

UTVÄRDERING AV TERMISK PROPAGERING I ELCYKELBATTERIER

KUND:

Attn: Mari Sparr
Stiftelsen Länsförsäkringsgruppens Forsknings- och Utvecklingsfond
106 50 Stockholm

RAPPORTNUMMER:

2020273STO-001

FÖRFATTARE:

Dr Maria Wesselmark
Senior Battery Specialist på Intertek Semko AB
Dr Andreas Nyman
Senior Battery Specialist på Intertek Semko AB

DATUM:

14 december 2020





UTVÄRDERING AV TERMISK PROPAGERING I ELCYKELBATTERIER

ANSVARIGT KONTOR:

Intertek Semko AB
Torshamnsgatan 43, Box 1103,
SE-164 22 Kista, Sweden
Telephone +46 8 750 00 00,
Fax +46 8 750 60 30
www.intertek.se
Registered in Sweden: No: SE556024059901
Registered office: As address

PROJEKTLEDARE:

Dr Maria Wesselmark

GODKÄND AV:

Dr Eva Fontes

DISTRIBUTION:

Mari Sparr, Stiftelsen Länsförsäkringsgruppens Forsknings- och Utvecklingsfond

DISCLAIMER:

This report is for the exclusive use of Intertek's Client and is provided pursuant to the agreement between Intertek and its Client. Intertek's responsibility and liability are limited to the terms and conditions of the agreement. Intertek assumes no liability to any party, other than to the Client in accordance with the agreement, for any loss, expense or damage occasioned by the use of information from this report. The Client is authorized to permit copying or distribution of this report and then only in its entirety, other forms of reproduction require written approval from Intertek.



SAMMANFATTNING

Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps (MSB) PM "Sammanställning av bränder i eltransportmedel 2018-2019" visar att elcykelbatterier ligger bakom ett ökande antal bränder per år. Näst efter hoverboards är det eltransportmedel som ligger bakom flest antal bränder. Under våren och sommaren 2020 har även elcykelförsäljningen ökat markant vilket gör att antalet batterier ute i samhället även ökar.

En av riskerna med större litiumjonbatterier är spridning av en termisk rusning i en cell till omgivande celler. Om den termiska rusningen propagerar till omgivande celler så kan en större energimängd frigöras. Ju större energimängd som finns i batteriet desto större energimängd kan också frigöras. Spridningen och effekten av en termisk rusning i en cell kan testas i ett så kallat termiskt propageringstest. Testet finns beskrivet i standarder såsom EN/IEC 62619:2017 "Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for large format secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications", UL 1973:2018 "Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications" och UL 2580:2020 "Standard for Batteries for Use In Electric Vehicles". Testet startas genom att en termisk rusning initieras i en cell och kravet för att klara detta test är att ingen extern brand eller explosion får förekomma utanför batterihöljet. Att klara ett termiskt propageringstest är dock inget regulativt krav för elcykelbatterier.

I denna studie genomfördes termiska propageringstester på några utvalda, och här anonymiserade, elcykelbatterier för att förstå om dessa är designade för att hantera en termisk rusning i en cell. Utöver att svara på frågan hur väl designade dessa batterier är för att hantera detta så visar även studien på hur allvarliga konsekvenser det kan bli om ett singelcellfel leder till en termisk rusning på den här typen av batteri.

Eld spred sig utanför batterihöljet för de båda testade batterierna i det termiska propageringstestet och den termiska rusningen som sattes igång i en av cellerna spred sig till i stort sett alla celler i batterierna. Brandförloppet skiljde sig dock en del mellan batterierna. Det totala brandförloppet var ca 12 minuter för det ena batteriet och ca 27 minuter för det andra batteriet. Totaltid från termisk rusning i initieringscellen till fullt utvecklad brand var 8 sekunder för det ena batteriet och 12 minuter för det andra. Dessutom var det generellt betydligt mer rökutveckling och mindre brand för batteriet med längre tid till fullt utvecklad brand samt ett längre brandförlopp. Detta gällde framförallt initialt, då cellernas temperatur steg såsom i en termisk rusning men utan att det skapades flamma eller brand utanför batterihöljet. Flamprov som gjordes separat på batterihöljerna visade att dessa var relativt beständiga mot lågor med minst flamklass V-2 förutom i ett batteri där en del av höljet hade den sämre flamklassen HB. De termiska propageringstesten visar att det kan vara svårt för ett hölje att motstå brand vid de temperaturer som brinnande litiumjonceller kommer upp i.

Batterierna verkar inte vara designade för att klara av ett termiskt propageringstest. Resultaten från testerna tyder på att det var två olika propageringsmekanismer som ledde till branden utanför batterihöljet; ventilering från initieringscellen för det ena batteriet samt termisk värmeledning från initieringscellen till närliggande celler för det andra batteriet. Båda dessa processer går att förhindra genom designförändringar av batterierna vilket även går i linje med den sammanfattande rapporten från workshopen "Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation?" samt NASAs riktlinjer för design, dvs att designa batterierna så att ventilering från celler hanteras och ej riktas direkt mot andra celler eller antändbart material samt att undvika att värme överförs från cell till närliggande cell. Testet visar på att det finns potential för förbättringar i designen av dessa batterier så att de bättre kan hantera en termisk rusning i en av cellerna.



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Introduktion	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Termiska propageringstest	6
2	Testbeskrivning	8
2.1	Testobjekt	8
2.2	Granskning av provobjekt	8
2.3	Termisk provning	8
2.3.1	Initiering av termisk rusning på cell	8
2.3.2	Termiskt propageringstest	9
2.3.3	Flamprov	9
3	Resultat	10
3.1	Granskning av testobjekt	10
3.2	Termisk provning	11
3.2.1	Termisk propageringstest Batteri B	14
3.2.2	Termisk propageringstest Batteri C	18
3.2.3	Flamprov på batterihöljen	22
4	Diskussion och slutsatser	23
4.1	Diskussion	23
4.2	Slutsats	23



1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps (MSB) PM "Sammanställning av bränder i eltransportmedel 2018-2019" visar att elcykelbatterier ligger bakom ett ökande antal bränder per år. Näst efter hoverboards är det eltransportmedel som ligger bakom flest antal bränder¹. Under våren och sommaren 2020 har även elcykelförsäljningen ökat markant vilket gör att antalet batterier ute i samhället även ökar.

Litiumjonbatterier har under många år funnits kring oss i vår vardag i produkter såsom mobiltelefoner och datorer. Det har funnits en del uppmärksammade fall där litiumjonbatterier i dessa produkter har fattat eld på grund av termisk rusning. En termisk rusning är när temperaturen i en cell eller flera celler har ökat till en sådan hög temperatur att elektrolyten och elektroderna börjar reagera kemiskt med varandra och bilda bland annat värme vilket ökar cellens temperatur ytterligare.

Även för elcykelbatterier finns en risk för en termisk rusning, och en stor skillnad mellan elcykelbatterier och batterier för mobiltelefoner och datorer är den totala energimängden och antalet celler i batterierna. Ett mobiltelefonbatteri består oftast av en cell med en energimängd på 6-10 Wh medan ett datorbatteri består av upp till 8 celler med en total energimängd på 50-70 Wh. Ett elcykelbatteri består av upp till 50 celler med en total energimängd på 300-500 Wh.

En av riskerna med större litiumjonbatterier är just effekten av spridning av en termisk rusning i en cell till omgivande celler. Om den termiska rusningen propagerar till omgivande celler så kan en större energimängd frigöras. Ju större energimängd som finns i batteriet desto större energimängder kan också frigöras.

Spridningen och effekten av en termisk rusning i en cell kan testas i ett så kallat termiskt propageringstest. Testet finns beskrivet i standarder såsom EN/IEC 62619:2017 "*Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for large format secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications*", UL 1973:2018 "*Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications*" och UL 2580:2020 "*Standard for Batteries for Use In Electric Vehicles*". Testet startas genom att en termisk rusning initieras i en cell och kravet för att klara detta test är att ingen extern brand eller explosion får förekomma utanför batterihöljet.

Det finns en standard för elcyklar "SS-EN 15194:2017 Cyklar - Elassistade cyklar – EPAC" som i sin tur ställer vissa krav på batteriet. Ett termiskt propageringstest är dock inget krav i denna eller andra gällande regler och standarder för elcyklar. För andra framförallt större litiumjonbatterier i industriella tillämpningar finns dock ett krav att de ska vara designade för att förhindra att ett en termisk rusning i en cell leder till en brand utanför batteriet.

Syftet med denna studie är att utvärdera om 3 st utvalda elcykelbatterier är designade för att hantera en termisk rusning i en cell genom att genomföra termiska propageringstester. Utöver att svara på frågan hur väl designade dessa batterier är för att hantera en termisk rusning så kan studien även ge en bättre förståelse för hur allvarliga konsekvenser det kan bli om ett singelcellfel leder till en termisk rusning på den här typen av batteri.

¹ "Sammanställning av bränder i eltransportmedel 2018-2019", Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) PM 2020-02-17, Ärendenr. 202002136, Ulf Bergholm.



1.2 Termiska propageringstest

Den energi som finns i litiumjonceller kan frigöras i en så kallad termisk rusning där temperaturen ökar okontrollerat driven av exoterma, kemiska reaktioner. Det är litiumjonbatteriets kemiska uppbyggnad som gör att cellen måste hållas inom vissa gränser vad gäller spänning, ström och temperatur för att undvika att en cell går i termisk rusning. Mekanisk påverkan utifrån eller tillverkningsfel kan också leda till en intern kortslutning som leder till en temperaturökning som resulterar i en termisk rusning. Utöver energi så frigörs även gaser som kan vara både lättantändliga och toxiska.

