkste kenmerken samen. NCA is een verdere ontwikkeling van lithiumnikkeloxide; de toevoeging van aluminium geeft de chemie een grotere stabiliteit.



Figuur 11: Momentopname van NCA.

Een hoge energie- en vermogensdichtheid en een goede levensduur maken van NCA een kandidaat voor EV-aandrijflijnen. Hoge kosten en marginale veiligheid zijn negatieve factoren. Bron: Cadex

Overzichtstabel

Lithium Nikkel Kobalt Aluminium Oxide: LiNiCoAlO_2 kathode (~9% Co), grafietanode Verkorte vorm: NCA of Li-aluminium. Sinds 1999	
Spanningen	3,60V nominaal; typisch werkbereik 3,0-4,2V/cel
Specifieke energie (capaciteit)	200-260Wh/kg; 300Wh/kg voorspelbaar
Opladen (C-snelheid)	0,7C, laadt op tot 4,20V (meeste cellen), typische laadduur 3 uur, snelladen mogelijk met sommige cellen
Ontladen (C-snelheid)	1C typisch; 3,00V cut-off; hoge ontladingssnelheid verkort levensduur batterij
Levensduur	500 (afhankelijk van de ontladingsdiepte, temperatuur)
Thermische runaway	150°C (302°F) typisch, hoge lading bevordert thermische runaway
Kosten	~\$350 per kWh[1]
Toepassingen	Medische apparatuur, industrie, elektrische aandrijving (Tesla)
Commentaar bij update 2019:	Heeft overeenkomsten met Li-kobalt. Dient als energiegel. Voornamelijk gebruikt door Panasonic en Tesla; groeipotentieel.

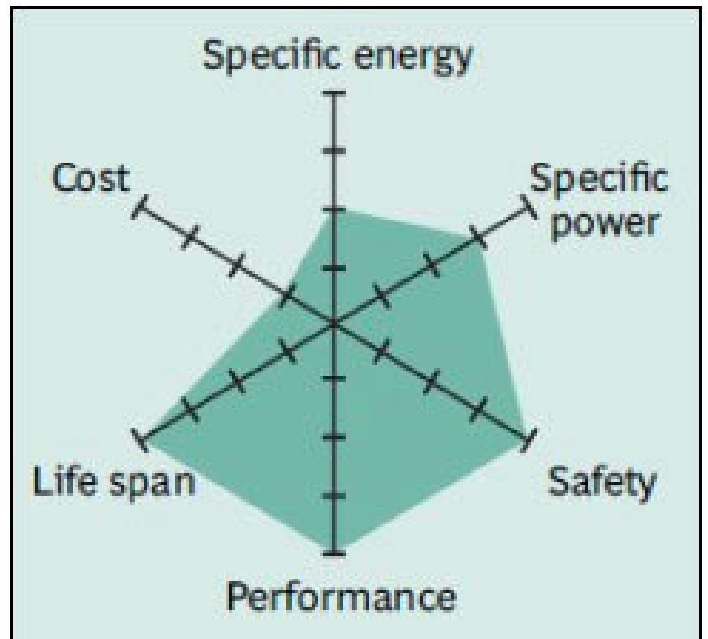
Tabel 12: Kenmerken van lithiumnikkel-kobalt-aluminiumoxide

Lithiumtitanaat (Li_2TiO_3) - LTO

Batterijen met lithiumtitanaatanoden zijn al bekend sinds de jaren tachtig. Li-titanaat vervangt het grafiet in de anode van een typische lithium-ion batterij en het materiaal vormt zich tot een spinelstructuur. De kathode kan lithium mangaanoxide of NMC zijn. Li-titanaat heeft een nominale celspanning van 2,40 V, kan snel worden opgeladen en levert een hoge ontlaadstroom van 10C, oftewel 10 keer de nominale capaciteit. Het aantal cycli is naar verluidt hoger dan dat van een gewone Li-ion. Li-titanaat is veilig, heeft uitstekende ontladeigenschappen bij lage temperaturen en haalt een capaciteit van 80 procent bij -30°C (-22°F).

LTO (meestal $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) heeft voordelen ten opzichte van de conventionele kobalt-geblende Li-ion met grafietanode door het bereiken van de nultrek eigenschap, geen SEI filmvorming en geen lithiumplating bij snelladen en laden bij lage temperatuur. De thermische stabiliteit bij hoge temperaturen is ook beter dan bij andere Li-ion-systemen, maar de batterij is duur. Met slechts 65Wh/kg is de specifieke energie laag, vergelijkbaar met die van NiCd. Li-titanaat laadt op tot 2,80 V/cel en het einde van de ontlading is 1,80 V/cel. Figuur 13 illustreert de kenmerken van de Li-titanaat batterij. Typische toepassingen zijn elektrische aandrijvingen, UPS en straatverlichting op zonne-energie.

Figure 13: Momentopname van Li-titanaat.
Li-titanaat blinkt uit in veiligheid, prestaties bij lage temperaturen en levensduur. Er worden inspanningen geleverd om de specifieke energie te verbeteren en de kosten te verlagen. Bron: Boston Consulting Group



