

Mäta HRR från Li-jonbatterier med hjälp av OCC (oxygen consumption calometry) och andra metoder

Olof Skyllberg | Brandteknik | LTH | LUNDS
UNIVERSITET



Mäta HRR från Li-jonbatterier med hjälp av OCC (oxygen consumption calorimetry) och andra metoder

Olof Skyllberg

Lund 2023

Mäta HRR från Li-jonbatterier med hjälp av OCC (oxygen consumption calorimetry) och andra metoder

Measure HRR from Li-ionbatteries by use of OCC (oxygen consumption calorimetry) and other methods

Olof Skyllberg

Report 5688

ISRN: LUTVDG/TVBB--5688--SE

Antal sidor/Number of pages: 74

Illustrationer/Illustrations: 23

Sökord: Litium-jon batteri, Termisk rusning, Oxygen consumption calorimetry (OCC), Sensible enthalpy rise approach (SERA), effektutveckling.

Keywords: Lithium-ion batteries, Thermal runaway, Oxygen consumption calorimetry (OCC), Sensible enthalpy rise approach (SERA), Heat release rate.

Abstract

One of the most important parameters to measure in the fire discipline is the heat release rate (HRR). Therefore it is very important that these measurements are accurate and as correct as possible. The most common method for measuring heat release rate of fires is the OCC method (oxygen consumption calorimetry). The method is based on the relation between oxygen in the surroundings and the exhaust gases. Problems with the method can arise when the fuel that is burnt develops oxygen by itself, something that a lithium-ion battery do. One solution to this problem could be to use a different method to measure HRR. The method that is chosen to evaluate as an alternative to OCC is the SERA (sensible enthalpy rise approach) method. A comparison between the methods is conducted to evaluate if the SERA method can produce a result with less uncertainty than that of the OCC method. The comparison is conducted through a series of calculations and assumptions. The assumptions that are made in the comparison is deemed to induce to large of an uncertainty in the result to state that one method is better than the other one and instead it is suggested that further research should be conducted to be able to conclude which method is better. The results that can be concluded from the work is that a measurement with the SERA method has to be conducted very carefully to have a chance to be an improvement of a measurement with the OCC method. The second result that can be concluded from the work is that the produced oxygen from the lithium-ion battery induces a significant uncertainty in the OCC method, resulting in an underestimate of the HRR.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2022

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2022.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Sammanfattning

En av de parametrar som är viktigast att mäta vid arbete och undersökningar inom brandsäkerhetsdisciplinen är brandeffekten (HRR- Heat Release Rate). Därför är det extra viktigt att effektutvecklingsmätningarna blir så exakta och säkra som möjligt. Den vanligaste och mest vitt spridda metoden för att mäta brandeffekt är Oxygen Consumption Calorimetry (OCC). OCC använder sig av syrgaskoncentrationen i den omgivande luften och skillnaden mellan den och syrgaskoncentrationen i brandgaserna för att bestämma effektutvecklingen av en brand. Ett problem med metoden uppkommer dock när bränslet som förbränns producerar eller innehåller syre. Då stämmer inte relationerna som används för att beräkna effektutvecklingen och effektutvecklingen underskattas. Ett bränsle som blir allt vanligare och vanligare som gör just detta, utvecklar syre när det brinner, är litium-jonbatterier. I arbetet undersöks därför hur pass väl effektutvecklingen kan mätas med OCC metoden trots att bränslet är ett litium-jonbatteri.

Eftersom det är osäkert huruvida OCC metoden skulle lämpa sig för att mäta effektutvecklingen för en brand i ett litium-jonbatteri så undersöks en alternativ metod för att mäta effektutvecklingen. Metoden som undersöks är Sensible Enthalpy Rise Approach (SERA). SERA metoden använder sig av värmebalansen i en kontrollvolym för att uppskatta effektutvecklingen av en brand. SERA metoden påverkas därför inte av att bränslet utvecklar syre när det brinner och skulle därför kunna lämpa sig mycket bra för att mäta effektutvecklingen när ett litium-jonbatteri brinner.

De båda metoderna jämförs sedan för ett specifikt fall för att konstatera hur pass väl en mätning med SERA metoden behöver utföras för att generera ett resultat som är säkrare än resultatet från en mätning med OCC metoden för fallet. I utförandet av jämförelsen är dock osäkerheterna mycket stora, speciellt för beräkningarna för SERA metoden, vilket gör att det inte går att konstatera vilken av metoderna som bäst lämpas sig utan resultatet av rapporten blir att en vidare utredning behövs för att konstatera vilken av metoderna som bäst lämpar sig för mätning av effektutvecklingen.

De slutsatser som kan dras av arbetet är för det första, att syrgasen som produceras av batteriet medför ett signifikant fel i OCC metoden som innebär att effektutvecklingen underskattas. För det andra, att om SERA metoden ska ha möjlighet att innebära en förbättring av en mätning med OCC metoden så behöver SERA metoden utföras mycket noggrant.

Förord

Examensarbetet påbörjades under hösten 2021 och en paus av skrivandet togs i början på vårterminen 2022 skrivandet av rapporten togs sedan upp igen under vårterminen 2023 i kursen VBRM01 på Brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet utfördes på distans på grund av den rådande smittspridningen av Covid-19.

Jag skulle vilja ge ett stort tack till min handledare Petra Andersson

Som hjälpt mig under skrivandet av examensarbetet, med stöd i framtagande av metodik, stöd i beräkningar, tillhandahållande av litteratur och testresultat och framför allt en god handledning av arbetet.

Jag skulle även vilja tacka Richard Johansson från RISE

Som också hjälpte mig med beräkningarna och felsökning i beräkningarna.