Med en termisk rusning följer en snabb ökning i temperatur men även i tryck på grund av gas som bildas och expanderar. Trycket byggs först upp i cellen men kan även då den ventileras ackumuleras och bygga upp ett tryck inuti batterihöljet. Celler med hårda höljen såsom prismatiska och cylindriska celler har en riktad säkerhetsventil där gaser ventileras ut då trycket inuti cellen blir för stort. För så kallade pouch eller påsceller finns ingen riktad ventilering men de kan inte heller bygga upp ett lika högt tryck innan de går sönder. Antänds gaserna kommer detta att leda till en snabb volymexpansion. Händer detta inuti cellen kan det leda till en cellexplosion och på samma sätt kan det leda till en explosion inuti batterihöljet.

Syftet med ett termiskt propageringstest är att testa om batteriet är designat så att det förhindrar att en termisk rusning i en cell orsakar en brand eller explosion utanför batterihöljet. Testet ska utföras på ett fulladdat batteri eller del av batteri vid rumstemperatur. Någon av metoderna nedan kan användas för att initiera en termisk rusning i en cell:

- Värmning
 - med värmare
 - med brännare
 - med laser
 - med induktiv värmning
- Överladdning
- Nail penetration
- En kombination av ovan metoder eller annan lämplig metod

Värmning är dock den metod som främst används och även föreslås att användas i första hand. I testbeskrivningen från UL 2580 och UL 1973 måste cellen gå i termisk rusning inom 10 minuter efter det att man har initierat testet. Initieringscellen ska vara centralt placerad i batteriet för att det ska kunna betraktas som ett värsta fall.

Metoden som används för att skapa en termisk rusning i initieringscellen representerar inte nödvändigtvis en intern kortslutning av cellen utan ska ses som ett sätt att initiera det termiska propageringstestet för att utvärdera hur felet sprider sig till andra celler inuti batteriet. Testet säger inte heller någonting om sannolikheten för en cell att gå i termisk rusning eftersom man utsätter cellen för en felmekanism ända tills den går i termisk rusning. En kritik mot testet skulle kunna vara att en cell som har en hög tröskel och står emot relativt höga temperaturer eller andra felförhållanden innan den går i termisk rusning behöver utsättas för värre förhållanden, såsom att exempelvis tillföra mer energi, innan den verkligen går i termisk rusning jämfört med en cell med en lägre tröskel.

Testproceduren såsom den är beskriven i standarder ger utrymme för en viss flexibilitet för hur man ska utföra testet. Oftast bestäms metoden genom diskussion mellan tillverkare och testlaboratorium genom en avvägning vad som kan anses vara ett värsta fall och vad som är tekniskt möjligt. Alla batterier som testas behöver prepareras och modifieras jämfört med dess egentliga design och kan inkludera extra material, kablar och hål i höljet för kablar etc. Alla dessa modifieringar kan ha en inverkan på



slutresultatet och därför blir det ofta en avvägning hur man väljer att introducera ett fel med så liten påverkan som möjligt på testförhållandena.

Det finns ett antal studier där man tittar på batteridesign och vilka parametrar som påverkar en termisk propagering. Tillgången till värme, bränsle (brännbart material) och syre är givna parametrar som påverkar utfallet i ett termiskt propageringstest. Specifikt för litiumjonceller och dess kemi är dessutom att de kan börja brinna även utan tillgång till extern syretillförsel och att exoterma kedjereaktioner kan leda till en mycket snabb värmeutveckling.

The Joint Research Centre (JRC) inom EU organiserade en workshop med titeln "*Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation?*" under 2018. Resultatet från denna summerades i en teknisk rapport som tar upp många av de olika aspekterna gällande termiska propageringstest och design för att förhindra termisk propagering². En av de viktigaste sakerna som man kommit fram till för att minimera risker för termisk propagering är att hantera ventileringsriktningen. Genom att optimera hur gasen och eventuellt fast cellinnehåll distribueras så kan man undvika propagering. I batteripack för elfordon är ventileringsstrategier och andra brandskyddande åtgärder noga testade och hanteras i dess design genom t ex ventileringsriktningar, brandbarriärer, isolerande material, värmeledande material, mekanisk struktur, avstånd och ventileringsstrategier i hölje.

NASA har en lång tradition av att utvärdera celler och batterier ur ett säkerhetsperspektiv. De har tagit fram ett antal riktlinjer gällande batteridesign för att minimera risker för termisk propagering³. En viktig parameter är att se till att det finns bra förutsättningar för värmebortförsel och att undvika direkt cell-mot-cell-kontakt då de sett att detta i princip alltid leder till propagering. Andra viktiga designparametrar är att se till att ha säkringar mellan parallella celler för att elektriskt isolera cellen med intern kortslutning samt att skydda kringliggande celler från material som kommer ut från en ventilerande cell och begränsa möjligheten för flammor att komma i kontakt med brännbart material.

² Vanesa Ruiz and Andreas Pfrang, *JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation - Workshop report: summary & outcomes* (JRC Petten, Netherlands, 8-9, March 2018), EUR 29384 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-96399-5, doi:10.2760/096975, JRC113320

³ Eric Darcy, NASA, Design guidelines for Safer High Performing Li-ion Batteries with 18650 cells. JRC Exploratory Research Workshop, Petten Netherlands 8 March 2018.



2 TESTBESKRIVNING

2.1 Testobjekt

Länsförsäkringar har försett Intertek med tre (3) olika typer av elcykelbatterier som finns tillgängliga idag på den svenska marknaden. Två exemplar av varje typ erhöles för utvärdering. Alla batterityper har en spänning på 36 V och ett ungefärligt energiinnehåll på 400 Wh. Typerna som utvärderades är anonymiserade i denna rapport och hänvisas till som Batteri A, Batteri B och Batteri C.

2.2 Granskning av provobjekt

En visuell yttre inspektion gjordes av batteriet där dess märkning och dokumentation granskades för att förstå vilka standarder eller certifieringar som har applicerats på batteriet. Även instruktioner för hur man ska handha batterierna granskades. Yttre designskillnader främst med avseende på säkerhet noterades. Därefter öppnades ett batteri av varje typ och dess design och synliga säkerhetsfunktioner dokumenterades. Verifiering av att laddaren stängs av vid högre temperaturer gjordes även.

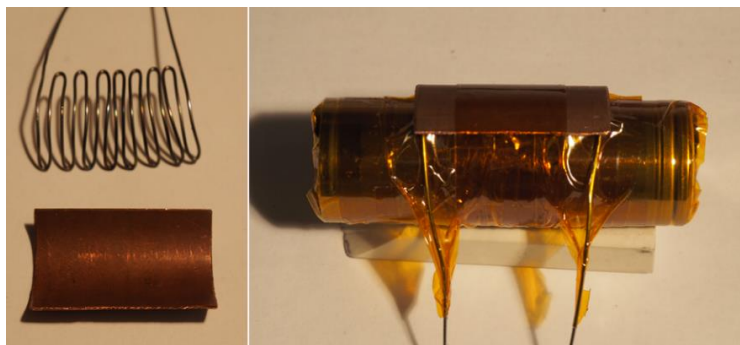
2.3 Termisk provning

Det öppnade batteriet undersöktes för att bestämma hur det termiska propageringstestet skulle genomföras. Celler från det öppnade batteriet togs därefter ut för att prova ut och dokumentera en metod för att initiera termisk rusning i en cell för det termiska propageringstestet.

2.3.1 Initiering av termisk rusning på cell

Den vanligaste metoden för att initiera en termisk rusning i en cell för det termiska propageringstestet är uppvärmning. Denna metod bedömdes efter öppnande av batterierna som tillämplig på alla batterier. Celler som monterats loss från batteripacken användes vid utvärdering och optimering av metoden. Tre olika försök gjordes på celler från de tre olika packen.

En kanthal tråd användes för att värma cellen. Figur 1 nedan visar hur kantaltråden ser ut samt hur den fästs på cellen tillsammans med en kopparplåt med hjälp av kaptontejp. I de olika försöken varierades längden på kantaltråden, den pålagda strömmen samt styrning av värmningen. Vid försöken monterades cellen i en hållare i ett skyddsskåp i ett brandrum. Termoelement sattes vid cellens topp och botten samt utanpå kopparplåten för att styra värmaren. Styrningen av värmningen bestod i att stoppa vid en viss uppmätt temperatur för att sedan slå på vid den lägre temperaturgränsen igen. Den optimerade metoden innebar att samma metod kunde användas på alla celler där värmningen stoppades då den uppnått 300 °C och åter sattes igång vid 250 °C. Alla försök videofilmades och temperaturer loggades.

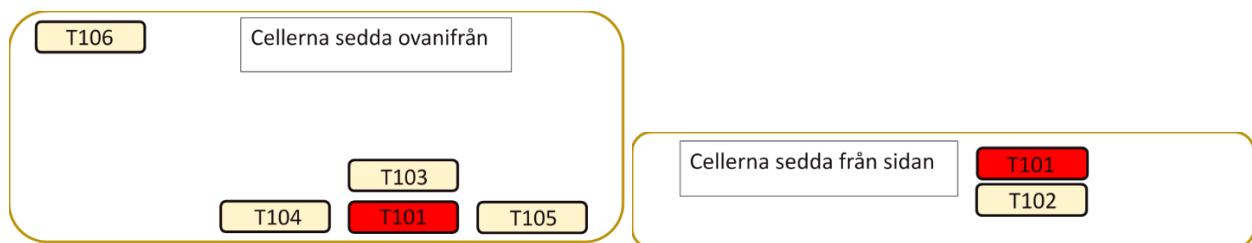


Figur 1: Till vänster - Kanthaltråden lindad för att få en lagom kontaktyta med cellen samt kopparplåt att lägga ovanpå kanthaltråden. Till höger – Kanthaltråd och kopparplåt fastsatt på cellen med kaptontejp.

