



## Utvärdering av batteriteknik Med fokus på det optimala batteripaketet

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Elektroingenjör*

***Sonny Eriksson***

Institutionen för signaler och system  
Avdelningen för reglerteknik, automation och mekatronik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige, 2014

## Förord

Examensarbetet är utfört för elektroingenjörsprogrammet, på Chalmers tekniska högskola, som omfattar 3 års studier. Arbetet omfattar totalt 15 högskolepoäng och medverkande företag är Reac AB i Åmål.

Litiumjonbatterier är ett område som ständigt förnyas och därav är det av yppersta vikt att företag håller sig uppdaterade med den senaste forskningen. Denna rapport bör vara aktuell i åtminstone ett par år framöver. Svenska företag skulle kunna dra nytta av de enkla metoder som finns beskrivna i denna rapport där överdimensionering ihop med anpassade kontrollsystem är nyckeln till god prestanda i nuläget.

I omfattande efterforskningar på Chalmers bibliotek har inte en enda sammanfattande bok eller rapport kunnat leverera de viktiga fakta i kring litiumjonbatterier som finnes i nedanstående rapport. Böckerna eller rapporterna har i huvudsak varit riktade till studenter och forskare i syfte att vara till grund för, och att bistå till fortsatt, forskning. Därav är just denna rapport unik eftersom den tjänar som en sammanställning av viktiga aspekter rörande litiumjonbatterier och att den är mera riktad mot tillverkningsföretag av litiumjonbatteripaket.

Tack till Johan Olsson och Mikael Grufman på Reac AB deras hjälp med att initiera och finna grund till examensarbetet. Tack till forskaren Fredrik Larsson för intervjun i kring litiumjonbatterier. Tack till handledare Lennart Widén. Och tack till mor och far för mat, logi och trevligt sällskap.

## **Sammanfattning**

Denna rapport utvärderar olika batterityper och då främst litiumjonbatterier. Syftet är att välja batteripaket för eldrivna rullstolar.

Säkerheten är av största vikt för val av batteripaketet. Det får inte hända en olycka då rörelseförmågan hos de flesta användare är begränsad.

Rapporten beskriver grundläggande fakta kring batteriteknik som ett nystartat batteripaketsföretag behöver för att kunna välja, samt att dimensionera ett lämpligt batteripaket. Olika aspekter presenteras som måste övervägas för att uppnå ett batteripaket av främsta kvalitet, bland annat laddningsteknik, spänningsbegränsning och passiv eller aktiv kylning.

Rapporten innehåller summeringar av den senaste litiumjonbatteri- forskningen i form av nya säkerhetslösningar samt metoder för att optimera säkerhet och prestanda. Det är forskning kring en gryende teknik som för var dag öppnar för nyare och bättre alternativ.

I resultatet sammanställs tre olika alternativ som alla uppfyller krav på säkerhet, kostnad och totalkapacitet. Dessutom berörs fördelar och nackdelar med ett eget tillverkat batteriövervakningssystem.

## **Abstract**

In this report different kinds of battery technologies are examined, especially the li-ion technology. This in purpose of choosing a battery pack for motorized wheelchairs.

The top level of priority is the safety aspect. An accident regarding a fire or an explosion cannot occur because the user may be limited to the wheelchair due to functional disabilities. In this report a newly founded battery pack manufacturer can gain knowledge of fundamental facts which is necessary to build and optimize a battery pack.

Different aspects are taken into account to achieve a battery pack of the highest performance level. Aspects such as charging techniques, SOC limiting and whether or not active cooling is needed, etc.

The report contains summaries of the latest scientific reports regarding li-ion with new safety solutions and methods to optimize performance. The li-ion technology are still under development and new and better alternatives are possible as time goes on.

As result three alternatives are presented which achieves the criteria of safety, total capacity and cost effectiveness. In addition pros and cons of manufacturing an own battery-management-system are summarized.

## Innehåll

Förkortningar och terminologier.....	1
1.0 INLEDNING.....	2
1.1 Bakgrund.....	2
1.2 Syfte.....	3
1.3 Avgränsningar.....	3
1.4 Precisering av frågeställningen.....	4
2.0 METOD.....	5
3.0 STÖDJANDE FAKTA FÖR VAL AV BATTERITEKNIK.....	6
3.0.1 Genomgång av batteriteknologier.....	6
3.0.2 Peukerteffektens betydelse på blybatterier och LJBer.....	7
3.0.3 LJBer och kyla.....	9
3.0.4 Simulering av en eldriven skoter med LJB eller blybatterier.....	10
3.1 Mer om litiumjonbatteriet.....	13
3.1.1 Viktiga certifikationstester för ett LJB paket.....	14
3.1.2 Koppling av battericeller.....	15
3.1.3 Olika cellarkitekturer för LJBer.....	16
3.1.4 De olika cellkemierna för LJBer.....	17
3.1.5 Batteriövervakningssystem.....	23
3.1.6 Förhållanden som ökar LJBernas livslängd.....	26
3.1.7 Viktig kunskap kring urladdning.....	29
3.1.8 Laddningsteknik.....	30
3.1.9 Luftkylning av LJB-paket.....	36
3.1.10 Viktminsknings effekt på effektförbrukningen.....	42
3.1.11 Utredning av den regenerativa inbromsningens effekt.....	44
3.2 Fakta för val av ett säkert LJBpaket.....	45
3.2.1 Lager på lager av skyddsmekanismer.....	49
3.2.2 Den inneboende säkerheten.....	50
3.2.3 Effektiva säkerhetslösningar för LJBceller och LJBpaket.....	61
3.2.4 Framtida skyddsmekanismer hos LJBceller och LJBpaket.....	73
3.2.5 Ett patentverk inriktat på batteriteknik.....	73
4.0 Slutsatser.....	74
Kompletterande läsning.....	78
Bilagor.....	86
Intervju med Fredrik Larsson.....	86

## Förkortningar och terminologier

Ah	Kapacitets bemärkning som betyder 1 Ampere konstant i en timme
Anod	Negativ elektrod på cellen
BMS	Batteri- övervakningssystem(eng. battery management system)
Cykelliv	Hur många laddnings och urladdningscykler det krävs för att batteriet skall förlora funktionsdugligheten
DOD	Urladdningsdjupet mätt i procent(eng. depth of discharge)
Kalenderliv	Hur länge ett batteri kan förvaras innan det förlorat funktionsdugligheten
Katod	Positiv elektrod på cellen
LCO	Litium- koboltoxid
LFP	Litium- järnfosfat
LJB	Litiumjonbatteri
LMO	Litium- manganoxid
LTO	Litium- titanat
NCA	Litium- nickel-kobolt-aluminiumoxid
NMC	Litium- nickel-mangan-kobolt
PCM	Phase- change- materials som absorberar värme ikring dess smältpunkt
SEI	Det solida-elektrolyt-mellanlagret som bildas vid reaktion mellan anod och elektrolyt under den första cykeln och som sedan fortsätter att växa
SOC	Laddningsgrad(eng. state of charge) mätt i procent av total kapacitet
SOH	Hälsograd(eng. state of health) mätt i procent av ursprunglig kapacitet
Tjänstliv	Tid i bruk för batteriet

## INLEDNING

Projektarbetet görs i företaget Reac ABs vägnar för att hjälpa dem i deras val av batterityp till eldrivna rullstolar. De är framförallt intresserade av litiumjonbatterier, LJBer, som är en batteriteknologi de ej besitter erfarenhet av. Reac ABs specifikation är ett batteripaket på 60 Ah och den måste klara av att leverera en ström på 120 A. Handledare är Johan Olsson och Mikael Grufman.

## Bakgrund

Litiumjon- batteriet kräver mycket lite underhåll jämfört med de andra batteriteknologierna, så som nickelkadmium- och blybatterier. Den saknar minneseffekt, behöver ingen schemalagd laddningstid och har en låg självurladdning jämfört med nickelkadmium- batteriet. Dessutom väger LJBer lite och miljöpåverkan är låg jämfört med blybatterier. De skulle vara ett bra alternativ till eldrivna rullstolar om de är säkra och om det är enkelt att avläsa återstående laddning på dem. Reac AB önskar ta fram kontrollösningar för elektriska rullstolar. Man vill även kunna erbjuda ett batteriövervakningssystem samt tillhörande LJB paket till rullstolarna för att effektivt och noggrant förutsäga den kvarvarande laddningen. LJB som numera används i de flesta tekniska områden såsom datorer, telefoner och fordon m.m. Kan dessa då även implementeras för rullstolar.

Det är svårt att avgöra exakt hur mycket laddning som finns kvar i ett LJB eftersom spänningen inte är i ett linjärt förhållande gentemot kvarvarande laddning. Även om den olinjära spänningskurvan finns bokförd gentemot kvarvarande laddning så motsvarar den spänningen endast den öppna cellspänningen. Förutom detta så åldras batteriet vilket gör att motsvarande spänning svarar för en högre kvarvarande laddning än vad som är fallet.

Brandrisken under laddning och urladdning måste vara minimal eftersom rörelseförmågan hos användaren oftast är begränsad.

Möjligtvis går det med ett mycket sofistikerat säkerhetssystem att göra Litiumkoltoxid, LCO, batteriet tillräckligt säkert för att våga använda det. Detta skall utredas genom att studera de olika batterikatodernas egenskaper och olika tekniska lösningar som komplement ihop med dem. Bland annat har biltillverkaren Tesla Motors gjort en lösning på deras LCO celler som möjliggör användning i deras bilar. De har bland annat säkringar som förhindrar kortslutning hos varje cell samt att de har kapslat in varje cell i ett metallhölje. Fördelen med LCO är att en mycket längre körsträcka skulle uppnås.

Kylningsförmågan är en viktig aspekt för både säkerhet och ett långt cykelliv. Cykelliv är hur många laddnings och urladdningscykler det krävs för att batteriet skall förlora funktionsdugligheten. Det kan röra sig om 60% av maxkapaciteten exempelvis. Kylning kan mildra reaktionen av en termisk rusning i viss mån och med lägre temperaturer desto längre livslängd. Men med ökad kylningseffekt kommer ökade kostnader. Det kan räcka med god placering av cellerna, material mellan cellerna som absorberar värme, aktiv luftkylning i form av fläktar eller aktiv vätskekylning med hjälp av pumpar. Det första alternativet vore pris- och energimässigt bäst då det är ett passivt kylsystem.

Det råder dessutom vissa krav på de eldrivna rullstolarna i allmänhet. De skall t ex kunna stå uppladdade i 4 månader för att sedan kunna köras. Detta gör att läckströmmen på de olika LJB typerna och övervakningssystemen inte får vara för höga.

## **Syfte**

Projektets huvudsakliga syfte är ta fram ett förslag på ett batteripaket som klarar av Reac ABs specifikation samt är optimerad för en så god säkerhet, kapacitet och kostnadseffektivitet som möjligt. Rapporten skall förmedla hur Reac AB med enkla medel kan ta fram och utveckla detta optimerade batteripaket genom att få tillgång till så väl grundläggande kunskap som de senaste teknikerna och metoderna som används. Detta för att optimera batteripaketets prestanda och kvalitet. Värt att nämna är att utvecklingen är mycket stark inom LJB teknologin och att förutsättningarna förändras allt eftersom ny forskning tillkommer. Det har hänt mycket under de senaste 5 åren som öppnar upp för nya lösningar och alternativ som inte var tillgängliga tidigare. Ytterligare utveckling kommer att öppna upp alternativ som inte går att ta i bruk i dagens läge. Än så länge är LJB tekniken av en flyktig karaktär i avseende av säkerhet. Det gäller alltså att vara uppdaterad med den senaste fakta för att kunna utveckla det bästa LJB paketet för specifikt ändamål, lik väl som att ha den grundläggande förståelsen kring LJBer.

## **Avgränsningar**

Projektet blir teoretiskt inriktat, dels krävs det för att förklara varför val av batteri i fråga och dels för att denna kunskap behövs hos företaget. Det går heller inte att avgöra dessa mycket specifika frågor utan att till fullo förstå och avväga de teoretiska aspekterna bakom respektive batteri och laddarteknologi. Det kräver alltså en djup förståelse för att med säkerhet kunna avgöra vilken batterityp och batteriteknik som lämpar sig bäst. Detta projekt är endast ett utvärderingsprojekt och avgränsar sig genom att inte påbörja konstruktion av ett batteriövervakningssystem och batteripaket. Batteriövervakningsmetoder hanteras endast ytligt då tyngdpunkt ligger vid att ta fram förslag på specifika batteripaketsalternativ.



## Precisering av frågeställningen

Vad är fördelarna respektive nackdelarna jämfört med de blybatterier som sitter i dagens eldrivna rullstolar?

Hur mycket sämre blir då förmågan att förutsäga batteriets laddning jämfört med ett vanligt blybatteri som används i dagens eldrivna rullstolar?

Därefter tas brandrisken i beaktning. Kan man använda ett vanligt LCO LJB, som har högre energidensitet, eller skall något mera brandsäkert alternativ som LiFePO<sub>4</sub>, litium järnfosfat (LFP), NickelManganKoboltOxid, NMC, eller litium- manganoxid (LMO) användas istället?

Finns det någon teknisk lösning som minimerar brandrisken eller någon annan typ av litiumjon-batterier som är bättre lämpad?

Går det att skapa samma säkra miljö för LCO celler som i Teslas batteri paket och för ett rimligt pris?

Eller måste den säkraste cellen ihop med de kraftfullaste säkerhetsmekanismerna väljas för att garantera att en incident inte sker?

De olika cellgeometriernas för och nackdelar kommer att utredas i avseende av specifik energi och säkerhet. Vilken är att föredra i detta sammanhang?

Vilken typ av aktiv eller passiv kylning är att föredra?

Kommer LJBet att kunna köras vid låga temperaturer? Kanske med lite hjälp av god cellkemi eller värmare.

LJBer har visats vara känsliga för stressande förhållanden, t ex då de laddas ur samtidigt som de laddas. Är de då känsliga mot regenerativ inbromsning med snabba växlingar? Energin måste kunna överföras till något, vad annars i sådana fall?

Är det möjligt för Reac AB att ta fram ett eget batteriövervakningssystem som kan uppfylla kraven på önskad noggrannhet eller är det bättre att anlita exempelvis Texas Instrument och något av deras övervaknings system. Hur noggranna är deras lösningar?

## **METOD**

Litteraturstudier har utgjort den huvudsakliga delen utav arbetet. Framst i projektets inledningsfas men även under projektets när nya frågor väcktes. Litteraturen har hämtats från erkända organisationer, forskningsrapporter samt tillverkningsföretag i syfte att samla ihop ett noggrant urval av fakta för att stärka rapportens resultat och slutsatser.

En intervju med forskare Fredrik Larsson ägde rum för att få en indikation om efterforskningarna var i rätt riktning.

Forskningsunderlaget har noga avvägts för att presentera diverse alternativ och valmöjligheter samt för att finna nya frågor och svar rörande prestanda och säkerhet hos LJB paket.

# STÖDJANDE FAKTA FÖR VAL AV BATTERITEKNIK

## Genomgång av batteriteknologier

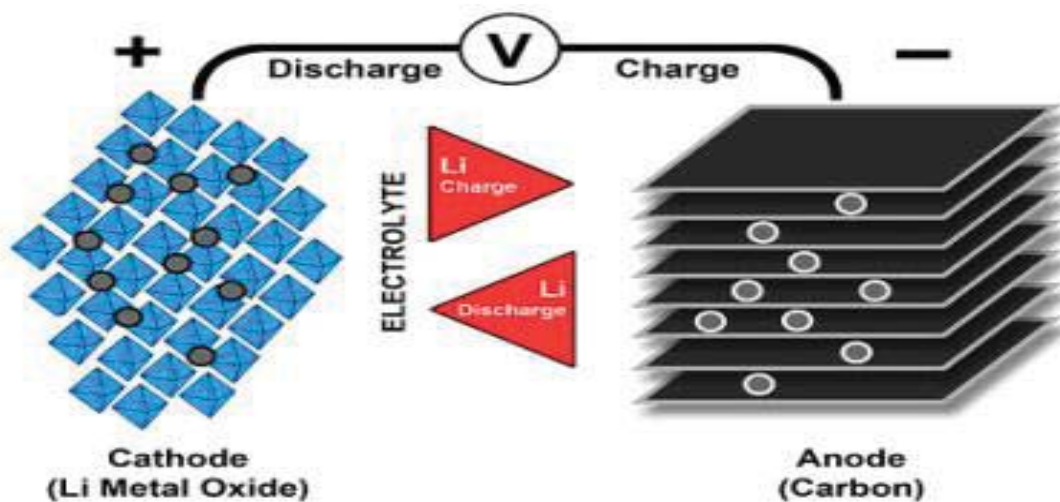
Blybatterier är den äldsta av de moderna batterisystemen och började användas redan runt år 1880. De är slittåliga och mycket billiga att köpa in. De har tyvärr en mycket låg energidensitet på mellan 30 - 50 Wh/ kg samt ett cykelliv på omkring 300 - 500 cykler. Uppladdningstiden är mellan 8 - 16 timmar. Självladdningen är dock mycket god på endast 5 % per månad vid rumstemperatur. De används för närvarande i rullstolar, golfbilar, nödtändning och för avbrottsfri kraft(UPS)(1).

Nickel-cadmium (NiCd) är en mogen och välförstådd teknologi som används när långtidsanvändning, höga urladdningsströmmar, extrema temperaturer och ekonomiskt pris är av stor betydelse. På grund av miljöskäl väljs dock NiCd bort mot andra kemier. Självladdningstiden per månad är 20 %. Vanliga användningsområden är elverktyg, tvåvägs-radio, flyg och avbrottsfri kraft(UPS)(1).

Nickel-metall-hydrid(NiMH) är en bra ersättare till NiCd och har en högre specifik energi och mindre miljöfarliga ämnen. Självladdningstiden per månad är 30 %. Den används i medicinska instrument, hybridbilar och i industriella applikationer(1).

Litium-jon-batterierna (LJB) är det mest lovande batterisystemet och används i portabel elektronik liksom fordon. Inköpspriset är dock högre än nickel- och blybatterier och för att vara säkra att använda så måste den ha en skyddskrets(1).

LJBer använder sig precis som bly- och nickelbaserade system av en katod som är den positiva elektroden och en anod som då är den negativa elektroden. Där emellan finns en elektrolyt som agerar som en ledare. Katoden är en metalloxid och anoden består i regel av poröst kol. Under urladdningen flödar joner från anoden till katoden genom elektrolyten och separatorn, se fig 1. Under laddning har jonerna den motsatta riktningen. Alltså under urladdningen så går jonerna till katoden vilket betyder att den blir plusladdad. Detta medför att utifrån så går elektronerna från anod till katod och strömmen ifrån katod till anod(2).



*Fig 1. Joner som pendlar mellan katod och anod vid laddning och urladdning. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(2).*

Alla katodmaterialen äger en inneboende gräns för dess maximala energitäthet. Den teoretiska kapaciteten för litiumjonteknologin är 2000 kWh vilket är 10 gånger mer än dagens kommersiella batterier. Sonys första batteri använde "coke" som utvinns ut stenkol men sedan 1997 så byttes detta mot grafit som gav en mycket flackare spänningskurva och på så vis gick det att få ut lite mera energi. Det är den typ av grafit som används i blyertspennor. Det näst mest vanliga anoden är hård och mjuk kol. Nano kolrör finns också men de är inte kommersiellt tillgängliga. I fig 2 så illustreras spänningskurvan för den tidiga coke-anoden jämfört med dagens grafitanod(2).

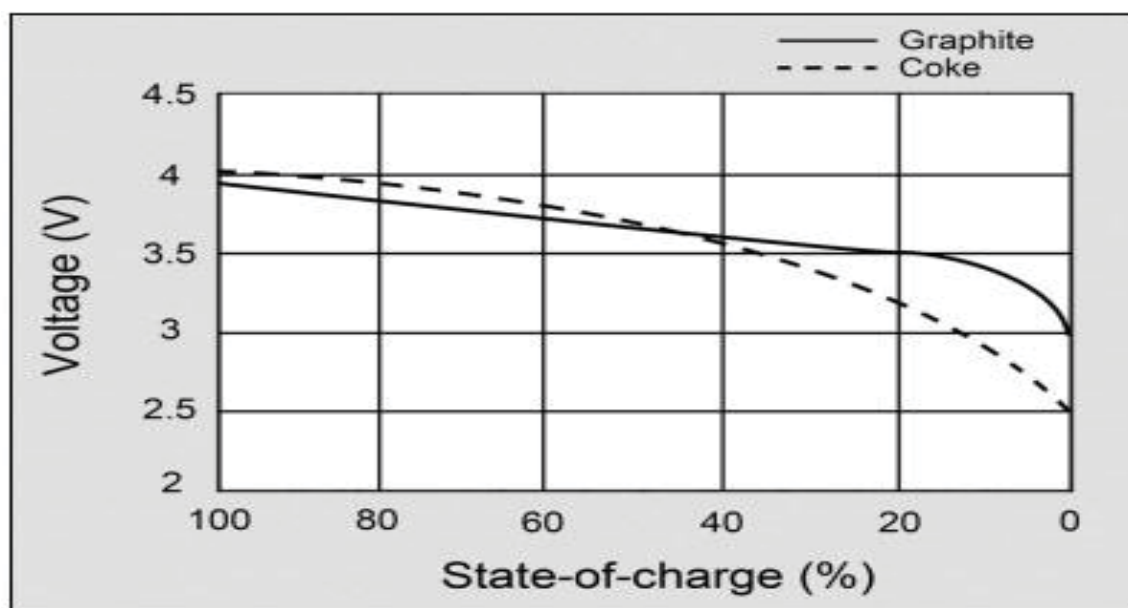


Fig 2. Spänning i förhållande till SOC per cell hos LJB. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(2).

## Peukerteffektens betydelse på blybatterier och LJBer

I slutet av 1700-talet bestämdes att när ett batteri förses med en ström på en Ampere så passerar en coulomb eller laddning per sekund och på 10 sekunder 10 coulomb och så vidare. Batteritillverkarna använder sig idag av en så kalla C-faktor för att beskriva hur hög batteriströmmen är. För det mesta är batterierna märkta i en 1 C-faktor vilket innebär att ett batteri kapacitet 1000 mAh kan laddas ur med en ström på 1 ampere under en timmes tid. Laddas den ur med 0,5C så skall den kunna förse 0,5 Ampere i 2 timmar. Vid 2C skall den kunna förse 2 A i en halvtimme(3).

På grund av peukerteffekten är det inte så det fungerar i praktiken. Den gör att den inre resistansen stiger ju högre urladdningsströmmen är. För att demonstrera detta kan batterikapaciteten mätas i en batterianalysator, som fungerar så att den laddar ur ett fulladdat batteri i en viss C faktor. Vid 1C faktor så uppnås 100% om batteriet håller i en timma. Håller den längre uppnås över hundra procent och lägre mindre än 100 %. Oftast uppnår inte helt nya batterier 100% vid 1C. Peukerteffekten illustreras enkelt genom att ladda ur ett batteri, som faktiskt uppnår 100 % vid ett 1C, med 2C. Då skall den enligt tidigare resonemang kunna hålla i en halvtimme men på grund av peukerteffekten gör den tyvärr inte detta. Viss kapacitet omvandlas till värme på grund av den ökade inre resistansen och som resultat blir att batteriet endast kan leverera 95 % av sin energi, ibland mindre. Vid 0,5 C sker det motsatta och batteriet klarar av att leverera mer än 100 % av sin kapacitet(3) .

Blybatterier lider betydligt mer av denna effekt än LJBer gör vilket gör att tillverkarna använder sig av riktigt låga C grader, 0,05 C (20 timmar), för att få en lovande märkkapacitet. Inte ens då är det vanligt att de når upp till en kapacitet på 100 %. Dock förser tillverkarna informationen kapacitets offset för avvikelser ifrån märkvärdet. I fig 3 visas ett exempel för hur urladdningskurvan för ett blybatteri med olika C grad(3).

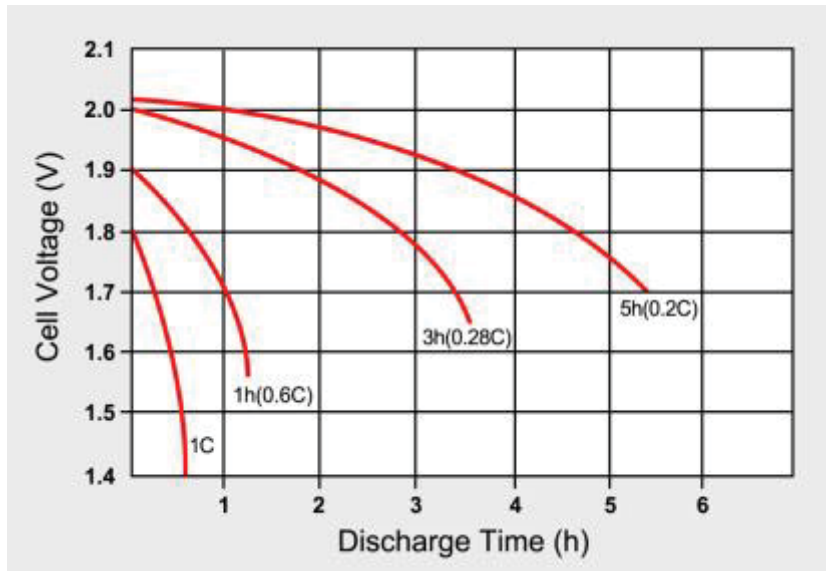


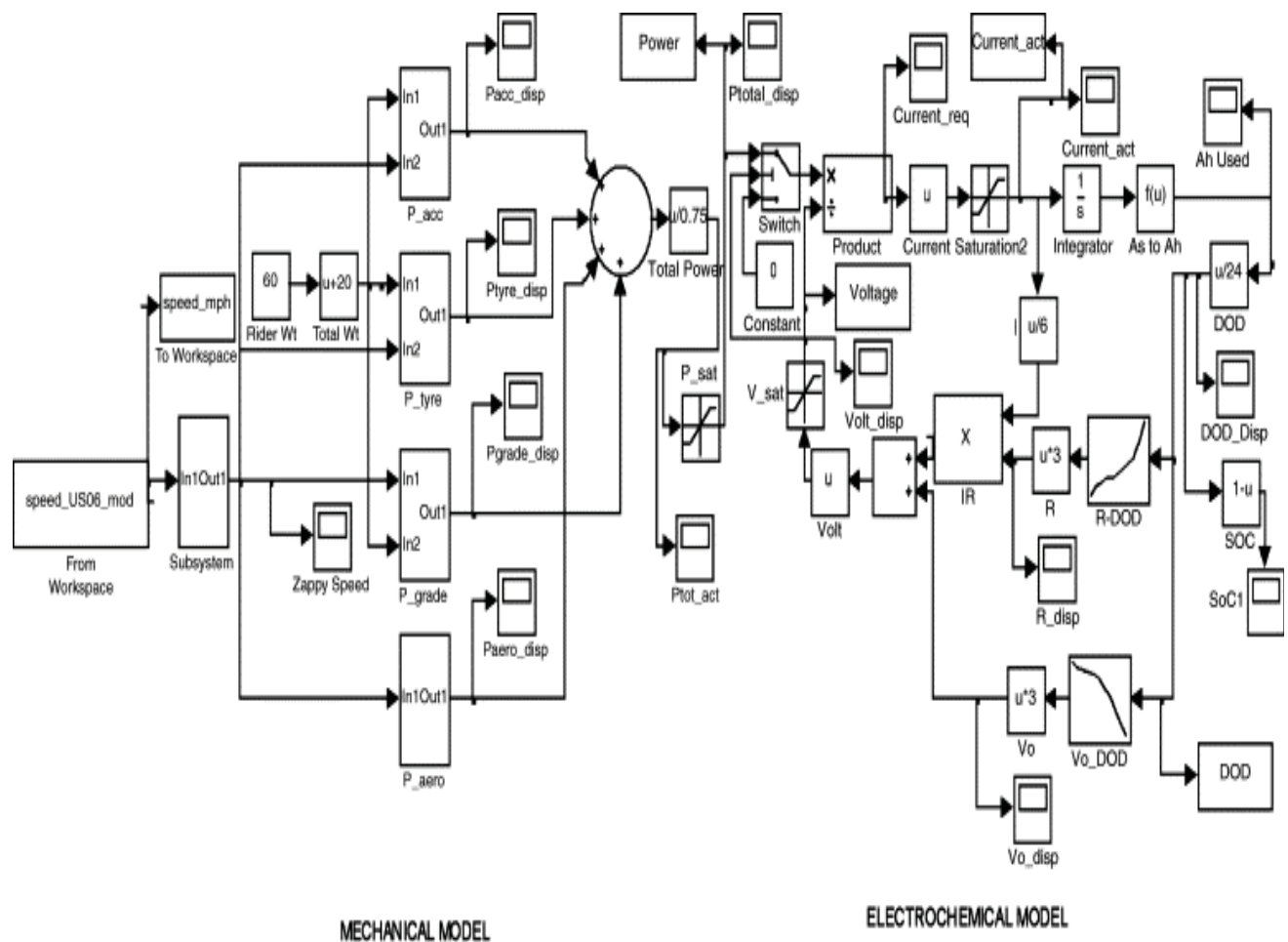
Fig 3. Urladdningskurva för ett blybatterier vid olika C-grad. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den (3).

## LJBer och kyla

LJBer arbetar normalt mellan ett temperatur område mellan  $-20^{\circ}\text{C}$  till  $60^{\circ}\text{C}$ . Under  $-30^{\circ}\text{C}$  så minskar cellkapaciteten på grund av att den inre resistansen hos elektrolyten ökar. Detta skadar dock inte batteriet utan försämrar endast dess prestanda. Därför kan det vara bra att designa LJB paket med en hög kapacitet så att det åtminstone går att använda applikationen under låga temperaturer(4).

En del LJB applikationer kan helt sluta att fungera vid  $-20^{\circ}\text{C}$ . Andra specialdesignade LJB paket är gjorda för att klara  $-40^{\circ}\text{C}$ . För att kunna uppnå detta så är en viktig del att begränsa applikationens effekt uttag vid låga temperaturer samt om det är möjligt öka LJBernas kapacitet(5).

## Simulering av en eldriven skoter med LJB eller blybatterier



MECHANICAL MODEL

ELECTROCHEMICAL MODEL

### Simulation of Li-ion Battery in a Zappy Electric Scooter

Fig 4. Simuleringsmodellen av Scootern Zappy med ett LJB som drivmedel. Detta är utfört i Simulink(6). © 2006 Elsevier

I fig 4 visas den mekaniska och elektrokemiska modellen av den eldrivna (LJB) skotern Zappy som utvecklades i Matlab och Simulink och kom väl att efterlikna verkligheten. Scootern väger 20 kg och föraren 60 kg i simuleringen. Den kom att testas mot ett fälttest med blybatteri. Motorn är märkt 0,5 hästkrafter (373 w). Motorn kan dock dra korta pulser som överträffar märk effekten. Kravet på genomsnitts effekten ligger mellan 175 - 225 W. LJBet är simulerat att vara märkt 24 Ah(6).

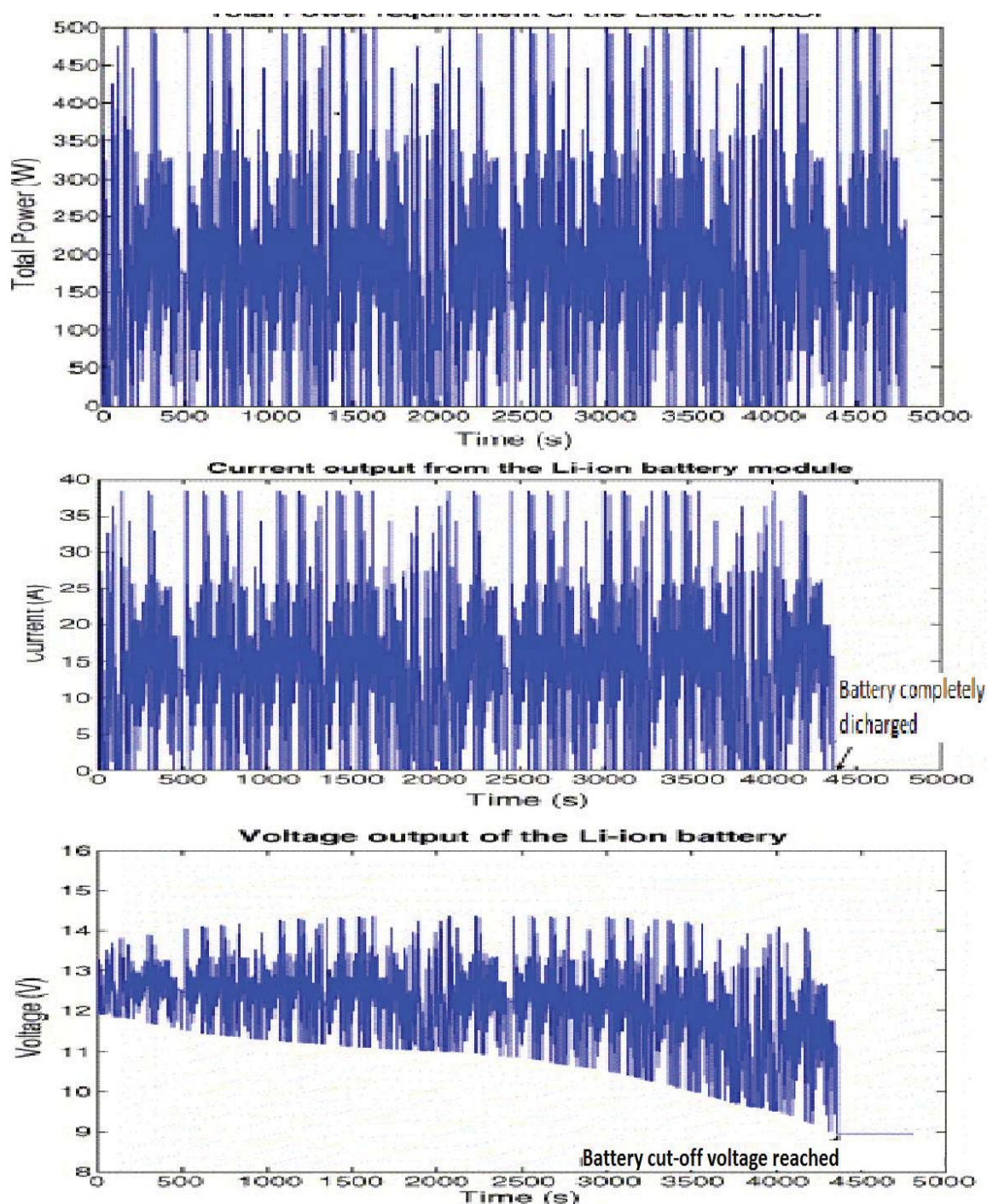


Fig 5. Effekt, ström och spännings svar ifrån Simulinksimuleringen av skotern(6). © 2006 Elsevier

Utefter det ovanstående kraftkravet ifrån den motorns moment i den översta grafen, i fig 5, så svarar LJBet med den mellersta ström förbrukningsgrafan och den understa spänningsgrafan. Genomsnittsströmmen var 15-18 A. Genomsnittsspänningen visade sig vara 12,5 V och märk spänningen var 11,1 V. Vissa spänningstoppar kom upp till 14 V. Det är viktigt att inte spänningstopparna blir högre än detta. Vid 9 V har simuleringen som krav att stänga av batteriet. Detta skedde vid 4400 sekunder och då var DOD 72 %. LJBet skulle faktiskt klara det längre eftersom simuleringen var inställd på att ha en inre resistans som motsvarar 1 C. Egentligen kördes batteriet i en 0,75 C-grad(6).