Overzichtstabel

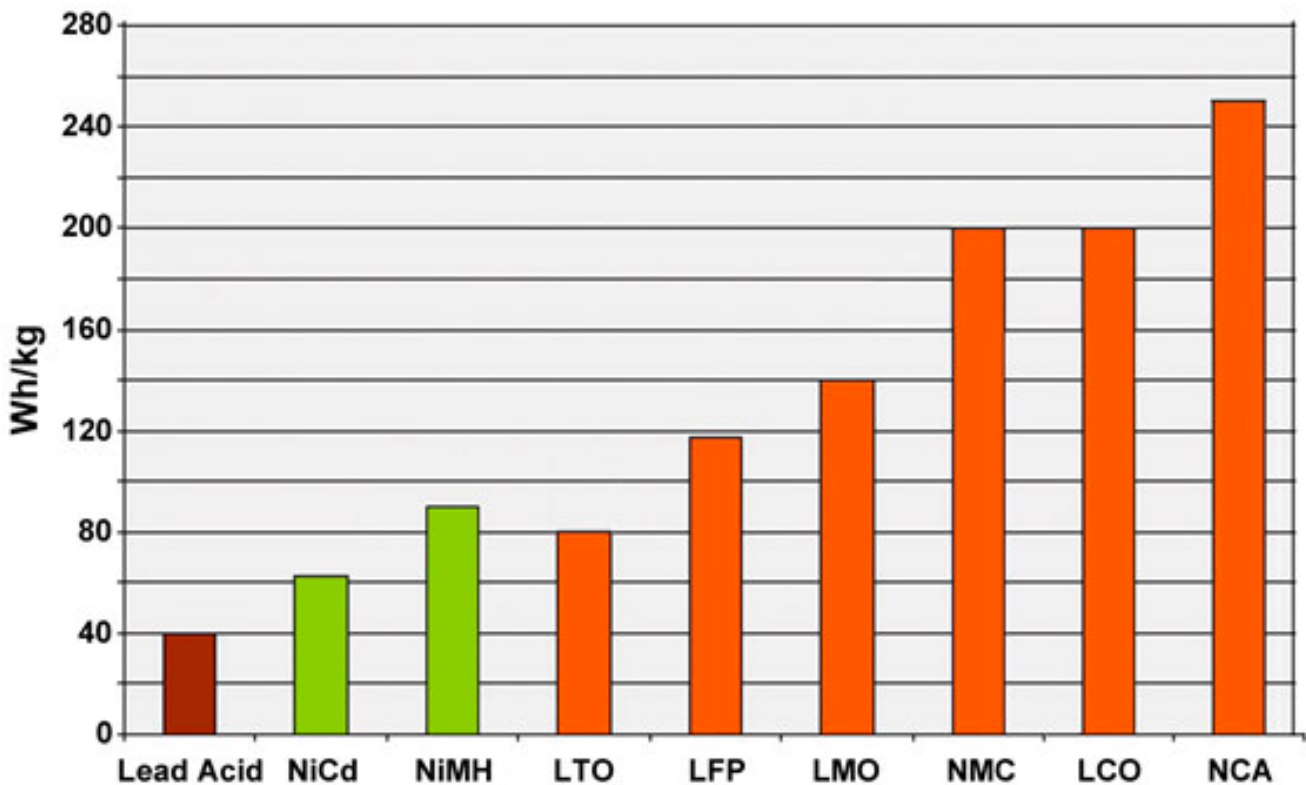
Lithiumtitanaat: Kathode kan lithiummangaanoxide of NMC zijn; Li_2TiO_3 (titanaat) anode Verkorte vorm: LTO of Li-titanaat In de handel verkrijgbaar sinds ongeveer 2008.	
Spanningen	2,40V nominaal; typisch werkbereik 1,8-2,85V/cel
Specifieke energie (capaciteit)	50–80Wh/kg
Opladen (C-snelheid)	1C typisch; 5C maximaal, laadt op tot 2,85V
Ontladen (C-snelheid)	10C mogelijk, 30C 5s puls; 1,80V cut-off op LCO/LTO
Levensduur	3,000–7,000
Thermische runaway	Een van de veiligste Li-ion-batterijen
Kosten	~\$1,005 per kWh[1]
Toepassingen	UPS, elektrische aandrijving (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), straatverlichting op zonne-energie
Commentaar bij update 2019:	Lange levensduur, snel opladen, breed temperatuurbereik, maar lage specifieke energie en duur. Een van de veiligste Li-ion-batterijen. Mogelijkheid tot ultrasnel laden; hoge kosten beperken speciale toepassingen.

Tabel 14: Kenmerken van lithiumnikkel-kobalt-aluminiumoxide

Batterijen van de toekomst

- / Solid-state Li-ion: Hoge specifieke energie maar slechte lading en veiligheid.
- / Lithium-zwavel: Hoge specifieke energie maar slechte levensduur en slechte lading
- / Lithium-lucht: Hoge specifieke energie maar slechte lading, heeft schone lucht nodig om te ademen en heeft een korte levensduur.

Figuur 15 vergelijkt de specifieke energie van systemen op basis van lood, nikkel en lithium. Hoewel Li-aluminium (NCA) de duidelijke winnaar is door meer capaciteit op te slaan dan andere systemen, geldt dit alleen voor de specifieke energie. Op het gebied van specifiek vermogen en thermische stabiliteit zijn Li-mangaan (LMO) en Li-fosfaat (LFP) superieur. Li-titanaat (LTO) heeft misschien een lage capaciteit, maar deze chemie gaat langer mee dan de meeste andere accu's op het gebied van levensduur en heeft ook de beste prestaties bij koude temperaturen. In de richting van de elektrische aandrijflijn zullen veiligheid en levensduur het winnen van capaciteit. (LCO staat voor Li-kobalt, het oorspronkelijke Li-ion).



Figuur 15: Typische specifieke energie van lood-, nikkel- en lithiumbatterijen. NCA heeft de hoogste specifieke energie; mangaan en fosfaat zijn echter superieur op het gebied van specifiek vermogen en thermische stabiliteit. Li-titanaat heeft de beste levensduur. Met dank aan Cadex

References

[1] Source: RWTH, Aachen

Last Updated: 22-Oct-2021