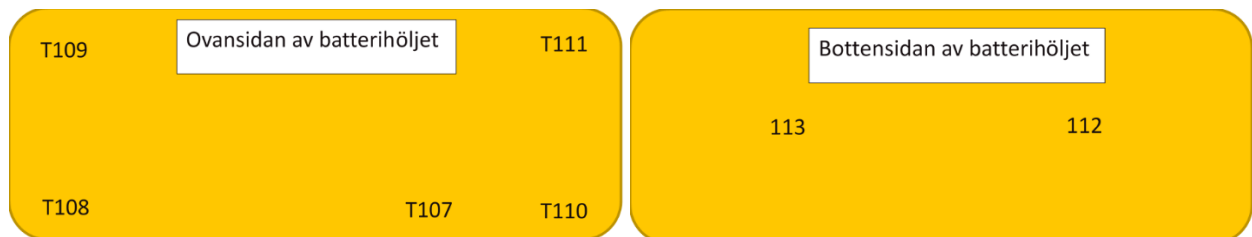


2.3.2 Termiskt propageringstest

Det termiska propageringstestet genomfördes på det andra, orörda, batteriet. Val av cell för initiering av det termiska propageringstestet gjordes efter en bedömning av vad som kan anses vara ett "worst case" scenario samt vad som var en möjlig placering av värmaren för att minimera påverkan av betingelserna inuti packet. Då det inte går att komma åt en cell med värmare om den har celler på alla sidor valdes en cell som hade intilliggande celler på så många sidor som möjligt. Figur 2 nedan visar cellen med värmare samt placering av termoelement på kringliggande celler i batteriet. För att minimera värmeöverföringen från värmaren till hölje och andra celler lades en brandtätningssmassa samt isolering ovanpå värmaren. Plasthöljet tejpades även invändigt med aluminiumtejp för att minimera strålningsvärmens från värmaren. När batteriet var förberett med värmare, isolering och termoelement skruvades höljet igen och batteriet placerades i brandrum för laddning. Placering av termoelementen utanpå batterihöljet visas i figur 3 nedan.



Figur 2: Placering av värmare och termoelement på cellerna inuti packen. Den röda cellen visar cellen med värmare och T101 mäter temperaturen på värmaren och inte på cellen. De övriga termoelementen T102-T106 mäter temperaturen på cellerna.



Figur 3: Placering av termoelement utanpå packen. T107 sitter på höljet utanför den cell där värmaren sitter.

Efter att det termiska propageringstestet hade gjorts på Batteri B och C, båda med brand som resultat, bedömdes det som troligt att ett liknande resultat även skulle erhållas med Batteri A. Då man under de utförda termiska propageringstesterna fann att batterihöljet fattade eld relativt lätt samt då man i tidigare försök med termisk propagering sett att brand i höljet är en viktig parameter för om det blir en termisk propagering valde man i samråd med Stiftelsen Länsförsäkringsgruppens Forsknings- och Utvecklingsfond att prioritera att göra ett flamprov på alla batterihöljen istället för att göra ett termiskt propageringstest på Batteri A som var den ursprungliga uppdragsplanen.

2.3.3 Flamprov

Ett flamprov gjordes på de olika batteriernas plasthöljen i enlighet med standarden *UL 746C - Polymeric Materials – Use in Electrical Equipment Evaluations*, klausul 15, för att undersöka hur väl de står emot en flamma utan att fatta eld. Materialet ska utsättas för en 12 mm flamma under två 30 sekundersperioder med ett tidsintervall på 1 minut. Om materialet brinner mer än 1 minut någon av gångerna så uppfylls inte kravet. Batteri C hade olika material i höljets över- och underdel och därför testades båda dessa delar i flamprovet.



3 RESULTAT

3.1 Granskning av testobjekt

Kommentarer gällande märkning:

- Alla batterier är CE märkta
- Det framgår inte från märkning eller manual mot vilken standard batteriet är utvärderat/testat.
- Manualerna är ganska knapphändiga och innehåller inte så detaljerad information.
- Alla batterier har symboler för återvinning, överkorsad soptunna (att inte slänga batteriet i soporna), läs manual samt någon variant på symbol för att undvika att utsätta batteriet för värme. De har även en varningssymbol följt av ett antal punkter på saker att undvika samt saker att göra.
- Exempel på hanteringsanvisningar från manualen för batterierna:
 - Använd, ladda och lagra batteriet inom angivna temperaturintervall.
 - Använd dedikerad laddare
 - Undvik värme, solljus, eld och väta
 - Utsätt ej för mekanisk påfrestning
 - Koppla ej in om kontakter eller anslutningar är blöta
 - Ha god ventilering och värmeförsel vid laddning
 - Håll borta batteriet från barn och djur
 - Öppna ej batteriet
 - Lämna batteriet till återvinning
- I vissa av manualerna beskrivs även konsekvenser om batteriet blir skadat såsom explosion, rök och läckage av vätska samt uppmaning till att söka läkarvård.

Kommentarer gällande yttre design:

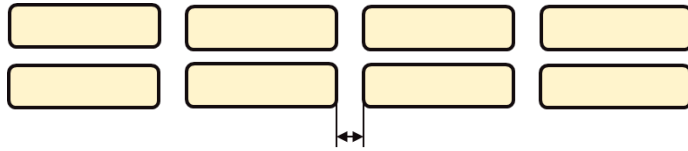
- Batterierna har alla sin egen unika anslutning till laddare, dvs det går inte att använda felaktig laddare för vanliga användare.
- Alla batterier har en diodstapel för att visa laddningsgrad av batteriet.
- Batterierna har alla liknande yttre design.

Kommentarer gällande funktion:

- Verifiering av att laddningen stoppar vid hög temperatur gjordes för samtliga batterier och alla batterier stoppade laddning vid en omgivningstemperatur på 60 °C.

Kommentarer gällande inre design:

- Alla tre batterier använder sig av celler från välkända tillverkare.
- Alla tre batterier består av totalt 40 st cylindriska celler i en 10S4P konfiguration.
- Alla tre batterier har en BMS som kan läsa av spänningen på varje cell i batteriet vilket är ett minimikrav på en BMS. Ingen ytterligare detaljerad granskning av elektronik eller komponenter i BMS:en har dock gjorts.
- Cellerna sitter fast väl inuti batteriet i en robust plastkonstruktion. I alla tre batterier sitter cellerna placerade på rad med toppen vänd direkt mot nästa cell så att ventilering av cellens går direkt mot nästa cell men med något varierande avstånd och olika ventileringsriktningar.

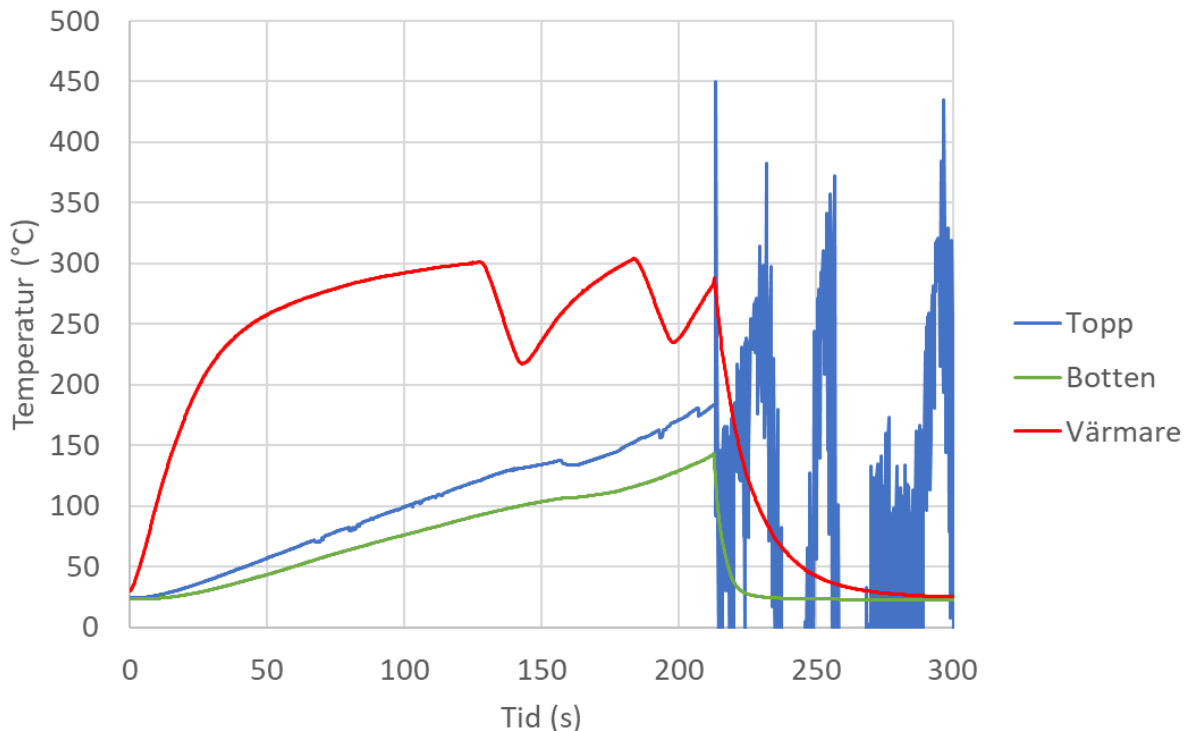


Figur 4: Mellanrum mellan cellerna i de olika packen: **Batteri A – 3 mm, Batteri B – 2.7 mm, Batteri C – 8.5 mm**