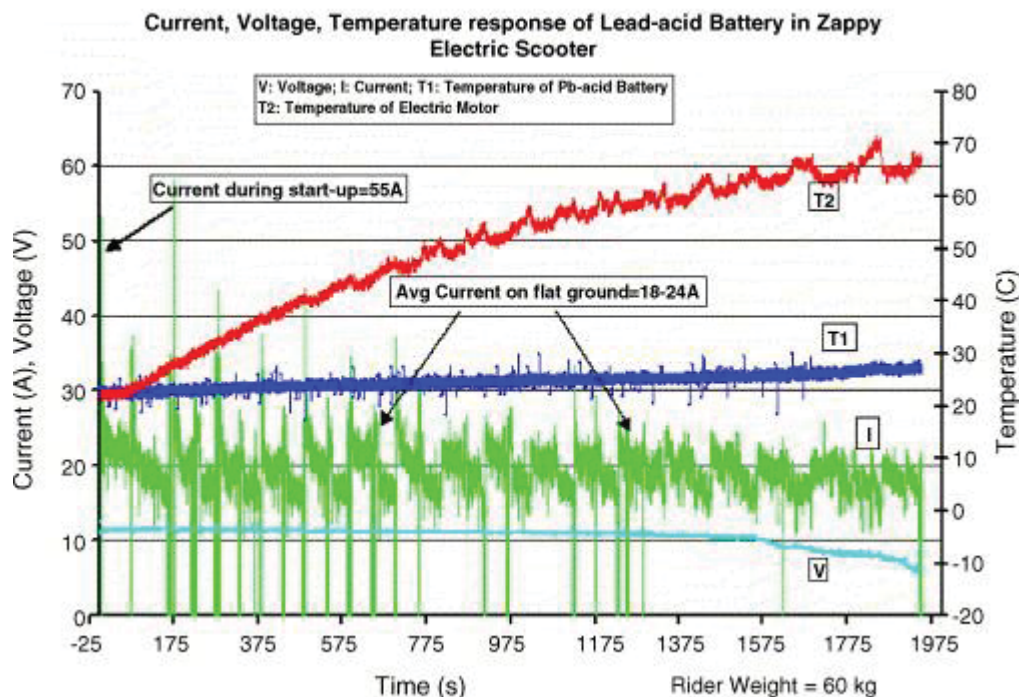


Fig 6. Temperatur, ström och spännings kurvor för fullständig körcykel(6).  
© 2006 Elsevier

I bilden ovan visas resultatet ifrån ett fälttest med ett blybatteri som är märkt 18 Ah och 12 V. I bilden ovan kan utläsas att blybatteriet blev urladdat något högre än 1 C och borde i ideala fall klara att laddas ur under 2770 s - 3600 s. Den klarade dock endast 1950 s. Detta beror på peukert effekten och att den är märkt efter en 5 timmars urladdningstid vilket kraftigt ökar dess kapacitet(6).

## Blybatteri för eldrivna rullstolar

M24 SLD G FT ,12 V, är namnet på ett gelblybatteri som är optimerat för ett längre cykelliv. Den brukar användas för eldrivna rullstolar och liknande. Batteriet kännetecknas av dess större tyngd och den väger 23,6 kg. Den är märkt som ett 85 Ah batteri men detta vid urladdning på 1/100C. Vid 1/5C så kom är den ner på 63 Ah vilket matchar Reac ABs specifikation väl. Två sådana behövs och de väger då 47,2 kg tillsammans, kostar mellan 3,200 och 3,400 kronor, de har ett cykelliv på 700 cykler vilket är ändå är relativt gott och innebär att de brukar då bytas ut vid ungefär 3 års användning(7).

## Mer om litiumjonbatteriet

Det första primära, icke laddningsbara, litiumbatteriet blev kommersiellt tillgängligt i början på 70 talet. Därefter inleddes försök med det första sekundära, laddningsbara, litiumbatteriet men försöken misslyckades på grund av de instabila egenskaper som litiummetallen orsakade. Litium är den lättaste av alla metalliska grundämnen, har den största elektrokemiska potentialen och har mest specifik energi per vikt. Problemet är att under laddningscykler så ansamlas dendriter vid anoden som punkterar separatorn och orsakar kortslutning mellan elektroderna(2). Dendriter är litiumfibrer som bildas under upprepad laddnings och urladdningscykler på kolanoden(8). Detta orsakar en termisk rusning som innebär att temperaturen stiger snabbt och närmar sig litiumets smältpunkt(2).

Instabiliteten hos litiummetall, speciellt under laddning gjorde att forskningen bytte spår till en icke metallisk lösning genom att använda litiumjoner. Den har en betydligt lägre specifik energi än litiummetall men den är säker om den används ihop med vissa skyddskretsar. Sony var först med att släppa det första kommersiella litiumjon batteriet (LJB) år 1991. Samtidigt fortsätter forskningen att försöka utveckla ett säkert laddningsbart litiummetallbatteri(2). Om detta problem löses finns ett batteri med mycket hög specifikenergi och -kraft(1).

Det finns massor av olika katodmaterial i teorin och i laboratoriernas värld men endast några få kommersiella sorter. Produktionen för olika koboltblandningar står mestadels Japan för medan Kina står för den huvudsakliga produktionen av LFP(9).

Den specifika energin är minst dubbelt så hög som de NiCd och har en nominell spänning på 3,6 volt. Den erbjuder en mycket god lastkaraktistik och har en flack urladdningskurva vilket gör att det går effektivt att utnyttja den laddade energin. Spänningen varierar mellan 3.7 och 2.8 V vilket är ett åtråvärt spektrum. Detta är dock goda egenskaper som NiCd också har. Den börjar på 1,25 V och går ner till 1 V per cell(2) .

Kostnaderna för LJB celler sjunker allt mer. 1994 var kostnaden för en vanlig 18650 cell, 18 mm i diameter och 650 mm i höjd,10\$ och hade en kapacitet på 1100 mAh. 2001 var den kostnaden 2\$ och då hade kapaciteten stigit till 1900 mAh. Idag kan en energioptimerad cell ha över 3000 mAh och kosta ännu mindre än tidigare. Den är också relativt fri från giftigt material i sin konstruktion(3). Teslas Volts batteripaket kostar 8 000\$ vilket är en mycket stor del av den totala bilens kostnad på 41 000\$. Produktionskostnaden för eldrivna fordon kan reduceras kraftigt om batteri-kostnaden minskas(10).

2009 var 38 % av alla sekundära batterier LJBer. LJBer är underhållsfria vilket få batteri typer kan klassas för att vara. Ingen minneseffekt gör att inget utövande av påtvungna 100% DODs behövs. Självurladdningen är åtminstone hälften av ett nickelbaserat system.

För att få fram den nominella spänningen så laddas ett fullt laddat batteri, 4,2 volt, ur med 0.5 volts urladdningsström tills den når 3,0 volt. Medelspänningen över hela förloppet blir till den nominella spänningen(11). Se fig 5 över den elektriska potentialens momentanvärde för en skoters batteripaket. Potentialen varierar kraftigt beroende på effektuttaget(6).

Den nominella spänningen på 3,6 volt är bra eftersom den direkt kan ge kraft åt applikationer såsom mobiltelefoner och digitalkameror. Detta eftersom det var praktiskt då NiCd batterier har en spänning på 1,2 volt vilket medför att ett LJB ersätter 3 NiCa batterier vilket leder till förenklingar liksom kostnadsminskningar i flercellslösningar. Minus är som tidigare nämnts behovet av skyddskretsar för att undvika missbruk och det höga cellpriset(2). Används en högre märkning så anges en högre watt per timme på papperet och då också en bättre marknadsfördel. Trots detta använder applikationstillverkarna ändå 3.6 volt som märkspänning även om den egentliga märkspänningen i vissa fall är 3,7 V eller 3,8 V(11).

## **Viktiga certifikationstester för ett LJB paket**

Celltillverkare med gott anseende förser inte ocertifierade batteripaketstillverkare med celler. Detta på grund av de stora riskerna som förekommer om cellerna misshandlas. Att certifiera ett batteripaket för konsumentmarknaden och för flygtransport kostar någonstans mellan 10 000 - 20 000 \$. Ett dyrt pris med tanke på att försummelser inom batteriindustrin ändå är vanlig(12). För de bemyndigade laboratorerna som genomför testerna behöver 24 provexemplar av batteripaketet. 12 stycken nya och 12 stycken som har blivit cyklade 50 gånger. En annan källa säger att kostnaden för FNs batteripakets certifikation endast är mellan 1200 - 1500 \$ och att dessutom testlaboratoriet måste förse med 25 prov av batteripaketet(13).

Dessa höga kostnader gör att mindre företag avskräcks till att använda LJBer. Har dock företaget god expertis och känner sig säkra på sitt LJB paket så kan testerna avstås men då är det förbud mot att transportera produkten via flyg. Eftersom olyckor fortfarande inträffar under flygfrakten så kommer förmodligen kraven på LJBer öka i fortsättningen(12).

Det färdiga paketet måste testas som en enskild produkt oavsett vilka celler som används. Batteripaketet måste genomgå en elektrisk och mekanisk uppskattning för att kunna möta rekommendationerna för transport av farligt gods, för LJBer, med flygfrakt. Dessa reglerna har satts upp av FN. I de elektriska testerna utsätts paketet för hög hetta, överladdning, höga urladdningsströmmar och en elektrisk kortslutning. Under den mekaniska delen blir paketen krosstestade utsatta för höga slagkrafter, vibrationer och skakningar. FNs transport test kräver också höjd-, termisk stabilitets-, vibrations-, skak-, kortslutnings- och överladdningstest. FN transport arbetar i anslutning med Federala flyg administrationen (FAA), Förenta staternas avdelning för transtport (US DOT) och det internationella flygtransportsällskapet (IATA)(12).

Den uppskattade risken för att en termisk rusning är 1 på 10 miljoner celler. En termisk rusning är en ohejdbar temperatursigning som kan leda till att cellen ventilerar gaser, exploderar och fattar eld. Av de 140 olyckor som skett, sedan 1991 vid flygtransport av batterier, så visar att de flesta olyckor har skett på grund av olämpligt lastande och hantering av batterierna(14)(15). Av dessa 140 så var 3 av olyckorna elektriska rullstolar drivna av blybatterier varav ett var modernt gel batteri som fattade eld under urlastning vid flygplats(15).

En komplett utredning har hållit på i över ett år på JAL 787 planet som råkade ut för en LJB olycka. Utredningen förväntas vara klar om 3 månader ifrån och med den 14 januari 2014. Den förväntas kunna sätta upp nya säkerhetsriktlinjer för LJBer(16).

## Koppling av battericeller

För att få högre spänning och högre kapacitet seriekopplas respektive parallellkopplas cellerna ihop till önskvärd specifikation. Sitter 3 LJBer i serie så adderas deras spänningar men deras C grad blir fortfarande den samma och levererar fortfarande 2800 mA per timme. Parallellkopplas de däremot så kan de förse 7800 mA per timma men då har de bara en spänning på 3,6 V tillsammans. De första konfigurationen förkortas 3S1P den andra för 1S3P vilket betyder 3 i serie 1 i parallell och vice versa. Mellan varje cell sitter isolerande folie för att isolera både elektriskt och termiskt. Elektriskt för att undvika kortslutningar mellan cellerna och termiskt för att minska värmeöverföringsförmågan mellan cellerna. Det är mycket viktigt att använda samma batterikemi med lika stor kapacitet och aldrig blanda märken och storlekar. Inte heller celler av samma slag fast som ändå har andra elektrokemiska egenskaper efter tillverkning. En svagare cell skapar obalans och ännu större obalans om den sitter i serie. Ett batteri är bara så starkt som dess svagaste länk. Inte riktigt så om god skyddskrets finns att balansera cellerna men nästan. En svag cell i en kedja med starka celler blir uttröttad fortare. Under laddning kommer den svaga cellen att fyllas upp snabbare än de övriga och kommer istället att bli varm. Under urladdning kommer den att ta slut fortare vilket kommer leda till att den får en högre DOD än de andra(17).

Den totala spänningen ifrån batteripacket behöver inte överensstämma exakt med applikationen. Det viktiga är att den har en lite högre spänning. De flesta applikationer klarar av en något högre spänning än de specificerade(17).

En högre spänning gör att låg ledarstorlek kan hållas. Bilindustrin funderade på att göra om startbatteriernas spänning ifrån 12 volt till 36 V men på grund av logistik problem blev det inte så. De tidiga hybrid bilarna hade 148 V nu har de 450 - 500 volt. Det rör sig om runt 130 celler i serie och risken för att en av dem skall gå sönder är verklig. Nackdelen med högspänningsbatterier är om en cell går sönder så drar den med sig hela serien. Om det istället väljs att ha fler paralleller så fördelas risken bättre. En öppen cell bryter kretsen och en kortsluten reducerar den totala spänningen. Att ersätta en cell är inte så lätt eftersom en ny cell har högre kapacitet än de gamla vilket kan orsaka obalans. Att cellerna är hoplödda gör det än värre och därför brukar ett batteripaket utgöras av flera moduler så att om en cell går sönder byts modulen ut istället för hela batteripaketet. Ett smart batterisystem kan eventuellt koppla bort en defekt cell(17).

Om en cell i en serie av 4 bara har halva kapaciteten mot de övriga så blir den totala spänningen bara  $3,5 \cdot 3,7$  istället för  $4 \cdot 7$ . Detta gör att körtiden blir kortare eftersom skyddskretsen stänger av vid en viss spänning och stänger då i detta fall av för tidigt för de övriga 3. Anledningar till celldefekter kan vara en delvis kortsluten cell, som inombords själv förbrukar en viss del av dess uppladdade energi. En annan anledning kan vara torrläggning av en cell på grund av att elektrolyten har läckt ut till viss del eller på grund av vårdslöst användande(17).

I en parallell koppling är det inte så kritiskt med en cell som har en mycket hög inre resistans. De andra cellerna kan jobba på ändå. Dock så minskar det lastkapaciteten och kan liknas med en motor som har en cylinder ur funktion. Däremot är en elektrisk kortslutning kritisk eftersom den defekta cellen drar energi ifrån de övriga och orsakar större brandrisk. De flesta kortslutningar, vilka är vanliga, uttrycker sig endast i förhöjd självurladdning(17).

## Olika cellarkitekturer för LJBer

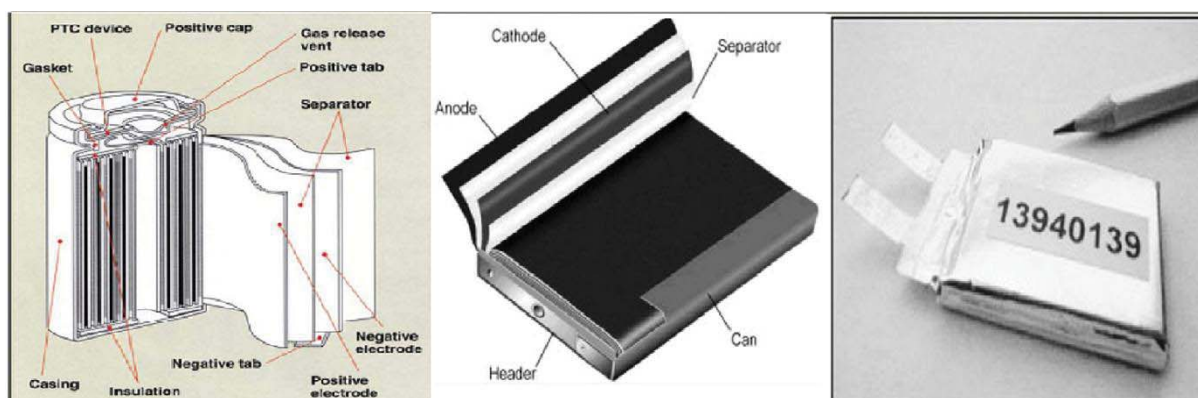


Fig 7. De olika typerna av cellarkitektur. Från vänster, cylindrisk cell, prismatisk cell och pouch cell. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(18).

I fig 7 ovan så illustreras de olika cell strukturerna. Nedan sammanfattas deras olika egenskaper(18).

Hur risken för en termisk rusning beror på cellstorlek och -geometri är ännu oklart eftersom det bara finns ringa tillverkningshistorik och erfarenheter ikring dessa. Det är även svårt att bedöma graden av misslyckanden hos varje enskild cell på grund av detta(19).

En cylindrisk cell har fördelar som goda cyklingsegenskaper, kalenderliv, och är ekonomiskt fördelaktigt att tillverka. Kalenderlivet är hur länge ett batteri kan förvaras innan det förlorat funktionsdugligheten. Nackdelar är att de är tunga och har en lägre packningsdensitet. Det kan dock vara till fördel för luftkyllning(20).

Den prismatiska har bättre packningstäthet på grund av den rektangulära formen men kan vara dyrare att tillverka. Den blir också svårare att kyla, vilket kan leda till lägre cykelliv(20).

De flesta polymerbatterierna har en arkitektur som är en blandning av litiumjon-batterier och polymerbatterier. Det finns många variationer av polymerbatterier men det sanna polymerbatteriet som har en elektrolyt som är helt torr har ännu inte kommit ut på marknaden. Det släpptes faktiskt sådana batterier runt år 2000. Polymerelektrolyten i denna liknar en plastliknande film som tillåter ett utbyte av joner mellan elektroderna och ersätter den traditionella porösa separatorn som är dränkt i elektrolyt. Problemet var att de hade en dålig ledningsförmåga vid rumstemperatur och var tvungna att värmas upp till 50 - 60 °C för en god funktion(21). Därför tillsattes en gel elektrolyt som gjorde att de fick ungefärlig ledningsförmåga som den flytande elektrolyten. Alla dagens moderna polymerbatterier har införlivat en mikro porös separator med fukt. Polymerbatterierna erbjuder en aning bättre specifik energi och kan göras tunnare. Dock ökar tillverkningskostnaderna med 10- 30 %(22).

Polymercellen kan också göras i foliehölje som gör cellen mera flexibel och reducerar vikten med ungefär 20 % gentemot det hårda plasthöljet. Denna typ av cell är även billigare att tillverka och kallas för pouchcell(22).

Pouchcellen är lätt och kostnadseffektiv att tillverka men utsätts den för hög luftfuktighet och värme så kan livslängden minska. Pouchcellen släpper snabbare ur gaserna vid en termisk rusning än vad en typisk cylindrisk cell gör. En eventuell explosion blir då inte lika häftig. Det krävs en god ventilkvalité hos den cylindriska cellen för att släppa trycket i samma takt som pouchcellen(9).

Gasbildning i en kaffepåscell under laddning är minimal men som batteripaketstillverkare är det ändå viktigt att ta hänsyn till detta genom att inte lägga cellerna på varandra. Istället bör de läggas sida vid sida och med lite extra utrymme för eventuell svällning. Celltillverkarna hävdar att det inte sker gasbildning i cellen vid korrekt användning. Likväl så kan det finnas tillverkningsfel som leder till gasbildning. Trycket ifrån svällandet kan leda till att kringutrustning kan gå sönder, display t ex(20).

Det går dock att skapa polymerbatterier som är helt fasta men i nuläget endast i laboratorium genom kostsamma metoder. Men i april 2012 kom det en rapport som visar hur lågkostnadstillverkning av dessa är möjligt för massproduktion(10). Det tunna elektrolytlagret är en kombination av lösning, salt och separator. Detta elektrolytlager och är oftast mycket tunt och kan komma ner till en mikron, en miljondels meter. Detta lager fungerar även som separator vilket spar utrymme och gör battericellen mindre vilket minskar materialkostnaden. Denna volym och viktminskning av elektrolyten leder till att jonerna färdas snabbare och effektivare. På grund av avsaknad av vätska så degenereras elektroderna långsammare vilket leder till ett längre tjänsteliv, tid i bruk för batteriet. Fasta elektrolyter har en högre inneboende säkerhetsnivå. Eftersom ingen vätska kan läcka ut och allt är fast så förhindras explosioner och eld att uppstå(10).

För att skapa dessa mikronlager krävs mycket kostsam laboratorietillverkning i nuläget, såsom fysikalisk ångavsättning. Men nya och kostnadseffektiva lösningar för masstillverkning har presenterats för LCO med LIPON elektrolyt(10).

## De olika cellkemierna för LJBer

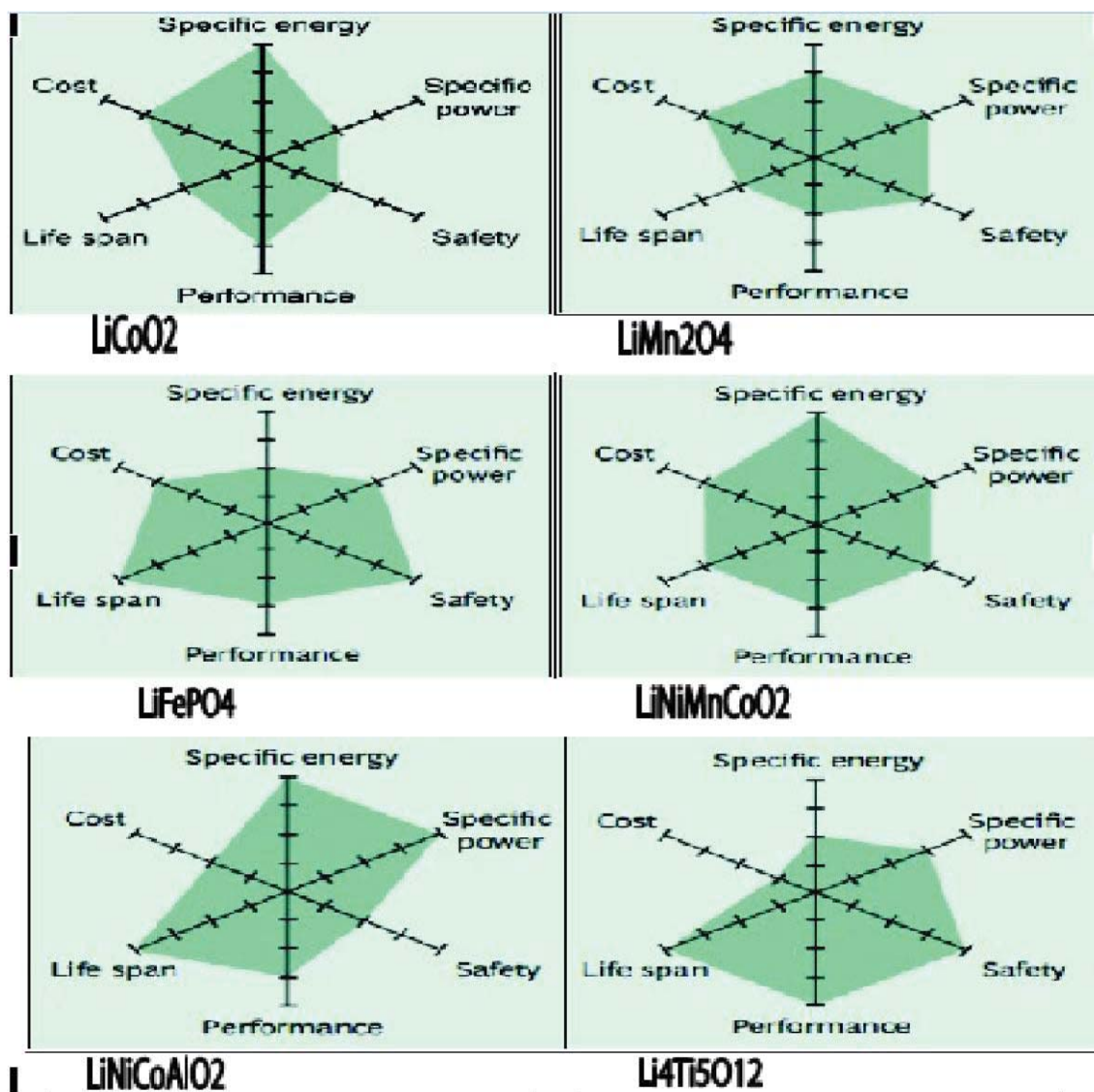


Fig 8. Hexagonnät över katodkemiers egenskaper Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(23).

Fig 8 illustrerar de olika katodkemierna och ifrån dem kan en grov jämförelse mellan de olika katodkemierna göras. Specific energy anger energitätheten för de olika katodkemierna. Specific power anger maximal urladdningsgrad. Performance anger kemins funktionella förmåga vid höga och låga temperaturer. Life span graderas beroende på hur många djupa laddnings- och urladdningscykler det tar innan batteriets kapacitet har sjunkit till en viss procent av den ursprungliga kapaciteten. Cost är då kostnaden att tillverka respektive kemi i nuläget. Ju lägre nivå på skalan desto dyrare är cellkemin(23).

LiCoO<sub>2</sub> (LCO) har en hög specifik energi och används ofta i mobiltelefoner och laptops. Men ett problem är att de har ett lågt maximalt effektuttag. De flesta övervakningssystem till de här applikationerna sätter urladdningsströmmens maxima till 1C. Tesla har dock valt att använda denna typ av kemi i sina bilar(24).

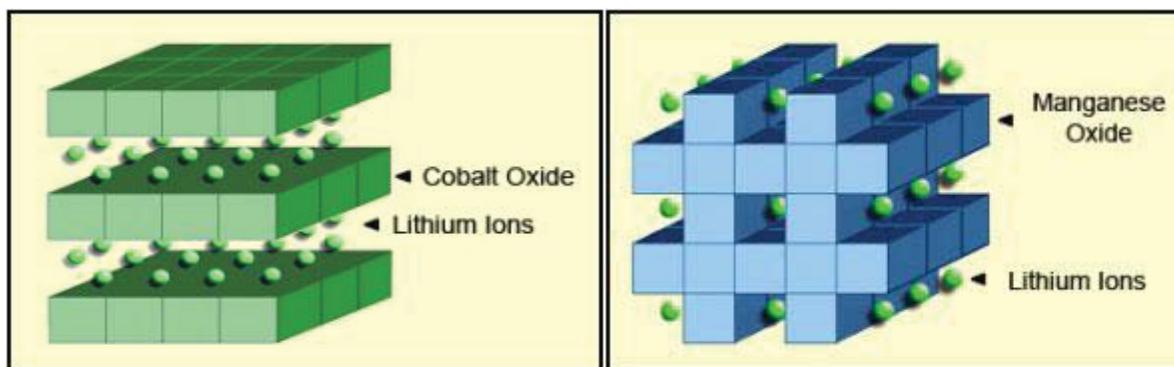


Fig 9. Till vänster LCOs katodstruktur och till höger LMOs katodstruktur. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(23).

Till skillnad ifrån LCOs katodstruktur har LMA, se fig 9, en spinell struktur som möjliggör att litiumjonerna färdas effektivare, se fig 9. Den spinella strukturen är en jonisk kristallstruktur som ger ett tredimensionellt ramverk att hysa litiumjoner inom. Det är detta som gör det möjligt för de inkapslade litiumjonerna att färdas i inte bara X- och Y- planet utan även Z- planet till skillnad ifrån koboltoxidens kemiska struktur som inkapslar litiumjonerna inom lager på lager. Detta leder till att LMA har en lägre inre resistans som möjliggör ett högre maximalt effektuttag. LCO har dock möjligheten att kapsla in fler litiumjoner och får därmed en högre specifik energi. Ytterligare fördelar med denna struktur är en förbättrad termisk struktur och säkerhet. Den har dock ett begränsat cykelkalenderliv(23). Den lägre resistansen möjliggör snabbbladning och höga urladdningsströmmar. Den lägre inre resistans leder även till en högre genomsnittlig utspänning. En helt ren spinell struktur har en nominell spänning på 3,8 volt. LFP har trots detta en potential på 3,3 volt(11). Celltillverkaren har möjligheten, pga flexibel design hos LMA, att konstruera ett långlivs batteri med lägre specifik energi eller ett högkapacitetsbatteri med längre liv. Ett med längre liv kan ligga på 1100 mAh medan det med högre kapacitet ligger på 1500 mAh. En biltillverkare hade valt det med längre liv(23). Skall LMA användas i ett svenskt vinterklimat så finns möjligtvis större anledning för en batterivärmare med tanke på dess lägre nivå på performanceskalan i fig 8(23)(9).

LFP har goda elektrokemiska egenskaper med låg resistans. Det är möjligt genom fosfatkatod- material i nanoskala. Den har egenskaper så som utökad säkerhet, god termisk stabilitet, tål ogynnsamma förhållanden bra, kan leverera höga strömmar och har ett långt cykelliv. Den låga cellspänningen gör dock att den har en låg energidensitet, något lägre än LMO. Den presterar också sämre i låga temperaturer och förhöjda lagringstemperaturer reducerar livslängden. Självladdningen är högre än de övriga kemierna på runt 10 % per månad(23).



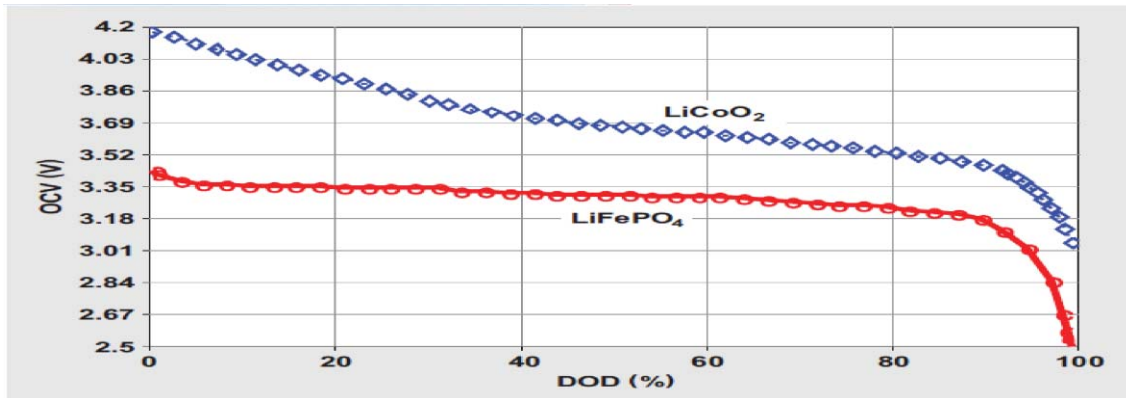


Fig 10. LFPs mycket flacka urladdningskurva kan ställa till problem för SOC mätning(25). Figuren används med tillåtelse av Texas Instruments Incorporated

I grafen ovan visas den öppna spänningspotentialen under urladdning för LCO och LFP. Den betydligt flackare urladdningsprofilen kan både ha sina för och nackdelar. Det gör att det går att utnyttja den laddade kapaciteten nästintill maximalt men det gör också att SOC indikationen blir svårare att utläsa(25).

LFP har visat sig öka medicinska skotrars och eldrivna rullstolars körsträcka signifikant. För samma volym som ett blybatteri så ökas kapaciteten med det dubbla och för samma vikt tredubblas kapaciteten. Det har en direkt effekt för personens livskvalité och nu kan användaren istället fokusera på syftet med färden och uppleva resan istället för att oroa sig för om batteriet kommer att räcka och om han eller hon skall kunna komma hem eller inte. LFP är alltså en god ersättare istället för blybatterier i dessa applikationer(26).

### LitiumNickel-Mangan-KobaltOxid (LiNiMnCoO<sub>2</sub> eller NMC)

NMC är den batterikemi som de ledande batteritillverkarna har valt att satsa på. Likt LMO kan NMC bli skräddarsydd för hög specifik energi och maximalt effektuttag men inte för båda delarna. Exempel på detta är att en NMC 18650 cell kan ha 2250 mAh men med medellågt maximalt effektuttag. Medan samma typ av cell kan bli optimerad för ett högt maximalt effektuttag men då endast ha 1500 mAh. Med en kiselbaserad anod kan den nå upp till 4000 mAh men med lägre maximalt effektuttag och tjänsteliv som följd. Att kombinera nickel och mangan har sina fördelar. Nickel har en hög specifik energi men låg stabilitet. Mangan har en låg inre resistans men en låg specifik energi. Kombinationen av dessa bringar fram deras bästa egenskaper. NMC passar bra till såväl elverktyg som för eldrivna fordon. Råmaterialkostnaden minskar dessutom med minskat kobolt innehåll. Men det är viktigt att få rätt balans i kemin och det receptet håller tillverkarna hemligt(23).

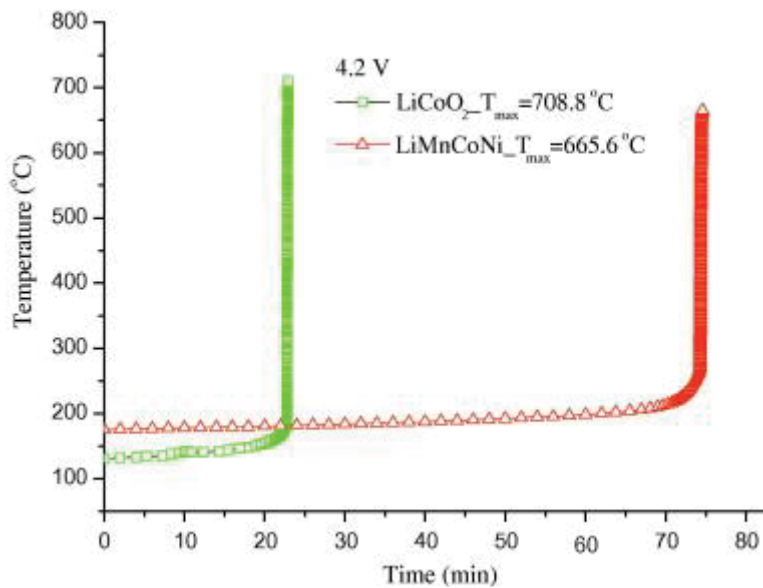


Fig 11. Ett termiskt ramptest utfört på LCO cell samt NMC cell(27). © 2012 Elsevier

NMC som är effektoptimerade exploderade inte under ugnstest på 150 C°, se fig 11, och uppvisade goda termiska egenskaper då den inte reagerade lika kraftigt som LCO när termisk rusning väl inträffade(27).

NMC egenskaper är beroende på olika sammansättning av Li, Ni, Ma och Co. En högre nivå av Ni ökar urladdningskapaciteten men minskade den termiska stabiliteten. Detta kan kompenseras något genom att minska halten Li vilket gör att syrebildandet minskar och då också trycket(28). En  $\text{Li}[\text{Ni}_{3/8}\text{Co}_{1/4}\text{Mn}_{3/8}]\text{O}_2$  kombination visade på bättre termisk stabilitet än vad LMO gjorde(29).

Att blanda katod och anod material kan förstärka olika inneboende styrkor men det finns också risk att vissa egenskaper slår ut andra egenskaper. Ett exempel är förhållandet mellan maximalt effektuttag och specifik energi(2).

En hög specifik energi till låg kostnad kan uppnås genom att tillverkare tillsätter nickel i kombination med kobolt. Detta gör dock att säkerheten undermineras och gör cellen mera ostabil. Alltså kan ett nystartat företag som fokuserar på hög specifik energi snabbt vinna marknadsfördelar till priset av säkerhet och hållbarhet. Tillverkare som arbetar för gott rykte värderar dock säkerhet och hållbarhet högre och utesluter denna metod(2).

Litium Nickel Kobalt Aluminum, NCA, är inte vanligt förekommande i konsumentprodukter men tack vare hög specifik energi och högt maximalt effektuttag samt ett långt tjänsteliv gör att den är attraktiv inom fordons industrin. Kostnaden är dock hög och säkerheten är låg(23).