Umeå 2021-2023

Olof Skyllberg

Nomenklaturlista och förkortningar

Ord	Förkortning
Oxygen consumption calorimetry	OCC
Sensible entalpy rise aproach	SERA
Litium-jon	Li-jon
Solid electrolyte interface	SEI
Litium-koboltbatteri	LCO
Effektutveckling (Heat release rate)	HRR

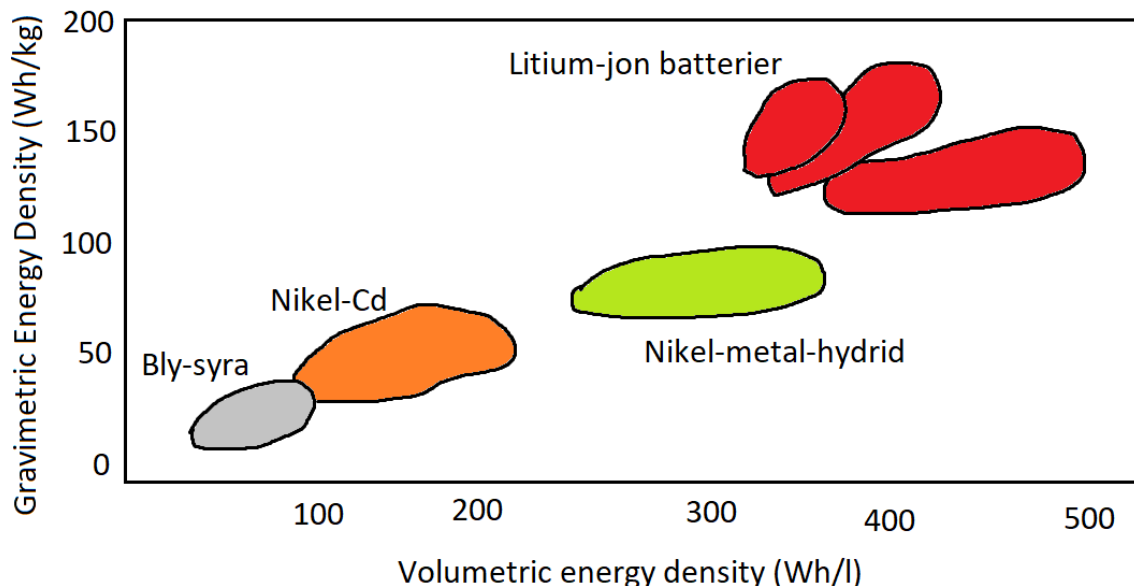
Innehållsförteckning

Sammanfattning	iv
Förord	v
Nomenklaturlista och förkortningar.....	vi
1 Inledning.....	9
1.2 Syfte och mål.....	11
1.3 Problemformulering.....	11
1.4 Avgränsningar och begränsningar.....	11
1.5 Metod.....	11
1.5.1 Litteraturundersökning.....	12
1.5.2 Beräkningar	12
2 Teori.....	14
2.1 Förbränning.....	14
2.2 Litium-jon batteriet	15
2.3 Termisk rusning.....	16
2.4 Brand i Li-jon batterier	17
2.5 Oxygen Consumption Calorimetry (OCC).....	19
2.5.1 Beräkningsgång OCC.....	19
2.5.2 Hur OCC fungerar och byggs upp.....	22
2.6 SERA.....	25
3 Jämförelse mellan OCC och SERA	31
3.1 Introduktion av försöket som används	31
3.2 Beräkningar OCC.....	33
3.2.1 Kontrollräkning av beräkningsgången för OCC	33
3.2.2 Syrgasens påverkan på uppmätt effektutveckling i OCC metoden.....	35
3.3 Kan SERA metoden vara säkrare än OCC metoden	41
3.3.1 Ingående parametrar i SERA.....	41
3.3.2 Känslighetsanalys. Osäkerheter i SERA metoden.	42
3.3.2 Variation av parametrar.....	46
4 Resultat.....	51
4.1 Kan SERA metoden utföras säkrare än OCC metoden.....	51
4.2 Genomsnittstemperaturen på utsidan av apparatens väggar, $T_w, surf4$	52
4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar, $dT_w, voldt$	55
4.4 Slutgiltiga konstateranden	57

5 Diskussion	58
5.1 Studerat fall och tillämpning av data	58
5.2 Osäkerheter i metoderna.....	58
5.2.1. Antaganden och osäkerheter i OCC metoden	58
5.2.2 Antaganden och osäkerheter i SERA metoden.....	61
5.3 Diskussion av resultat.....	67
5.4 Förbättringsförslag och förslag till vidare utredning.	68
5.4.1 Identiska experiment för båda metoderna.	68
5.3.2 Anpassning av förbränningsentalpin till bränslet	69
5.3.3 Anpassning av OCC metoden för litium-jonbatterier som bränsle.....	69
5.3.4 Kvantifiering av osäkerheter i mätmetoderna.	70
5.3.5 Andra förbättringsförslag.....	70
6 Slutsats.....	71
Referenser	72

1 Inledning

Med den nuvarande trenden att skapa mer miljövänliga fordon genom elektrifiering ökar användandet av batterier. I och med den snabba tekniska utvecklingen som har skett de senaste 100 åren så har även batterierna utvecklats. Nya tekniker för att skapa bättre och bättre batterier utvecklas hela tiden och en av de nyaste och vanligaste uppladdningsbara batterityperna är litium-jon batterier (Antti & Justin, 2014). Några av de områden där batteriet används idag är elfordon (bilar, lastbilar och bussar), lagring av solenergi, verktyg och mobiltelefoner (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020). Det finns många anledningar till att just litium-jon batteriet blivit så populärt. En anledning är att det är mycket mer flexibelt än innan vanliga batterier som bly-syra batterier eller Nickel-metal-hydrid batterier. Litium-jon batterierna kan ha både högre energidensitet och högre effektdensitet än de andra batterierna vilket kan ses i Figur 1.