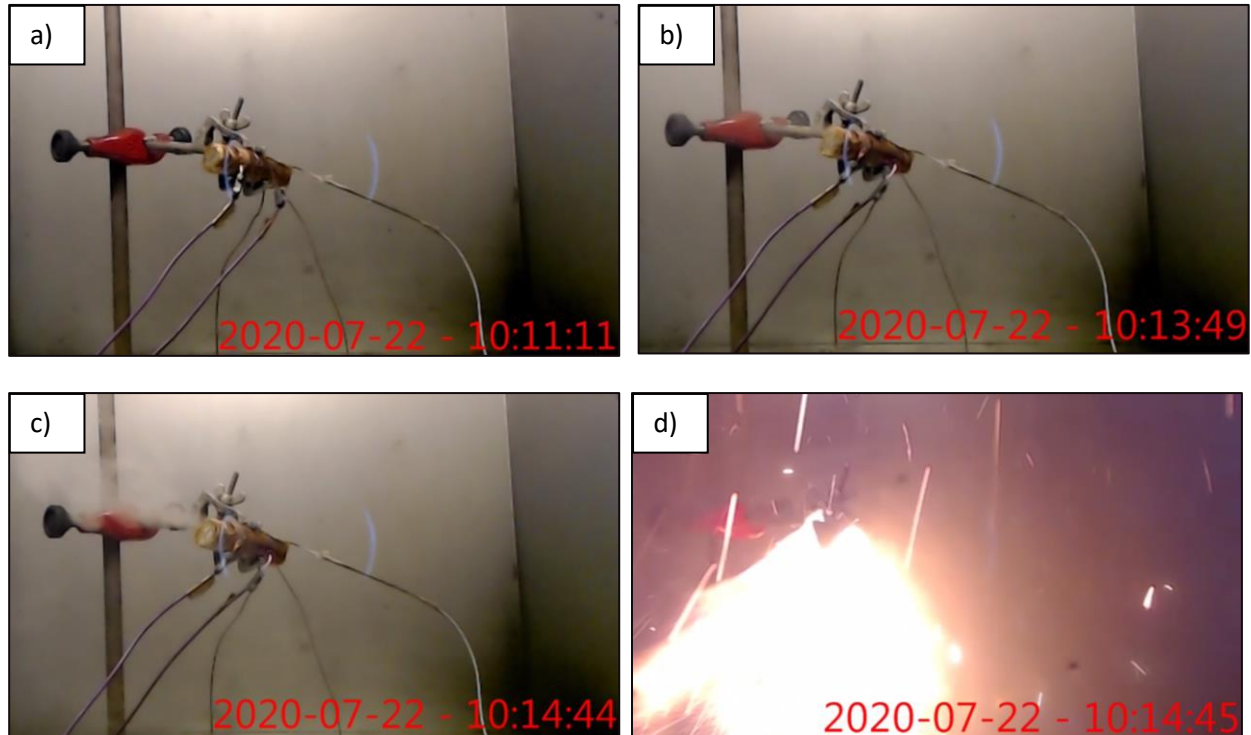
- Batterihöljet är hopskruvad med en gummipackning mellan över och underdel.

3.2 Termisk provning

Nedan visas resultaten från den optimerade metoden för initiering av termisk rusning i cellerna från de olika batterierna. Cellen från batteri A går i termisk rusning efter 213 sekunder då temperaturen på toppen av cellen är 180 °C. Den har 56 sekunder tidigare ventilerat, se figur 6b), men då utan att gå i termisk rusning varför värmningen fortsätter enligt samma styrning tills den går i termisk rusning. Ventileringen syns också som en liten sänkning av temperaturen vid 157 sekunder i figur 5, vilken är tydligast vid temperaturmätningen i toppen på cellen. Vid den termiska rusningen flyger en stor del av cellinnehållet ur toppen och temperatursensorerna tappar kontakten både i toppen och botten. Topptemperaturen på runt 450 °C vid den termiska rusningen är rimlig men därefter har det hänt något med termoelementet och värdena representerar inte verkligt uppmätta temperaturer.

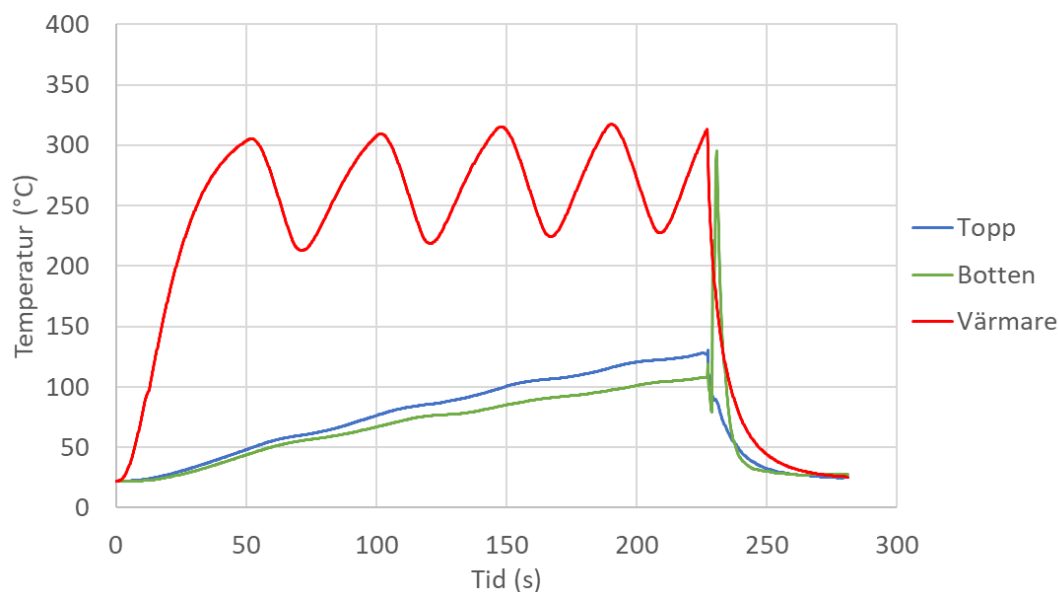


Figur 5: Batteri A, temperaturmätning under initiering av termisk rusning i cell.

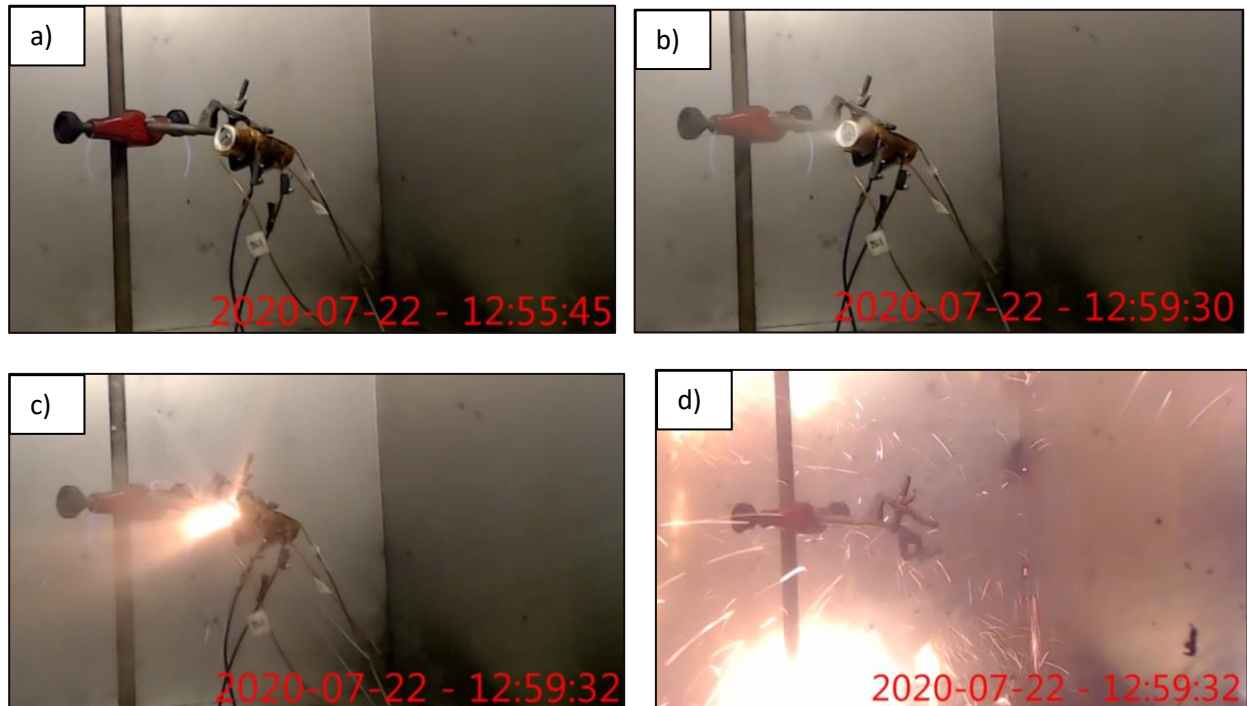


Figur 6: Batteri A, Bilder från film under initiering av termisk rusning i cell a) start av test, b) cellen ventilerar, c) sekunden innan cellen går i termisk rusning och d) cellen går i termisk rusning.

Cellen från Batteri B går i termisk rusning efter 227 sekunder då temperaturen mäter 128 °C i toppen på cellen. Den ventilerar 1.8 sekunder innan dess. Vid den termiska rusningen flyger en stor del av cellinnehållet ur toppen varför temperaturmätningen i toppen tappar kontakt. Temperaturen i botten går snabbt upp men även snabbt ner då en stor del av det varma cellinnehållet flyger ur höljet samt då även kontakten med cellen tappas pga att cellen förflyttas av den kraft som bildas vid den termiska rusningen då cellinnehållet flyger ut.