Litiumtitanat ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), LTO, ersätter grafitanoden i det vanliga LJB och det bildar en spinell struktur. LTO har 2.5V vs. LCO och 1.9V vs. LFP. De har en god termisk stabilitet och klarar av att säkert laddas vid en 10C laddningsfaktor. De klarar då av att laddas upp på mindre än 10 minuter(30). Toshiba introducerade tidigt LTO för elcyklar. Toshiba's batteri väger 14 kg och har fortfarande en god kapacitet efter 6000 cykler(30). LTO förlorar endast 80 % av sin kapacitet vid - 30 °C. Den har tyvärr en mycket låg specifik energi på 65 Wh/kg. Märkspänningen är på 2,4 V och laddar till 2,8 V och laddar ut till 1,8 V per cell. Ansträngningar görs för att förbättra den specifika energin och för att minska tillverkningskostnaderna(23). På grund av att LTO anoden arbetar på en högre potential, mindre negativ, så blir cellspänningen lägre. Det gör att överhettning på grund av det fasta elektrolytmellanlagret blir eliminerat. Det finns rapporterat om ett cykelliv på 10,000 cykler med en DOD på 80%(30).

Specifications	Li-cobalt $\text{LiCoO}_2$ (LCO)	Li-manganese $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ (LMO)	Li-phosphate $\text{LiFePO}_4$ (LFP)	NMC <sup>1</sup> $\text{LiNiMnCoO}_2$
Voltage	3.60V	3.80V	3.30V	3.60/3.70V
Charge limit	4.20V	4.20V	3.60V	4.20V
Cycle life <sup>2</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000	1,000–2,000
Operating temperature	Average	Average	Good	Good
Specific energy	150–190Wh/kg	100–135Wh/kg	90–120Wh/kg	140–180Wh/kg
Specific power	1C	10C, 40C pulse	35C continuous	10C
Safety	Average. Requires protection circuit and cell balancing of multi cell pack. Requirements for small formats with 1 or 2 cells can be relaxed		Very safe, needs cell balancing and V protection.	Safer than Li-cobalt. Needs cell balancing and protection.
Thermal runaway <sup>3</sup>	150°C (302°F)	250°C (482°F)	270°C (518°F)	210°C (410°F)
Cost	Raw material high	Moli Energy, NEC, Hitachi, Samsung	High	High
In use since	1994	1996	1999	2003
Researchers, manufacturers	Sony, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Samsung, Hitachi, Toshiba	Hitachi, Samsung, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Toshiba, Moli Energy,	A123, Valence, GS Yuasa, BYD, JCI/Saft, Lishen	Sony, Sanyo, LG Chem, GS Yuasa, Hitachi, Samsung

		NEC		
Notes	Very high specific energy, limited power; cell phones, laptops	High power, good to high specific energy; power tools, medical, EVs	High power, average specific energy, safest lithium-based battery	Very high specific energy, high power; tools, medical, EVs

Fig 12. En kortare sumering av olika katodkemiers egenskaper samt lite fakta om dem. Isidor Buchmann har framställt tabellen och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(17).

Litiumpolymer nämns inte i denna tabell, fig 12, eftersom den inte är en unik kemi utan den har bara en annan konstruktion. Den kan göras i flera olika kemier där LCO är den vanligaste(17).

Några katodkemier graderade utefter deras termiska stabilitet  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{Li}[\text{Ni}_{3/8}\text{Co}_{1/4}\text{Mn}_{3/8}]\text{O}_2$ ,  $\text{Li}_{1+x}\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ ,  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.2}\text{Ti}_{0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{O}_2$ ,  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ ,  $\text{LiNiO}$ . Värt att notera är att NMC blandningen med större proportion nickel och mangan än vanligt klassas som en kemi med större stabilitet än LMO(29).

## Batteriövervakningssystem

Batteriövervakningssystemet, BMS, försäkras LJBets säkerhet, livslängd samt mäter SOC. Nuvarande system gör detta genom att mäta cell spänningen, strömmen, temperaturen och coulombbräkna. Coulombbräkning mäter in och utflödet hos batteriströmmen. I regel så försämras SOC indikationen med tiden(32). Moderna elbilars SOC indikation uppskattas kunna ha ett fel på mellan 5 - 15%(19).

Varje cell behöver en enskild spänningsövervakning. Ju högre celltalet blir desto mer komplext blir skyddssystemet(33). Batteriövervakningsschipet ATA6870 ifrån Atmel kan kaskadkopplas likt bilden nedan för att täcka varje enskild cell(34).

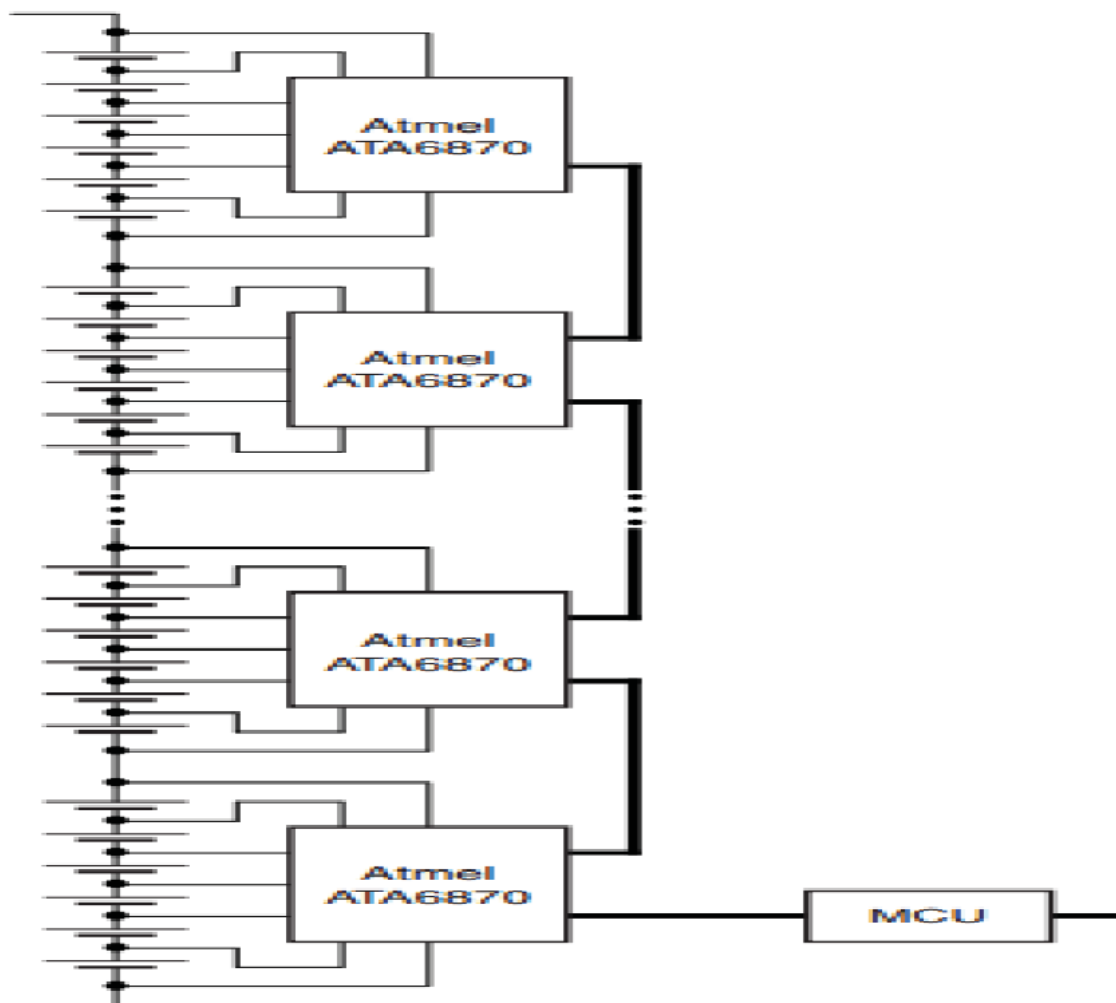


Fig 13. Atmel chip för enskild spänningsmätning över varje enskild cell(34). Figuren används med tillåtelse ifrån Atmel Corporation

Det svåra är att det uppskattade värdet och det elektrokemiska värdet skall följas åt under tidens lopp. När felet blir för stort så måste det uppskattade värdet kalibreras med det elektrokemiska värdet för en mer korrekt överensstämmning. Annars kan det ske som illustreras i nedanstående fig 14. Det allra enklaste sättet att kalibrera SOC indikationen är att låta göra en fullständig urladdning följt av en uppladdning för att sedan mäta tiden där emellan. Denna tid jämförs sedan med värdet ifrån den tidigare kalibreringen och därefter justeras SOC parametrarna utefter detta. Det är det som sker i fig 14 nedan efter att 3 månader har gått. Batteriets totala kapacitet minskas kontinuerligt och detta uppskattas med en så kallad hälsogradsvariabel (eng. state-of-health), SOH. I fallet nedan så uppdateras SOH endast en gång var tredje månad vilket är för lite för applikationer som kräver en stor noggrannhet(32).

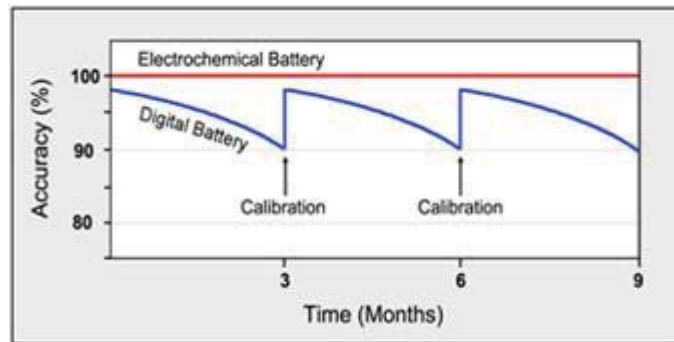


Fig 14. Hur det uppskattade värdet med tiden avviker ifrån det sanna elektrokemiska värdet för att sedan med tiden kalibreras. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(33).

Coulombräkningen är inte alltid exakt och eftersom antalet coulomb ligger som arean under strömkurvan. Bli det ett fel på strömmätningen under en lång tidsperiod så ökar felet i antal coulomb. Därför blir inte SOC indikationen helt exakt om inte strömmätningen är helt korrekt(32).

Den urladdade energin är aldrig lika stor som den energin som krävdes för att ladda upp LJBet. Detta beror på att laddningseffektiviteten blir sämre mot slutet av laddningscykeln samt förluster under urladdning och lagring av LJBet. Energicykeln för Tesla Roadster uppskattades att ha en effektivitet på 86%. Detta gör att coulombräkningen försvåras ytterligare(35).

Anders Reinholdsson och Johan Persson, tidigare elektroingenjörstudenter på Chalmers, skapade på 10 veckor ett system som klarade av att göra en SOC indikation på ett LJB paket. Detta med hjälp av coulombräkning och tangentuppskattning av den öppna kretspotentialen. För att kunna göra en rimlig tangentuppskattning behövde battericellen vara i fränläge i minst 6 minuter. De bedömde att de hade kunnat få en ännu bättre SOC och SOH uppskattning genom att göra flera tester där de hade kunnat medelvärdesbilda de olika resultaten. Slutsatsen var ändå att det går att göra ett LJB övervakningssystem på 10 veckor(36).

Den magnetiska permeabiliteten ökar linjärt i takt med att SOC sjunker. Cadex Electronics har utvecklat en sensor som ger en noggrannhet på +/-5% av SOC och då även när LJBet åldras(32).

Toshiba erbjuder ett chipset bestående av en LJB monitor IC, TB9141FG, och ett fordonssäkerhets mikrokontroller. De kan upptäcka återstående batterinivå, fördela laddningen jämt över alla celler så de får en balanserad potential och upptäcka förhållanden som är onormala för LJBet. Monitor chippet klarar av att övervaka upp till 16 celler samtidigt och de kan kaskadkopplas. Systemet är robust mot störande signaler. Ett prov för båda komponenterna beräknas kosta 12 \$ respektive 10 \$(37).

## Förhållanden som ökar LJBernas livslängd

Om batterierna behandlas på rätt sätt utan höga laddningsströmmar, inte sitter överdrivet mycket anslutna till laddarna och undviker extrema lastvillkor så lever de betydligt längre(11).

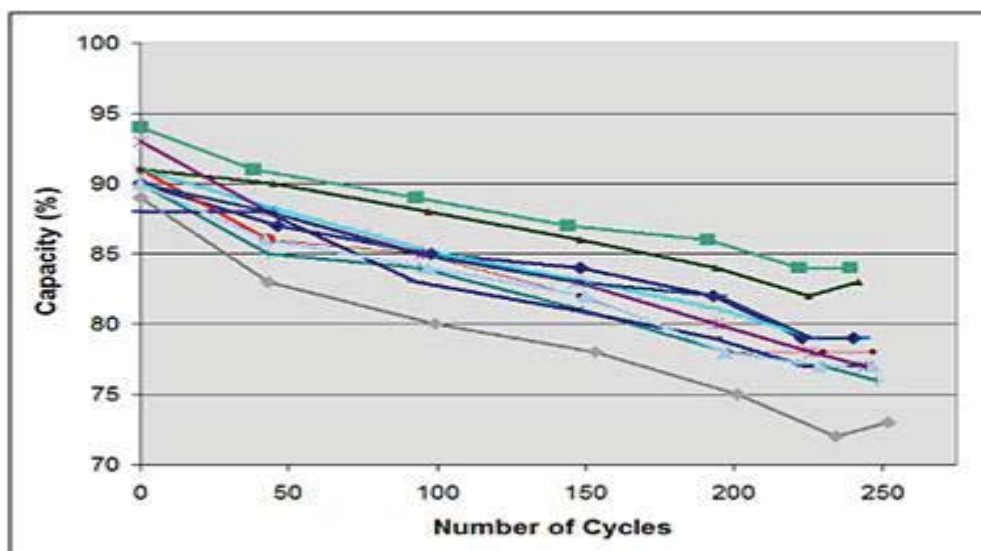


Fig 15. Celler som är lika gamla och av samma märke och modell kapacitets testas. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(38).

I ovanstående graf visas hur 11 stycken smartphone pouchceller köptes in och testades samtidigt. De var av samma märke och modell. Trots detta visade de sig ha en ursprunglig kapacitetsskillnad på mellan 88-94%. Efter att ha cyklats med 250 fulla urladdningscykler hade de en kapacitet på 73-84%. De hade alla också en varierande kapacitets förlust över tiden. När ett LJB paket skall konstrueras gäller det alltså att försöka matcha celler med liknande elektrokemiska egenskaper(38).

Depth of discharge	Discharge cycles
100% DoD	300 – 500
50% DoD	1,200 – 1,500
25% DoD	2,000 – 2,500
10% DoD	3,750 – 4,700

Fig 16. Effekten av vad olika DOD gör på antalet cykler. Isidor Buchmann har framställt tabellen och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(38).

Ovanstående tabell i fig 16 visar på hur många urladdningscykler ett LJB klarar vid olika DODs. Som synes har den 100%:a DODn sämst total kapacitet, sedan kommer 10%, 25 % och allra bäst var 50%. Detta var utfört på celler med ett spänningstak på 4,2 V(38).

Temperature	40% charge	100% charge
0°C	98%	94%
25°C	96%	80%
40°C	85%	65%
60°C	75%	60% (after 3 months)

Fig 17. Förlusten av maxkapaciteten på grund av lagring av cellerna vid olika rumstemperaturer under 1 års tid. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(38).

Figuren ovan illustrerar en tabell över kapacitetsförlusten i från det ursprungliga maxvärdet. Som synes stor skillnad mellan 40 och 100 % lagrad kapacitet(38).

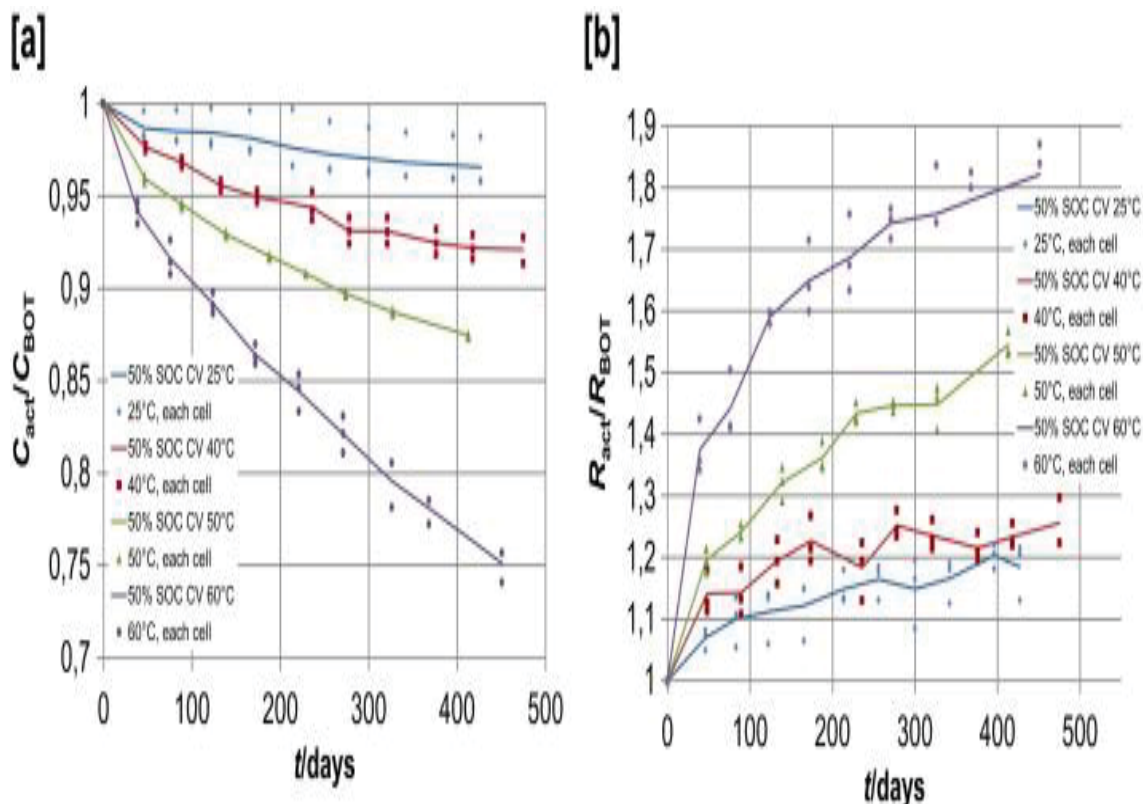


Fig 18. Illustration av NMCs kalenderliv vid olika rumstemperaturer och 50% SOC(39). © 2013, Elsevier



Resultat ifrån lagringstest vid olika temperaturer illustreras i fig 18 ovan. Testet utfördes på pouchceller med en kapacitet av 10 Ah och laddade till 50% SOC. Värt att notera är att efter 430 dagar i rumstemperatur har den kvar 96,5% av ursprungliga kapaciteten(39).

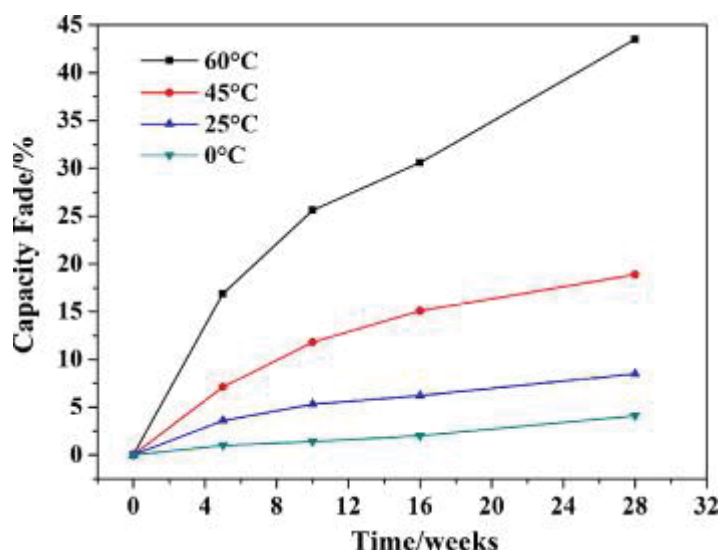


Fig 19. Illustration av NMCs kalenderliv vid olika rumstemperaturer och 100% SOC. Testet varade i 28 veckor(40). © 2009, Elsevier

Resultat ifrån lagringstest vid olika temperaturer illustreras i fig 19 ovan. Testet utfördes på pouchceller med en kapacitet av 3,2 Ah och laddade till 100 %SOC(40).

Charge level (V/cell)	Discharge cycles	Capacity at full charge
[4.30]	[150 – 250]	~[110%]
<b>4.20</b>	<b>300 – 500</b>	<b>100%</b>
4.10	600 – 1,000	~90%
4.00	1,200 – 2,000	~80%
3.92	2,400 – 4,000	~75%

Fig 20. Effekten av att begränsa maximala spänningen per cell och vad det har för inverkan på antalet urladdningscykler. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(38).

Allra bäst resultat ger 3,92 volt som synes i fig 20 och det talas om att vid denna potential så skall all stress orsakad av spänning vara avlägsnad(38). LJBer märks oftast efter DODs på 80% eftersom celltillverkarna menar på att det är mera fältrelaterat eftersom de flesta batteripaket begränsar SOC för ett bättre cykelliv(41).

## Viktig kunskap kring urladdning

LJBer får aldrig laddas ur för kraftigt och som säkerhetsmekanism för detta så bryter kontrollkretsen strömmen vid 3 V per cell. Om spänningen sjunker till 2,7v så försätts LJBet i sömnläge och går då inte längre att användas. Många tillverkare programmerar också in ett sömnläge som är aktivt innan varan är såld för att minimera självurladdningen ifrån skyddskretsen. När varan för första gången laddas eller laddas ur så inaktiveras detta tillstånd för att aldrig mer komma tillbaka i aktivt läge. En cell som har varit under 1,5 V i mer än en vecka bör inte återupplivas för att kopparshuntar kan ha uppkommit, vilka är delvis eller fullständiga kortslutningar. LJBer som utsatts för mycket stress är mera känsliga för mekaniska påfrestningar så som vibrationer, att de tappas eller utsätts för hetta(41).

Även milda urladdningsströmmar hjälper cellen att leva längre. Se figur 21 nedan som visar förändringen av maxkapacitet vid olika urladdningsströmmar. En avsevärd skillnad mellan 1,2,3 C faktor för LCO. LFP bland annat lider inte av extra kapacitetsförlust vid dessa C-grader(11).

Cycle performance at various charge/discharge rates

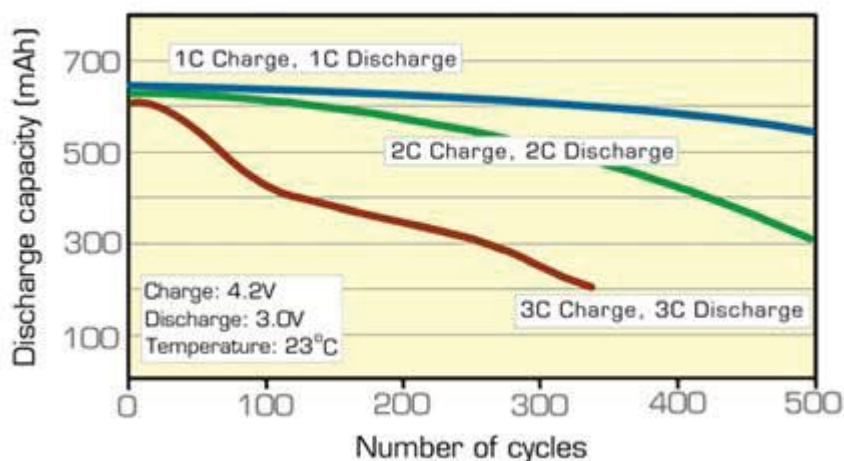


Fig 21. LCO kapacitet beroende på vilken C laddnings- urladdningsfaktor och antal cykler. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(11).

Vid stora urladdningsströmmar så måste den undre brytspänningen sänkas. Detta eftersom potentialen för cellen sjunker vid kraftiga urladdningsströmmar. När lasten sedan tas bort så kommer potentialen långsamt stiga till märkspänningen igen. För LMO så sänks brytspänningen ifrån 3,0 V till 2,7 V vid tung belastning. För LFP så sänks den ifrån 2,70 V till 2,45 V(42).

## Laddningsteknik

LJBer tål till skillnad mot blybatterier inte överladdningar. Många LJB celler laddas upp till 4,2v men inte högre än så. De kan faktiskt hålla en högre kapacitet men cykellivet minskar drastiskt. I nedanstående figur så visas en DC laddning med tillhörande mätnads-laddning(41). Det är inte heller bra att ladda ur ett LJB för mycket utan det är bättre att ladda oftare istället. Eftersom LJBer saknar minneseffekten är detta helt okej. Ladda inte LJBer vid eller under fryspunkten eftersom detta kan leda till litiumplattenering vilket äventyrar säkerheten(11).

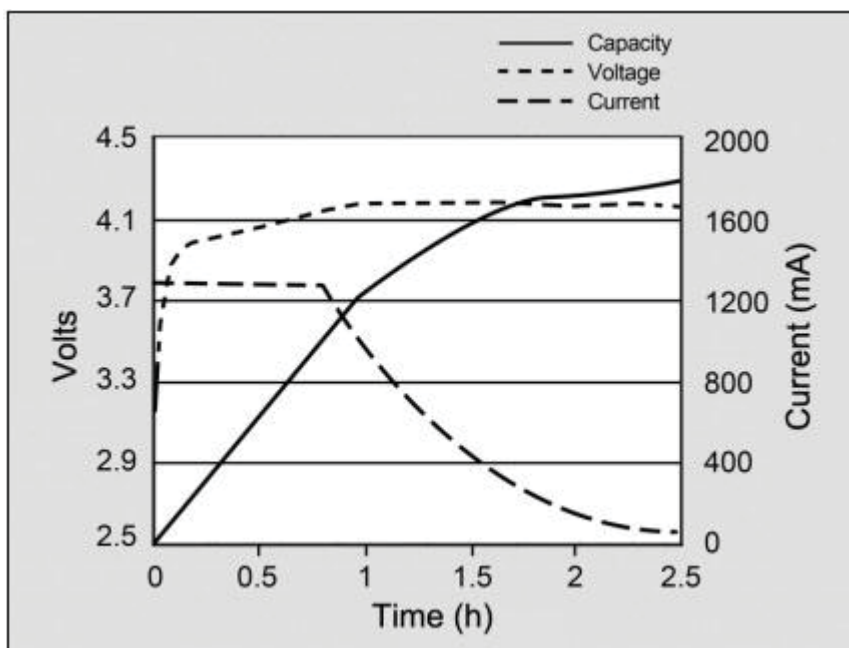


Fig 22. Ett typiskt laddnings förlopp för en LJBcell. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(41).

LJBet är fullt laddad när strömmen har sänkts till ett förutbestämt läge, se fig 22. I början när kapaciteten fortfarande är kvar i sitt mättade läge så är självurladdningen hög och LJBet tappar 5 % av dess kapacitet redan under de första 24 timmarna för att sedan övergå till att tappa 5% varje månad istället. Laddaren kan tillföra ny laddning när spänningen exempelvis sjunkit till 4,05 V per cell. Laddningsfaktorn för ett LJB brukar ligga mellan 0,5C och 1C och då blir uppladdningstiden ungefär 3 timmar. Laddningseffektiviteten ligger mellan 97 - 99%. Ibland kan celltemperaturen stiga upp till 5 °C beroende på batteripaketet. Detta kan bero på skyddskretsen eller förhöjd inre resistans. Full uppladdning är då strömmen har sjunkit till 3% av sitt ursprungsvärde(41).

Att öka strömmen påskyndar inte laddningsprocessen särskilt mycket. Den når bara spänningstoppen tidigare men mättnadsfasen blir då längre istället. Men en ökad ström har effekt om till exempel endast 70% skall nå snabbt. Många tillverkare väljer att hela tiden maximera körtiden och därför väljer de att ladda batteriet maximalt till kostnad av en kortare livstid. Nackdelen är att den sista mättnadsspänningen tillför mer stress på batteriet. För att drastiskt minska stressen på cellen gäller alltså att den bör vara en så kort stund som möjligt på maximal spänning av 4,2 V(41).

<i>Charge V/cell</i>	<i>Capacity at cut-off voltage</i>	<i>Charge time</i>	<i>Capacity with full saturation</i>
3.80	60%	120 min	65%
3.90	70%	135 min	76%
4.00	75%	150 min	82%
4.10	80%	165 min	87%
4.20	85%	180 min	100%

*Fig 23. Tabell hur olika ansatt laddspänning påverkar kapaciteten och laddningstiden. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(41).*

I tabellen ovan sammanställs hur olika nivåer av laddnings potential påverkar den slutliga kapaciteten och tiden det tar att nå dit(41).

Laddarkretsarna är föga komplicerade och förutom att möta de specifika spänningskriterierna för respektive LJB så skall de begränsa spänningen samt indikera med signal då strömmen sjunkit till ett visst värde(41).

## **En mer funktionell laddning**

Sinusformad laddningskurva visar god prestanda och i jämförelse med en vanlig konstant DC laddning så förbättras följande parametrar, laddningstiden med 17%, effektiviteten med 1,9%, maximala temperatur höjningen med 45,8% och livstiden för cellen med 16,1%. Minsta inresistans för dessa cellerna är vid 996 Hz(43). I en liknande rapport fastställdes den minsta inresistansen också till ungefär 1000 Hz(44).

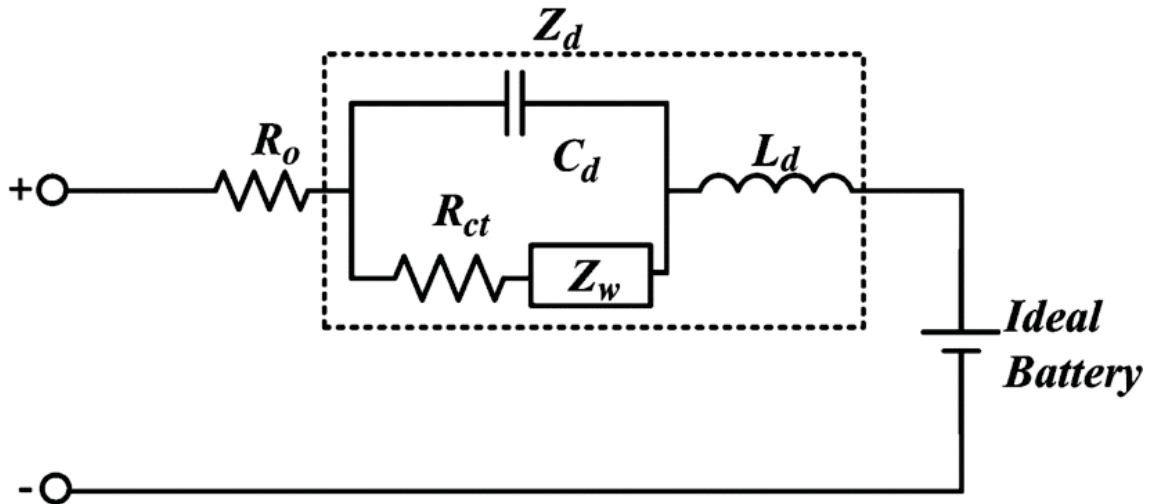
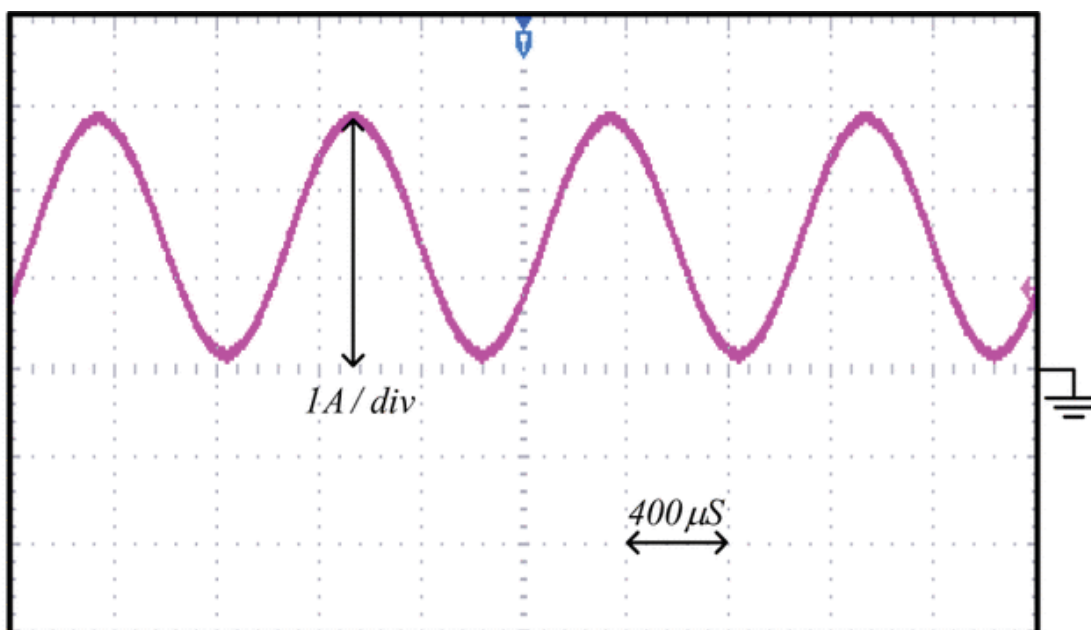


Fig 24. Kretschemat över en LJBcell med dess inre impedans inkluderad(31). © 2013 IEEE

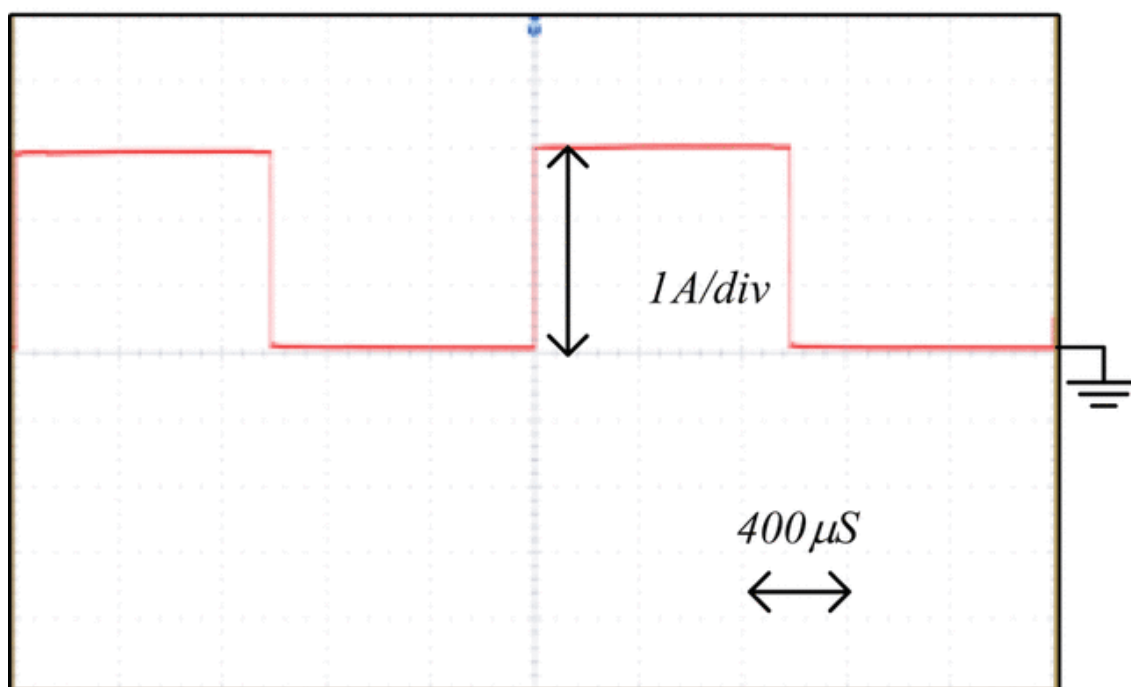
I bilden ovan visas det ekvivalenta kretschemat för en LJB cell. Impedansen  $Z_w$  försvinner då frekvensen överstiger 1 Hz och kan därför försummas i nedanstående beräkningsmodell(43).

$$Z_{\text{battery}}(\omega_s) = \left[ R_o + \frac{\frac{R_{ct}}{(\omega_s C_d)^2}}{R_{ct}^2 + \left(\frac{1}{\omega_s C_d}\right)^2} \right] + j \left[ \omega_s L_d - \frac{\frac{R_{ct}^2}{\omega_s C_d}}{R_{ct}^2 + \left(\frac{1}{\omega_s C_d}\right)^2} \right] \quad (1)$$

Fig 25. Beräkningsmodell för en LJBcell totala inre impedans vid frekvenser större än 1 Hz(43). © 2013 IEEE



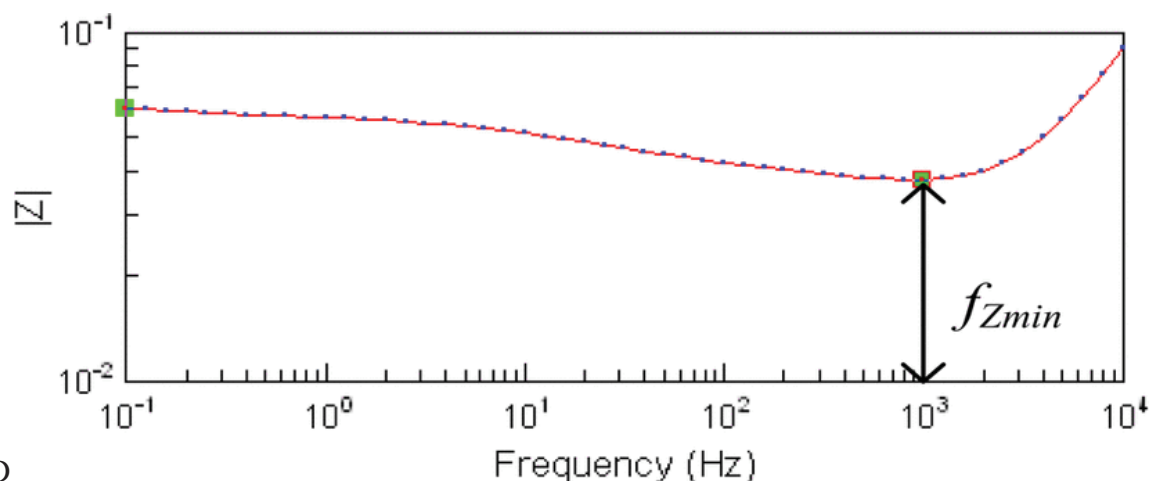
(a)



(b)

Fig 26. Två av de testade laddströmmarna. Båda med en toppström av 3 A, 1C(43). © 2013 IEEE

Ovanstående figur 26 illustrerar två av laddningsströmmarna. Nämligen den sinusformade laddningskurvan, SRC och den pulsformade laddningskurvan. Båda med ett strömmaxima på 3 A vilket motsvarar en laddningsgrad på 1 C ifrån de två 1,5 Ah cellerna som användes i testet. De var två LMA 18650 celler ifrån Sony(43).



dFD

Fig 27. Hur den inre impedansen varierar med frekvensen. Frekvensen i logaritmisk skala(43). © 2013 IEEE

I ovanstående figur 27 illustreras den inre impedansen i förhållande till frekvens, i en av de två cellerna. De skiljde sig faktiskt lite ifrån varandra och den andra cellen nådde ett impedans minima vid en aningens högre frekvens(43).