Figur 1. Illustration över typisk/möjlig energidensitet för några vanliga batterityper. Bilden är en grov skiss från bild utav: NASA - National Aeronautics and Space Administration (Hall, 2021). Ingen exakt avläsning bör göras av bilden den är bara till för att ge en uppskattning av skillnaderna mellan batterityperna.

Batterierna har även andra fördelar mot alternativa energikällor som Andersson (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020) tar upp, bland annat att de inte producerar några avgaser vid användning, genererar inget buller, de går snabbt att ladda upp, har lång livslängd som kan genomgå flera djupa cykler samt att de har hög verkningsgrad. Dock har de en del nackdelar i och med att de har en brännbar elektrolyt och kan hamna i termisk rusning.

I Qingsong Wangs artikel "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery" (Qingsong, o.a., 2012) finns en stor mängd anmälda fall då litium-jon batterier har orsakat bränder. I artikeln framgår det att många bränder har inträffat sen tekniken först togs i bruk samt att antalet termiska rusningar som sker blir fler och fler i och med att vardagselektronik så som smarttelefoner börjat innehålla batterierna.

En av de viktigaste parametrarna att studera för att förstå hur ett bränsle eller produkt brinner och vilka konsekvenser en brand kan leda till är dess effektutveckling, Heat Release Rate (HRR). HRR mäts oftast med Oxygen Consumption Calorimetry (OCC) (Brohez & Sylvain, 2005). Litium-jon batterier kan dock avge syre när de hamnar i termisk rusning och eftersom OCC metoden använder sig av syrefraktioner för att bestämma effektutvecklingen är det oklart hur pass väl HRR uppmätt med OCC representerar den brandeffekt som batterierna egentligen avger. Batterierna avger dessutom CO₂ utan direkt förbränning (Ravdel, o.a., 2003) vilket ytterligare komplicerar bilden då koldioxidfraktionen används för att beräkna effektutvecklingen i OCC metoden (Swedish standard institutes, 2019), men detta kommer inte undersökas vidare i detta arbete.

Enligt ISO/IEC 17025 standarden behöver laboratorier och testverksamheter som ska ackrediteras enligt ISO 17025 undersöka mätosäkerheter för varje mätning och hur dessa sedan påverkar testmetoder, kalibrering, mm. (Svenska institutet för standarder, 2005). Eftersom standarden kräver att osäkerheten undersöks så återfinns det också en del litteratur på området t.ex. så skriver Brohez och Sylvain om osäkerheterna i effektutvecklingsmätningarna (HRR) med hjälp av OCC (Brohez & Sylvain, 2005). Enright och Fleischmann skriver om hur individuella komponenter påverkar osäkerheten i resultaten (Enright & Fleischmann, 1999). Det här arbetet kommer att fokusera på de osäkerheter och fel som genereras vid mätning av effektutvecklingen med hjälp av OCC på grund av det extra syret som produceras av litium-jon batterier när de hamnar i termisk rusning. I boken "Att genomföra examensarbete" (Höst, Regnell, & Runeson, 2011) presenteras 3 olika typer av mätfel.

- "Grova fel: rejäla misstag som beror på fel i avläsning, fel i protokollförandet och liknande. De utmärks genom att radikalt avvika från mätserien.
- Systematiska fel: fel som alltid uppträder och som orsakas av någon konstant störning på mätningen.
- Tillfälliga fel: små slumpmässiga variationer kring det sanna värdet"

Felet som uppkommer av syret i OCC metoden tolkas som ett systematiskt fel eftersom det alltid uppträder och har den konstanta störningen som orsakas av syret som produceras.

Eftersom OCC metoden antas ge felaktiga resultat för HRR vid brand i litium-jon batterier så undersöks en extra metod som kan vara relevant för att mäta effektutvecklingen. Den andra metoden är att mäta avgiven värme med så kallad "Sensible Enthalpy Rise Approach (SERA)", som är baserad på konserveringen av energi (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020). Det är dock mycket oklart hur pass väl HRR kan uppskattas genom denna metod eftersom användningen av metoden inte är lika vanlig som OCC.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att ge en uppfattning av osäkerheter och storleken av dessa i de båda metoderna som används för att mäta effektutvecklingen. Syftet är även att fungera som underlag för bedömning av vilken av metoderna som lämpar sig bäst för mätning av effektutveckling vid bränder i litium-jonbatterier.

Målet med arbetet är att uppskatta och kvantifiera det fel/den osäkerhet som syrgasproduktionen från ett litium-jon batteri ger när HRR mäts med OCC för ett specifikt test fall. Målet är även att uppskatta hur pass väl en mätning med SERA metoden behöver göras för att ge ett resultat som är bättre än resultatet som fås med en OCC mätning för det valda testfallet.

1.3 Problemformulering

- Hur stort fel genererar litium-jonbatteriernas syreproduktion vid brand på resultatet av en OCC mätning?
- Hur pass väl bör HRR uppskattas med hjälp av SERA för att ge ett bättre resultat än OCC?
- Vilken av metoderna OCC och SERA lämpar sig bäst för att mäta effektutvecklingen vid brand i litium-jon batterier?