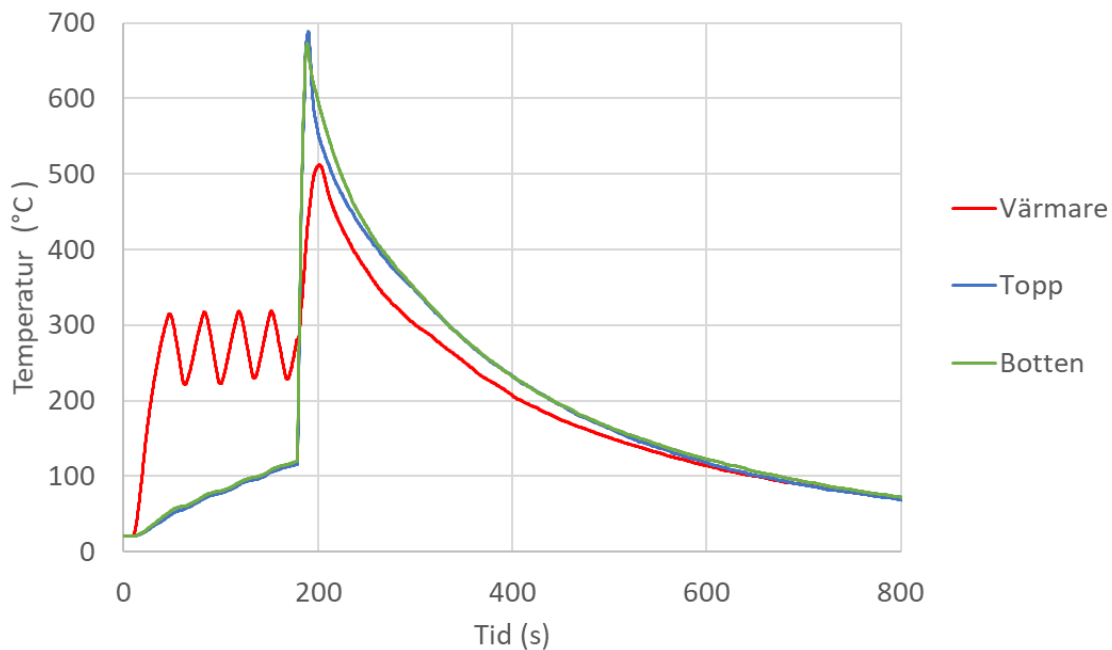


Figur 7: Batteri B, temperaturmätning under initiering av termisk rusning i cell.

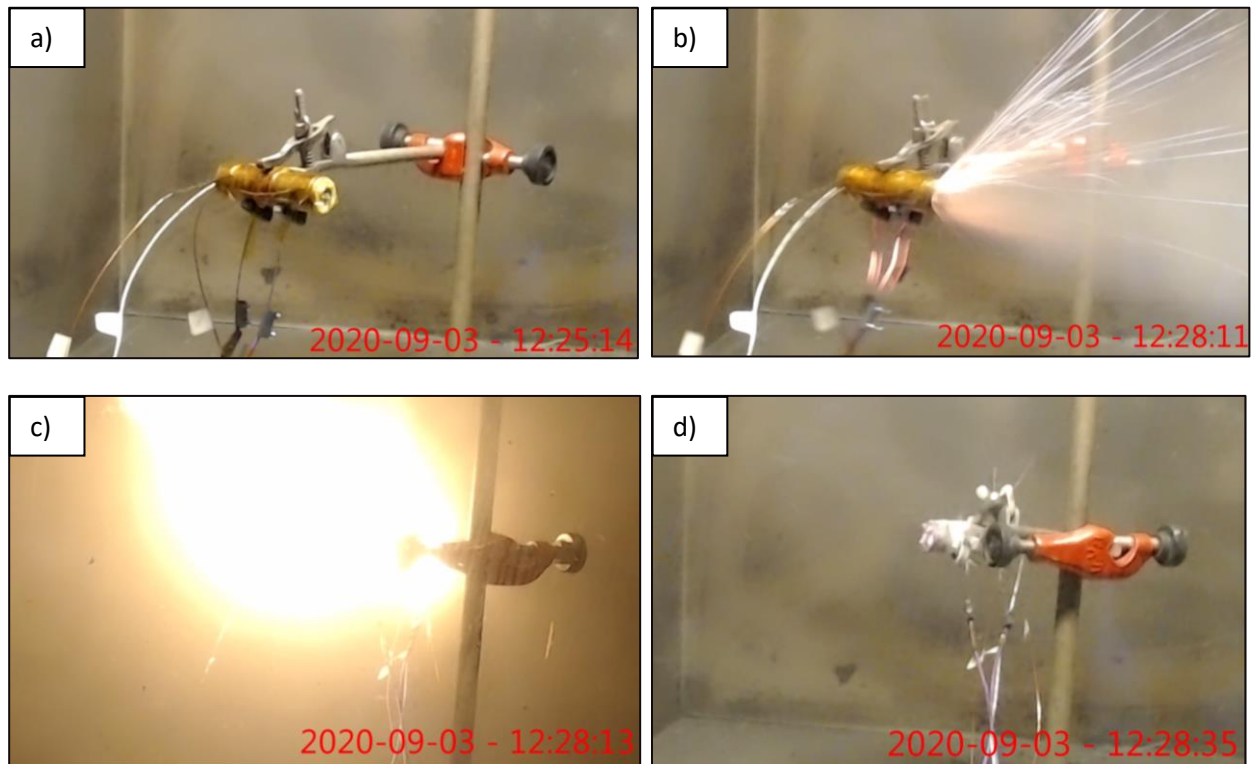


Figur 8: Batteri B, Bilder från film under initiering av termisk rusning i cell a) start av test, b) cellen ventilerar, c) cellen går i termisk rusning och d) cellen flyger iväg av kraften som bildas vid den termiska rusningen och fortsätter att flamma.

Cellen från Batteri C går i termisk rusning efter 177 sekunder då temperaturen mäter 117 °C i toppen och 119 °C i botten på cellen. Ingen ventilering observeras innan cellen går i termisk rusning. Kraften gör att fästet i stativet vrids 180°. Det tar relativt lång tid innan cellen går ned i temperatur då det finns relativt mycket material kvar inuti cellen.



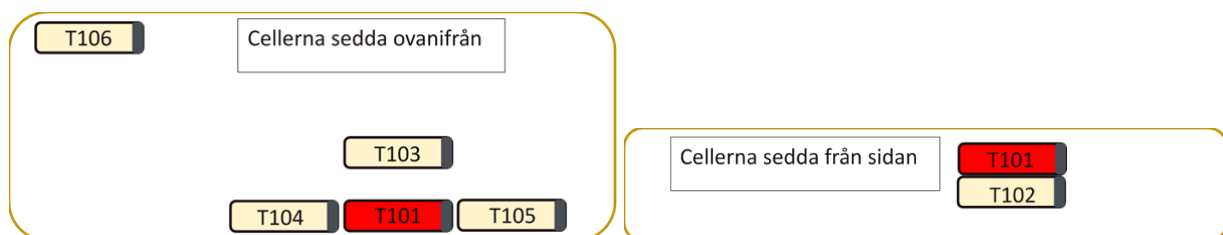
Figur 9: Batteri C, temperaturmätning under initiering av termisk rusning i cell



Figur 10: Batteri C, Bilder från film under initiering av termisk rusning i cell a) start av test, b) cellen går i termisk rusning, c) brand runt cellen och d) 25 sekunder efter den termiska rusningen glöder det fortfarande inuti cellen.

3.2.1 Termisk propageringstest Batteri B

Bilden nedan visar hur cellerna med termoelement sitter i Batteri B samt ventileringsriktning (grå ände). Bilden visar även på ungefärliga avstånd mellan dessa celler. Mellan kortsidan på cellen till kortsidan på nästa cell är det 2.7 mm. Mellan T101 och T102 är det ca 1.1 mm luft och mellan T101 och T103 är det ca 20 mm.



Figur 11: Placering av celler med termoelement som visar ungefärliga avstånd. Den grå änden är toppen på cellen med ventil.



Tabellen nedan summerar testförloppet under det termiska propageringstestet på Batteri B.

Tabell 1 Testförlopp för termisk propagering i Batteri B

TID	HÄNDELSE	KOMMENTAR
00:00:00	Värmning påbörjas.	
00:04:58	Spänningen över batteriet bryts.	När cellen med värmare ventilerar bryts spänningen över batteriet.
00:05:02	Mycket rök väller ut mellan över och underdelen av batterihöljet.	Värmaren stängs av. Se figur 12a).
00:05:03	Gnistor tränger ut genom höljet och temperaturer upp mot 600-700 °C registreras på T102 och T105.	Cellen med värmare går i termisk rusning och cellen under (T102) samt cellen som sitter bredvid i ventileringsriktningen (T105) blir uppvärmda. Eventuellt går dessa celler direkt i termisk rusning. Se figur 12b).
00:05:07	Ytterligare celler går i termisk rusning/ventileras och antänds med ett explosionsartat förlopp.	
00:05:07- 00:05:14	Det brinner med kontinuerlig flamma från batteriet och dess plasthölje.	
00:05:14	Snabb temperaturökning upp mot 800 °C registreras på T104 samt en ny explosionsartad brand registreras på videoupptagningen.	Troligen ventilerar cellen och dess innehåll antänds, alternativt går cellen i rusning i ett explosionsartat förlopp. Se figur 15 med mätningar från termoelementen.
00:05:24	Snabb temperaturökning upp mot 800 °C registreras på T106 samt en ny explosionsartad brand registreras på videoupptagningen.	Troligen ventilerar cellen och dess innehåll antänds, alternativt går cellen i rusning i ett explosionsartat förlopp. Se figur 15 med mätningar från termoelementen.
00:05:14 – 00:07:39	Allmän brand med celler som ventilerar och brinner explosionsartat med ett par sekunder upp till 20 sekunders mellanrum.	Se figur 12d) och e).
00:07:39	Inga fler celler ventilerar utan det är enbart plasthölje och andra delar som brinner.	
00:16:21	Plasten som brinner lugnt släcks enkelt med en brandsläckare.	