Charge Method	CC-CV	Pulse current with $f_{Zmin}$	SRC with $f_{Zmin}$
Charging Time (sec)	4368	3635	3626
Efficiency (%)	97	98.6	98.9
Rising Temperature (°C)	4.4	2.8	2.4

Fig 28. Tabell över det sammanställda och genomsnitts resultatet för de olika typerna av laddningsströmmar(43). © 2013 IEEE

I ovanstående tabell skildras de medelvärden som fåtts vid de olika laddningstyperna vid olika frekvenser. Detta eftersom det kan vara svårt att hitta exakt rätt frekvens. Om så vore så skulle temperaturstigningen vara 2,3 istället för 2,4 för SRC(43).

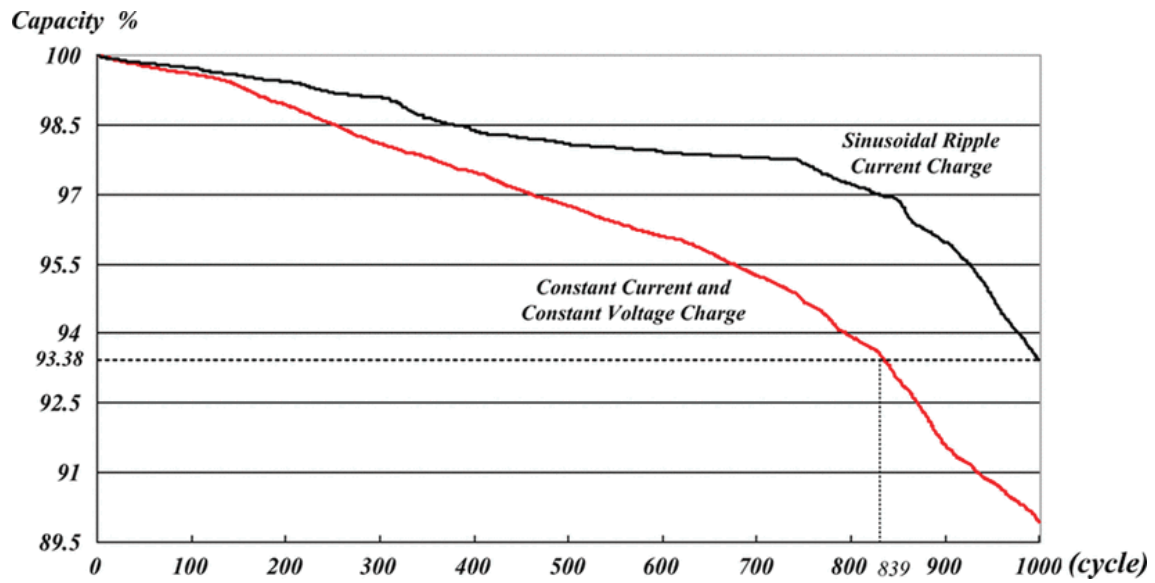


Fig 29. Kapacitetsförändringen på grund av de olika laddningsteknikerna(43).  
© 2013 IEEE

Ovan visas i figuren en graf över kapacitetsförändringen vid konstant laddningsström och sinusformad strömkurva när ett visst antal cykler har gått(43).



## Luftkylning av LJB-paket

Sony 18650 celler med 1,8 Ah utsattes för cykeltest vid olika yttemperaturer. Vid 25 och 45 grader hade de vid 800 cykler förlorat 31% respektive 36% av den ursprungliga kapaciteten. Vid 50 grader hade cellen förlorat mer än 60 % vid 600 cykler(45).

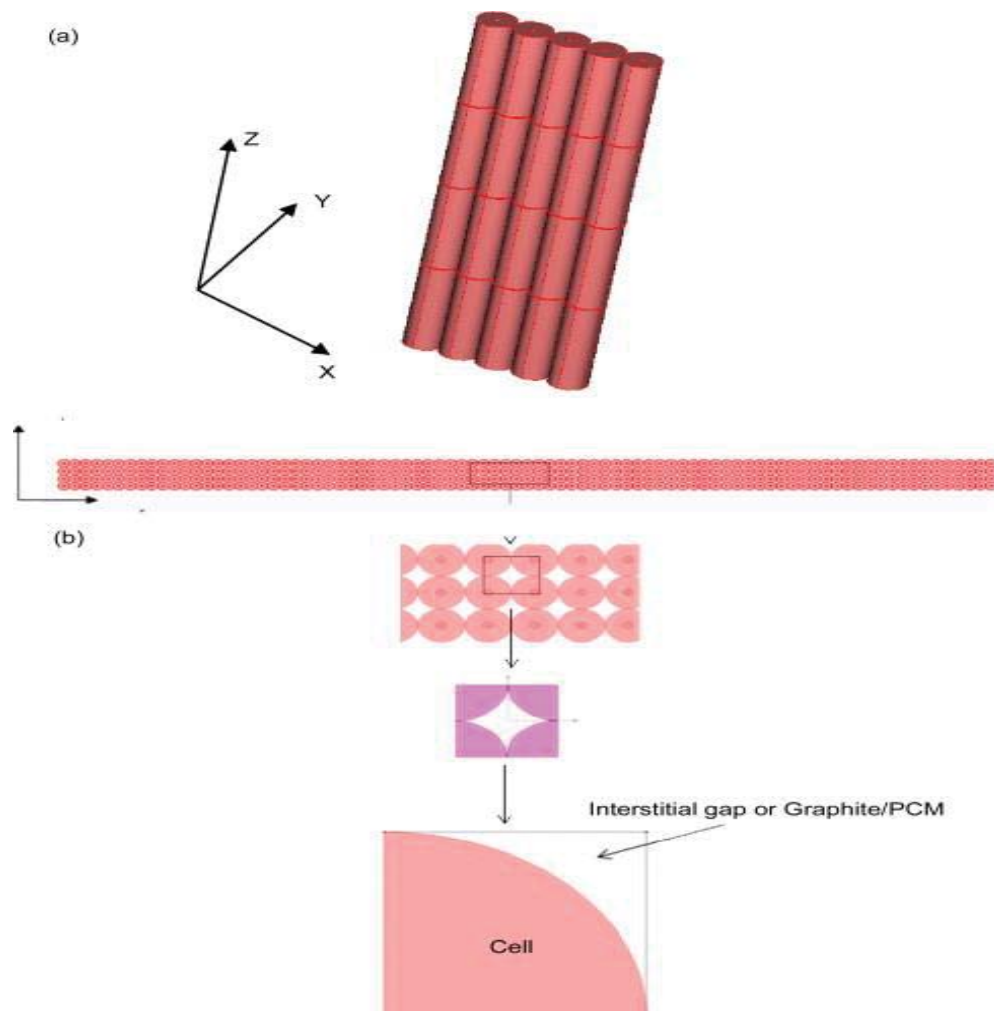


Fig 30. En illustration av ett LJB paket bestående 1,5 Ah 18650 celler i 68 stycken 4S5P moduler(46). © 2008, Elsevier

Rumstemperatur 25 °C			Rumstemperatur 40 °C		
Reynolds tal	Temperatur, (°C)	Fläkteffekt, (W)	Reynolds tal	Temperatur, (°C)	Fläkteffekt, (W)
13	34,72	0,0046	67	53,83	0,137
126	33,06	0,464	670	50,87	15,42
PCM	33,57	0	PCM	52,45	0

Fig 31. Tabell över resultatet ifrån ett 2C urladdningstest vid olika rumstemperaturer, kylmedium och fläktstyrka(46). © 2008, Elsevier

I fig 31 ovan visas resultatet för LJB paketet i fig 30 vid urladdningsgrad av 2C. Vid låg fläkteffekt så har PCM och luftkylning ungefär samma temperatur. Vid mycket hög fläkteffekt sänks temperaturen endast 1-2 °C. Fördelen med PCM över fläktkylning är alltså inte effektförlusten av fläkten. Fördelen är att temperaturen är enhetlig över hela cellen. Det leder till att cellen åldras långsammare(46).

## Ett växlande luftkylningssystem

Ett växlande luftkylningssystem för att förbättra temperaturenformigheten över alla cellerna och som minskar upphettningen illustreras i fig 32. Genom att använda "flipflop" portar för att periodvis växla riktning på luftströmmen så uppnåddes en lägre temperatur samt en lägre temperatur differens mellan cellerna. Vid en periodväxling av 120 sekunder uppnåddes en minskning av temperaturskillnaden mellan cellerna på 4 °C och en temperaturminskning på 1,5 °C till skillnad mot att inte växla alls(47).

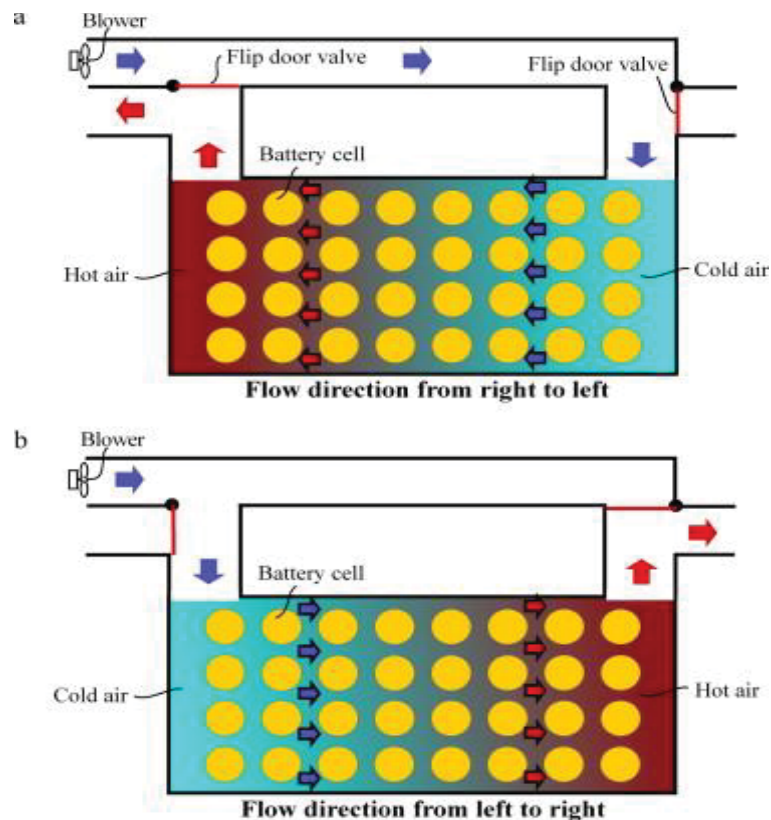
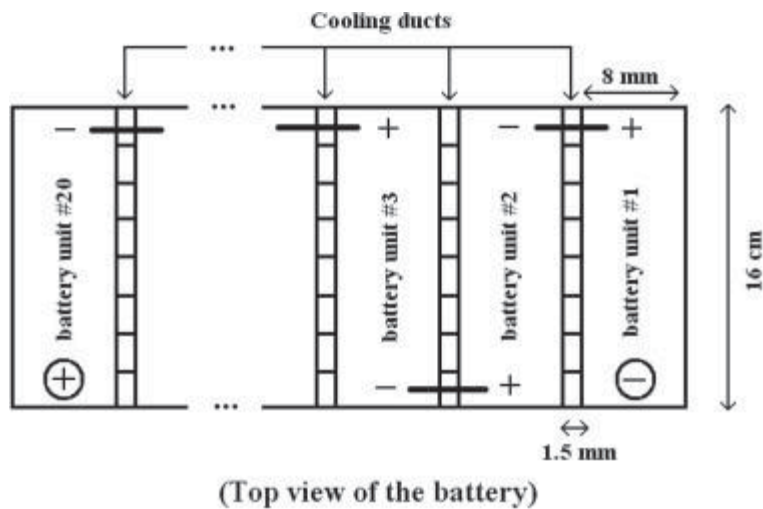


Fig 32. Genom att använda ett luftflöde som periodvis växlar håll uppnås en mera enhetlig temperatur(47). © 2011 Elsevier

## Optimal packning med LJB pouchceller för en bättre kylning

Varje modul består av 10 stycken parallellkopplade platta pouchceller av LCO kemi. De är märkta 2,0 Ah och 3,6 V vilket betyder att varje modul har 20 Ah. 20 seriekopplade moduler gör att spänningen blir 72 V. Cellens tjocklek är 730 µm vilket leder till att varje batterimodul endast är 8 mm tjock. Varje modul är 16 cm bred och 23 cm lång. Mellan varje batterimodul föreslås 8 rektangulära värmeavledningskanaler som är 2 cm breda och 1,5 mm tjocka. De föreslagna luftgapen mellan batterimodulerna ökar volymen med 17,81 %. Det föreslagna batteripaketet illustreras ovanifrån i fig 33. I fig 34 illustreras LJB paketet i 3D vy(48).



(Top view of the battery)  
 Fig 33. Batteri modulerna sedda ovanifrån(48). © 2014, Elsevier

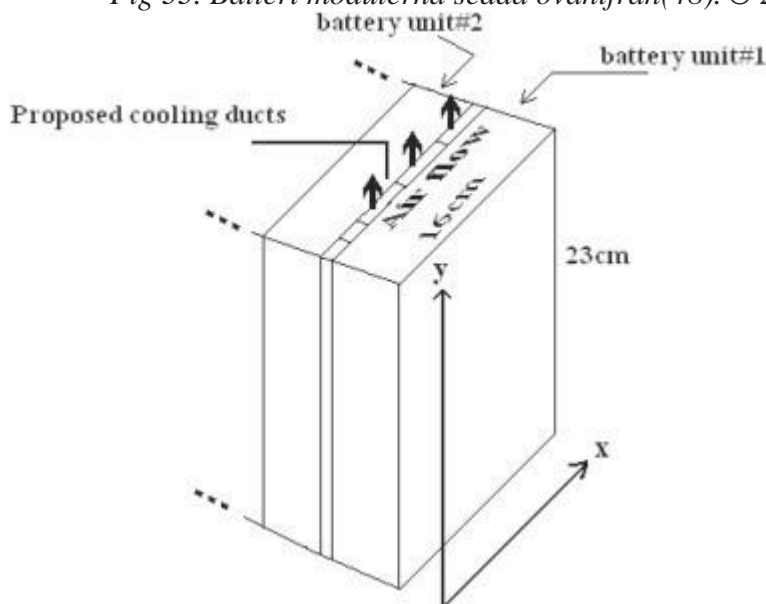


Fig 34. Batterimoduler i 3D vy(48). © 2014, Elsevier

I början av testet var SOC 1 och vid slutet 0,2 vid en urladdningsgrad på 2C. Det tar då 24 minuter innan SOC blir 0,2. Kylmediet är luft och dess styrka var 0,1 m/s. Värmeöverföringskoefficienten,  $h$ , var  $37,5 \text{ (W/m}^2\text{)}^\circ\text{C}$  och rumstemperaturen var  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Temperaturen blev mätt i mitten av cellen och är den som illustreras i grafen nedan. Förutom de 2 yttersta cellmodulerna så var temperaturen jämn med en maximal temperaturdifferens på  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ . Maximalt observerad temperatur var  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vid de yttre modulerna var temperaturdifferensen  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  och de nådde en maximal temperatur av  $30,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Gapen illustrerar temperaturen av luften mellan modulerna. I nästa graf illustreras spänningsvariationen mellan cellerna och där är potentialen jämn bortsett från de yttersta modulerna. Volt förändringen mellan maxima och minima spänning ligger på 1,98%(48).

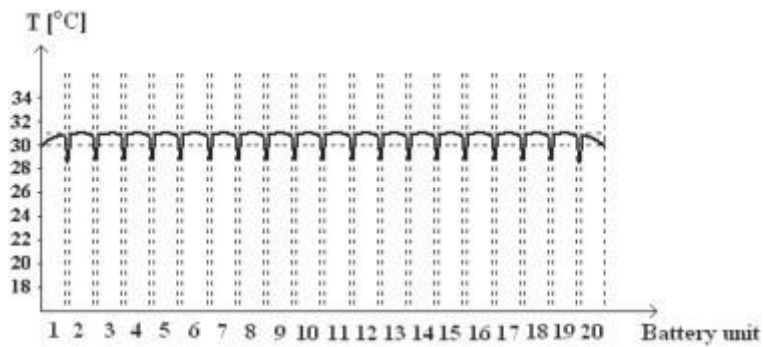


Fig 35. Graf över temperatur fördelningen vid ett 2C urladdningstest uppmätt vid slutet av urladdningscykeln och vid cellens mitt ytskikt(48). © 2014 Elsevier

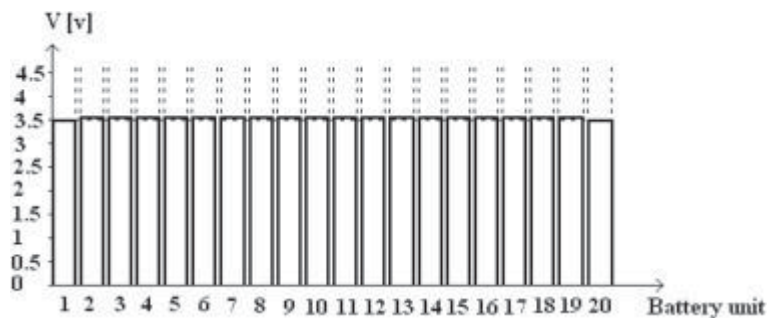


Fig 36. Graf över Spännings fördelningen vid ett 2C urladdningstest uppmätt vid slutet av urladdningscykeln(48). © 2014 Elsevier

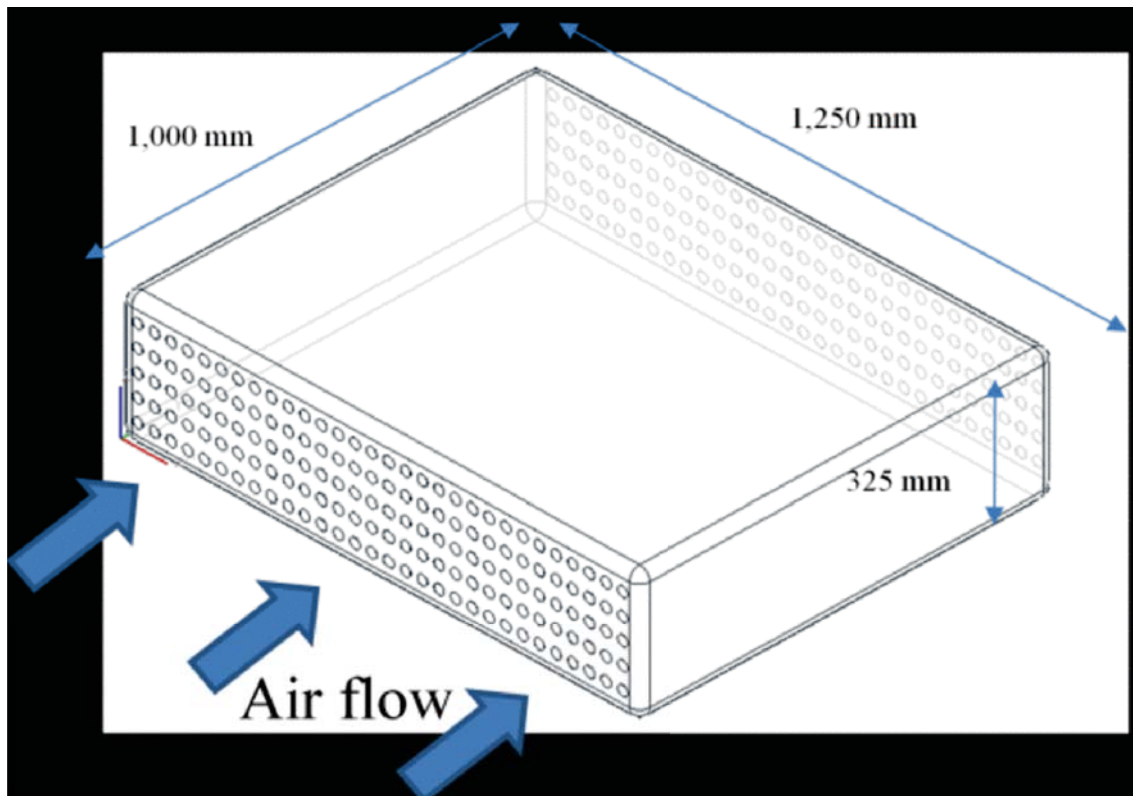
Vid test på 48 °C var detta förslag fortfarande det mest optimala. Mellan 48 - 55 °C var det lämpligt att sätta en fläkt ovan det föreslagna batteripaketet som då gav en luft hastighet på 1 sekundmeter. I och med detta så kan föreslaget LJB paket användas under de flesta temperatur förhållanden. Den maximala temperaturen visades vara lägre än de som uppstod i andra rapporter. Även volymökningen var mindre än andra föreslagna batteripaket. Med denna lösning, under normala förhållanden, så är framtvingade luftströmmar ifrån fläktar överflödiga(48).

Parameter	(48)	(49)
Maximalt observerade temperatur i mitten av cellern ( $T_{Max}$ ) [°C]	31	36
Maximal temperatur fördelning i mitten av cellerna ( $\Delta T_{Max}$ ) [°C]	0.05	0.2
Maximalt observerade temperatur i de yttre cellerna ( $T_{Max}$ ) [°C]	30.8	35
Maximal temperatur fördelning i de yttre cellerna( $\Delta T_{Max}$ ) [°C]	0.8	1
Procent av spännings regleringen ( $\Delta V\%$ )	1.98	>2 <sup>a</sup>
Volyms ökning mellan de olika förslagen ( $\Delta Vol. \%$ )	17.81	22.5 <sup>b</sup>

Fig 37. Tabell över en jämförelse med den senaste relaterade rapporten(48). © 2014 Elsevier

Ovan visas en jämförelse med den senaste relaterande rapporten som äger samma miljömässiga testparametrar som vid dessa test. Förslaget ifrån ovan sammanfattad rapport visar på en överlägsenhet i förhållande med den relaterade(48)(49)

## Kylsystem för cylindriska cellpaket



*Fig 38. Det optimala batteripaketets dimensioner samt hur luftflödet löper genom det(50).© 2011 IEEE*

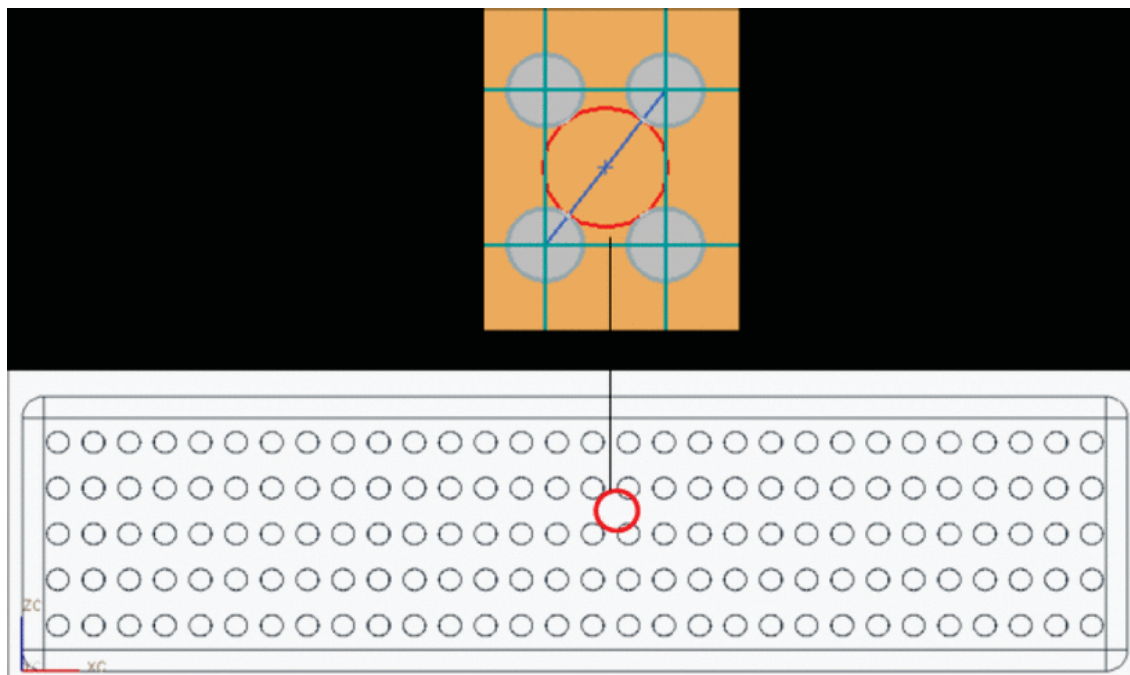
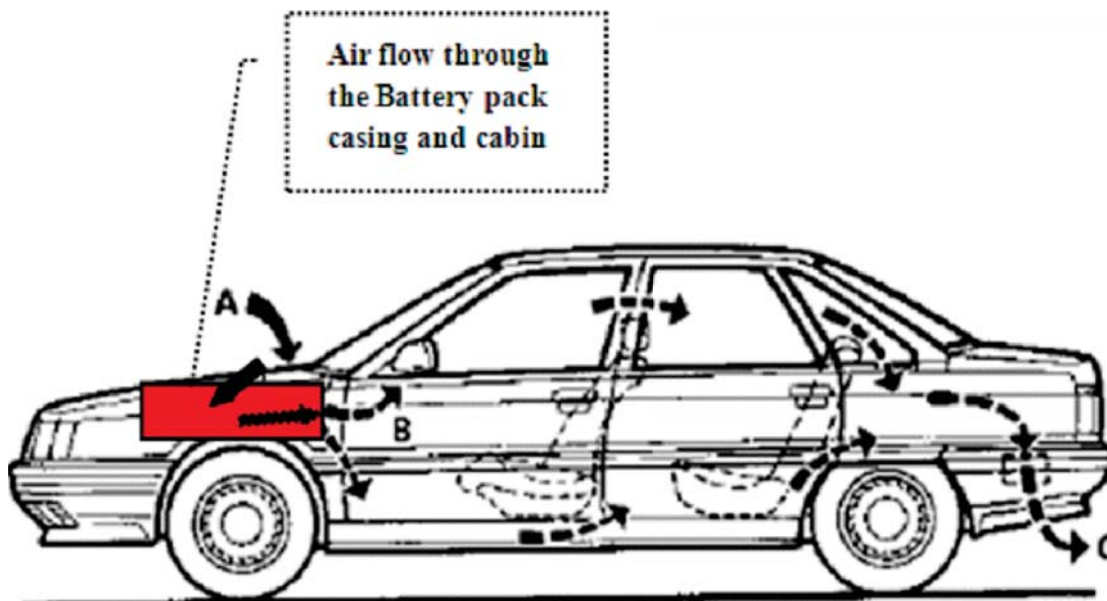


Fig 39. Luftflödet åker genom och förbi LJB paketet och vidare in till kabinen. Mellan 4 luftrör sitter en 18650 LJB cell(50). © 2011 IEEE

En algoritm för att utveckla det optimala värmeöverföringstalet användes i detta fall för att optimera ett bilbatteri på 150 cylindriska celler. LJB paketet visas fig 38 och 39. När bilen står stilla är en fläkt aktiverad och när fordonet kommer upp i tillräckligt hög rörelse inaktiveras fläkten. Batteripaketet kan med fördel sättas i fronten av bilen utan vidare komplikationer och på så vis kunna dra bättre nytta av det inkommande luftflödet. Detta illustreras i fig 36. I en del bilar sätts faktiskt batteriet där bak. Batteri inkapslingen är i PVC plast och rören som är gjorda för att kyla, har en grov yta istället för en slät. På det viset kan den kylande effekten ökas med 400%. Dock så ökar friktionen för fläkten och den drar mera effekt. Det gäller då att hitta en god balans mellan dessa två parametrar. I det här exemplet uppnåddes det maximala värmeöverföringstalet vid en lufthastighet på 2,6 m/s, genom att ha diametern på rören som är så stora som möjligt(50).

## Viktminsknings effekt på effektförbrukningen

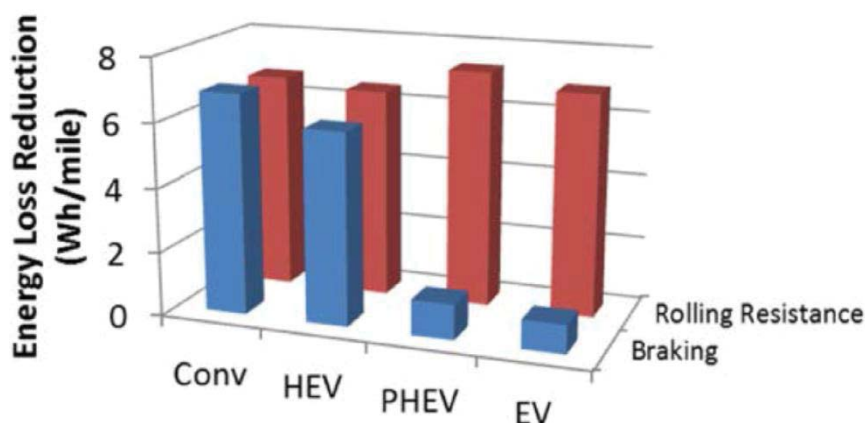
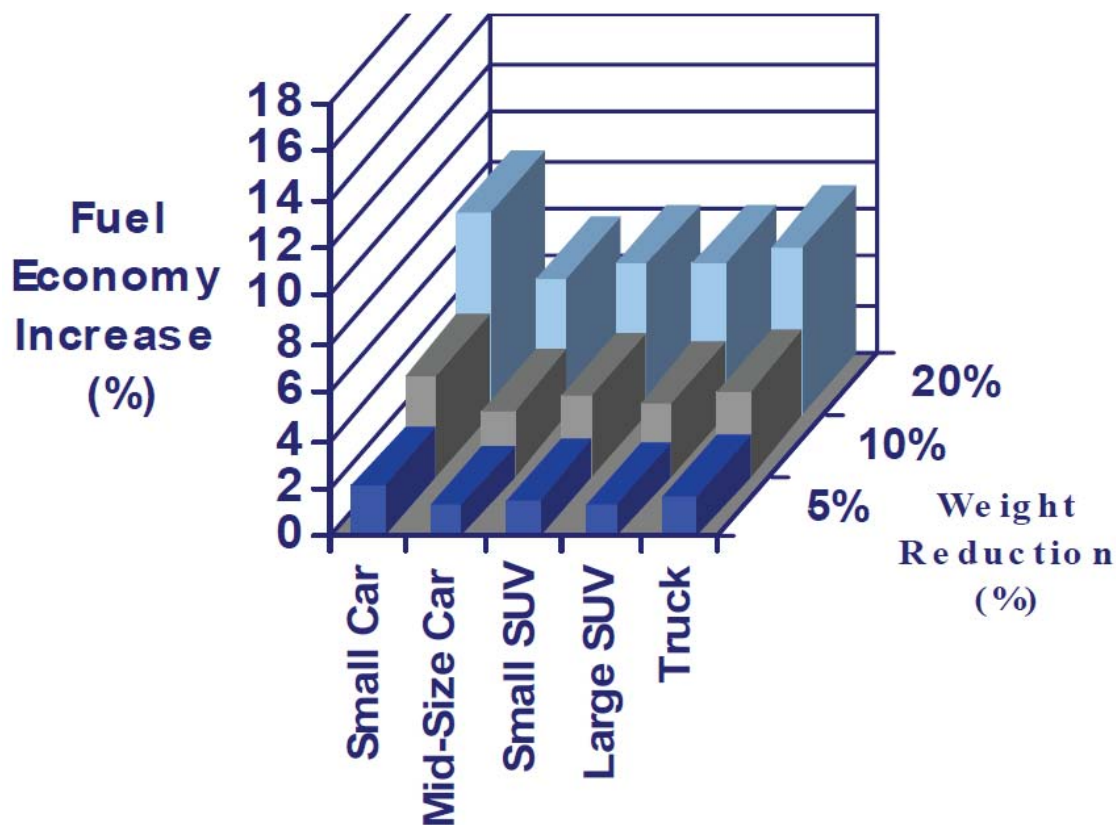


Fig 40. Energireduktion vid 150 kg viktminskning av fordon med olika drivmedel. Det ger en viss uppskattning av förhållandet mellan vanliga fordon med konventionella drivmedel och eldrivna fordon. Med författarens tillåtelse(51).