1.4 Avgränsningar och begränsningar

Examensarbetet görs på distans från universitetet vilket gör att tillgången till labblokalerna begränsas och därför görs inga egna laborationer utan resultat för detta tas från annan litteratur. Dessutom saknas kompetens hos laboranten för att elda så pass komplicerade bränslen på ett säkert sätt.

Syrgasproduktionen från enbart ett specifikt försök med litium-jonbatterier används i arbetet eftersom tidsspannet för arbetet begränsar möjligheten till att undersöka fler batterityper. Begränsningen sker också eftersom ingen ytterligare litteratur fanns att tillgå som redovisade producerad mängd syrgas från ett litium-jonbatteri.

Möjligheten till att anpassa beräkningar och jämförelser till det specifika fallet som ska utvärderas begränsas av att inga egna undersökningar kan utföras så värden från litteraturen behöver anpassas efter bästa förmåga.

1.5 Metod

För att enkelt kunna besvara frågeställningarna i avsnitt 1.3 "Problemformulering" delades arbetet upp i ett antal faser: en litteraturundersökningsfas, en beräkningsfas, en skrivningsfas och en sista sammanställningsfas.

1.5.1 Litteraturundersökning

Litteraturundersökningen utgör grunden för arbetet och utfördes först.

Litteraturundersökningen krävs för att bygga en bra grund att utgå ifrån i arbetet och för att få en överblick över området för att sedan rikta in sig på frågeställningen.

Litteratur och där igenom information hämtades från vetenskapliga artiklar, rapporter och föreläsningar. För att hitta artiklarna med mera användes en rad olika sökmotorer och databaser. Den främst använda databasen var Google scholar, men även Lunds universitets egen databas lu.se/search och inspelade föreläsningar, från Canvas, som hölls vid Lunds universitet användes för att hämta information. För att hitta viss detaljinformation var den främst använda sökmotorn Google eftersom den ansågs vara enklast att använda och därför skulle ge bäst sökresultat. Exempel på de mest frekvent använda sökorden som användes vid sökningarna både i databaserna och i sökmotorn var litium-jonbatterier, OCC, SERA, termisk rusning och effektutveckling, orden användes även på engelska eftersom det ofta finns mer litteratur på engelska än på svenska.

Informationen från litteraturundersökningen användes främst för att författa avsnitt "2 Teori" men också som grund för avsnitt "3 Jämförelse mellan OCC och SERA". Till avsnitt "2 Teori" var fokus på litteratur som behandlade grundläggande information om litium-jonbatterier och brand i litium-jonbatterier. Även teorilitteratur som behandlade mätmetoderna OCC-metoden och SERA-metoden söktes till avsnitt "2 Teori". Den mer grundläggande informationen i avsnitt "2 Teori" används sedan som bas till avsnitt "3 Jämförelse mellan OCC och SERA", det mer djupdykande beräkningskapitlet. Eftersom grunderna redan var lagda till avsnitt "3 Jämförelse mellan OCC och SERA" var i stället fokus på att hitta detaljinformation om förbränningen av litium-jonbatterier och de båda mätmetoderna. Exempel på information som hämtades till avsnitt "3 Jämförelse mellan OCC och SERA" är mängden syre som utvecklas vid bränder i litium-jon batterier och den uppmätta effektutvecklingen vid en brand.

1.5.2 Beräkningar

Beräkningarna går ut på att utvärdera hur pass stor påverkan det utvecklade syret från en brand i litium-jon batterier har på den uppmätta effektutvecklingen vid mätning med OCC. Efter att påverkan på resultatet av OCC mätningen hade konstaterats så utvärderas vilken säkerhet en mätning med SERA metoden behöver utföras med för att producera ett resultat som ligger närmre det verkliga värdet än vad OCC mätningen ger.

För att kunna göra beräkningarna behövdes ett fall att räkna på, det inte fanns något test att tillgå som inkluderade alla de parametrar som behövdes i studien. Därför behövde flera olika experiment från litteraturen användas för att få till ett lämpligt beräkningsexempel.

Det första som gjordes i beräkningarna var att kontrollera att beräkningsmetoderna som ställts upp i teorikapitlet för OCC fungerar. Kontrollen gjordes genom att kontrollberäkna ett redan utfört experiment med OCC metoden, försöket som användes var försök 10 i rapporten ” Investigation of fire emissions from Li-ion batteries” (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) Försöket användes eftersom tillgång till indatan till försöket fanns vilket möjliggjorde kontrollräkningen och möjlighet till vidare utredningar.