Figur 12 visar bilder tagna från videon av testet och illustrerar olika delar av förloppet. Figur 13 visar de temperaturer som registreras under hela testförloppet medan figur 14 visar detaljer innan initieringscellen går i termisk rusning. Efter att värmningen påbörjats tar det 5 minuter tills initieringscellen går i termisk rusning. Den leder direkt till att ett flertal celler går i termisk rusning med gnistor, rökutveckling och tryckuppbyggnad. 5 sekunder efter att den första cellen gått i termisk rusning brinner det i batterihöljet och celler fortsätter att ventileras och brinna explosionsartat. Temperaturer mellan 700 och 800 °C registreras från dess att den första cellen går i termisk rusning tills dess att den sista cellen har ventilerat med en toppnotering runt 1000 °C, se figur 13. Efter 2 minuter och 40 sekunder har alla celler ventilerat och antänts och efter drygt 11 minuter brinner det endast lite i plastrester från batterihöljet och branden släcks.

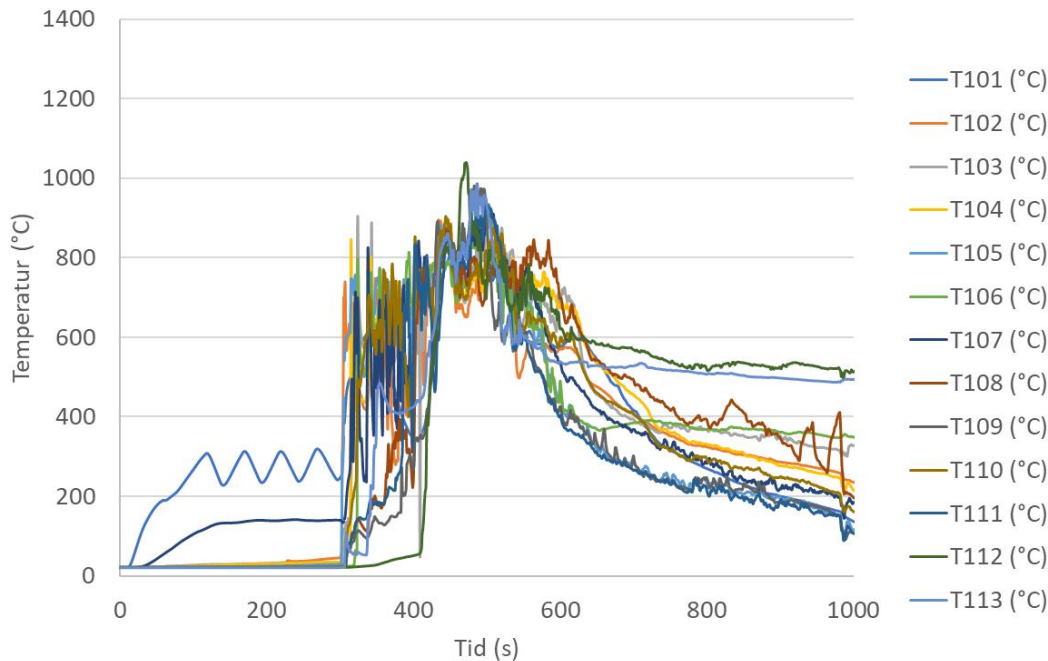


Figur 3: Bilder från film under termisk propageringstest av Batteri B, a) rök kommer ut från batteriet (00:05:02) b) initieringscellen går i termisk rusning (00:05:03), c) rökutveckling efter att första cellen gått i termisk rusning (00:05:04), d) kontinuerlig brand med flammor (00:05:10) och e) Explosionsartat brand, här drygt 2 min efter första cellen gått i termisk rusning (00:07:14).

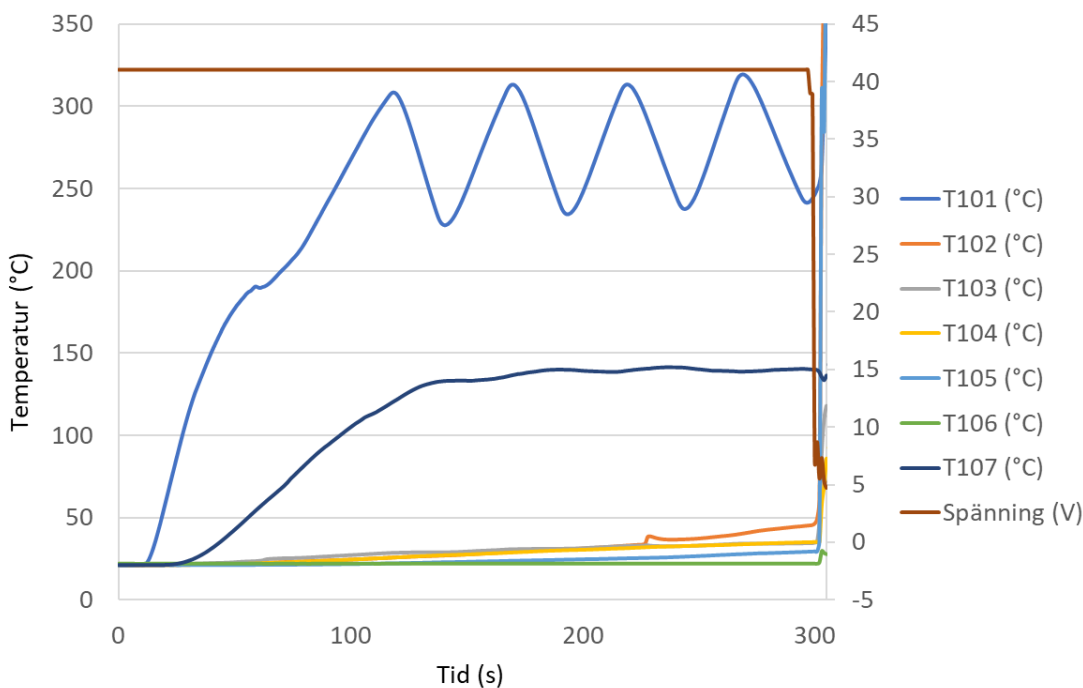
Figur 14 nedan visar förloppet tills dess att första cellen går i termisk rusning. Testet påbörjas genom att starta värmaren. Denna regleras på samma sätt som i celltesterna så att den stängs av då den uppnått 300 °C och sätts åter på vid 250 °C. Värmaren slås av efter 302 sekunder då rök väller ut från batteriet. Redan 4 sekunder tidigare (298 s) har spänningen över batteriet sjunkit då initieringscellen ventilerat. T107 registrerar temperaturen på batterihöljet direkt utanför cellen som värms upp. Temperaturen på plasthöljet går under uppvärmningen upp ganska snabbt till 140 °C och ligger sedan kvar där. Cellerna som ligger intill initieringscellen värms inte upp nämnvärt. Det är cellen under, T102, som värms upp mest och den kommer upp i 45 °C. Då initieringscellen går i termisk rusning går även temperaturen på T105 och T102 upp snabbt, se figur 15 och troligen går även dessa celler i termisk rusning strax efter initieringscellen. T105 ligger precis i riktningen för ventileringen av T101. T102 ligger direkt under T101. T104 och T103 ökar i temperatur ca 10 sekunder senare. T104 ligger mot bakänden av initieringscellen och T103 ligger bredvid initieringscellen men med ett luftgap på ungefär en cellbredd emellan. Sist går



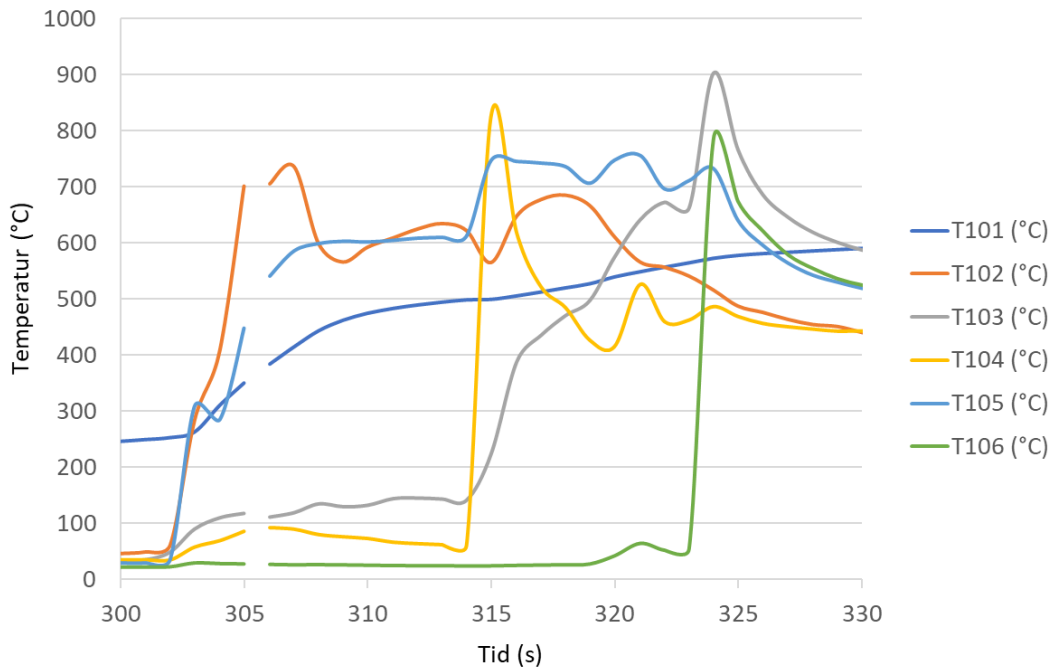
temperaturen på T106 upp, ca 10 sekunder efter T104, och det är den cell med termoelement som ligger längst ifrån initieringscellen. Cirka 100 sekunder efter att den första cellen går i termisk rusning så följs alla registreringar från temperatursensorerna åt rätt väl och individuella temperaturmätningar beror lite slumpvis på materialet som befinner sig i den direkta omgivningen och troligtvis inte på aktiviteter kopplade till cellen de sitter på.