Genom att använda vissa lättviktsmaterial i fordon kan ovanstående energimängd per mile sparas in beroende på vilket drivmedel som används, se fig 40. Att inte elfordonen, EV, vinner lika mycket bromsenergi som de konventionella drivmedlen, Conv, beror på att de inte använder de mekaniska bromsarna lika mycket utan istället passar på att alstra energi till batterierna vid inbromsning(51).

Vid motorvägskörning så kom fordonet 116 miles och i stadstrafik kom fordonet 121 miles. Detta beror till stor del på peukerteffekten eftersom vid stadstrafik är batteriet nere på en mycket lägre C faktor. Värt att notera är att en bensin eller dieselbil hade haft den motsatta tendensen och då förbrukat mera i stadstrafik(26).



*Fig 41. En viss procent viktminskning ger en viss procent i bränsleförbrukning minskning. Detta då endast för vanliga konventionella drivmedelsbilar utan last(52). © Ricardo Inc 2007*

I grafen ovan så illustreras den resulterande minskningen av bränsleförbrukningen vid minskning av vikten. Man får också en ökad prestanda hos bilen vid en viktminskning. Det är då möjligt att dimensionera ner motorn så att endast prestandan bibehålls, vilket genererar till att energibesparingarna i ovanstående figur 41 ökar med ungefär 50 %. Däremot drar en fullastad lastbil en betydligt mindre nytta av en viktreduktion(52).



## Utredning av den regenerativa inbromsningens effekt

Absorptionsförmågan hos LJBer är god vilket medför att en intermittent energikälla duger precis lika bra som den vanliga likspänningen som brukar användas vid laddning(41).

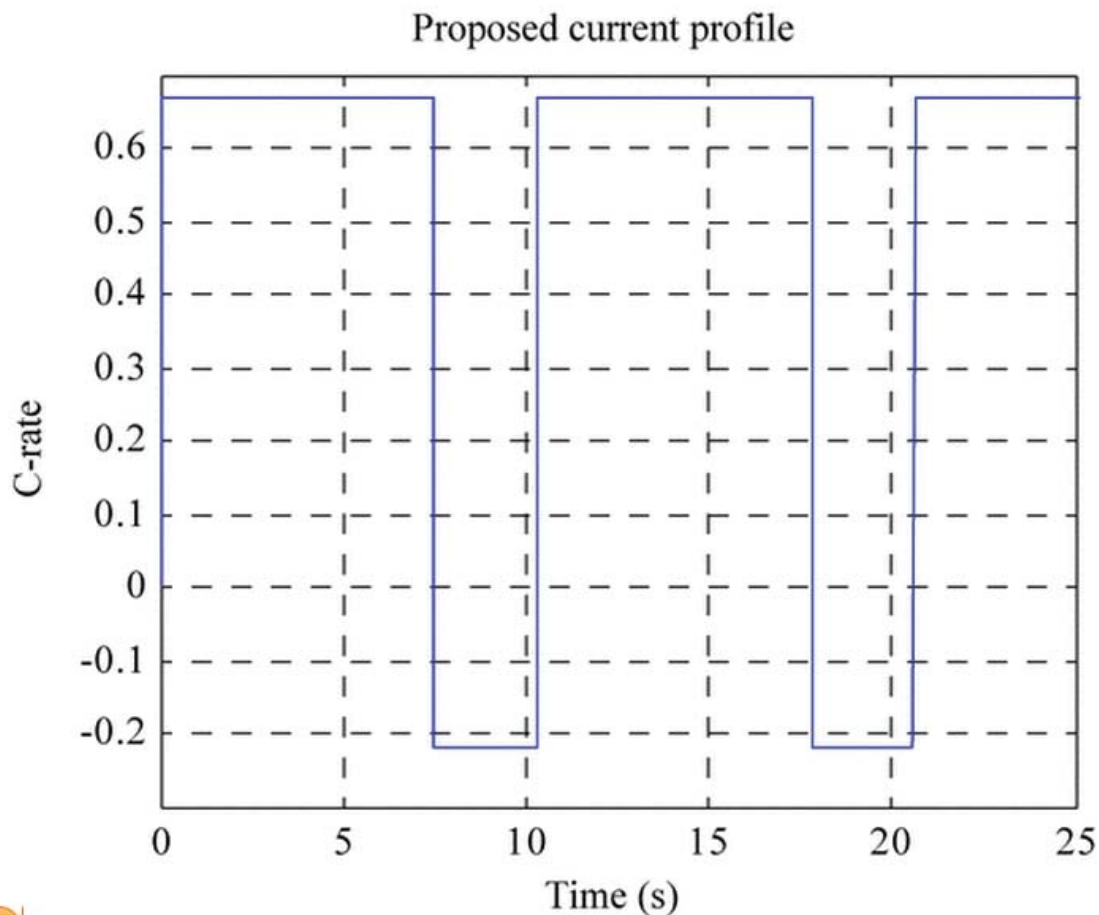


Fig 42. Urladdningsprofilen för cellen med regenerativ inbromsning(53). © 2012 IEEE

I nedanstående graf så visas resultatet ifrån en cell som cyklades med regenerativ inbromsning inkluderad i dess körcykel, se fig 42. En cell som cyklades med viloperioder där den första cellen hade inbromsningar. Det skulle kunde symbolisera ett system som kopplar in en superkondensator under inbromsning för att den istället skall absorbera energin ifrån inbromsningen. Den tredje cellen blev cyklad med en konstant urladdningsström. Kapacitets avyttringen jämförs sedan med antalet laddade Ah för respektive LJB cell. Det visade att cellen med regenerativ inbromsning inte förlorade någon kapacitet på grund av detta. Däremot så förlorade cellen med viloperioder mera kapacitet. Detta är märkligt och det skulle kunna bero på att just denna cell var av sämre kvalitet. Inga slutsatser bör därför dras av cell nummer två resultatet i nedanstående graf(53).

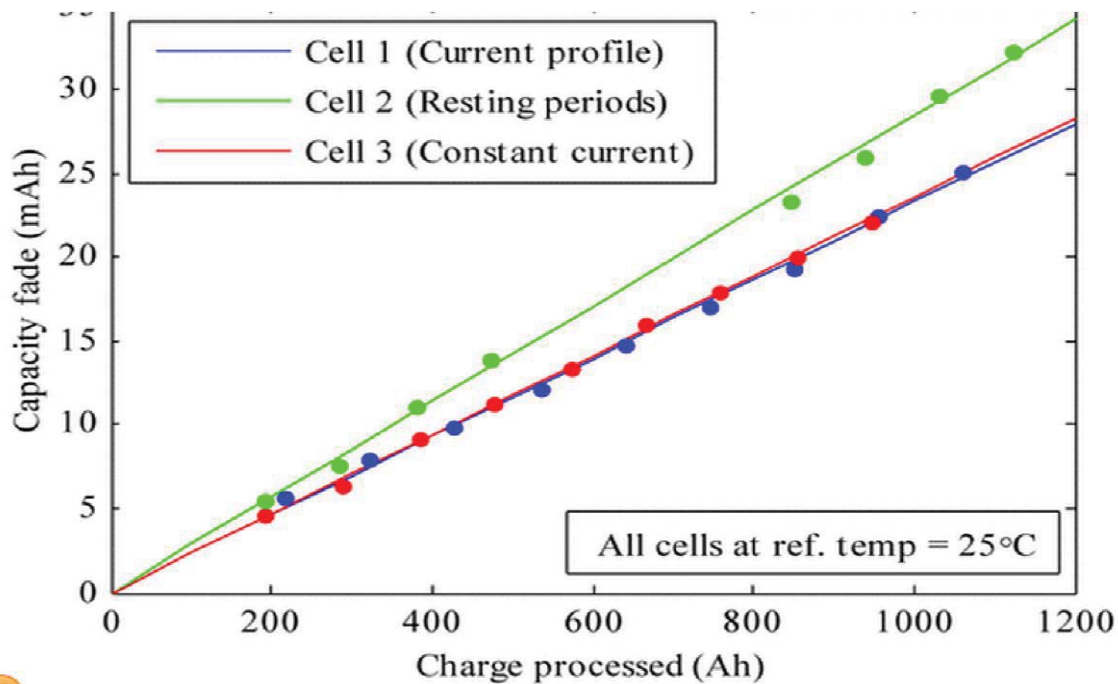


Fig 43. Tre celler med olika urladdningsprofil jämförs för att se eventuell kapacitetsminskning. Regenerativ inbromsning verkar inte påverka cellen negativt(53). © 2013 IEEE

## Fakta för val av ett säkert LJBpaket

Det går att dela in säkerhetsaspekten i två huvudsakliga mål. Det är att minska andelen celler som det sker en termisk rusning inom och att minska förödelsen vid en eventuell termisk rusning(19).

Att förstå varför ett LJB kan bli farligt när det missbrukas är enkelt att förstå med tanke på att ett LJB innehåller både oxidationsmedel och bränsle inom en sluten behållare. Att para ihop ett oxidationsmedel med bränsle brukar undvikas i andra sammanhang på grund av den potentiella risken för en explosion. SOC är en mycket viktig variabel för att kunna mildra den elektrokemiska reaktionen i ett LJB. Ett lägre SOC värde minskar katodens oxidationsgrad och anodens reduktion. Den går dessutom att enkelt kontrollera genom spänningsbegränsning. Under normala förhållanden omvandlar bränslet och oxidationsmedlet lagrad energi, elektrokemiskt, utan någon värme eller gasavyttringar. Om elektrod-materialet någon gång skulle reagera kemiskt, i en elektrokemisk cell, så skulle bränslet och oxidations-medlet direkt omvandla den kemiska energin till utsöndring av gas och hetta. När reaktionen väl startat kommer den med stor sannolikhet att fullföljas och den direkta kontakten mellan bränsle och oxidationsmedel leder till en så kallad termisk rusning(19).

Olika batterikemier har olika misslyckandereaktioner. Den vanligaste är att vid missbruk så utsöndras värme och gas. De produceras vid samma kemiska reaktioner men det finns tillfällen då endast en av dessa utsöndras(48). Vid förhöjda temperaturer hos LCO så frigörs syre som kan reagera tillsammans med de organiska cellkomponenterna. LFP tål termisk misshandel extra bra på grund av de starka fosfatsyrebindningarna(19).

Tillverkarna av LJBer strävar efter att öka effekttätheten så mycket som möjligt. Detta går att göra genom att aktiva material som har högre energi eller packa och dimensionera tätare. Detta medför högre säkerhetsrisker. Forskningen strävar efter att minska dessa risker som görs inom två områden. Det ena är genom avancerade elektroniska skyddskretsar som innehåller batteriövervakningssystem. De kan utifrån gå in och ändra eller avbryta batteriet vid ofördelaktiga och kritiska tillstånd hos batteriet. Det andra området är de olika cellkomponenterna och deras sammansättning hos batterikemin. Det inkluderar elektrodmaterial, separator och elektrolyten som skraddarsys för en högre inneboende säkerhet. Ett exempel är att applicera ett ytskikt på katoden med olika oorganiska lager. Det har visat sig mildra de exotermiska reaktionerna mellan elektrolyt och katodmaterial(19).

Dagens skyddskretsar kan bara skydda mot missbruk utifrån så som en elektrisk kortslutning eller en felande laddare. Skulle en defekt ske inom cellen orsakade av mikroskopiska metallämnen som kommit dit vid tillverkningen så får skyddskretsen svårt att hejda förloppet(33).

Under vissa ovanliga tillfällen så kan mikroskopiska metallpartiklar komma i kontakt med andra delar av cellen vilket kan leda till en intern kortslutning, anser Sony(56). Dagens celltillverkare använder sig av otroligt noggranna metoder för att minimera antalet metallpartiklar som uppstår under kapning, pressning och slipning(54). Fastän att celltillverkarna strävar efter att minimera förekomsten av metallpartiklar vid tillverkning så är det ändå omöjligt att eliminera dem på grund av komplexa konstruktionsmetoder som används för att montera ihop en cell(56).



*Fig 44. Ett LJB som orsakat skada på en laptop. Enligt Sony kan anledningen till termisk rusning vara förorenade mikroskopiska partiklar av Fe, Cu, Ni eller Al. Isidor Buchmann har framställt figuren och Cadex Electronics Inc. har givit tillåtelse att använda den(56).*

En mild kortslutning orsakar endast en förhöjd självurladdning och lite värme avges eftersom urladdningsenergin är låg. Men om tillräckligt med metallpartiklar sammanstrålar vid en punkt så uppstår där en kraftig kortslutning. Denna leder till kraftiga strömmar mellan elektroderna och ger då en kraftig temperatur stigning. En så kallad termisk rusning(56). För LCO sker det mellan 130-150 °C, för NMC mellan 170-180 °C och för LMO är det runt 250 °C. LFP har liknande och bättre temperaturegenskaper än LMO(41). I fig 44 har ett LCO batteri förorsakat en termisk rusning i en laptop. Den termiska stabiliteten är kanske den mest viktiga parametern bland flera andra säkerhetspunkter(19).

## Felkällor för LJBer

Termisk rusning kan ske, eller lättare ske, då LJB utsätts för fel, exempelvis överladdning eller kortslutning(50). Nedanstående figur illustrerar olika orsaker för en termisk rusning eller snarare orsaker till en celltemperaturökning som i värsta fall leder till en termisk rusnings reaktion och som eventuellt kan spridas till intilliggande celler(9).

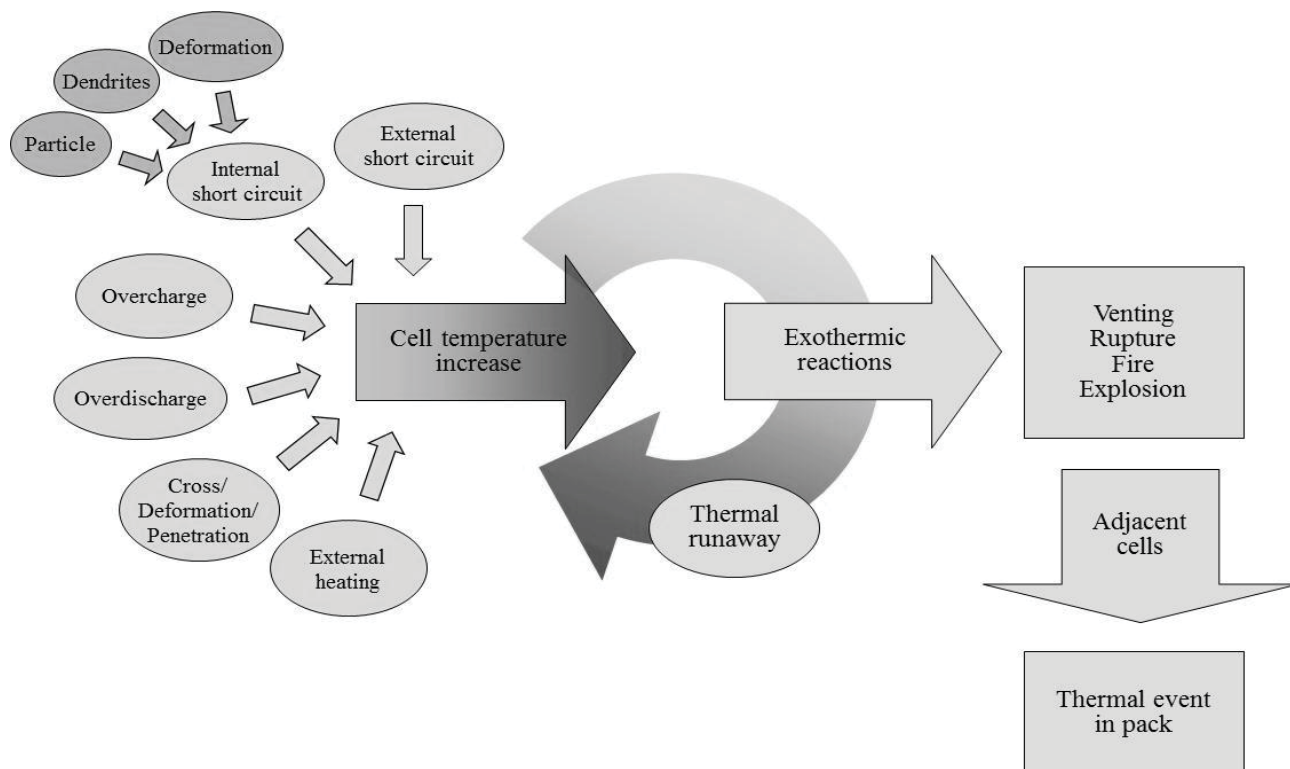


Fig 45. Illustration av den termiska rusningens kedja ifrån orsakande faktorer till spridning till intilliggande celler(9). F Larsson har gjort figuren samt givit tillåtelse för dess användning.

De olika felen är uppdelade i tre huvudkategorier. Termisk misshandel som inkluderar bland annat förhöjda rumstemperaturer, hastiga över- och underladdningar. Elektrisk misshandel som inkluderar, över- och underspänningar, kortslutning och delvis kortslutning med mera. Den sista är då mekanisk misshandel såsom fall, vibrationer och stötar(19).

En extern kortslutning är det mest vanliga felet för ett LJB. Därför innehåller alla standarderna tester för just detta. Celler kan i allmänhet stå emot en extern kortslutning. Dock är stora celler som är över 10 Ah, celler som klarar av att uprätthålla stora kortslutningsströmmar, har en hög inre impedans och celler som har en låg inneboende termisk stabilitet mer benägna att inleda en termisk rusning. Intern kortslutning kan orsakas av ett främmande objekt, projektil, separatorbrott, dålig celldesign och icke precisa tillverkningsprocesser(19).

Fysisk misshandel såsom punktering, krossningar, skakningar eller vibrationer gör att cellen eller LJB paketet riskerar en intern kortslutning. Ju större specifik energi en cell har desto större kortslutnings effekt. Förutom detta så riskerar brandfarlig elektrolyt att läcka ut och orsaka eventuell sekundära brand vid användning(19).

## Den termiska värmeavgivningens förlopp hos cellen

När en cell själv avger inneboende energi i form av värme så kan det bero på flera olika orsaker. Det kan till exempel börja med att en intern kortslutning orsakar ohmsk uppvärmning när all ström går emellan elektroderna ( $I^2 \cdot R$ ). När temperaturen når till ett visst läge så börjar cellen själv skapa inneboende reaktioner som leder till självupphettning(19).

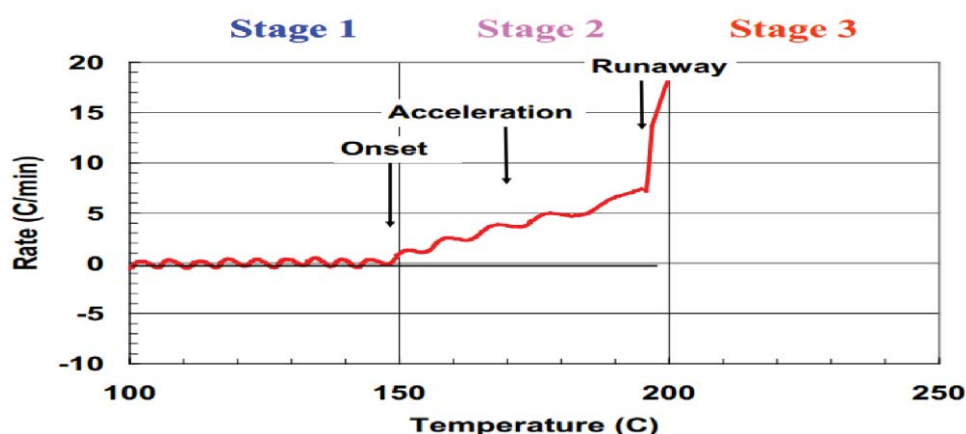


Fig 46. Cellens temperatur avgivande i olika stadium och moment. Med författarnas tillåtelse(19).

För att karakterisera gasgenerering, som eventuellt sker under onormala arbetsförhållanden, så utsätts LJB celler och paket för hög temperatur. Detta för att efterlikna scenarion som möjligtvis kan ske under användning. I dessa test så kan cellernas reaktion delas in i tre moment. Dessa moment illustreras i fig 46 under en termisk rampning och den första är vid det tillfälle då cellen kan definieras som värmeutsöndrande. Då graden av självupphettning har nått 0,2 °C/min så betraktas denna punkt vara nådd(19). Lite kontrovers äger rum kring detaljer om den termiska rusningen men annars finns en samstämmighet bland forskare, att den termiska processen inleds av att det fasta-elektrolyt-mellanlagret (SEI) bryts ned(55). Detta brukar inte vara något problem för ett väldimensionerat batteripaket att klara. Ökad reaktivitet på grund av SEI lagrets nedbrytning som blottar anoden för reaktion med elektrolyten försvårar dock. När då inte den genererade hettan kan avges så accelererar den genererade hettan ytterligare och nästa moment ger då sitt uttryck, den så kallade accelererande fasen. Den beror på att SEI lagret bryts ner ytterligare samt att oxidation av elektrolyten sker vid katodens ytlager. Denna reaktions styrka beror på cell kemism samt SOC. Ventilering och utsläpp av gas är en potentiell följd i denna fas. Fortsätter hettan att accelerera så kommer fas 3 att inledas och det är termisk rusning. Anledningen till detta är katod och/eller anod reaktioner av hög grad som orsakar att temperaturen stiger mycket hastigt. Eld eller explosion kan bli en följd av detta. Termisk rusning kan beskrivas som att självupphettningsgraden har stigit till 10 °C/min. Det är högst osannolikt att en extern kylningsmekanism eller åtgärd skulle kunna kväva cellreaktionen när det har gått så här långt. Momentet då fas 3 eller den termiska rusningen inleds kan bli fördröjt i minuter, timmar eller till och med dagar(19).

## Lager på lager av skyddsmekanismer

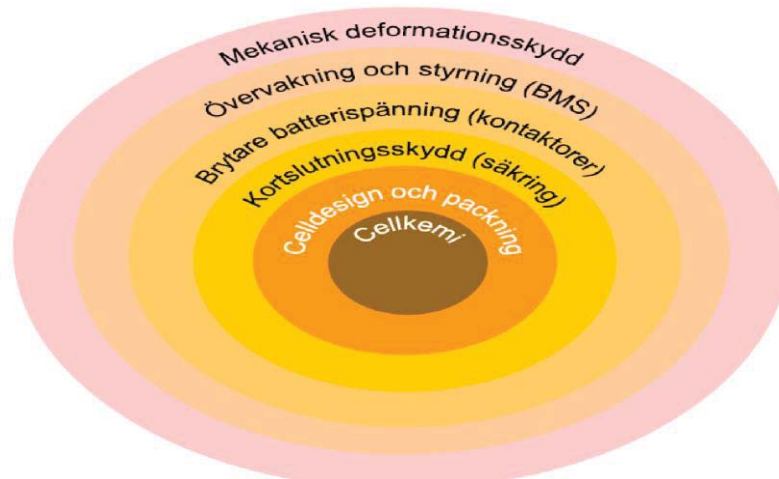


Fig 47. Ett lager på lager perspektiv med säkerhet i avseende(9). F Larsson har gjort figuren samt givit tillåtelse för dess användning.

Att koppla inneboende säkerhetsmekanismer med att använda en eller flera externa säkerhetsanordningar är ett effektivt sätt att förhindra en batteriexplosion för närvarande(9)(57)(19). I fig 47 ovan studeras säkerhetsmekanismerna ur ett lager på lager perspektiv. Dock behöver termisk rusningsförhindrande mekanismer samt BMSen att bli bättre förstådda och utvecklade, speciellt vad gäller hybrid och elektriska fordon(57).

LJBpaket har många inneboende skyddsnivåer för att uppnå säkerhet under nästan alla förhållanden i händerna på allmänheten. Battericellen i sig har flera skydd så som en inbyggd temperatur switch, PTC resistor, som skyddar mot höga strömpulser, en kretsavbrotts anordning (CID), som öppnar den elektriska anslutningen vid ett cell tryck på 1000 kPa och en skydds ventil som släpper ut gas vid snabb förändring av celltrycket(33).

Ihop med detta finns en externskyddskrets som förhindrar att laddspänningen för varje enskild cell inte går över 4,3 V. Dessutom så slår en säkring av strömmen om ytemperaturen av en cell övergår 90 C°. För att förhindra celler ifrån överurladdning slår en kontrollkrets ifrån strömmen vid 2,2 V/cell(33).

## Några av Teslas implementerade skyddsnivåer

De bästa tillverkarna av LJB system implementerar 6-7 försvarslinjer medan andra bara har en eller två(19).

Tesla Roadsters revolutionerande batteripaket har använt LCO celler som har en svag termisk stabilitet. Men tack vare lager på lager av säkerhetsmekanismer har de lyckats göra ett säkert batteripaket. Dock har Tesla bilar börjat brinna vid krocktester på grund av läckande elektrolyt. De valde 18650 celler och om en termisk rusning sker i en av dem så blir konsekvenserna små om termisk rusning inte sprider sig till närliggande celler. De valde celler ifrån Fortune 500 som förser dem med celler av god kvalité(24).

De har även packat sina celler i stålbehållare vilket ger paketet en robust konstruktion som minskar risken för att cellen skall penetreras och kortslutas av objekt med hög rörelsemängd och det ökar också värmeavledningsförmågan. De använder sig av aluminium som hölje till batteripaketet istället för plast vilket ger större tolerans för mekanisk misshandel och det smälter eller brinner inte lika lätt. De använder CAN bussar för att batteriövervaknings-systemet skall kunna kommunicera med övriga fordonets mikroprocessorer. Varje cell har 2 inbyggda säkringar och alla de 11 batterimodulerna har också var sin egen huvudsäkring(24).

Om teslas 7000 små celler ersätts med 20 jättestora celler, som då är inkapslade av samma volym, så uppnås en ytarea av cellerna på 3,5 kvadratmeter istället för en cellyta på 27 kvadratmeter. Detta har avsevärda fördelar ur värmeavledningssynpunkt. Dessutom blir temperaturskillnaden mellan den varmaste och den kallaste punkten avsevärt mindre om man använder många små celler istället för få stora(24).

De har två högvoltkontaktorer för att avskärma de höga spänningarna ifrån resten av bilen ifall vissa oroväckande signaler upptäcks. Kontaktorerna är endast stängda när de är beordrade att göra så annars är de öppna som extra försiktighets åtgärd(24).

Deras batteripaket har också sensorer för att upptäcka tröghetsmoment som uppstår vid krasch eller vältning. Den har även sensorer som upptäcker rök, fukt och vätska(24).

## Den inneboende säkerheten

En spridning av den termiska rusningen till intilliggande celler får inte ske. LJB paket för elfordon är problematiskt eftersom de kan inhysa 1000 gånger mer energi än vad ett laptop-LJB gör. Dessutom verkar de i ett misshandlande klimat med stora temperaturvariationer, vibrationer, höga grader av upp och urladdningar(19).

Den termiska rusningarna eller de så kallade fältfelen kan idag inte upptäckas när cellerna granskas och genomgår vissa standardtester. Alla de celler som har återkallats av applikationstillverkare har genomgått och godkänts vid sådana tester. Visserligen arbetas det intensivt med nya tester som kan implementeras i teststandarder för att bättre återspegla verkligheten(19).

Förutom standardtesterna så genomför celltillverkarna röntgenundersökningar av cellerna för att upptäcka eventuella defekter som kan ha skapats vid tillverkningen, till exempel ojämna lager(19).

Fältmisslyckanden orsakade av tillverkningsmisstag och som leder till intern kortslutning uppskattas att vara 1 cell på 10 - 40 miljoner, (gäller 18650 celler). Detta delvis tack vare de inneboende säkerhetsmekanismerna så som CID, PTC, säkringar, avledningsdioder och BMS system(19).

Det förekommer olika typer av interna kortslutningar och två av dem är mellan katod och anod och mellan aluminium och anod. Den elektrodmetall som katodmaterialet är fäst på är aluminium. Det är den sista kortslutning som leder mest ström och leder till så kallad joule upphettning. Detta eftersom resistansen är mycket lägre än mellan anod och katod. Denna kortslutning skulle kunna undvikas genom en mycket precis celldesign(58).

### SOC begränsningens effekt

Den termiska rusningens temperatur är lägre när cellen är fullt laddad(41).

Speed mm/sec	2	4	8	12	16	Speed mm/sec
EOCV						% SOC
4.2V	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	95
4.05V	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	FAIL	85
4.0V	FAIL	FAIL	FAIL	PASS	PASS	79
3.975V	FAIL	FAIL	PASS	PASS	PASS	74
3.95V	FAIL	PASS	PASS	PASS	PASS	71
3.9V	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	62

■ FAIL    ■ PASS

Fig 48. Spikpenetreringstest av en cylindrisk LJB cell med 2,2 Ah(59). © 2014 Elsevier

I tabellen ovan visas ett spikpenetreringstest med olika inkomsthastighet vid varierande cellspänning. Grönt, godkänt, när ingen reaktion sker och rött, icke godkänt, när en termisk rusning sker. 3,9 V motsvarar ungefär 62% SOC(59).



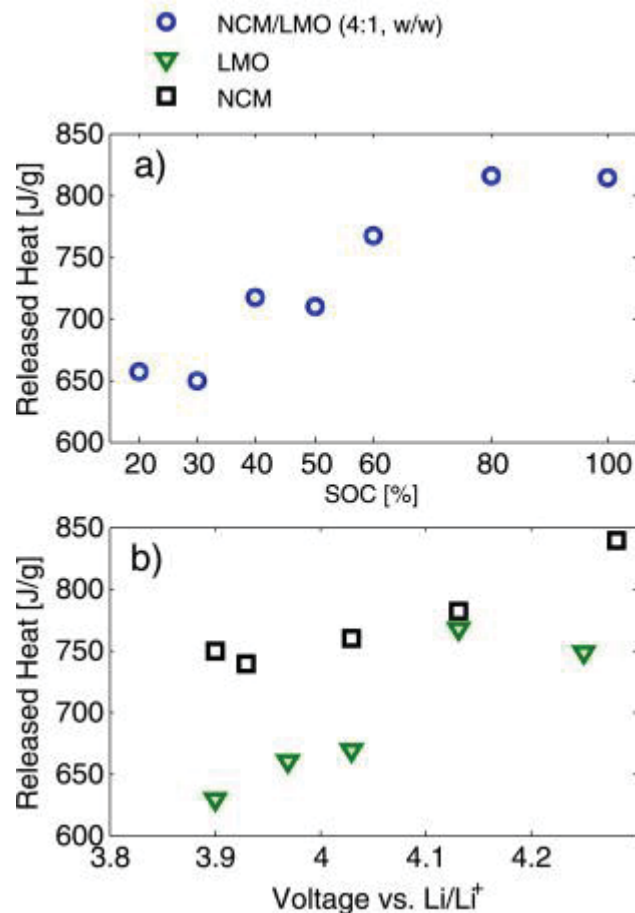


Fig 49. Den översta grafen visar den maxmala utsöndrade hettan som utsöndras vid termisk rusning för NMC/LMO cellen vid olika SOC grader. Nästa graf visar den utsöndrade hettan ifrån NMC och LMO cellerna vid olika potentialer(60). © 2014 Elsevier

I ovanstående grafer visas värmeutsöndringen för 3 olika pouchceller med olika katodkemier. En cells katod består av en blandning av NMC och LMO. Där LMO utgör en femtedel av katodmassan. Kapaciteten för denna cell är 2,0 Ah. Nästa är en NMC cell med 2,0 Ah och den sista är en LMO med 1,1 Ah. LMO cellen visar i den nedre grafen en signifikant ökning av utsöndrad hetta mellan 4,03 V till 4,13 V. Detta beror på den sista oxidationen av manganjonerna till att bli +4 joner. Liknande gjorde NMC/LMO cellen fast i mindre grad. NMC utsöndrar mer hetta eftersom nickels oxidationskapacitet är större än mangans(60).

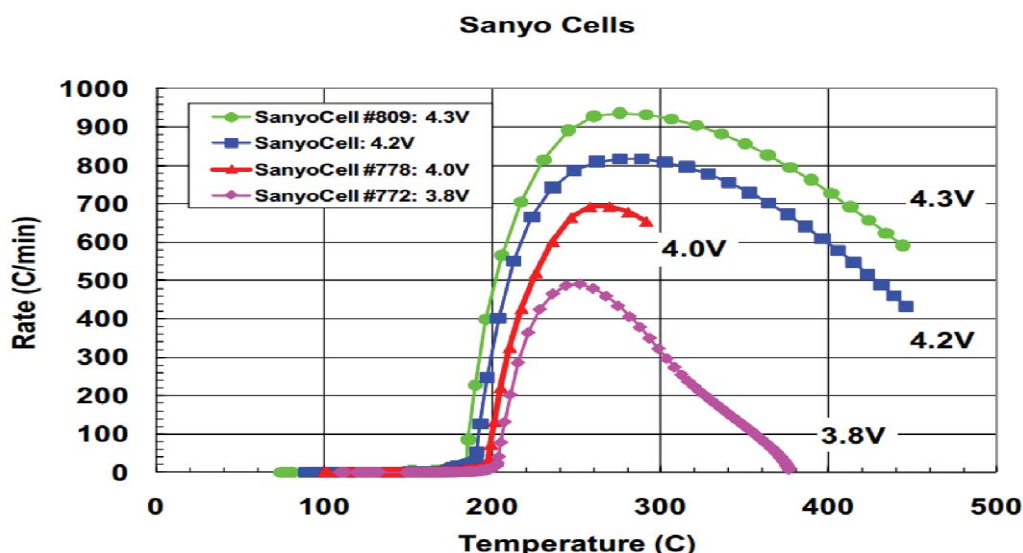


Fig 50. Graf över värmeutsöndringsmängden för Sanyo celler med olika potential vid olika temperaturer. Med författarnas tillåtelse(19).

Grafen ovan visar SOC gradens betydelse på den termiska stabiliteten. Vid 100% resulterar reaktionen oftast till en termisk rusning. Vid 80% kan temperaturen minskas till 200 °C och vid 70% så kan en termisk rusning helt undvikas. Detta experiment gjordes på Sanyos LCO 18650 celler(19).

### Effekten av mängd laddad kapacitet

Sample	Capacity	Energy
LiNi $\frac{1}{3}$ Co $\frac{1}{3}$ Mn $\frac{1}{3}$ O <sub>2</sub> NCM	1.5 Ah	5.5 Wh
LiCoO <sub>2</sub> LCO	2.2 Ah	8.2 Wh
LiCoO <sub>2</sub> LCO	2.6 Ah	9.5 Wh
LiFePO <sub>4</sub> LFP	1.1 Ah	3.5 Wh

Fig 51. Tabell över de fyra cellernas katodkemi och deras kapacitet. Med författarnas tillåtelse(19).

Cell ID	1100 mAh	1500 mAh	2200 mAh	2500 mAh
LFP	X			
NCM + LMO	X	X		
LCO	X	X	X	
LCO	X	X	X	X

Fig 52. Tabell över vilka kapacitetstester respektive cell var med och testades. Med författarnas tillåtelse(19).

Tabellerna ovan visar 4 olika celler med 3 olika cellkemier. De har olika mycket totalkapacitet och de testades mot varandra innehållande samma mängd kapacitet oberoende av SOC(19).