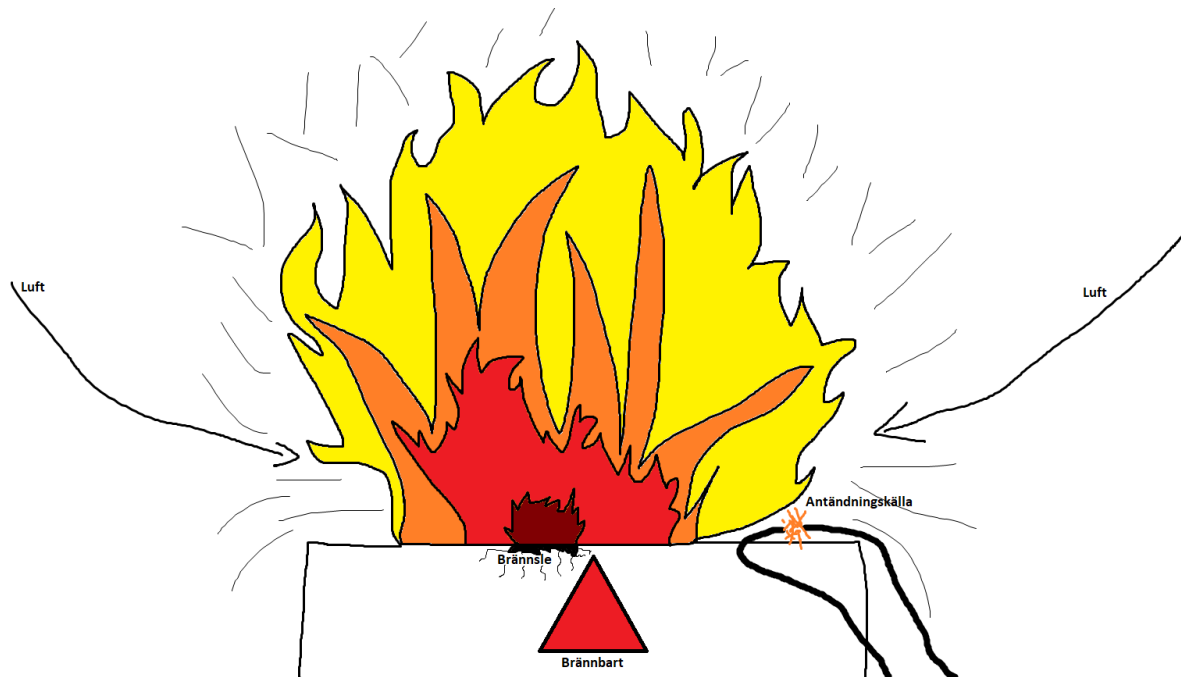
Efter kontrollberäkningen så beräknades hur pass stort fel syrgasutveckling i batteriet inducerar i resultatet vid en OCC mätning. Det gjordes genom att använda indatan från försök 10 tillsammans med data från litteraturen för syrgasutveckling vid bränder i litium jonbatterier, som bearbetades för att appliceras i beräkningen.

När felet i OCC mätningen konstaterats så utvärderades hur pass noga SERA mätningen behöver utföras för att få ett resultat som har lägre mätosäkerhet än OCC mätningen. Utvärderingen gjordes genom att först konstatera vilka parametrar i SERA metoden som påverkar resultatet av effektutvecklingen mest. Det gjordes genom en känslighetsanalys av SERA metoden för liknande indata som den som användes vid beräkningen i OCC analysen. De parametrar som konstaterades ha störst inverkan på resultatet utvärderades sedan vidare för att se hur säkert de behöver mätas för att en mätning med SERA metoden ska resultera i ett säkrare resultat än en mätning med OCC metoden.

2 Teori

2.1 Förbränning

För att förstå de mer komplicerade bränderna i Li-jonbatterierna behöver först grunderna av vad förbränning är för något förklaras. Dougal Drysdale skriver i sin bok "An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition" (Drysdale, 2011) att brand är en reaktion mellan ett ämne och syre från luften. Det betyder det behövs ett bränsle och ett oxidationsmedel (ofta syret i luften men kan också vara syre från andra källor som producerar eller innehåller syre) för att förbränning ska kunna ske. Ett exempel på hur en brand kan gå till kan ses i Figur 2 nedan.



Figur 2. Bild av de 3 parametrar som behövs för förbränning. Luft med innehållande syre strömmar in från sidorna, bränsle i form av brännbart föremål och antändningskälla i form av en trasig kabel.

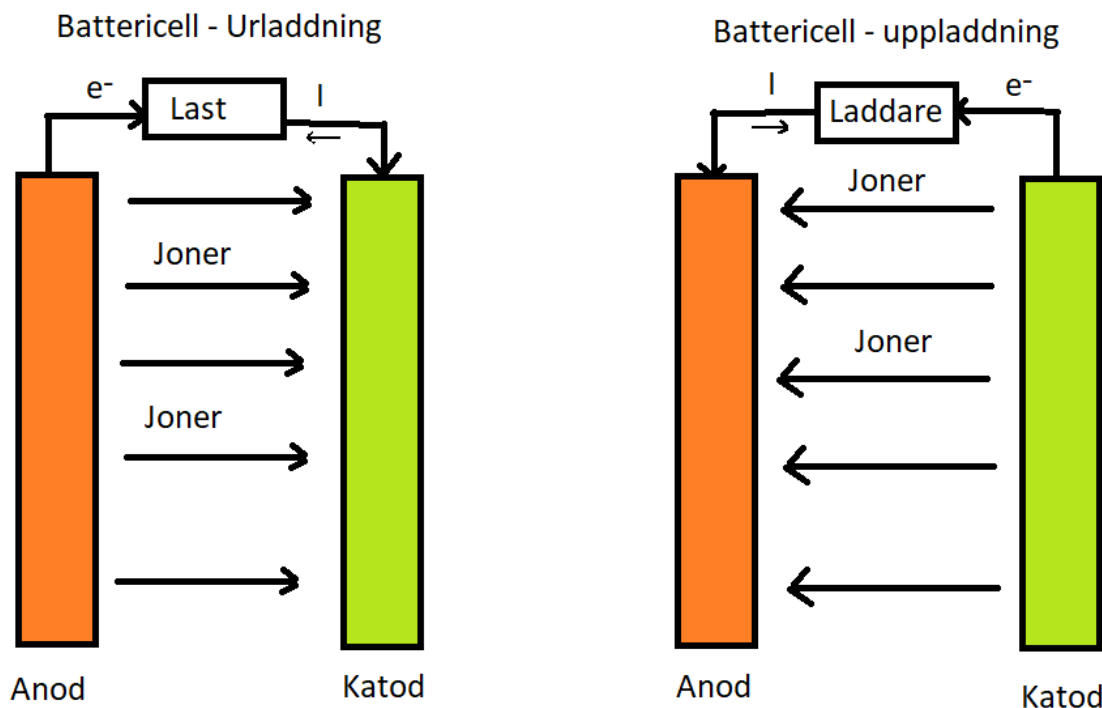
I figuren består bränslet av en brusten behållare med något brännbart i. Bränslet dunstar och övergår till gas-fas och läcker ut ur behållaren där det sedan antänds av en antändningskälla. Många bränslen kan också självantända beroende på förhållandena. Efter antändningen så sprider sig elden till resterade gas som är inom brännbarhetsområdet för gasen och en brand har brutit ut.