Figur 12: Batteri B - Överblick av temperaturmätningar från alla temperatursensorer från start av test tills dess att den avslutas genom att släcka den kvarvarande branden. För detaljer se efterföljande grafer.



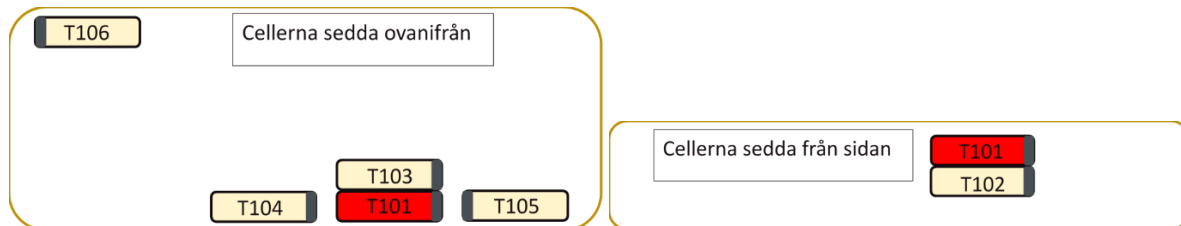
Figur 13: Batteri B - Förlopp fram till att initieringscellen går i termisk rusning.



Figur 14: Förlopp efter att initieringscellen gått i termisk rusning.

3.2.2 Termisk propageringstest Batteri C

Figur 16 nedan visar hur cellerna sitter i Batteri C samt ventileringsriktning (grå ände) på de celler som har termoelement på sig. Den visar även på ungefärliga avstånd mellan dessa celler. Mellan kortsidan på cellen till kortsidan på nästa cell är det 8.5 mm. Mellan T101 och T102 är det ca 1.4 mm plast som sitter mellan cellerna och på samma sätt är det 1.4 mm plast mellan T101 och T103.



Figur 15: Placering av celler med termoelement som visar ungefärliga avstånd. Den grå änden visar toppen på cellen med ventil.

Tabell 2 på nästa sida summerar testförloppet under det termiska propageringstestet på Batteri C.



Tabell 2 Testförlopp för termisk propagering i Batteri C

TID	HÄNDELSE	KOMMENTAR
00:00:00	Värmning påbörjad.	
00:04:37	Initieringscellen går i termisk rusning med rökutveckling och en kraftig explosion och flamma.	Värmaren stängs av. Se figur 16a).
00:04:37- 00:06:09	Plasthöljet brinner med en lugn låga och lite vit rök kommer ut inifrån batteriet.	
00:06:09	Flammorna minskar och plasthöljet slutar brinna. Temperaturen på T101 sjunker samtidigt som temperaturen på T102, T103 samt T107 stiger.	Se figur 16c).
00:08:23	Temperaturen på T102 sjunker från 137 till 91 °C men fortsätter sedan vidare uppåt.	Troligen sjunker temperaturen pga att cellen ventilerar. Se figur 18.
00:10:20	T102 fortsätter att öka i temperatur medan T103 och T107 istället minskar.	
00:14:13	Mycket rökutveckling och en temperaturökning på T102 med en topp över 600 °C.	Cellen T102 går troligen i termisk rusning men utan att det bildas någon flammande låga, se figur 16d).
00:14:13- 00:16:40	Det fortsätter att ryka, ibland minskar och ibland tilltar rökutvecklingen.	Det är möjligt att fler celler ventilerar/ går i termisk rusning men utan att antändas.
00:16:40	Gnistbildning och explosionsartad brand.	Se figur 16e).
00:16:40 – 00:35:30	Allmän brand med celler som ventilerar och brinner explosionsartat med som minst ett par sekunders mellanrum men ibland med flera minuters mellanrum.	Se figur 16f) och 16g).
00:35:30	Sista cellen ventilerar och därefter brinner enbart återstående plast.	
00:41:08	Plasten slutar att brinna.	

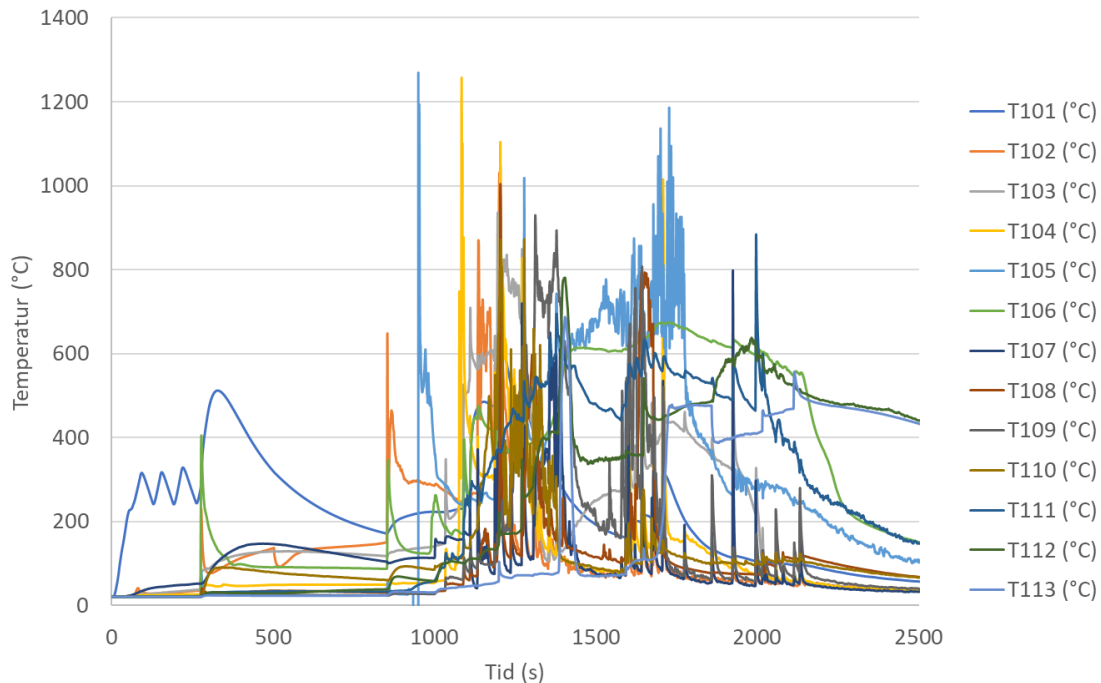
Figur 17 visar bilder tagna från videon av testet och illustrerar olika delar av förloppet. Figur 18 visar de temperaturer som registreras under hela testförloppet medan figur 19 visar detaljer då initieringscellen går i termisk rusning samt förloppet innan det blir en propagering. Efter 4 minuter och 37 sekunder går initieringscellen i termiska rusning med en explosion och rökutveckling till följd. Plasthöljet börjar att brinna men branden slocknar efter 1 minut och 30 sekunder. Därefter sjunker temperaturen i initieringscellen samtidigt som den sakta stiger i de två celler som ligger närmast, dvs under och precis bredvid, se figur 19. Drygt 2 minuter efter att branden slocknat sjunker temperaturen plötsligt från 137 °C till 91 °C på cellen som sitter under initieringscellen då cellen troligen ventilerar. Därefter fortsätter temperaturen återigen att öka i cellen och nästan 6 minuter senare väller rök ut från batteriet och temperaturen stiger snabbt till över 600 °C på den cellen. Därefter följer rökutveckling under 2 ½ minut då en explosionsartad brand uppstår. Det fortsätter därefter att brinna i höljet och celler ventilerar och antänds så att de brinner explosionsartat. Det kan ta alltifrån ett par sekunder till ett par minuter mellan



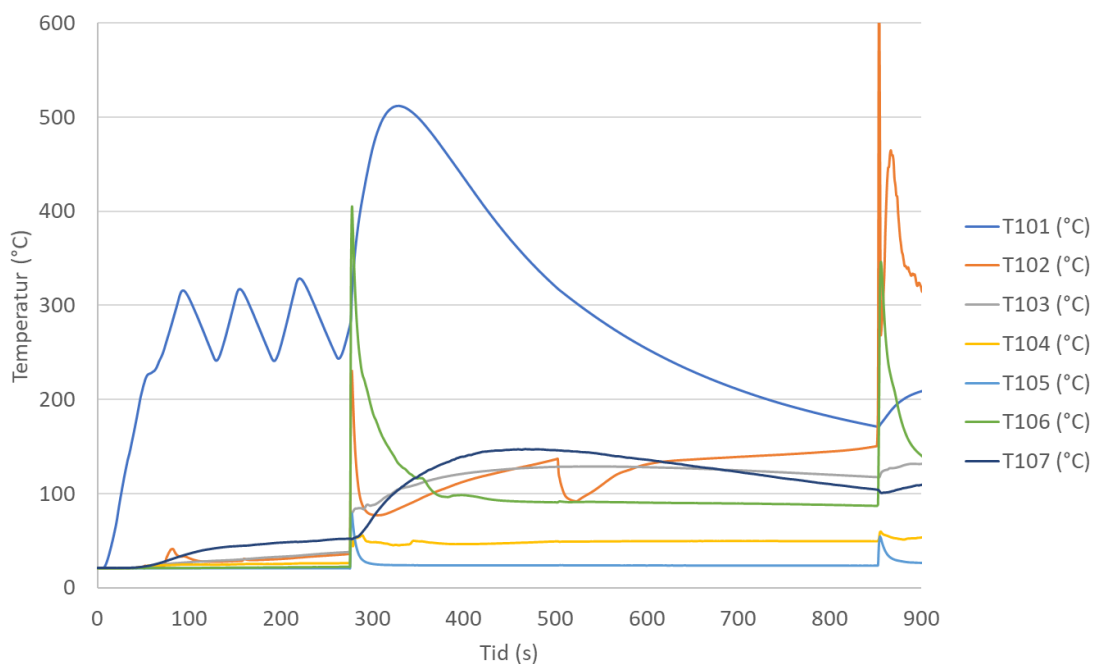
dessa "explosioner". Temperaturtoppar över 800 °C men även över 1000 °C registreras, se figur 17. Efter ytterligare 20 minuter är det endast plasthöljet som brinner och 5 minuter senare slocknar branden av sig själv.