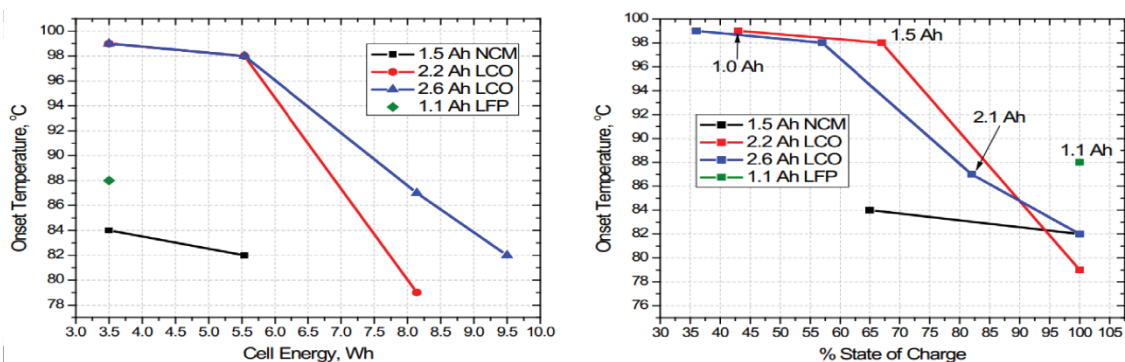


Fig 53. I den vänstra grafen visas reaktionstemperatur mot laddad effekt och i den högra visas reaktionstemperatur mot SOC grad. Med författarnas tillåtelse(19).

LFP cellen kan bara vara med vid ett test som illustreras i de två graferna ovan. Detta på grund av att dess kapacitet inte räcker till att vara med i de andra. Graferna visar på när en reaktion skapas inne i själva cellen som gör att extra tillskottsvarme skapas. Den vänstra grafen visar vid vilken laddad effekt detta sker och den högra vid vilken SOC som detta sker. Detta visar på att förbättrade säkerhetsaspekter beroende på katodkemi mycket väl kan bero på energikapacitet och att LFPs säkerhetsfördelar kanske mestadels bara beror på dess låga cellspänning(19).

### Ålderns påverkan av den termiska stabiliteten

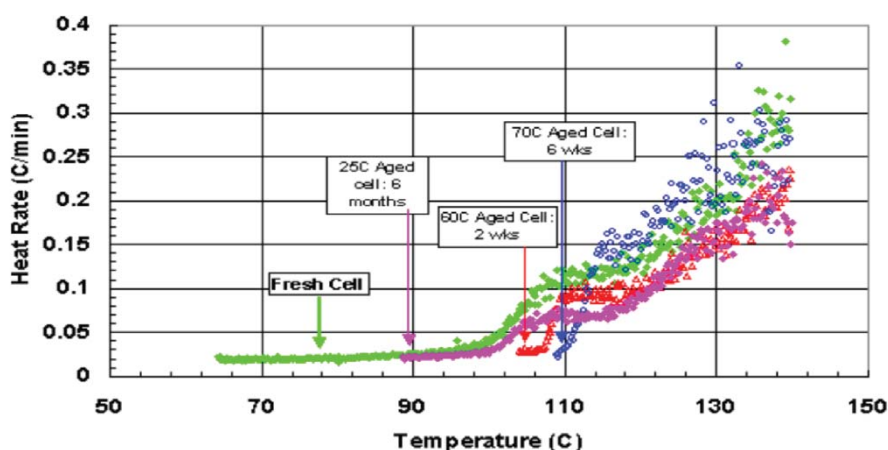


Fig 54. Graf över hur 18650 Sony celler utsöndrar värme under ett ugnstest. Cellerna har tidigare åldrats under olika omständigheter. Med författarnas tillåtelse(19).

I figuren ovan visas fyra olika celler, en helt ny, en 6 månader, under 25°C, föråldrad cell, en cell som åldrats i 60 °C under 2 veckor och en som åldrats i 70 °C under 6 veckor. Den nya cellen börjar utsöndra värme tidigast och ännu mer tydligare blir det om cellen som varit misshandlad av 70 °C bortses. Faktum är att den cellen som har åldrats under rumstemperatur utsöndrar minst värme(19).

I ett experiment jämförs 4 olika celler som har blivit cyklade under 50°C tills de har förlorat viss kapacitet av den ursprungliga 80% SOC. En cell blev cyklad tills den fick en avvikelse på 3%, nästa till 6% och den sista tills 9%. Därefter laddades samtliga celler ihop med en oåldrad tills de nådde 100% av SOC. Därpå utsattes de av ett test på upptill 160°C. Cellerna hade en MCMB anod och en LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> katod. De cyklade cellerna visade på en bättre termisk stabilitet då de hade en senare initieringstemperatur för den termiska rusningen(19).

## De olika katodkemierna vid överladdning

LJBet blir ostabil vid för hög spänning exempelvis vid 4,3 V under en längre tid så bildas metallisk litium på anoden och katoden arbetar som en oxideringsagent som bildar koldioxid ihop med elektrolyten. När trycket stigit till 3450 kPa så ger det yttre säkerhetsmembranet vika samtidigt som cellen kan ha fattat eld, en termisk rusning(41).

Över och underurladdningsfel kan ske ifall BMS inte skulle fungera eller vid allvarliga obalanser mellan celler. Viktiga parametrar vid överladdning är en låg urladdningsström och vilken cellkemi som används. En låg laddningsström gör att reaktionen kan bli mild. LFP är extra känslig vid överurladdningar ty när SOC är 100% är allt litium utarmat ur katoden till skillnad ifrån LCO som då har 50% kvar. Mätningar har gjorts på detta och det har visat sig att fortsatt laddning vid avsaknad av litium leder till massiva temperaturökningar. Detta illustreras i fig 55 nedan där olika kemiers reaktion visas vid olika grad av SOC. Det visar sig att LFP är svagast av alla LJB kemier i detta säkerhetsavseende följt av LMO. Litium plattenering på anoden är en följd av snabb laddning vid låga temperaturer(19).

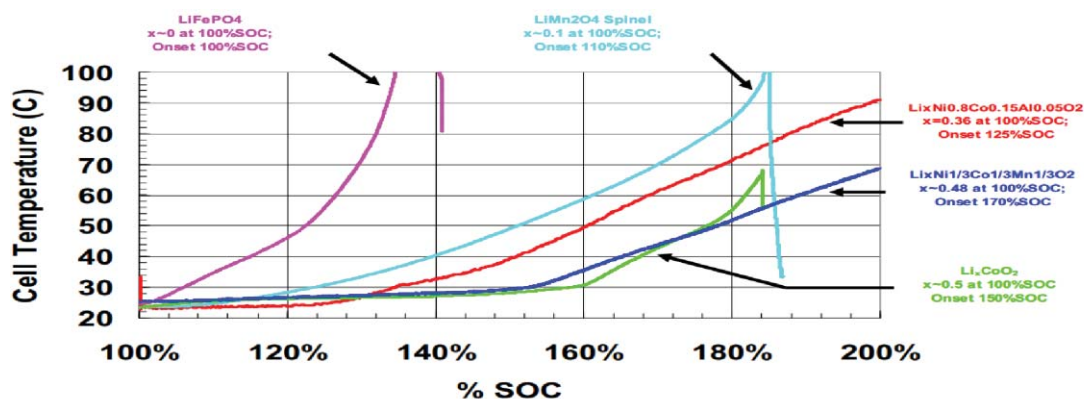


Fig 55. Termisk urladdningsreaktion vid en 1C- grads urladdning och varierande grad av SOC för respektive katodkemier. Med författarnas tillåtelse(19).

## Separators inverkan på säkerhet och kapacitet

Separatorm kan mätas till endast några tiondelar av en mikrometer. Det går också att ha säkerhetsmekanismer i separatorm genom att ta två lager polypropylen och omgärda ett lager med polyetyl. Detta ger skydd mot milda överhettningar och fungerar så att om temperaturen skulle stiga mot 135°C så börjar de två ytterlagren att smälta och blockerar jonernas genomfart i mellanskiktet. Polypropyl har ungefär 30 °C högre smältpunkt. Cellen är då permanent avbruten och kan börja kyla ner sig(61). Detta skydd påverkar dock kapaciteten per volymenhet eftersom separatorm blir tjockare(15)

En viktig del i säkerheten hos en separator med 2 material är att det skall vara ett så stort avstånd som möjligt emellan bryt- och smältpunkten. Detta därför att det är viktigt att separatorn kan bibehålla sin mekaniska integritet eftersom det alltid råder ett visst termiskt tröghetsmoment(61).

Det finns celler som är förstärkta med självläkande separatorer och används för elektriska drivlinor. Tyvärr driver detta upp cellkostnaden betydligt och de gör cellerna större. Istället för 170 till 200 Wh/kg så får de nya cellerna 100-110 Wh/kg(33).

Brytareseparatorer som är mindre än icke ideala kan vara orsak till interna kortslutningar ovanför brytarpotentialen, särskilt hos seriekopplade celler. Därför kan i vissa fall separatorer som inte erbjuder denna brytarmekanism, vid höga temperaturer, erbjuda en bättre termisk stabilitet. Mer forskning krävs för att utreda detta mer noggrant(19).

### Val av anodmaterial och deras effekt på säkerheten

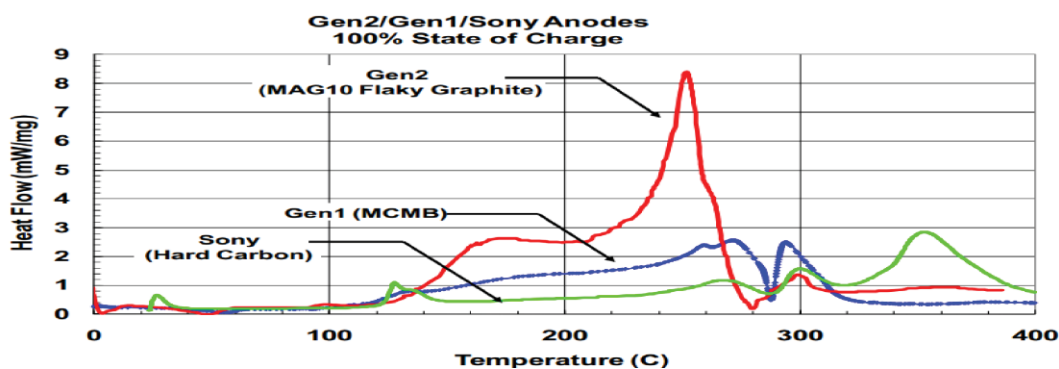


Fig 56. Värmegenerationsfördelningen beroende på temperatur för olika anodmaterial. Med författarnas tillåtelse(19).

Kolanoder är baserade på antingen naturligt eller syntetiskt grafit och kan ha en liten eller stor ytare. De har olika kemiska strukturer ifrån formlös, sfärisk eller flagiga korn. Dessa olika egenskaper påverkar anodens termiska reaktion vid fel. I ovanstående graf illustreras hur anod material med olika kemisk struktur reagerar. Anoderna är hårt karbon (Sony), MCMB (GEN1) och MAG10 (GEN2) med flagiga korn. Alla anoder visar på reaktion vid nedbrytning av SEI på 120°C men därefter reagerar de olika allt eftersom temperaturen stiger. MAG10 visar på sämst termisk stabilitet på grund av att endast ett svagt ytskikt av SEI kunde bildas på partiklarnas kanter. Nackdelen med kolanoder är att de endast har en potential till förhållande till litium på endast 50 mV vilket gör att de löper risk för litiumplatenering vid aggressiva laddningsscenarioer eller en icke enformig strömdensitet(19).

## Elektrolytkonfigurationens effekt på den termiska stabiliteten

Elektrolyten är icke vattenbaserad och består av organiska lösningsmedel, litiumsalt, oftast LiPF<sub>6</sub> litiumhexafluorofosfat, och andra hemliga tillsatser som bara celltillverkaren känner till. Elektrolyten brukar bestå av mer än 15 olika ämnen. Lösningsmedel kan vara Etylenkarbonat, propylenkarbonat, etylmetylkarbonat och dimetylkarbonat. tillsatser kan vara till exempel flammskyddsmedel och cellutjämnare, redox skyttlar(9)(54). Som skydd emot över-spänningar finns molekyler som har en form av "flip-flop" mekanism. De kallas för Redoxskyttlar och fungerar så att vid en potential som är något högre än den övre brytpotentialen, 4,2 V, så växlar molekylerna ifrån ett oxiderat tillstånd till ett reducerat tillstånd(54).

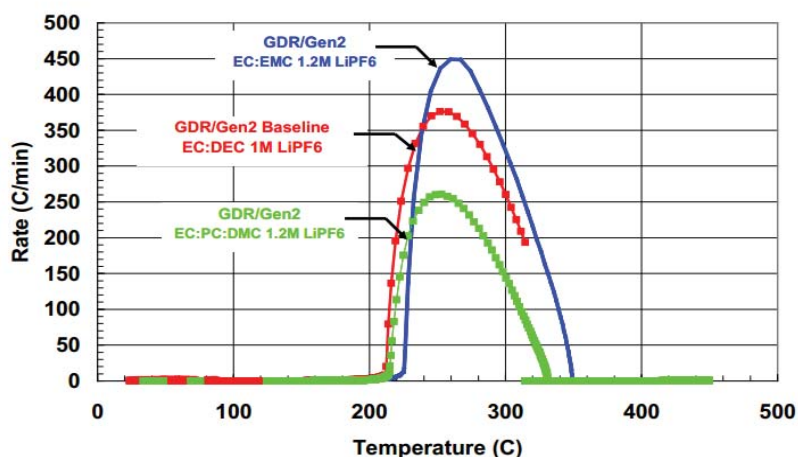


Fig 57. Effekten av olika tillsatta organiska lösningar på värmeavyttringen. Med författarnas tillåtelse(19).

I alla LJB celler finns dock elektrolyter som innehåller litiumsalter som är upplöst med en blandning av organiska lösningar så som etylkarbonat (EC), propylenkarbonat(PC), dietylkarbonat (DEC) och etylmetylkarbonat (EMC). I fig 57 ovan visas deras effekt på värmeavyttringen ihop med en ostabil cellkemi. Valet av elektrolyter baseras oftast på prestanda kriterier så som spänningsstabilitetsområde, temperatur område och ledningsförmåga. Det finns väldigt många olika lösningar, fördelningar mellan lösningar, elektrolytsalter och tillsatser. Men valet av elektrolyt kan spela stor betydelse vad gäller säkerhet. I fig 58 nedan illustreras två av elektrolyterna ifrån fig 57 ihop med en NMC katod. LiAsF<sub>6</sub> har överlägsna prestandaegenskaper men är dock mycket giftigt. PC måste begränsas till mindre koncentrationer eftersom de annars kan leda till nedbrytning av grafitkorn. Men det är också viktigt att välja elektrolyt utefter dess effekt vid missbrukande förhållanden(19).

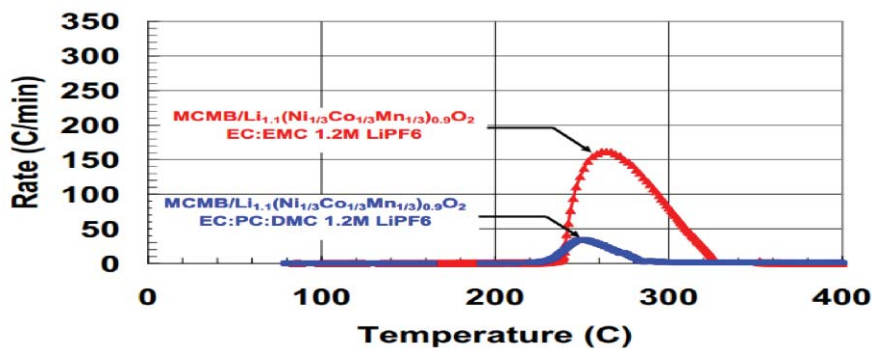


Fig 58. Värmeentalpin vid för  $[Li_{1.1}(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})_{0.9}O_2]$  katod med olika elektrolyter. Med författarnas tillåtelse(19).

### Applicering av ytskikt på cellkomponenter

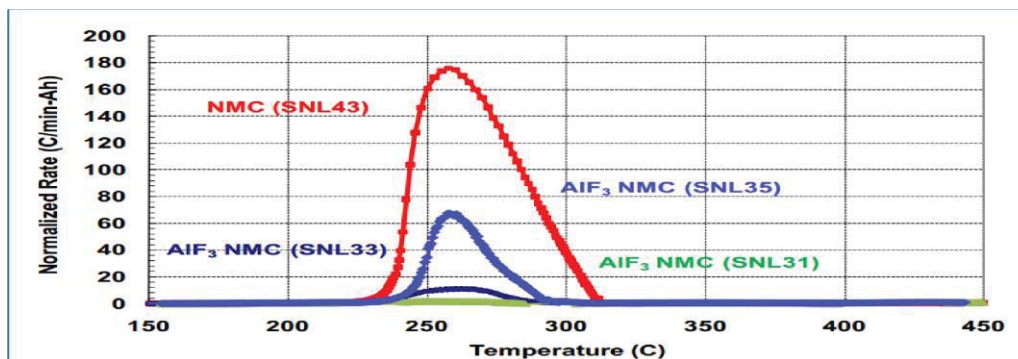


Fig 59. Värmegenereringen ifrån celler utan och med  $AlF_3$  täckning av katoden. Med författarnas tillåtelse(19).

Ett ytskikt på katoden med  $AlF_3$  har visat på förbättrat cykelliv och termisk stabilitet. Fig 59 ovan visar NCA 18650 celler med och utan detta ytskikt. Alla cellerna visar på en reducerad upphettningsgrad och på en förskjutning av den termiska rusningen med 20°C högre. Variationen i resultatet mellan  $AlF_3$  katoderna beror troligtvis på varierande tjocklek samt täckning av katoderna. .  $AlF_3$  är endast ett av flera möjliga ytskikt(19).

## Den termiska värmeavyttringens fördelning, cellkomponenterna emellan

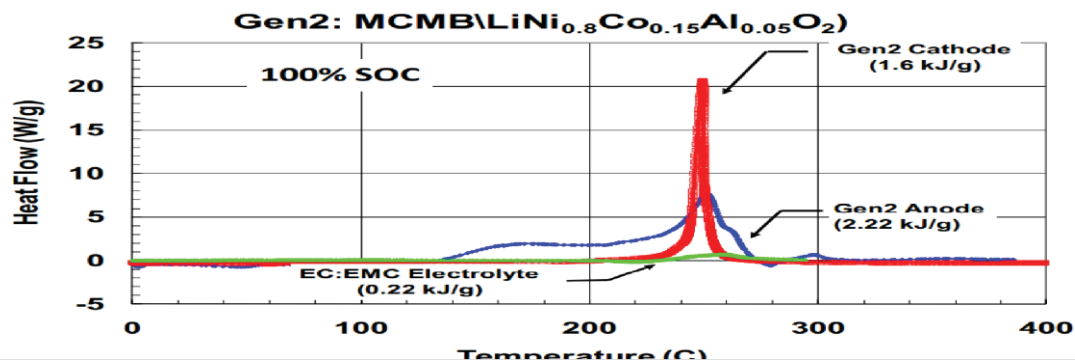


Fig 60. Visar på värme flödet ifrån cellens olika aktiva komponenter. Cellen är en MCMB/LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub>. Med författarnas tillåtelse(19).

I denna cellkomposition står katoden för den mest aggressivaste temperaturökningen vilket är mer fördödande än om värmeavyttringarna är utspridda över en längre tid likt anoden och elektrolyten(19).

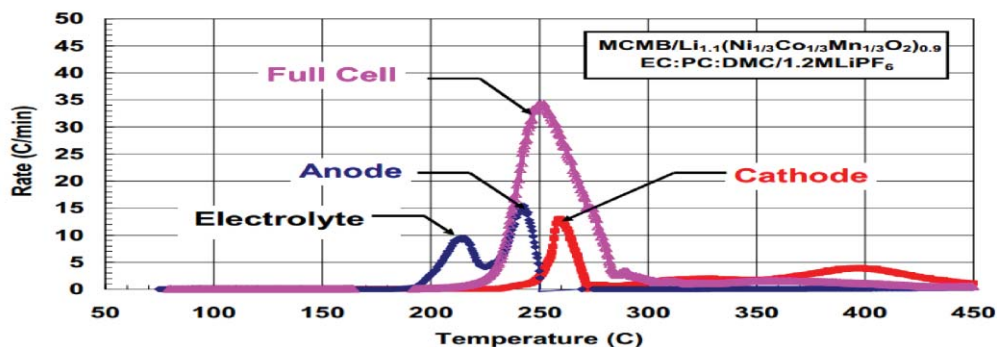


Fig 61. Värmeavyttrings fördelningen mellan de aktiva cellkomponenterna. Med författarnas tillåtelse(19).

I fig 61 ovan visas de olika cellkomponenternas bidragande värmegenerering men till skillnad ifrån tidigare exempel så används en stabilare elektrolyt samt katodmaterial. För LFP eller LMO, som inte oxiderar, står i huvudsak elektrolyten och anoden för värme reaktionen(19).



## Fördelningen mellan gaser genererade vid termisk rusning

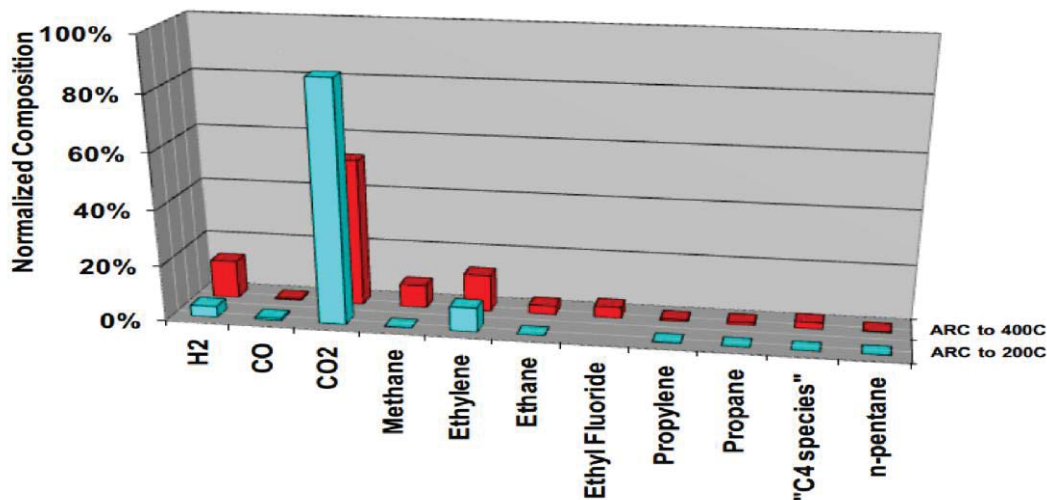


Fig 62. En graf som visar förhållandet mellan andel utsöndrade gaser vid både 200 °C och 400°C. Med författarnas tillåtelse(19).

Huvudelen av den gas som ventileras ut vid övertryck är koldioxid. Andra gaser är förångad elektroyt som består av etylen eller propylen. Brinnande gaser inkluderar förbränningsprodukter av de organiska lösningarna(19).

I figuren ovan visas förhållandet mellan de gaser som utsöndrades vid termisk rusning av en cell. Värt att notera att vid 200°C så består hela 80 % av all utsöndrad gas av koldioxid. Vid 400 °C är andelen koldioxid endast 50 % vilket betyder att en stor andel av farligare gaser har skapats(19).

Det är alltså inte bara elden som är farlig utan också att giftiga gaser utsöndras redan i tidigt skede såsom vätefluorid, fosforoxyfluorid och kolmonoxid m.m. Exakt hur mycket gaser som bildas är ännu oklart. I teorin så är det väldigt mycket gaser men i praktiken så har det visat sig vara mindre. Forskning för att klargöra detta är på väg. I elektrolyten används flour som ger upphov till flera farliga gaser, men det finns elektrolyt lösningar utan flour(9).

## Andelen tillgängligt syre och dess inverkan på den termiska rusningen

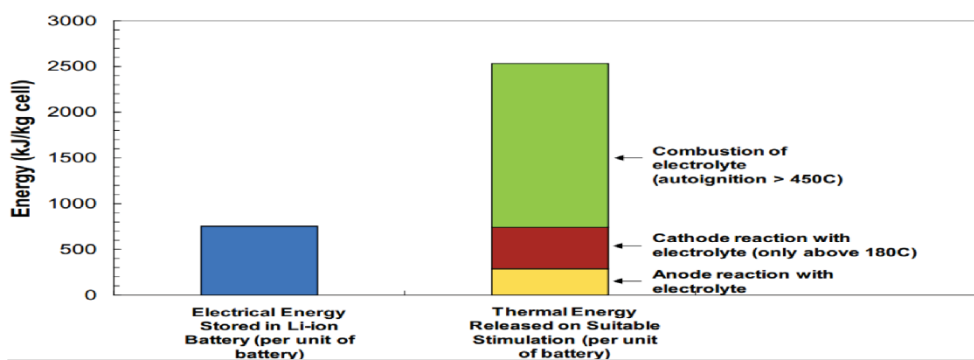


Fig 63. Energjfördelningen uppdelad mellan elektrolytens reaktion med anoden och katoden samt energin hos förbränningen av elektrolyten. Med författarnas tillåtelse(19).

För NMC så är det endast 5-15% av elektrolyten som reagerar med syret som finns i katoden vid en fullständig termisk rusning. Resterande del ventileras ut med risk för antändning och till och med självantändning då gasen har nått en temperatur över 450 °C i kontakt med omgivande luft. Den reaktionen får en entalpi som är flera gånger större än den som uppkommit inne i cellen, se fig(19).

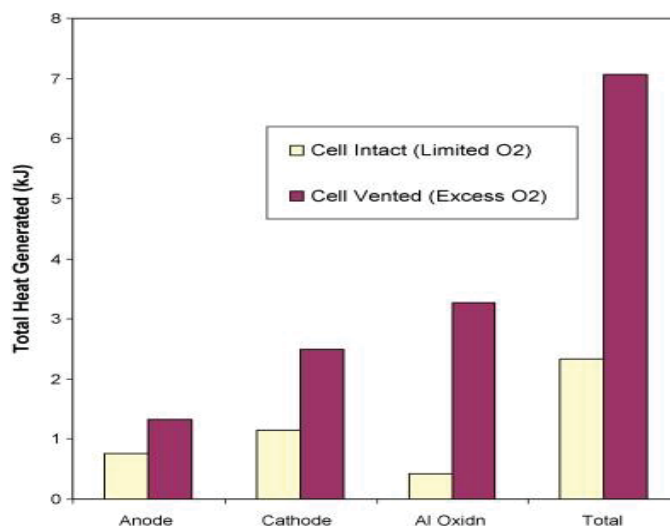


Fig 64. Värmeavyttringen mellan en cell som förblev intakt under termisk rusning och en som inte blev det(62). © 2009 Elsevier

I ovanstående fig 64 så jämförs värmeavyttringen ifrån en cell som förblev intakt under termisk rusning med en cell som inte blev det. Reaktionen begränsades till den syremängd som finns i elektrolyt och katod. Därför kan LJB paket packas in i ett lufttäta förseglande höljen, även om det ökar vikten något(62).

## Effektiva säkerhetslösningar för LJBceller och LJBpaket

Utvecklare på Philips-Medisize har arbetat med att utveckla en design som förminskar brandrisken vid ett LJB katastroftillfälle. Exempelvis en penetrering av batteripaketet, som kan uppstå vid kollision. Höljet runt batteripaketet innesluter en vätska ihop med cellerna. Om till exempel en projektil penetrerar paketet så självsluter batteripaketet tack vare denna vätska. Förseglingen minimerar syret så att flammor inte kan spridas. Samtidigt gör vätskan att temperaturen fördelar sig över hela paketet snabbare. Detta förhindrar en aktivering av en termisk rusning för den utsatta celler(63).

Resultatet blir att en kortsluten cell endast ryker och ventilerar gaser än brinner och exploderar(63).

## Phase-change-materials, PCM, ett värmeabsorberande material

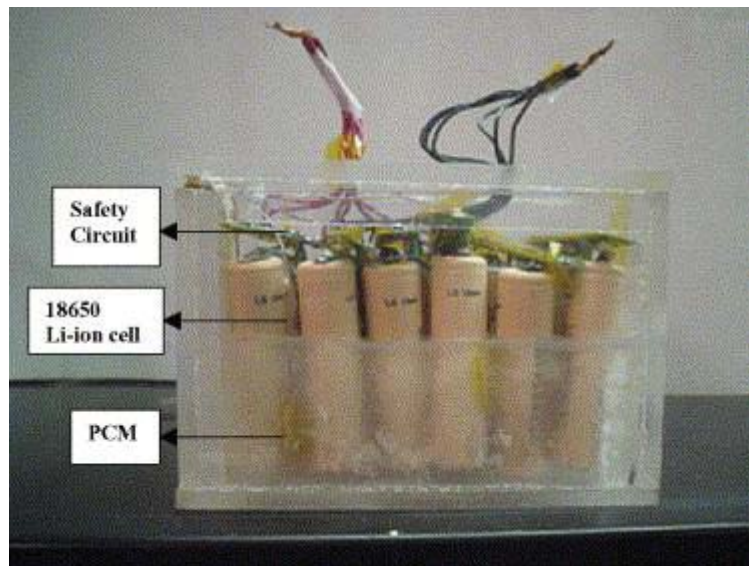


Fig 65. Ett 3S6P LJB paket med 18650 celler och som har PCM vax mellan cellerna(64). © 2005 Elsevier

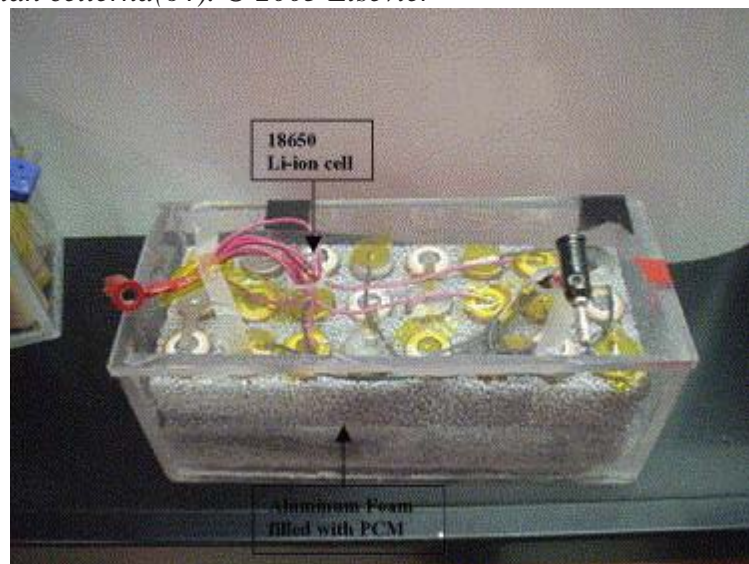


Fig 66. Har inför ett upprepat urladdningstest dessutom fått aluminiumskum emellan cellerna(64). © 2005 Elsevier

LJB paketet hade konfigurationen 3S6P och bestod av 18650 celler med 2,2 Ah. I fig 65 så visas den med tillhörande kontrollkrets redo för ett laddnings- eller urladdningstest. Mellan cellerna finns ett PCM lager. PCM står för Phase-Change-Material och när temperaturen når PCMets smältpunkt så börjar PCM absorbera värme för att kunna omvandlas från fast till flytande form. Just parafinvax kräver mycket värme för att kunna omvandlas och har då en hög inneboende absorptionsförmåga. I fig 66 ovan har paketet dessutom fyllts med aluminiumskum och redo för att göra samma urladdningstest som tidigare. Utöver dessa två scenarion så görs tester med bara aluminiumskum emellan och helt utan både PCM och aluminiumskum. Alla dessa olika konfigurationer testas med för olika hög laddnings- och urladdningsgrad samtidigt som temperaturen mäts. Fig 67 nedan visar resultatet ifrån laddningstesterna och fig för urladdningstesterna. Det är under urladdning som mest värme genereras(64).

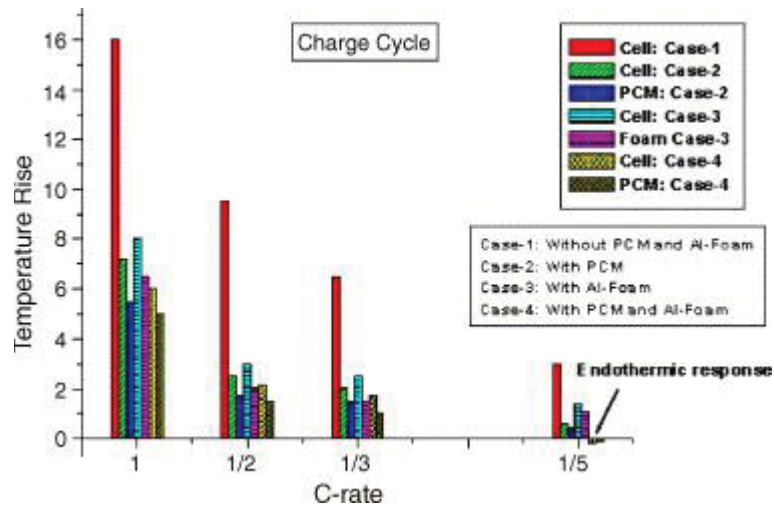


Fig 67. Laddningstest med för fyra kylmedium under olika C-grad(64). © 2005 Elsevier

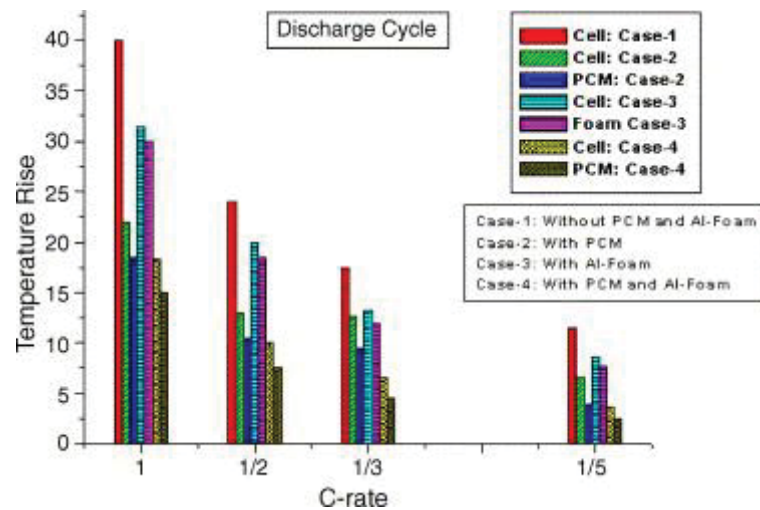


Fig 68. Urladdningstest med för fyra kylmedium under olika C-grad(64). © 2005 Elsevier

Termisk rusning i en cell leder med stor sannolikhet till termisk rusning i nästa cell om inte säkerhets åtgärder för detta vidtagits. På så vis skapas en kedjereaktion i LJB paketet som kan ta några få sekunder eller upp till flera timmar. Detta för att varje cell tar en viss tid på sig att generera en termisk rusning. För att öka säkerheten i ett batteripaket förses varje cell med åtskiljare till nästa cell för att förhindra spridning av den termiska rusningen(64).