Alla förbränningsreaktioner som sker avger energi. Mängden energi som avges vid en förbränning kan kvantifieras genom att definiera förbränningsvärmets som den totala mängden värme som avges när en enhet av bränsle (vid 25 °C och en atmosfärs tryck) blir oxiderad fullt ut (Drysdale, 2011). Oxidation sker dock sällan fullt ut och en korrigeringsfaktor för detta behöver appliceras, ofta benämnd χ , med ett värde mellan 0-1. Beroende på bränslet som förbränns så skapas olika förbränningsprodukter, vid bränder i kolväten så blir restprodukterna koldioxid och vatten (Drysdale, 2011). Vid mer komplicerade bränder i andra kemiska substanser så kan restprodukterna vara andra substanser. Ett exempel på ett bränsle som kan producera andra restprodukter är PVC plast som kan producera väteklorid vid brand (PVC Forum, 2017) vilket är en

frätande syra vid kontakt med vatten. Ett och samma bränsle kan också förbrännas på många olika sätt och därför också ge upphov till många olika risker. I "An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition" skriver Dougal Drysdale "...the mode of burning may depend more on the physical state and distribution of the fuel, and its environment, than on its chemical nature. Two simple examples may be quoted: a log of wood is difficult to ignite, but thin sticks can be ignited easily and will burn fiercely if piled together; a layer of coal dust will burn relatively slowly, but may cause an explosion if dispersed and ignited as a dust cloud." (Drysdale, 2011). Ett bränsle kan alltså ge upphov till en lättsläckt, lokal brand i vissa sammanhang och en stor explosionsrisk i andra fall.

2.2 Litium-jon batteriet

Det finns många olika litium-jonbatterier och litiumjonbatterisystem som varierar i storlek, kapacitet och uppbyggnad. Batterierna kan se olika ut på utsidan de kan t.ex. se ut som ett vanligt cylindriskt batteri, de kan se ut som påsar av aluminiumfolie eller vara hårda plastlådor som innesluter batteriet, men batteriet fungerar principiellt likadant oavsett form. Grund delen av ett litium-jonbatteri är en litium-jonbattericell.



Figur 3. Schematiska bilder över grundläggande upp och urladdning av en battericell, bilden är en skiss från bilder från artikel producerad av Batteriföreningen (2019).

I Figur 3 visas uppbyggnaden av en vanlig battericell där elektroner strömmar från den negativa elektroden (anod) till den positiva elektroden (katod) vid urladdning (Batteriföreningen, 2019). Vid urladdning måste även de positiva litium-jonerna transportera sig i elektrolyten genom en separator till katoden för att neutralisera polen, som blir mer och mer negativt laddad när elektronerna vandrar över till den. Det motsatta händer då batteriet laddas, då strömmar elektroner från katoden till anoden och jonerna vandrar tillbaka till anoden genom separatorn (PennState, 2018). Separatorn finns inte utritad i bilden men är ett permeabelt material som finns mellan anod och katod som separerar dessa för att undvika kortslutning i batteriet.

Litium-jon batterier är sällan ensamma celler utan består av olika system av celler. Batterisystemet består av många olika delar, här beskrivs delarna i ett system översiktligt i storleksordning från minst till störst. Det första steget i batterisystemet är cellerna som beskrivits i detalj tidigare. Cellerna packas i sin tur i batterimoduler som fungerar som ett större batteri byggt av många sammankopplade celler. Modulerna kan sedan packas i pack/subpack som sedan kopplas till ett stort batterisystem (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020).

Litium-jon batterier är egentligen namnet på många olika batterier där den enda konstanten är att de innehåller litium-joner och de delar en del egenskaper. Beroende på vilka ändringar som görs så ändras också batteriets olika egenskaper, det som vanligtvis varierar är ämnet som elektroderna och elektrolyten görs av. Elektrolyten är en lösning som ofta består av ett organiskt lösningsmedel och ett icke organiskt salt. De vanligaste förekommande lösningsmedlen för litium-jonbatterier är etylenkarbonat (EC), propylenkarbonat (PC), dimetylkarbonat (DMC) och dietylkarbonat (DEC) det förekommer även kombinationer mellan dessa (Qingsong, Jinhua, & Guanquan, Lithium Ion Battery Fire and Explosion, 2005). Det klart vanligaste saltet i elektrolyten till litium-jonbatterier är litiumhexafluorfosfat (LiPF_6). Egenskaperna som påverkas när elektrolyt-elektrodkombinationen varierar är batteriets energidensitet och effektdensitet, ofta är målet att få så hög energidensitet som möjligt (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020). Problemet blir dock att de kombinationer som genererar högst energidensitet också är de kombinationer som är mest reaktionsbenägna. Med mer reaktionsbenägna celler så ökar risken för att batteriet ska hamna i ett ostabilt tillstånd vilket om det inte kontrolleras leder till att batteriet hamnar i termisk rusning.