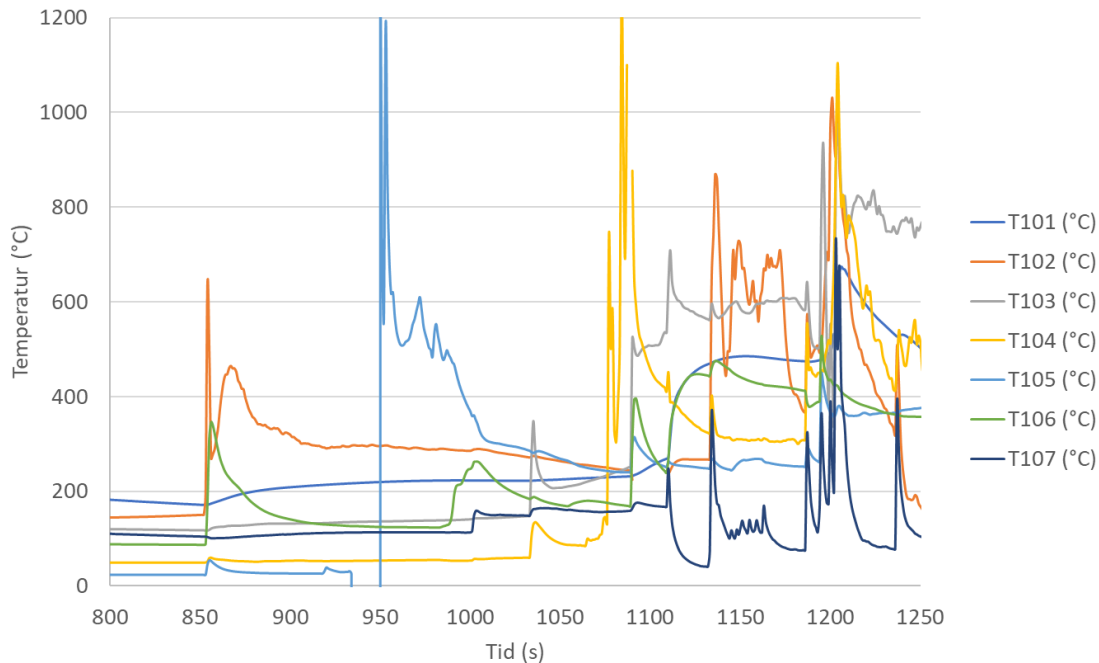
Figur 16: Bilder från film under termiskt propageringstest av Batteri C, a) initieringscellen går i termisk rusning (00:04:37) b) Flammor letar sig ut från höljet 2 s senare (00:04:39), c) branden i höljet slocknar (00:06:09), d) kraftig rökutveckling som startade 22 s tidigare och tilltar (00:14:34), e) gnistbildning och antändning (00:16:40), f) mycket rökutveckling och brand (00:17:15), g) brand i kvarvarande batteri (00:27:54) och h) sista flammen i höljet innan den slocknar (00:41:08).



Figur 17: Överblick av temperaturmätningar från alla temperatursensorer från start av test tills dess att den avslutas genom att släcka den kvarvarande branden. För detaljer se efterföljande grafer.



Figur 18: Batteri C - Förlopp fram till att initieringscellen går i termisk rusning samt efterföljande period tills nästa cell går i termisk rusning.



Figur 19: Batteri C - Förlopp med propagering mellan celler efter att den andra cellen har gått i termisk rusning.

3.2.3 Flamprov på batterihöljen

Flamprov gjordes enligt klausul 15 i UL746C. Materialet exponerades för en 12 mm flamma under två 30 sekundersperioder med ett tidsintervall på 1 minut. Om materialet brinner mer än 1 minut någon av gångerna så uppfylls inte kravet. Resultatet från testningen av batterihöljerna redovisas i tabellen nedan. Batteri C hade olika material i överdelen och underdelen av batterihöljet och provningen genomfördes därför på båda materialen.

Tabell 3 Resultat från flamprov på batterihöljerna

	BATTERI A	BATTERI B	BATTERI C (1)	BATTERI C (2)
Brinttid efter exponering av flamma	$t_1=5, t_2=1$ (sec)	$t_1=0, t_2=0$ (sec)	$t_1=0, t_2=0$	$t_1>60, t_2>60$ (sec)
Godkänd (J/N)	J	J	J	N

Alla material klarade flamprovet förutom en av delarna i Batteri C. De som klarade testet har därför minst flamklass V-2 men skulle troligen även kunna ha flamklass V-1. Detta testades dock inte. Det hölje som fallerade testet har inte flamklass V-2 utan troligen HB vilket är den lägsta klassningen. Ett vanligt krav på batterihöljen är en flamklassning på minst V-2 men även krav på V-1 kan förekomma.



4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

4.1 Diskussion

Eld spred sig utanför batterihöljet för de båda testade batterierna i det termiska propageringstestet och den termiska rusningen som sattes igång i en av cellerna spred sig till i stort sett alla celler i batterierna. Brandförloppet skiljde sig dock en del mellan batterierna. Det totala brandförloppet var ca 12 minuter för det ena batteriet och ca 27 minuter för det andra batteriet. Totaltid från termisk rusning i initieringscellen till fullt utvecklad brand var 8 sekunder för det ena batteriet och 12 minuter för det andra. Dessutom var det generellt betydligt mer rökutveckling och mindre brand för batteriet med längre tid till fullt utvecklad brand samt ett längre brandförlopp. Detta gällde framförallt initialt, då cellernas temperatur steg såsom i en termisk rusning men utan att det skapades flamma eller brand utanför batterihöljet. Flamprov som gjordes separat på batterihöljerna visade att dessa var relativt beständiga mot lågor med minst flamklass V-2 förutom i ett batteri där en del av höljet hade den sämre flamklassen HB. De termiska propageringstesten visar att det kan vara svårt för ett hölje att motstå brand vid de temperaturer som brinnande litiumjonceller kommer upp i.

I det termiska propageringstestet för Batteri B så ventilerar initieringscellen mot nästa cell som direkt tillsammans med cellen under initieringscellen går i termisk rusning. Därefter följer ett mycket snabbt förlopp med ventilerande och antändande celler. Det är rimligt att tro att det korta avstånd som är i ventileringsriktningen från initieringscellen till nästa cell gör att den cellen utsätts för en mycket hög temperatur vilket resulterar i ett mycket snabbt förlopp och fortsatt propagering mellan cellerna i batteriet som alla sitter nära varandra i ventileringsriktningen.

Även i Batteri C så ventilerar initieringscellen direkt mot nästa cell men med ett större mellanrum så att det som kommer ut från cellen har en möjlighet att ta en annan riktning. Trots att mycket höga temperaturer registreras på initieringscellen så propagerar inte den termiska rusningen vidare direkt i batteriet utan det sker en temperaturutjämning där de celler som ligger närmast cellen som gått i rusning tar upp mest värme, dvs cellen under och cellen bredvid. Under lång tid håller sig dessa celler inom ett stabilt temperaturområde men till slut ventilerar cellen under initieringscellen varefter den verkar gå i termisk rusning och bli ännu varmare utöver den värme som fås från initieringscellen. I detta fall verkar det vara den nära kontakten mellan cellerna som tillsammans med en hög temperatur i initieringscellen gör att det sker en propagering. Om cellerna inte hade legat så nära varandra så kunde det eventuellt ha funnits en större möjlighet för detta batteri att klara detta test.

Ytterligare en parameter som påverkar propageringstestet är hur cellen fallerar, vilken temperatur kommer cellkroppen upp i och hur mycket av cellinnehållet skjuts ut och hur mycket blir kvar. Även tendensen att ventilera och bilda mycket rök jämfört med att cellinnehållet direkt antänds skapar olika förutsättningar för termisk propagering i batteriet. Brandförloppet skiljer sig mellan batterierna och Batteri C har inte en lika snabb propagering mellan celler. Skillnaderna skulle kunna bero på både skillnader i batteridesign, dvs hur cellerna sitter placerade i förhållande till varandra men även cellens beteende då den går i termisk rusning.

Brandförloppet hos Batteri C belyser en problematik som kan uppstå med litiumjonbatterier där man kan tro att en brand är släckt men intern värmefördelning och värmegenerering kan återigen initiera en brand.

4.2 Slutsats

Batteri B och C verkar inte vara designade för att klara av ett termiskt propageringstest. Resultaten från testerna tyder på att det var två olika propageringsmekanismer som ledde till att batterierna fallerade; ventileringen från initieringscellen för Batteri B samt termisk värmeledning från initieringscellen till



närliggande celler för Batteri C. Båda dessa processer går att förhindra genom designförändringar av batterierna vilket även går i linje med den sammanfattande rapporten från workshopen "*Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation?*" samt NASAs riktlinjer för design, dvs att designa batterierna så att ventiler från celler hanteras och ej riktas direkt mot andra celler eller antändbart material samt att undvika att värme överförs från cell till närliggande cell. Testet visar på att det finns potential för förbättringar i designen av dessa batterier så att de bättre kan hantera en termisk rusning i en cell.