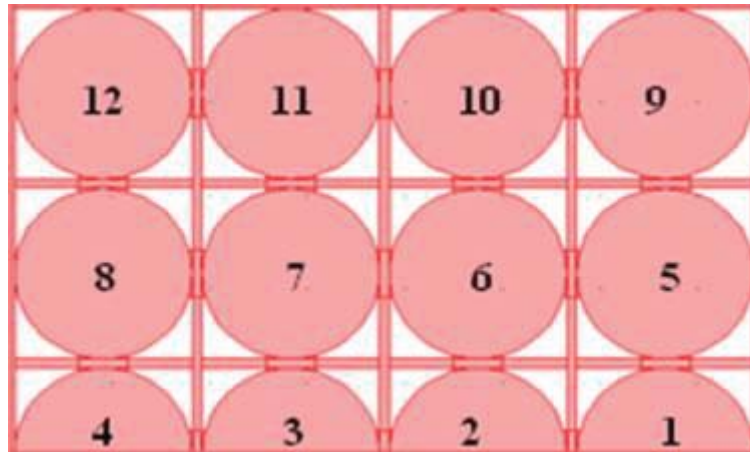


Fig 69. cellernas numrering som används för senare test(65). © 2009 Elsevier

Här är 12 celler, 1,5 Ah, som är optimerade för klara ett högt effektuttag. Mellan alla celler sitter nylon som termiskt och elektriskt avskiljer cellerna emellan. Cellerna är numrerade enligt fig 69 ovan. I nedanstående grafer visas temperaturökningen som sker i de intilliggande cellerna om en termisk rusning sker i cell 1. Graf a) är med ett nylon lager av 1 mm och graf b) med 2 mm. Alltså endast en 35 gradig ökning i cell 5 som värsta fall. Detta leder då inte till en kedjereaktion men det är värt att notera att vid detta test var cellerna inte anslutna elektriskt med varandra. De saknade nickelkoppling emellan sig(65).

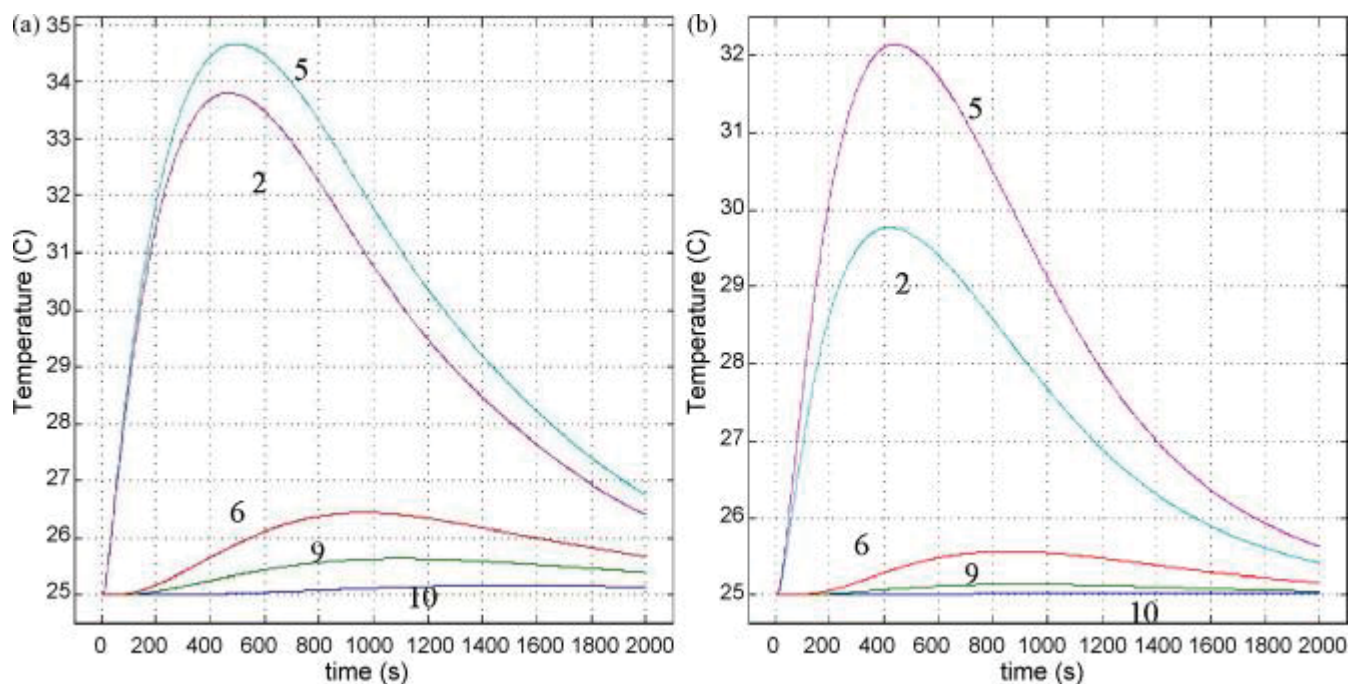
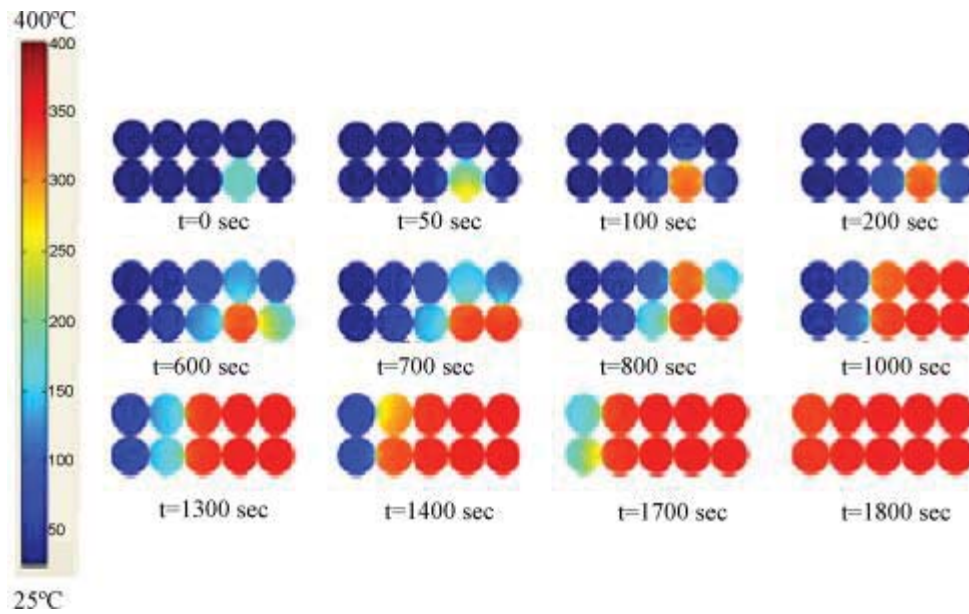


Fig 70. Temperaturökningen för cellerna som ligger intill cell 1. Cell 1 har gjort en termisk rusning. Skillnaden mellan de två graferna är att den till vänster endast har 1 mm mellanrum mellan cellerna och den till höger har 2 mm(65). © 2009 Elsevier



*Fig 71. 10 cellers temperatur uppmätt under 12 tidpunkter som då beskriver kedjereaktionens spridning(65). © 2009 Elsevier*

I Fig 71. så visas hur en termisk rusning sprider sig som en kedjereaktion till intilliggande celler. Detta dock utan nylonisolering(65).

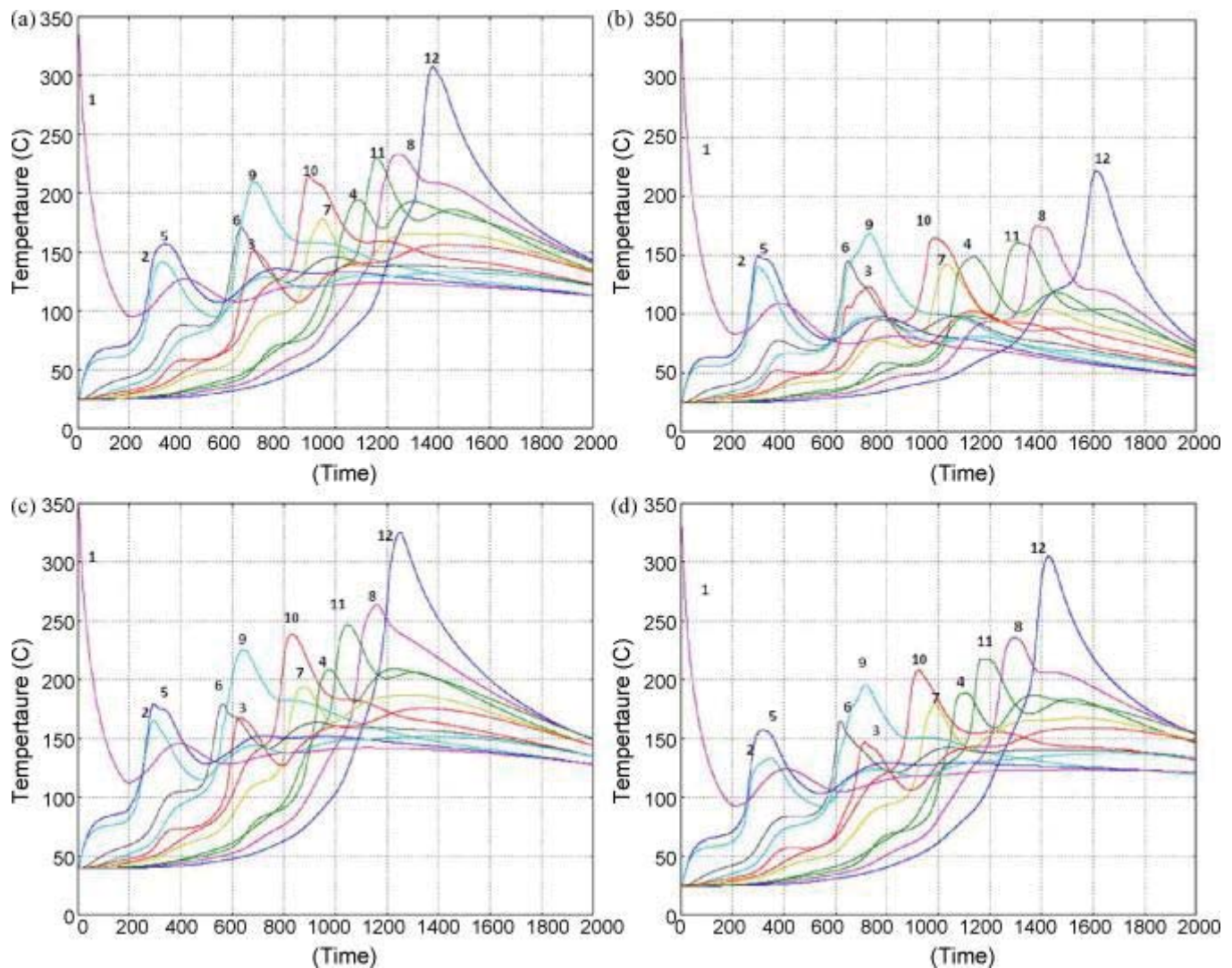
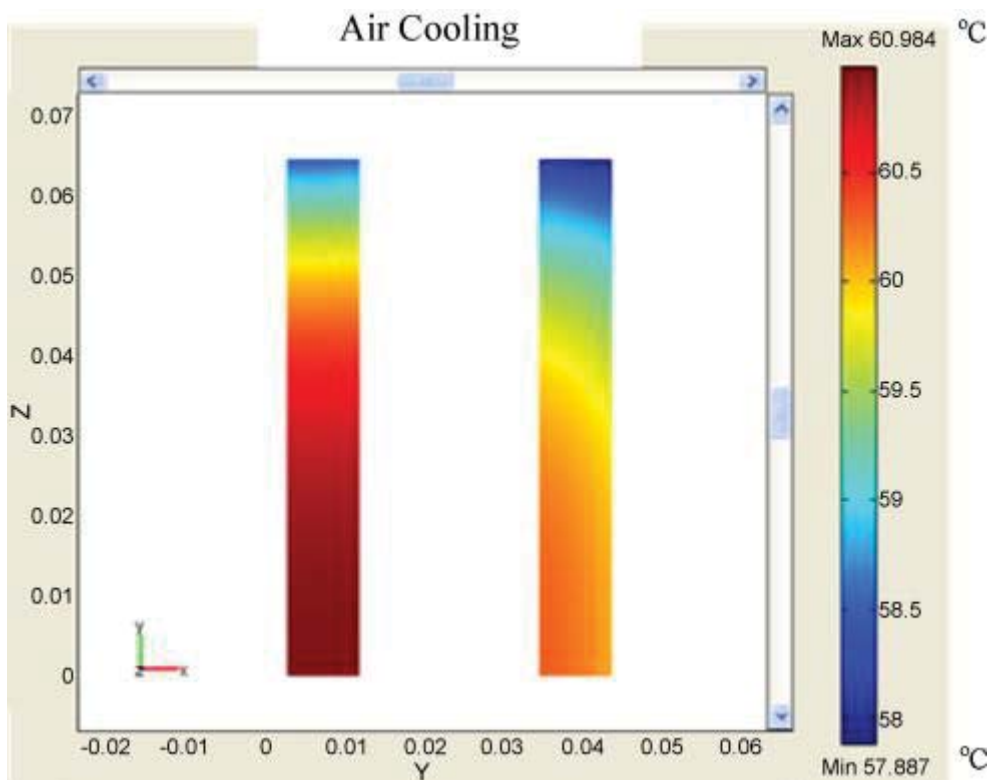


Fig 72. Cellernas temperaturprofil under termisk rusning när aktiv luftkylning används (a) 1 mm gap mellan cellerna,  $h = 5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  och  $T_{rum} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , (b) 1 mm gap,  $h = 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  och  $T_{rum} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , (c) 1 mm gap,  $h = 5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  and  $T_{rum} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , och (d) 2 mm gap,  $h = 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  och  $T_{rum} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (65). © 2009 Elsevier

I Fig 72. visas temperaturförändringen över tiden för samtliga celler. Här kan den termiska-kedjereaktionen tydligt urskiljas och som synes förstärks temperaturen desto längre kommen reaktionen är. I graf a) är luftkylningen inställd så att värmeöverförings koefficienten,  $h$ , blir  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  och rumstemperaturen var  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . I fall b) som också ger det bästa resultatet så ökas  $h$  till 20. Då är temperaturen för alla celler utom cell 12 och 1 under  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . I fall c) så höjs rumstemperaturen till  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  och fläktstyrkan sänks så att  $h$  återigen blir 5. Detta leder till den kraftigaste reaktionen och cell 12 når snabbare upp till sitt maxima på  $325 \text{ }^\circ\text{C}$ . I fall d) så testas nylonavskiljningen vid rumstemperatur av  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  och en fläktstyrka som ger  $h$  till 20. Avståndet mellan cellerna är 2 mm istället för 1 mm. Det höga resultatet torde bero på att nylonet delvis blockerar luftflödet samt att den termiska energin till störst del överförs via elektriska kopplingen av nickel mellan cellerna(65).



*Fig 73. Temperaturprofil för 2 intelligande celler under luftkylning. Rumstemperaturern var 40°C och urladdningsströmmen var 6,67 C(65). © 2009 Elsevier*

Fig temperaturprofilen mellan två intelligande celler när luftkylning är applicerad. Det är två celler i en 4S5P modul. Batteripaketet består av 67 sådana moduler. Rumstemperaturen är 40 °C och urladdningen är 6,67 C, 50 A/modul. Temperatur skillnaden är 3 °C som störst mellan kallaste och varmaste punkt på de två cellerna(65).



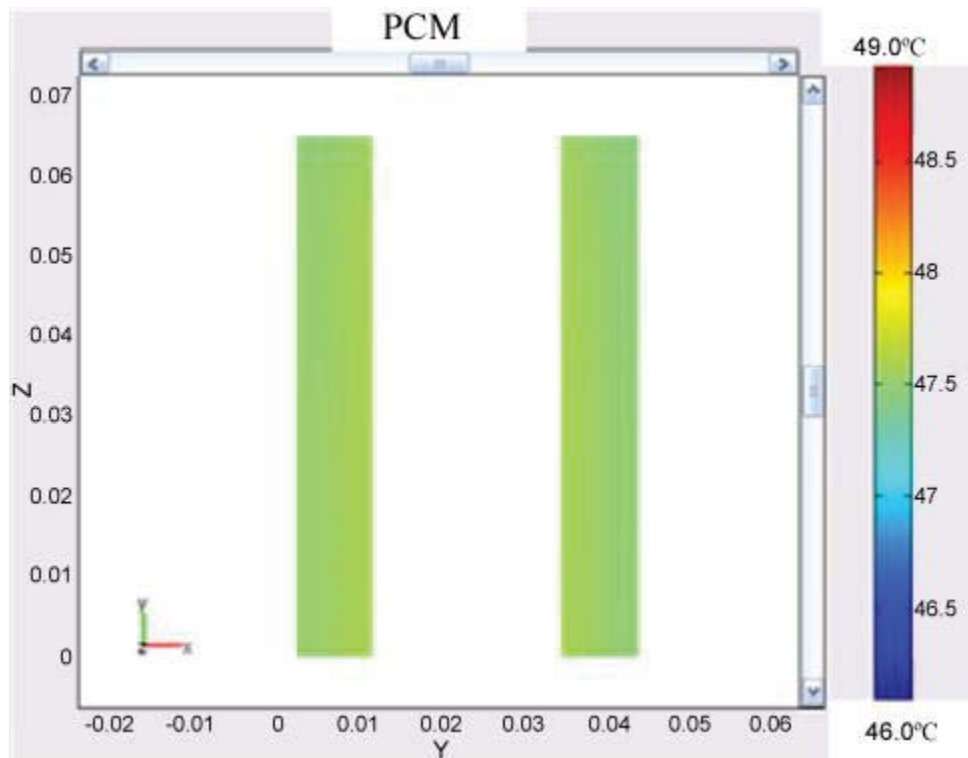


Fig 74. Med PCM som kylmedium så får cellen en enhetlig temperaturprofil(65). © 2009 Elsevier

Med PCM som kylning blir temperaturen något lägre men framförallt så en den enhetlig. Testet som fig 74 illustrerar gjordes vid en rumstemperatur av 40 °C(65).

### STOBA, ett skyddande ytskikt

För att möta problemet med termisk rusning tog det tekniska forskningsinstitutet (ITRI) i Taiwan fram ett polymermaterial gjort för att täcka katoden. Det kallas för självförgörande oligomerer med hypergrenad arkitektur(STOBA) och det har effektivt stoppat termisk rusning under spikpenetreringstester av olika grafit och oxid LJBer. Som ytskikt har den inte visat några avsevärda försämringar av den normala elektrokemiska effekten. I nedanstående figurer är STOBA applicerad på  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.4})\text{O}_2$  katoden. De underliggande skyddsmekanismerna kommer att studeras. Nedan i fig 75 visas den grundläggande kemiska enheten för STOBA(55).

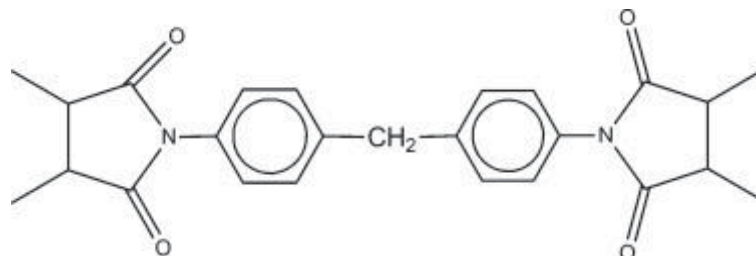
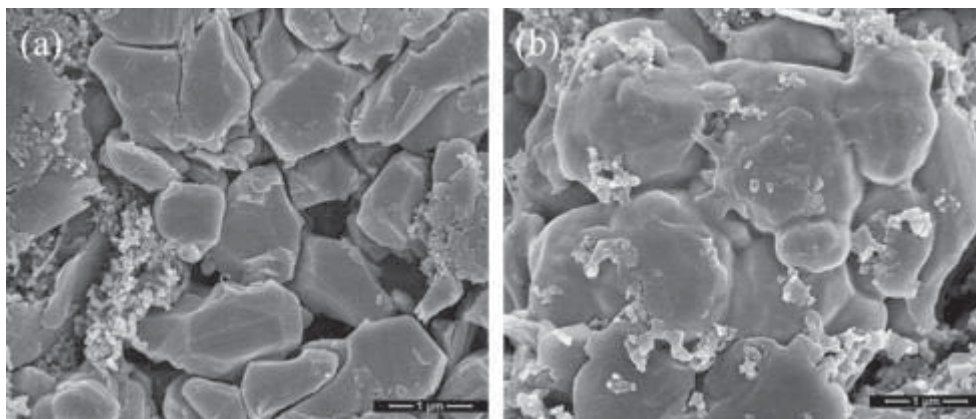


Fig 75. Den grundläggande kemiska enheten för STOBA(55). © 2013 Elsevier

Det går att säga att nanostrukturen hos STOBA (self-terminated oligomers with hyperbranched architecture) bildar en låsmekanism när cellens inre temperatur stiger till farliga nivåer. De vanliga cellerna utan STOBA har en lägre temperatur tolerans och börjar smälta mellan 150-170 grader Celsius. Det är detta som leder till termisk rusning. Sannolikheten för en termisk rusning hos en vanlig cell ligger på en sigmanivå av 6 vilket motsvarar 3-4 celler av en miljon stycken. STOBA cellerna ligger på en sigmanivå på mellan 10 och 12. Detta motsvarar en cell på 1000 miljarder ungefär. Alltså väldigt osannolikt. Inga bevis på bieffekter dock skulle STOBA kunna leda till att den inre resistansen ökar med några procent. STOBA skulle öka tillverkningskostnaden för battericellen med mellan 3-5%(66).

STOBA blev tillgängligt på marknaden i det andra kvartalet av 2010 ifrån taiwanesiska batteritillverkare. Elektriska fordon och bärbara datortillverkare skulle kunna bli mer införstådda med fördelarna av STOBA. Batteri och kraftsystem kan istället bli överdesignade för att förhindra fellägen. Att använda STOBA skulle leda till en enklare och maximerad design som är mer effektiv och reducerar kostnaderna. E-One Moli Energy som är en av cell och batteritillverkarna som har fått ta del av ITRs patent på STOBA. De har försett BMW mini E med litiumjonbatterier(60). Samt Amita Technologies Inc. som bör vara de enda som har lyckats att implementera STOBA i kommersiella celler(67).

Mikrograferna i fig 76 jämför elektroderna med och utan ett STOBA hölje. Som synes i bilden nedan som visar att med STOBA så täcks katod partiklarna fullständigt utav polymeren. I nästa figur jämförs urladdnings kurvorna för de två olika 18650 cellerna med samma C grad. Det visar att cellen med STOBA får en något sämre kapacitet, ungefär 6 - 7 % lägre mellan 0,5-2 C grad(55).



*Fig 76. Till vänster katodpartiklarna utan STOBA och till höger katod partiklar täckta av STOBA(55). © 2013 Elsevier*

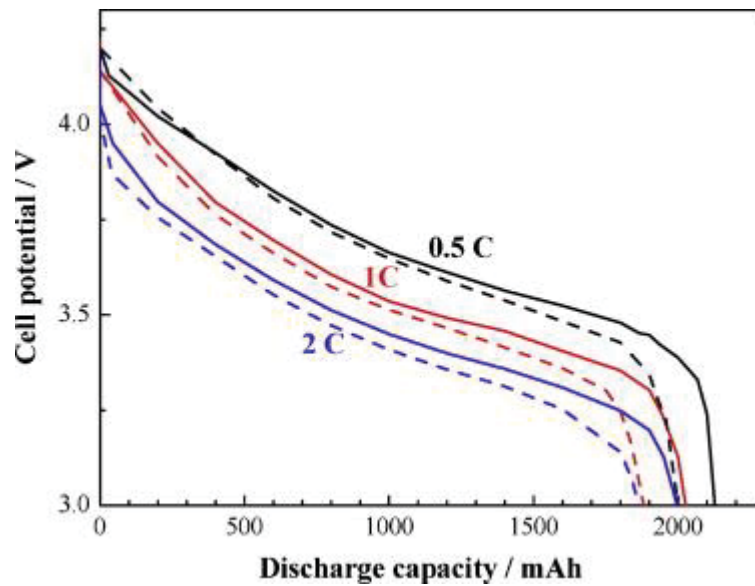


Fig 77. De streckade kurvorna är cellpotentialen under urladdning vid olika C-grad(55). © 2013 Elsevier

En intern kortslutning simuleras med ett spikpenetreringstest. Alla tre celler med STOBA överdrag som testades visade ingen termisk rusning medan de andra tre icke STOBA cellerna däremot fattade eld. Den interna temperaturen och cellspänningen skildras i fig 78. De icke STOBA cellerna steg snabbt upp till 720 grader Celsius och cellspänning sjönk hastigt till 0 V. I STOBA cellerna ökade tempraturen först till maxtempratur på 130 grader inom 2 sekunder. Sedan sjönk den till 90 grader på 6 sekunder för att sedan sakta öka till 130 grader igen. Spänningen sjönk snabbt till 1,2 V sedan sjönk den till 0 V fast under en längre tid. Vilket medför att under hela testet uppstod ingen eld(55).

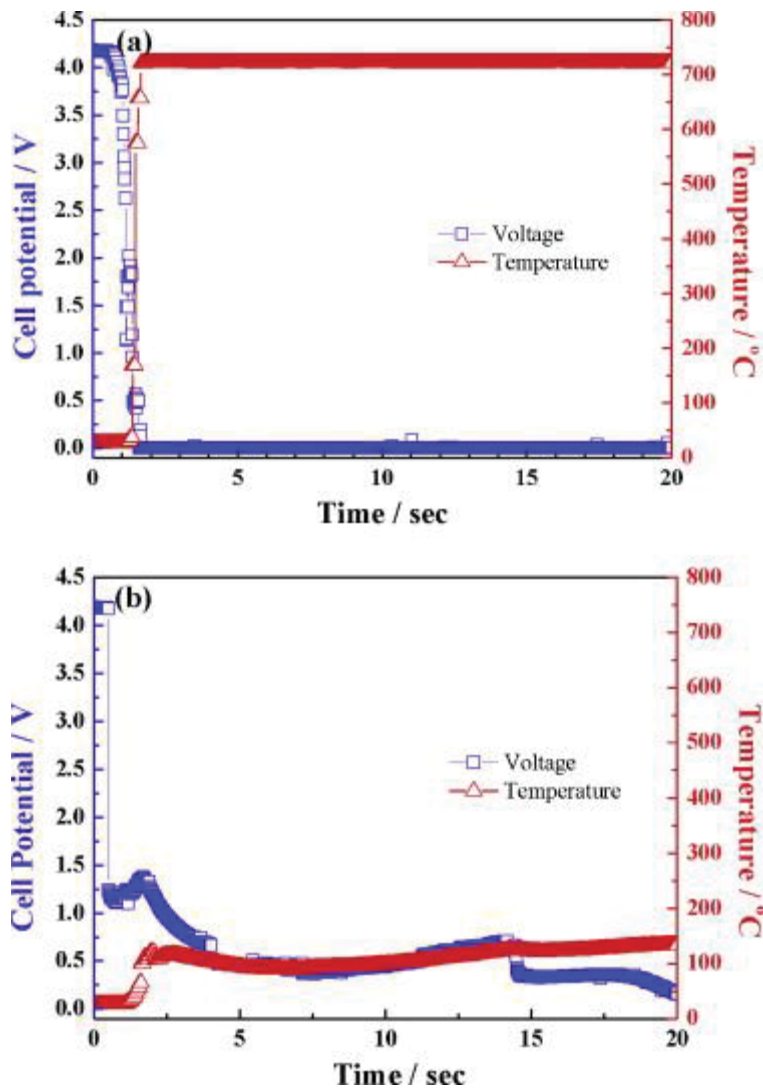
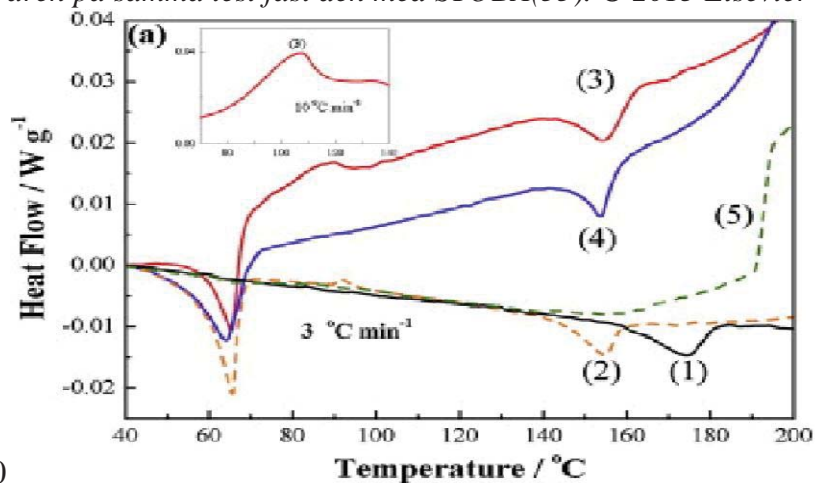


Fig 78. Den översta grafen visar cellspännings- och temperursvaret på ett spikpenetreringstest utan STOBA applicerade. Den undre grafen visar svaren på samma test fast den med STOBA(55). © 2013 Elsevier



0  
 Fig 79. Kurva (2) är värmegenerationen ifrån oladdad katod. Kurva är (3) värmegenerationen ifrån fullt laddad katod. Kurva (4) är värmegenerationen ifrån fullt laddad katod med STOBA. Kurva (5) är värmegenerationen ifrån torkad STOBA(55). © 2013 Elsevier

Om kurva 2 i fig 79 ovan, oladdad katod, och 3, fullt laddad katod, jämförs så märks tydligt att endast den laddade katoden leder till värmegeneration från elektrolyt-oxid mellanfas reaktioner. Det går också att se att vid 155 °C så når båda kurvorna en endotermisk topp. Detta beror på att elektrolyten börjar förångas. Om kurva 3, katod utan STOBA, jämförs med kurva 4, katod med STOBA, så syns det att kurva 4 saknar den exotermiska topp som sker vid 89 °C och som är associerat med SEI nedbrytningen. Detta indikerar att STOBA undertrycker SEI bildning vid höga spänningar. Kurva 5, torkad STOBA, har en exoterm reaktion vid 180 - 200 °C vilket förklarar att katoden med STOBA hinner i ikapp katoden utan STOBA vad gäller värmegeneration vid 190 °C. Men förskjutningen av den exotermiska energin som sker när STOBA ersätter SEI lagret räcker alltså för att förhindra en termisk rusning(55).

Avgörande moment i en termisk rusnings initieringsförlopp är när SEI lagret bryts ner vid 130-140 °C och när generering börjar ifrån kobolt och nickel innehållande katoders oxidation med elektrolyten. Det sker vid runt 180°C och resterande förlopp är omöjligt att förhindra(19).

### Enkla kompletterande säkerhetslösningar

De flesta batteripaketstillverkare anser att små celler hyser en bättre säkerhet än stora. Toyota väljer att använda små celler då enkla beräkningar visade på att en intern kortslutning i en 20 Ah cell oundvikligen ledde till en termisk rusning eftersom lokala temperaturer kom upp till temperaturer på över 180 °C(19).

En viktig faktor, är om en kortslutning sker i en 5Ah cell i serie med 5 andra så kan det gå upp till 25 Ah genom den cellen. Ett scenarion som mycket få celler klarar(19).

Kopplingsdesignen kan påverka spridningsförloppet av den termiska rusningen till intilliggande celler. Detta visade Quallion när de presenterade en matriskoppling som illustreras till höger i nedanstående bild. Den konfigurationen förhindrade nämligen att termisk rusning som skedde i en cell spreds vidare. När cellerna kopplades i vanlig konfiguration så var inte detta fallet utan den spreds över hela LJBpaketet istället(19).

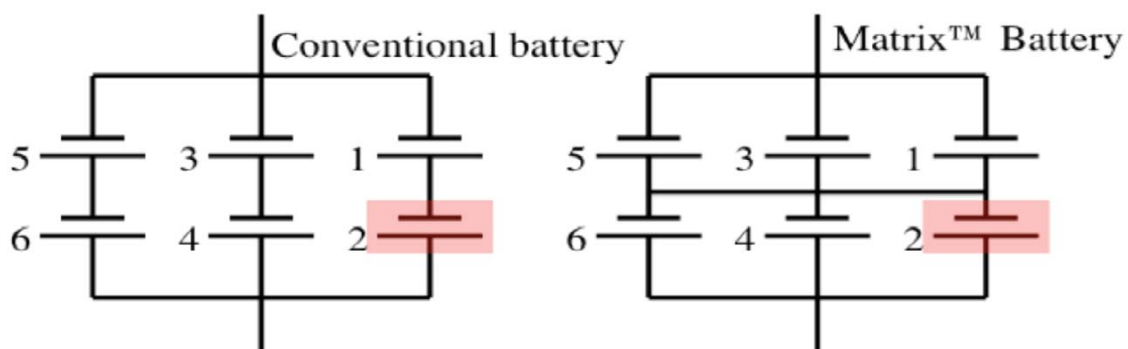


Fig 80. Skillnaden på en konventionell koppling och en matriskoppling mellan cellerna(48).

I ett experiment på en 3S4P konfiguration med 18650 celler med 0,5 mm mellanrum mellan cellerna så spreds termisk rusning till hela paketet. När avståndet ökades till 1 mm mellanrum så förhindrades den termiska rusning ifrån att spridas(19).

## Framtida skyddsmekanismer hos LJBceller och LJBpaket

Det forskas på att ta fram elektrolyter som inte fattar eld så lätt. Det designas robusta övervakningssystem som kan upptäcka när en termisk rusning är i ett tidigt skede. Något som tidigare setts som otänkbart. Det är viktigt att möta säkerhetsproblemet på många olika sätt och att se systemet i sin helhet(54).

Forskare vid Illinois universitet arbetar med att täcka anoden och separatorn med polyetylen respektive parafinvax. När en temperatur når deras smältpunkter så bildar de en isolerande barriär som stänger ner cellen(54). Både polyetylen och parafinvax reducerar strömmen med 98 % vid respektive smältpunkt vilka är 110°C och 65°C. Den triggande temperaturen är dimensionerbar för denna typ av säkerhet(68).

Att utveckla elektrolytlösningar med fosfater och fosfener kan reducera brandrisken. Dock är det svårt att utreda hur effektiva de egentligen är. Dessutom så kan de ibland leda till att potentialen på cellutgången minskar av dessa tillsatser. Det forskas även på icke antändbara joniska vätskor som helt kan utesluta brand. Det kan vara flourettrar och andra lösningar med hög flourhalt. Men inget av dessa varianter har ännu blivit den vinnande lösningen(54).

En annan lösning är att tillverka celler som inte innehåller några vätskor överhuvudtaget. Se avsnittet om pouchceller tidigare. De innehåller ickeorganiska litiumjonledare som inte utgör någon brandfara. Den typen av cell är väldigt säker och har ett långt cykel- och kalenderliv. Problemet med dessa celler är att tillverkningskostnaderna är så stora i nuläget(54)(10).

Utvecklare på Tiax jobbar med en sensor systems algoritm som möjligtvis kan upptäcka en internkortslutning redan i tidigt skede och då skickar en varningssignal till BMSen(54).

## Ett patentverk inriktat på batteriteknik

ABC PatentEdge™ är en databas som är den enda patent intelligenta lösningen som är speciellt anpassad för den avancerade batterimarknaden. Den innehåller mer än 200,000 patent över hela världen och är sorterade i mer än 200 kategorier som är relevanta just för den avancerade batteriteknologin. ABC PatentEdge™ hjälper till att identifiera trender på marknaden(69).

## Utvald information i från deras kvartalsrapport

De företag som hamnade i rampljuset under det tredje kvartalet år 2013 inom LJB kategorin för sina patent var Samsung, LG och Envia. Samsung för ett patent med speciell hinna, coating, och sluttande struktur. LG som vill massproducera deras nya batterier som med en unik form passar i små fickor där vanliga rektangulära batterier inte får plats. Envia för att de fortsätter att utveckla med målsättning att bygga energisystem med de högsta energi densiteterna till lägsta konstruktionskostnaderna. I det tredje kvartalet lämnade de in ett patent för " Mixed Phase Lithium Metal Oxide Compositions," som blottar de stabiliserande elektrodhöljerna och som skall förbättra prestation, cykelliv och säkerhet(69). Envia var först med att konstruera världens första storformats pouchcell på 400 Wh/kg. Dock endast på forsknings och utvecklingsskala. För masstillverkning har de pouchceller på 215 Wh/kg(70).