2.3 Termisk rusning

Det finns ett antal faktorer som bidrar till att en termisk rusning kan ske i batteriet. Det första som behöver hända är att batteriet behöver utsättas för ett yttre trauma (slag eller liknande), förhöjda temperaturer eller en inre kortslutning för att starta reaktionen. Ofta så börjar reaktionen med att en yttre påverkan initierar nedbrytningen av det tunna SEI (solid electrolyte interface (engelska)) lagret på anoden, detta sker då batteriet blivit varmt nog (ca 69°C , (Qingsong, o.a., 2012)).

Efter att SEI lagret har brutits ned så kommer anoden i direkt kontakt med elektrolyten, elektrolyten reagerar sedan med anoden i en exoterm reaktion vilket ökar temperaturen i batteriet ytterligare (Qingsong, o.a., 2012). På grund av nedbrytningen av SEI lagret och temperaturökningen som sker på grund av reaktionen så börjar litium och elektrolyten att reagera. Av reaktionen mellan elektrolyten och litium så produceras det brännbara gaser (kolväten) (Qingsong, o.a., 2012).

När det frigörs gaser i battericellen som dessutom värms upp av den exoterma reaktionen så ökar trycket i celler vilket gör att den sväller upp. Med den ökande temperaturen av batteriet ökar mängden energi som finns att tillgå vilket gör att mängden kemiska reaktioner i batteriet ökar och då produceras mer värme igen vilket leder till fler reaktioner igen osv (Qingsong, o.a., 2012). När temperaturen i batteriet har uppnått ca 130 °C så smälter separatorn mellan elektroderna vilket gör att dessa kommer i kontakt med varandra och kan kortslutas. Vid höga temperaturer så börjar även metall-oxidkatoden att brytas ned, nedbrytningen av katoden resulterar i att syre frigörs. Med syre kan sedan förbränning av elektrolyt och kolvätegaserna ske (Qingsong, o.a., 2012).

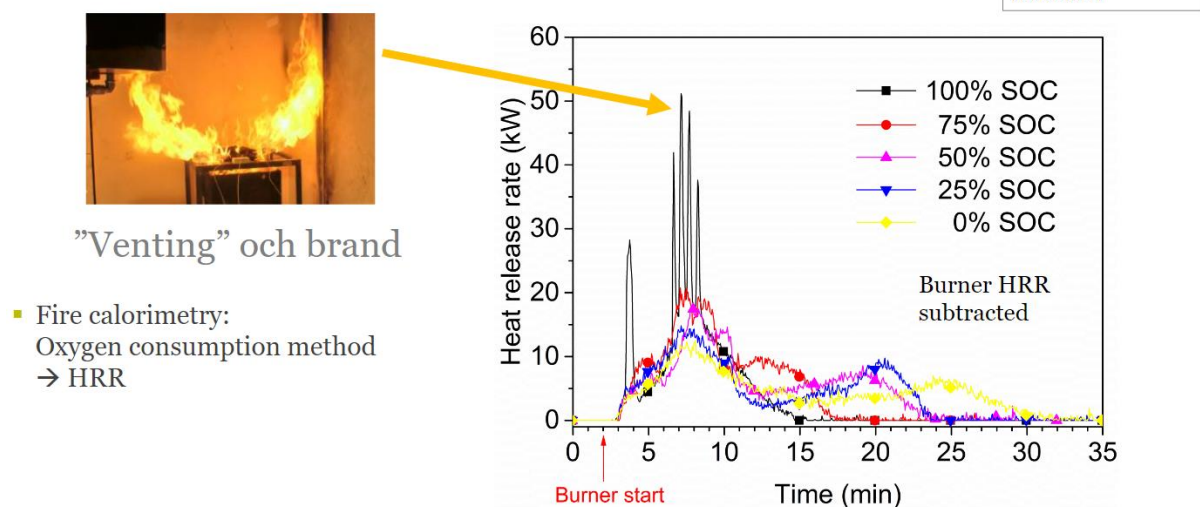
När mängden genererad värme är större än mängden förlorad/borttransporterad värme så har batteriet uppnått "temperature of no return" vilket betyder att batteriet kommer bara att bli varmare och varmare, batteriet kommer alltså att gå in i en termisk rusning. (Qingsong, o.a., 2012) Mängden genererad värme per reaktion bestäms av materien som batteriet är byggt av och mängden förlorad värme är bestämd av inneslutningen av batteriet, alltså själva höljet och möjligtvis kylsystemet i detta. Värmeförlusten till omgivningen är också beroende av temperaturen av omgivningen där en lägre temperatur leder till större värmeförluster än en högre temperatur.

Eftersom det vid en termisk rusning blir mycket varmt och batteriet består av många brännbara ämnen så kan resultatet av en termisk rusning bli en brand eller i värsta fall även en explosion. Den brännbara organiska elektrolyten är mer lättantändlig vid förhöjda temperaturer och kan förbrännas med det avgivna syret från batteriet eller om höljet på batteriet spricker med syre från omgivningen. Det är därför viktigt att stoppa termiska rusningar innan en brand kan bryta ut eller att brännbara gaser släpps ut, detta görs ofta med olika säkerhetsmekanismer i batteri-systemet men dessa tas inte upp vidare i arbetet då de inte påverkar mängden syre som utvecklas.