## Slutsatser

Säkerheten är mycket viktig i en rullstol då användaren inte alltid kan ta sig ur rullstolen, vilket är extra kritiskt vid exempelvis brand. I en rullstol är utrymmet för batteripaketet begränsat och därför är det viktigt med en hög specifik energi. Tyvärr äventyrar den specifika energin också säkerheten vilket gör att den bör begränsas på ett eller annat vis för att undvika säkerhetslösningar med stora kostnader. Det kan vara viktigt med en ganska högt specifik maximalt effektuttag med tanke på att rullstolen skall kunna ta sig över trottoarkanter. Enligt specifikation ifrån REAC AB så skall batteripaketet klara en urladdningsström på 2C. Alltså dubbla märkströmmen.

Bedömningen är att LJBer har en klar fördel över blybatterier i avseenden så som mindre vikt och ett längre cykelliv. Blybatterier optimerade för ett långt cykelliv är mycket dyrare och väger mer än vanliga startbatterier. Peukerteffekten försämrar kapaciteten avsevärt och för Reac AB som önskar ett 60 Ah LJB batteri så krävs ett blybatteri på uppemot 90 Ah för att även kompensera för den extra viktökningen som blybatterierna ger. Summering blir att ett blybatteri inte alls är så kostnads effektivt som det först verkar och att priset är likvärdigt med ett LJB paket i dagens läge och som dessutom håller åtminstone dubbelt så länge för samma pris.

Av de kommersiella katodkemierna så utmärktes LFP och NMC eftersom tyngdpunkten ligger närmare säkerhet. Då gärna 3/8 av mangan respektive nickel och 1/4 av kobolt för en ökad säkerhet. LMO är också ett acceptabelt val men tyvärr har den en något sämre prestanda vid extrem kyla än de övriga katodkemierna. LCO med LTO anod gav speciella egenskaper såsom ett i särklass långt tjänsteliv, god prestanda vid låga temperaturer och en god säkerhet. Hade inte kostnaden varit så hög för antalet Ah så hade den varit ett utmärkt alternativ. Både LFP och NMC har ett likvärdigt tjänsteliv men de skiljs åt genom att NMC har en bättre specifik energi medan LFP har bättre termisk stabilitet. LFP har också en bättre specifik kraft och alltså kan generera kraftigare urladdningsströmmar. Detta är dock en egenskap som inte kommer till stor nytta i Reacs rullstol, eftersom endast förhållandevis låga urladdningsströmmar krävs. Önskvärt hade varit att kunna använda NMC på ett säkert vis och få nytta av en ökad specifik energi.

Denna rapport fäster stor vikt på begränsa max SOC genom spänningsbegränsning. Det är det mest effektiva sättet för att uppnå en god helhetskvalité hos cellerna. Kostnaden är en lägre totalkapacitet. Fördelarna är ett betydligt längre tjänsteliv både vid aktiv användning liksom under förvaring och vila. Den termiska rusningens reaktion avtar och att den kan även helt utebli. Det ger en snabbare laddningsprocess, ger möjlighet till att kompensera för åldringsprocessen som faktiskt ökar den termiska stabiliteten genom att ha utvecklat ett tjockare SEI lager. Samt möjligheten att öka kapaciteten vid låga temperaturer som minskar kapaciteten. Detta går att göra genom att släppa upp SOC begränsningen ifrån exempelvis 65% till 70% allt efter tidens gång. För användaren tycks det då som om LJBet inte försämras.

SOC kan med fördel sättas till mellan 50 - 75% beroende på hur frekvent och hur mycket LJB applikationen används och vilken grad av säkerhet som önskas att uppnås. Det är alltså inom det intervallet som den totala användningskapaciteten uppnår ett maxima. Detta gäller åtminstone för LCO och NMC. Lite ovisst om LMO och LFP svarar precis lika gott på spänningsbegränsning.

Andra enkla åtgärder för en förbättrad säkerhetsprofil är att tillämpa matriskoppling emellan cellerna. Alltså parallellkoppla ihop varje serieelement med grannen i närmsta serie. Detta samt att hålla ett avstånd på större än 1 mm mellan varje cell är enkla medel som bör användas och kan appliceras på samtliga nedanstående alternativ.

Beroende på hur storskalig produktionen blir så finns alternativen att konstruera ett eget batteriövervakningssystem och att köpa in ett färdigt. Kostnadsbesparingen per LJBpaket är liten så för att spara in utvecklingskostnaderna krävs en ansevärd försäljning av rullstolar. Nackdelen är att eventuella konfigurationssvårigheter med att anpassa det redan färdiga BMS:et med specifik applikation och LJB paket. Det bör utredas hur goda möjligheterna är att moderera LJB paketet ihop med BMS:et. Möjligtvis klarar de inte heller av en AC- laddning istället för den vanliga DC- laddningen som visat bättre resultat på säkerhet, livstid och laddningstid hos cellerna. Att köpa in sensorer som kan registrera den magnetiska permeabiliteten skulle förenkla eventuellt egenbyggt BMS kraftigt.

Vid extrema temperaturer så som  $-20\text{ °C}$  så presterar LJBer sämre. Det går att undvika val så som motorvärmare eller att använda en LTO katodkemi. Det görs genom att minska applikationens effektuttag så att applikationen följer LJBets prestanda. Samt att möjligtvis höja SOC begränsningen under kalla temperaturer. Dock så kan detta endast registreras manuellt eftersom LJBet inte får laddas vid minusgrader. Ett annat komplement skulle kunna vara att på något vis göra det enkelt för användaren att försegla och isolera LJB paketet så att den varmare miljön som LJB paketet måste ha vid laddning bibehålls längre.

LJBer visade inte på ökad förslitning vid regenerativ inbromsning vilket förenklar och gör att systemet inte behöver kompenseras med exempelvis superkondensatorer.

Det kan vara så att aktiv kylning av batteripaketet, såsom fläktar, inte behövs eftersom urladdningstiden är lång så sprids värmeutvecklingen över en lång tid. För att verkligen bevisa detta krävs att termiska beräkningar på batteripaketet görs(13). Jämförelse med relaterade rapporter räcker dock i författarens mening för att göra en kvalificerad bedömning, i Reacs fall, och att dessutom strategiskt placera ut battericellerna samt moderation av dessa förstärker denna bedömning ytterligare. Förslag på optimal dimensionering av LJB paket för både cylindriska celler och pouchceller har summerats i denna rapport.

Fördelarna med PCM, som täcker alla celler helt, är att vid normala förhållanden erhålls en enhetlig temperaturfördelning av celltemperaturen över hela cellen. Detta samt en garanti att den termiska rusningen inte kan spridas till intilliggande cellerna så länge LJB paketet förblir intakt. För cylindriska celler går det då att packa cellerna mycket tätt. Att optimera den specifika energin utan att få stora följder går att välja genom att packa celler av mer aggressiv kemi förhållandevis tätt. En lösning som skulle passa väl för exempelvis motorcyklar då de kräver just dessa egenskaper.

Efter samtal, med en försäljare på ett av de ledande PCM företagen, för eldrivna fordon, fås informationen att de kan leverera batteripaket helt färdigt inklusive övervakningssystem och laddningsgrads indikator. Detta skulle då kosta 1500 \$ per rullstol om 50 rullstolar förses. Cellkemin är då NMC men det går att ändra. Eftersom några extra modifikationer bör tillkomma för att passa Reacs design, tillkommer förmodligen extra kostnader. Det går att skala ner kostnaderna till 1200 \$ per enhet. Då utan övervakningssystem och utan design modifikationer. Dimensionerna blir då  $37*27*8$  cm och motsvarar 60 Ah i ett paket.



Det blir totalt uppemot upp emot 10 000 kr per rullstol ifrån det mest ledande företaget. Detta pris är då utan spänningsmoderation som ökar livslängden. Ett plus är att hela systemet då finns inräknat såsom laddningsgradsindikator. Det blir ändå ett pris som är betydligt högre än övriga alternativ. Skall kostnaderna reduceras ytterligare skulle en uppgörelse såsom att Reac AB konstruerar batteripaketet och PCM företaget endast fyller ut med vaxet. Det skulle kanske kunna minska priset.

STOBA är en polymeryta som läggs över katoden och ersätter SEI lagret som annars bildas vid den första cykeln. Det ökar tillverkningskostnaderna med endast 3% och det förhindrar termisk rusning. Företag kan spara pengar på att välja STOBA celler genom att minska antalet försiktighetsåtgärder och säkerhetsmekanismer. Det finns dock endast ett företag som är ensamma med kommersiella STOBA celler vilket gör att priset drivs upp.

Den mest ekonomiska lösningen tycks vara att konstruera ett NMC LJB paket då det med enkla medel går att göra detta säkert. Dels genom konstruktion av ett LJB paket med små cylindriska celler för ökad mekanisk motståndskraft och kylningsförmåga, avstånd mellan cellerna och matriskoppling i tenn för ökat motstånd emot termisk rusning. Dels genom att minska maxspänningen över cellerna och därmed moderera SOC maxima. Detta för en markant förbättrad termisk stabilitet och även en längre livslängd hos cellerna. En begränsning av SOC kan motiveras endast med att få ut optimal kapacitet över hela cellens liv och är viktigt oavsett den termiska stabiliteten. Därför rekommenderas även detta för den mer stabila LFP cellen och NMC STOBA cellen. NMC cellerna kan modereras kraftigt innan de kommer ner till samma specifika energi som LFP. Det är också viktigt att välja celler av god kvalitet och som har en termiskt stabil elektrolyt ihop med anod och katod material. Så vikt bör läggas på vilken typ av anod och elektrolyt som finns i cellen. Författarens rekommendation till Reac AB är att välja NMC och begränsa SOC till 65% vilket medför att det totala LJBet blir på 92 Ah men då är endast 60 Ah aktivt som enligt specifikation. Med tiden åldras batteriet och därmed ökas säkerheten och kapaciteten minskar. Då kan SOC ökas upp till 70% i takt med åldrandet. Detta ihop med matriskoppling i tenn, cellavstånd med isolerande nylon emellan cellerna och med strategiskt utplacerade celler för en god kylningsförmåga bör ge ett fullgott skydd i flera lager med flera skyddsmekanismer.

Att välja LFP är också ett billigt alternativ med fördelar eftersom värmeavyttringen endast kommer ifrån elektrolyten och anoden och de är i regel mindre starka än den som annars kommer i från katoden. Fördelar jämfört med NMC är då att enklare celler kan väljas samt att begränsningen av SOC inte blir lika nödvändig. Skyddskretsen bör inte få defekter som kan leda till att LFP cellerna överladdas då de är de mest känsliga cellerna i det avseendet. Risken för detta är mycket liten men den finns. Därav skulle det vara bra att implementera ett extra överordnat kontrollsystem eller inbyggda säkerhetsmekanismer som ett extra skydd mot överladdning och kan fungera som garanti. Inbyggda säkerhetsmekanismer kan vara redoxskyttlar eller PTC resistorer.

Sammanfattningsvis i författarens mening så är ett NMC batteripaket med vidtagande säkerhetsåtgärder det mest kostnadseffektiva lösningen följt av LFP och STOBA.

Behövs ytterligare rådgivning eller verifikation på att ett LJB paket är säkert går det att vända sig till statens forskningsinstitut i Borås, SP Borås.

## Idéer som väcktes under rapportens gång

Om fig 70 och 72 d) jämförs så redovisas temperaturen hos de intilliggande cellerna när en termisk rusning uppstår. I den första figuren finns inga elektriska kopplingar i form av av nickel mellan cellerna som det gör i den andra. Det finns ett nylonmaterial som isolering emellan cellerna. Det är en massiv temperaturskillnad och cellerna i fig 72 d) leder till en spridning av den termiska rusningen. Ett faktum som föder idéer om externa skyddslösningar. En lösning är att använda frånskiljare emellan varje cell som drivs av någon slags nödmotor anknyten med vajer eller snöre till frånskiljararmarna. Systemet blir dock komplext om många celler används eftersom både plus- och minuspol måste dras ifrån. Det är då såklart viktigt att det finns minst två batteripaket så det alltid finns något som kan driva nödmotorn. En annan lösning är att använda tenn istället för nickel då tenn har en smältpunkt på endast 232 °C istället för nickels 1455 °C till kostnad av att ledningsförmågan endast halveras och alltså ökar minimum arean med en faktor av två. I fig 72 så uppgår temperaturen till flera hundra grader i den defekta cellen. Detta räcker gott för att smälta tenn kopplingen och minska den termiska överföringen mellan cellerna.

En annan lösning är en stål- eller plåtinfattning omkring paketet som helt stänger in eventuell brand. För att ha elektrisk anslutning kan en Brattbergare användas. En Brattbergare omsluter elkablar och är tillverkat av en självslocknande polymer, lycron, som motstår brand och explosion. Ett problem är att kylningen minskas. Men en nära anslutning till stålramen med hjälp av aluminiumskum skulle kunna lösa detta om extra kylning är av vikt. Bara att förhindra att syre tillkommer vid en reaktion minskar drastiskt mängden energi i reaktionen. Det kan räcka med ett plastmaterial som infattning om batteripaketet. Men ett problem är att kondens uppstår hos batteriet vilket kan leda till rost och kortslutning.

Om ett aktivt luftkylt system eftersträvas så skulle en passiv skyddsåtgärd vara att ha en rörlig plåtskiva med lufthål i, likt chassit, utanför chassit till LJBpaketet. När brand börjar utvecklas går trådar av mellan batteripaketet och ovan delen av plåten. Därpå gör tyngdkraften att plåten glider ner och blockerar hålen i chassit. Skulle flammor dra sig mot de springer som blir kvar skulle ett ytskikt kunna appliceras på plåten som smälter när flammorna når dit och då blockerar springorna.

## Kompletterande läsning

Nedan följer lite extra material som på grund av tidsbrist inte sammanfattades i denna rapport men som annars hade funnits med.

Ett LJB med gott rykte, så som A123 systems, kan väljas för att uppnå säkerhetskraven. Tyvärr ökar detta kostnaderna när ett starkt varumärke används. Istället skulle ett val ut efter kvalitativa standardtester vara ett mera kostnadseffektivt tillvägagångssätt.

Wu, A., Tabaddor, M., Wang, C., Jeevarajan, J., *Simulation of internal short circuits in lithium ion cells*, 2013 IEEE, Issue Date: 16-19 June 2013,

JAESIK CHUNG, *Development of a Li ion Battery Safety Risk Assessment Tool*, 2013, IEEE

För att få upp ögonen för de olika cellstandarderna, framtida tester och metoder som möjligen skulle kunna implementeras, se läsanvisning nedan.

*Study of internal short in a Li-ion cell I. Test method development using infra-red imaging technique*, Journal of Power Sources, Volume 248, 15 February 2014, Pages 769–776

För extra information om en precis cellmatchning, se nedan. Detta för att förbättra det totala batteripaketets prestanda som annars kan minskas på grund av enstaka svaga celler.

Jonghoon Kim; Jongwon Shin; Changyoon Chun; Cho, B.H. *Stable Configuration of a Li-Ion Series Battery Pack Based on a Screening Process for Improved Voltage/SOC Balancing*, Power Electronics, IEEE Transactions on, Issue Date: Jan. 2012

Precis cellmatchning ihop med ett kalmanfilter BMS har visats vara en effektiv lösning på ett robust system.

Jonghoon Kim, Jongwon Shin, Changyoon Jeon, Bohyung Cho, *High Accuracy State-of-Charge Estimation of Li-Ion Battery Pack based on Screening Process*

En analys av algoritmerna kalmanfiltrets och coulombräkningens robusthet vid varierande förhållande så som last, temperatur och åldringsnivåer.

Xiaosong Hu, Shengbo Li, Hui Peng, Fengchun Sun, *Robustness analysis of State-of-Charge estimation methods for two types of Li-ion batterie*, Journal of Power Sources Volume 217, 1 November 2012, Pages 209–219

Parameteruppskattning för ett robust och precist BMS system, se nedan.

*Li-ion battery parameter estimation for state of charge*, American Control Conference (ACC), 2011, Issue Date: June 29 2011-July 1 2011, Written by: Xidong Tang; Xiaofeng Mao; Jian Lin; Koch, B.

Ett precist och kostnadseffektivt BMS som är lätt att applicera fast med en nackdel. En svagare cellbalansering.

Dongping XU, Lifang Wang, JianYang, *Research on Li-ion Battery Management System*, 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering

## Referenser

1. *Comparison Table of Secondary Batteries*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)(Acc 2013-11-20)
2. *Lithium-based Batteries*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)(Acc 2013-11-21)
3. *What is the C-rate*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/what\\_is\\_the\\_c\\_rate](http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate)(Acc 2014-01-02)
4. *Lithium-Ion Battery Life Performance*, Motorola Solutions, Inc., <http://community.psion.com/knowledge/w/knowledgebase/lithium-ion-battery-life-performance.aspx>
5. *Discharging at high and low voltages*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging\\_at\\_high\\_and\\_low\\_temperatures](http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures)
6. Siddique A. Khateeb, Mohammed M. Faridb, J. Robert Selmana, SaidAl-Hallaj, *Mechanical–electrochemical modeling of Li-ion battery designed for an electric scooter*, Journal of Power Sources Volume 158, Upplaga 1, 14 July 2006, sidor 673–678.
7. *M24 SLD G FT SPECIFIKATIONS*, MKBattery, <http://www.mkbattery.com/images/M24SLDGFT.pdf>(2014-02-14)
8. *Improved lithium batteries*, Materials Today, <http://www.materialstoday.com/energy/news/improved-lithium-batteries/>(Acc 2013-11-31)
9. Larsson, F. (2013). muntlig källa, Technical report, SP Borås och Chalmers Tekniska Högskola
10. Davison, James, Boyce, James Low Cost, *Novel Methods for Fabricating All-Solid-State Lithium Ion Batteries*, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 23 april 2012, [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042312-141301/unrestricted/SS\\_Lithium\\_Ion\\_Battery\\_MQP\\_Final\\_Report.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042312-141301/unrestricted/SS_Lithium_Ion_Battery_MQP_Final_Report.pdf)(Acc 2013-12-04)
11. *The High-power Lithium-ion*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_high\\_power\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_high_power_lithium_ion)(Acc 2013-11-25)
12. *Building a Lithium-ion Pack*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/building\\_a\\_lithium\\_ion\\_pack](http://batteryuniversity.com/learn/article/building_a_lithium_ion_pack)(Acc 2013-12-13)
13. *BatterySpace.com Customized Battery Pack Inquiry Form*, AA Portable Power Corp, <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:cTeBeUQgQj0J:www.batteryspace.com/prod-specs/Custom%2520Pack%2520Form.doc+&cd=4&hl=sv&ct=clnk&gl=se>(Acc 2014-01-03)

14. How to transport batteries, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_transport\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_transport_batteries)(ACC 2013-11-20)
15. *BATTERIES & BATTERY-POWERED DEVICES*, Federal Aviation Administration (FAA),  
[http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ash/ash\\_programs/hazmat/aircarrier\\_info/media/battery\\_incident\\_chart.pdf](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ash/ash_programs/hazmat/aircarrier_info/media/battery_incident_chart.pdf)
16. Japan Air grounds Boeing 787 after battery problem, Nyhets byrån Reuters,  
<http://www.reuters.com/article/2014/01/14/us-japanairlines-787-battery-idUSBREA0D11820140114>(Acc 2014-01-15)
17. Serial and Parallel battery configurations, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations)(Acc 2014-01-02)
18. Types of battery cells, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells) (Acc 2014-03-24)
19. Daniel H. Doughty, Ahmad A. Pesaran, *Technical Report: Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance*, NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy, October 2012  
<http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/54404.pdf>(Acc 2014-01-15)
20. Pouch cell, small but not trouble free, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/pouch\\_cell\\_small\\_but\\_not\\_trouble\\_free](http://batteryuniversity.com/learn/article/pouch_cell_small_but_not_trouble_free)(Acc 2013-11-19)
21. Charging lithium-ion batteries, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)(Acc 2013-12-29)
22. The li-polymer battery: substance or hype?, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_li\\_polymer\\_battery\\_substance\\_or\\_hype](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype)(Acc 2013-11-19)
23. *Types of Lithium-ion*, Battery University™,  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)(Acc 2013-11-15)
24. Gene Berdichevsky, Kurt Kelty, JB Straubel, Erik Toomre, *The Tesla Roadster Battery System, Tesla Motors*, Stanford University, August 16, 2006,  
<http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/tesla.pdf>(Acc 2013-11-24)
25. Keith James Keller, Fine-tuning TI's Impedance Track™ battery fuel gauge with LiFePO4 cells in shallow discharge applications, Analog Field Applications, Texas Instruments, 2011 1Q,  
<http://www.ti.com/lit/an/slyt402/slyt402.pdf>(Acc 2013-12-12)
26. Performance of Lithium Phosphate motive vehicle applications, Battcon, 2005,  
<http://www.battcon.com/PapersFinal2005/NguyenPaper2005.pdf>\*

27. Can-Yong Jhu, Yih-Wen Wang, Chia-Yuan Wen, Chi-Min Shu, *Thermal runaway potential of LiCoO<sub>2</sub> and Li(Ni<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>)O<sub>2</sub> batteries determined with adiabatic calorimetry methodology*, Applied Energy, Volume 100, December 2012, Pages 127–131
28. Hiroaki, Konishi, Toyotaka, Yuasa, Masanori, Yoshikawa, *Thermal stability of Li<sub>1-y</sub>NixMn<sub>(1-x)/2</sub>Co<sub>(1-x)/2</sub>O<sub>2</sub> layer-structured cathode materials used in Li-Ion batteries*, Journal of Power Sources, Volym 196, upplaga 16, 15 August 2011, sida 6884–6888
29. D.D. MacNeil, Zhonghua Lu, Zhaohui Chen, J.R. Dahn, *A comparison of the electrode/electrolyte reaction at elevated temperatures for various Li-ion battery cathodes*, Journal of Power Sources, Volym 108, Upplaga 1–2, 1 June 2002, Sida 8–1427.
30. *Lithium Titanate Based Batteries for High Rate and High Cycle Life Applications*, Dr. MuMu Moorthi VP Business Development, NEI corporation, [http://neicorporation.com/white-papers/NEI\\_White\\_Paper\\_LTO.pdf](http://neicorporation.com/white-papers/NEI_White_Paper_LTO.pdf)
31. *Rechargeable Battery (SCiB™) 20 Amp Hour Cell(LTO)*, Toshiba, [http://www.toshiba.com/ind/product\\_display.jsp?id1=821](http://www.toshiba.com/ind/product_display.jsp?id1=821)
32. *How to improve battery fuel gauge*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_improve\\_the\\_battery\\_fuel\\_gauge](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_improve_the_battery_fuel_gauge)(Acc 2013-12-16)
33. *Safety circuits for modern batteries*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_circuits\\_for\\_modern\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_circuits_for_modern_batteries)(2013-11-26)
34. Datasheet, *Atmel ATA6870 Li-Ion, NiMH Battery Measuring, Charge Balancing and Power-supply Circuit*, [http://download.siliconexpert.com/pdfs/2012/8/21/7/37/44/599/atm\\_/manual/doc9116.pdf](http://download.siliconexpert.com/pdfs/2012/8/21/7/37/44/599/atm_/manual/doc9116.pdf)(Acc 2013-11-29)
35. *Battery fuel gauge, factual or fallacy?* Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_fuel\\_gauge\\_factual\\_or\\_fallacy](http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_fuel_gauge_factual_or_fallacy)(Acc 2013-11-29)
36. Anders Reinholdsson, Johan Persson, *Battery Status Module, Utveckling av ett batteriövervakningssystem med CAN-kommunikation*, Institutionen för signaler och system, 2012
37. *Toshiba Launches Li-ion Battery Monitor Chipset for Automotive Applications*, PR Newswire, November 8, 2012 <http://www.prnewswire.com/news-releases/toshiba-launches-li-ion-battery-monitor-chipset-for-automotive-applications-177832641.html>
38. *How to Prolong Lithium-based Batteries*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_prolong\\_lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries)(Acc 2013-12-01)
39. Stefan Käbitz, Jochen Bernhard Gerschler, Madeleine Ecker, Yusuf Yurdagel, Brita Emmermacher, Dave André, Tim Mitsch, Dirk Uwe Sauer, *Cycle and calendar life study of a*

*graphite/LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2 Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization*, Journal of Power Sources, Volym 239, 1 October 2013, Sida 572–583

40. Chenghuan Huang, Kelong Huang, Suqin Liu, Yuqun Zeng, Liquan Chen, *Storage behavior of LiNi1/3Co1/3Mn1/3O2/artificial graphite Li-ion cells*, Electrochimica Acta, Volym 54, Upplaga 21, 30 August 2009, Sida 4783–4788

41. *Charging Lithium-Ion batteries*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)(Acc 2014-01-10)

42. *Discharge Methods*, Battery University™, [http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge\\_methods](http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods)(Acc 2014-01-10)

43. Liang-Rui Chen; Shing-Lih Wu; Deng-Tswen Shieh; Tsair-Rong Chen, *Sinusoidal-Ripple-Current Charging Strategy and Optimal Charging Frequency Study for Li-Ion Batteries*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Jan. 2013

44. Liang-Rui Chen, Shing-Lih Wu, Tsair-Rong Chen *Improving Battery Charging Performance by Using Sinusoidal Current Charging with the Minimum AC Impedance Frequency*, IEEE ICSET 2010 6-9 Dec 2010

45. P. Ramadass, Bala Haran, Ralph White, Branko N. Popov, *Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells*, Journal of Power Sources, Volym 123, Upplaga 2, 20 September 2003, Sida 230–240

46. Rami Sabbah, R. Kizilel, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, *Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution*, Journal of Power Sources, Volym 182, Upplaga 2, 1 August 2008, Sida 630–638

47. Rajib Mahamud, Chanwoo Park, *Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity*, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 13, 1 July 2011, Pages 5685–5696

48. Hassan Fathabadi, *A novel design including cooling media for Lithium-ion batteries pack used in hybrid and electric vehicles*, Journal of Power Sources, Volume 245, 1 January 2014, Pages 495–500

49. G. Karimi, X. Li, *Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles*, International Journal of Energy Research, Volume 37, Issue 1, pages 13–24, January 2013



50. Mousavi, M.; Hoque, S.; Rahnamayan, S.; Dincer, I.; Naterer, G.F., *Optimal design of an air-cooling system for a Li-Ion battery pack in Electric Vehicles with a genetic algorithm*, Evolutionary Computation (CEC), 2011 IEEE Congress on, Issue Date: 5-8 June 2011
51. Aaron David Brooker, Jacob Ward, Lijuan Wang, *Lightweighting Impacts on Fuel Economy, Cost, and Component Losses*, NREL/CP-5400-57607, Presented at the SAE 2013 World Congress & Exhibition, 04 aug 2013
52. Anrico Casadei, Richard Broda, *Impact of Vehicle Weight Reduction on Fuel Economy for Various Vehicle Architectures*, The Aluminum Association, Inc. apr 2008
53. Long Lam, Bauer, P., *Practical Capacity Fading Model for Li-Ion Battery Cells in Electric Vehicles*, Power Electronics, IEEE Transactions on, Issue Date: Dec. 2013
54. Mitch Jacoby, *Assessing The Safety Of Lithium-Ion Batteries*, Volume 91 Issue 6, Issue Date: February 11, 2013 Pages. 33-37
55. Chun-Chieh Lin, Hung-Chun Wu, Jing-Pin Pan, Ching-Yi Su, Tsung-Hsiung Wang, Hwo-Shuenn Sheu, Nae-Lih Wu, *Investigation on suppressed thermal runaway of Li-ion battery by hyper-branched polymer coated on cathode*, Electrochimica Acta, Volume 101, 1 July 2013, Pages 11-17
56. *Lithium-ion safety concerns*, Battery University<sup>TM</sup>, [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_ion\\_safety\\_concerns](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_ion_safety_concerns)(Acc 2013-12-05)
57. Qingsong Wang, Ping Ping, Xuejuan Zhao, Guanquan Chu, Jinhua Sun, Chunhua Chen, *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*, Journal of Power Sources, Volume 208, 15 June 2012, Pages 210–224
58. Weifeng Fang, Premanand Ramadass, Zhengming (John) Zhang, *Study of internal short in a Li-ion cell-II. Numerical investigation using a 3D electrochemical-thermal model*, Journal of Power Sources, Volume 248, 15 February 2014, Pages 1090–1098
59. Premanand Ramadass, Weifeng Fang, Zhengming (John) Zhang, *Study of internal short in a Li-ion cell I. Test method development using infra-red imaging technique*, Journal of Power Sources, Volume 248, 15 February 2014, Pages 769–776
60. P. Röder, N. Baba, H.-D. Wiemhöfer, *A detailed thermal study of a Li[Ni<sub>0.33</sub>Co<sub>0.33</sub>Mn<sub>0.33</sub>]O<sub>2</sub>/LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-based lithium ion cell by accelerating rate and differential scanning calorimetry*, Journal of Power Sources, Volume 248, 15 February 2014, Pages 978–987

61. P.G. Balakrishnan, R. Ramesh, T. Prem Kumar, *Safety mechanisms in lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, Volume 155, Issue 2, 21 April 2006, Pages 401–414
62. Shriram Santhanagopalan Premanand Ramadass, John (Zhengming) Zhang, *Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell*, Journal of Power Sources, Volume 194, Issue 1, 20 October 2009, Pages 550–557
63. *Innovative Design Improves the Safety of Lithium-ion Batteries*, Leslie Langnau, June 5, 2013,  
[http://www.designworldonline.com/innovative-design-improves-the-safety-of-lithium-ion-batteries/#\\_](http://www.designworldonline.com/innovative-design-improves-the-safety-of-lithium-ion-batteries/#_)
64. Siddique A. Khateeb, Shabab Amiruddin, Mohammed Farid, J. Robert Selman, Said Al-Hallaj, *Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation*, Journal of Power Sources Volume 142, Issues 1–2, 24 March 2005, Pages 345–353
65. Riza Kizilel, Rami Sabbah, J. Robert Selman, Said Al-Hallaj, *An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs*, Journal of Power Sources, Volume 194, Issue 2, 1 December 2009, Pages 1105–1112
66. *Advanced battery week*, NATTBatt, 13 feb 2010,  
<http://naatbatt.org/uploads/NAATBatt-Weekly-02-13-102.pdf>(2013-12-26)
67. *The STOBA manufacturer*, Amita Technologies Inc.  
<http://www.amitatech.com/>(Acc2013-12-26)
68. Marta Baginska , Benjamin J. Blaiszik , Ryan J. Merriman , Nancy R. Sottos , Jeffrey S. Moore , Scott R. White, *Autonomic Shutdown of Lithium-Ion Batteries Using Thermoresponsive Microspheres*, Advanced Energy Materials, Vol. 2, Issue 5, May, 2012
69. *Advanced battery and capacitor*, PatentEdge, NATTBatt nov18, 2013  
[http://naatbatt.org/uploads/Advanced-Batteries-Q3-Update\\_111813\\_Final1.pdf](http://naatbatt.org/uploads/Advanced-Batteries-Q3-Update_111813_Final1.pdf)(Acc 2013-12-26)
70. *High capacity Lithium.ion manufacturer*, Envia Systems,  
<http://www.enviasystems.com/>(Acc 2013-12-26)

## Bilagor

### Intervju med Fredrik Larsson

*Text sammanställd från telefonintervju*

Fredrik Larsson arbetar som forskare på SP i Borås. SP är Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Han är också industridoktorand inom materialsäkerhetsfrågor om batteri och elektrifierade fordon, på Teknisk Fysik, Chalmers.

Företag kan anlita SP och Fredrik som konsult för att testa och verifiera sitt batterisystem för att se om det är säkert eller vad som måste göras bättre för att minimera riskerna. De kan även hjälpa till med att effektivisera och optimera hela batterisystemet.

Ett aktivt kylsystem kan vara överflödigt vid lång och lättare körning eftersom värmeutskiftningen sprids ut över körtiden. På så vis kan det vara idé att designa ett batteripaket med mer Ah än vad som endast krävs. En annan anledning för denna typ av design är att det kan öka livslängden men då om denna design är korrekt anpassad efter applikationen. För att bekräfta att ett luftkylsystem kan vara överflödigt krävs att en termisk överslagsberäkning utförs på batteripaketet.

Det är bra att inte lita helt på en säkerhetsmekanism utan gardera med flera istället.

I dagens moderna och utvecklade battericeller så är inte dendritansamling en stor orsak till intern kortslutning. De beror oftast på en förorenad partikel eller ojämnt lager i cellen. Risken för ojämna lager ökar vid större celler. Den mänskliga faktorn kan spela in, cellen kan exempelvis vara tappad.

Det går inte att helt förhindra att en termisk rusning kanske kan ske. Det gäller då att förhindra följderna av en sådan genom att förhindra att värmeutvecklingen sprider sig till närliggande celler. Battericellerna kan då spridas till flera olika ställen.

För att rullstolen skall fungera i ett svenskt klimat, såsom att kunna användas vid minus 20 grader Celsius, kan troligen en batterivärmare behövas men det beror på Li-kemi, BMSskydd Li-plattenering, Ah-körsträcka-dimensionering, etcetera. Det sätter också vissa krav på BMS. Är cellerna för kalla och höga strömmar dras så uppstår litiumplattenering vid elektroderna. Detta minskar säkerheten hos cellerna markant.

Den cylindriska cellen kan bygga upp ett större tryck än pouch cellen, polymercellen, eller den prismatiska. Detta gör att den blir mer riskfylld och ställer högre krav på säkerhetsventilen.

Om batteripaketet inhöls i en stål låda så får den inte vara helt tät på grund av kondens som kan leda till rost och kortslutningar efter hand. En lösning på detta är ett material som andas, ett goretexliknande material som släpper ut vätska. Huruvida detta material klarar att hålla åtminstone gas och rök tillbaka är inte helt säkert, värt att utreda. Eld kan bli svårt att hålla tillbaka. Vid termisk rusning så gäller att trycket, då också gaser och kanske eld, leds ut på ett ofarligt ställe och inte mot användaren. Detta kan man göra genom strategiskt placera ventilerna på höljet till batteripaketet.

Det är alltså inte bara elden som är farlig utan också att giftiga gaser utsöndras redan i tidigt skede såsom vätefluorid, fosforoxyfluorid och kolmonoxid m.m. Exakt hur mycket gaser som bildas är ännu oklart. I teorin så är det väldigt mycket gaser men i praktiken så har det visat sig vara mindre. Lite forskning har gjorts på denna gråzon men Fredrik kommer att inleda ett projekt på just detta, om ett år så har han troligtvis en del svar. I elektrolyten används flour som ger upphov till flera farliga gaser, men det finns elektrolytlösningar utan flour.

Att bygga ett batteripaket bestående av högkvalitativa järnfosfatceller är ett gott alternativ till ett PCM batteripaket utan några extraordinära kyl och inkapslingsmetoder. Risken för eld är då minimerad men fortfarande inte omöjlig. Möjligtvis skulle ett NMC alternativ också vara möjligt men det ställer höga krav på cellens kvalité, säkerhet och design, att rätt cell har valts till rätt typ av applikation. Är de energi optimerade eller är det effekt optimerade. Detta gäller alltid och inte bara för NMC kemin. Kvalitén gör så klart att kostnaderna för cellerna stiger.

Ett pålitligt och robust BMS är också viktigt då vibrationer kan vara ett problem exempelvis.

Ett bra BMS kan minska risken för termisk rusning, 1 av någonstans mellan 5 - 10 miljoner celler.