2.4 Brand i Li-jon batterier

Långt innan en brand med lågor bryter ut från ett batteri så startar reaktionerna som bildar förutsättningar för att en brand ska starta i batteriet. Det börjar ofta med att en termisk rusning initieras antingen genom ett internt fel i batteriet som kortslutning eller yttre påverkan så som uppvärmning och slag. När då trycket blir för högt och battericellen spricker och gaserna som frigörs antänder börjar batteriet att brinna. Beroende på batteriets laddningsgrad så kommer effektutvecklings-kurvan att se olika ut. Vid en högre laddningsgrad av batteriet så kommer effektutvecklingen att bli högre men vara under en kortare tid. Vid en lägre laddningsgrad kommer effektutvecklingen att vara lägre än vid en högre men kommer att vara under en längre tid vilket gör att totala mängden frigjord energi vid en brand är samma oavsett laddningsgrad (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020). Liknande resultat konstateras av Robert W et.al i sin artikel "Gas release rates and properties from Lithium Cobalt Oxide lithium ion battery arrays" (Kennedy, Marr, & Ezekoye, 2021).

Heat release rate (värmeproduktion)



Figur 4. Effektutveckling från batterier beroende på laddningsgrad. SOC är förkortning för state of charge (översatt är det mängd laddning i batteriet). Bild från doktorsavhandlingen Lithium-ion Battery Safety-Assessment by Abuse Testing, Fluoride GasEmissions and Fire Propagation (Larsson, 2017).

Vid brand så produceras och frigörs en blandning av gaser som sedan ingår i förbränningsprocessen eller släpps ut utan att vara med i någon vidare kemisk reaktion. De gaser som frigörs i större mängder och kan ingå i kemiska reaktioner är elektrolyten i gasfas, vätgas, metan, syrgas och kolmonoxid (Andersson, Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier, 2020).

Det finns såklart undantag från det ovan föreslagna brandförloppet men det är ett förlopp som täcker in de flesta delarna som leder till en brand och är ett troligt förlopp. Undantag från förloppet hade kunnat inträffa om t.ex. batteriet utsätts för större trauma så att cellen skadas och antänds på direkten, då sker fortfarande alla reaktioner men cellen spricker då inte av tryckuppbyggnad utan av traumat. Andra tänkbara scenarion kan vara att gaserna inte antänds efter tryckuppbyggnad i cellen utan att en tryckavlastning är installerad och gaserna ventileras ut istället genom en så kallad "venting" och inget kommer hända förrän gaserna antänds. Har det vid antändning släppts ut tillräckligt med brännbara gaser så kan det i stället för att en brand startar bli en deflagration eller detonation. För att minska risken för incidenter kan andra typer av batterier användas till exempel så kallade Litium-polymer batteri som har en fast elektrolyt och eventuellt kan anses vara säkrare än litium-jon batterier, detta behöver dock utvärderas.

2.5 Oxygen Consumption Calorimetry (OCC)

En av de vanligaste metoderna för att mäta brandeffektutveckling när ett prov eldas är oxygen consumption calorimetry (OCC). Metoden går i stora drag ut på att mäta hur mycket syre som har förbrukats i förbränningen genom att mäta skillnaden i syrgaskoncentration mellan brandgaserna och koncentrationen i den omgivande luften och därigenom beräkna avgiven brandeffekt.

2.5.1 Beräkningsgång OCC

Räkneexemplet i studien är baserade på ett test som gjorts i konkalorimetern av som presenteras i rapporten "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013). I rapporten så görs beräkningarna enligt beräkningsmetoden som presenteras i appendix G, kapitel G3.4, i Swedish standard institutes standard "SVENSK STANDARD SS-ISO 5660-1:2019" (Swedish standard institutes, 2019). Beräkningsmetoden från standarden och resultatet från rapporten (Andersson Petra, Blomqvist Per, Lorén Anders, Larsson Fredrik, 2013) används som grund för beräkningarna för OCC metoden. Nedan presenteras ekvationerna från standarden som används i det här arbetet:

För att beräkna effektutvecklingen med hjälp av en OCC utrustning så används i standarden ekvation 1.

$$\dot{q} = 1,10 * E * X_{O_2}^a * \left(\frac{\Phi - \left(\frac{E_{CO} - E}{E * 2} \right) * (1 - \Phi) * \frac{X_{CO}}{X_{O_2}}}{(1 - \Phi) + 1,105 * \Phi} \right) * m_e \quad 1$$

Där:

\dot{q}	Effektutvecklingen	(MW)
E	Förbränningsentalpin per- massenhet syre som förbrukas	(MJ/kg)
$X_{O_2}^a$	Syrefraktionerna i den omgivande luften	(-)
Φ	Syreförbrukningsfaktor	(-)
E_{CO}	Förbränningsentalpin för CO per- massenhet syre som förbrukas	(MJ/kg)
1,10	Relationen mellan molmassorna för syre och luft	(-)
1,105	Expansionsfaktorn (α)	(-)

Förbränningsentalpin för CO per massenhet syre som förbrukas (E_{CO}) är 17,69 MJ/kg (Drysdale, 2011). Expansionsfaktorn (α) antas vara 1,105 vilket också gjorts i annan litteratur som till exempel i Marc L. Janssens artikel "Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption" (Janssens, 1991) där han skriver "A recommended average value for α is 1,105".

I beräkningarna för effektutvecklingen så används koncentrationerna för koldioxid, kolmonoxid och syrgas. Men det tar tid för gaserna att nå mätutrustningen så värdena behöver tidsförskjutas. Ekvationerna som används för att göra denna tidsförskjutning är ekvation (2, ekvation 3 och ekvation 4):

$$X_{O_2} = X^1O_2 (t + t_d) \quad (2)$$

$$X_{CO_2} = X^1CO_2(t + t^1_d) \quad (3)$$

$$X_{CO} = X^1CO(t + t^2_d) \quad (4)$$

Där:

X_{O_2}	Syrefraktionsvärdet efter tidsförskjutning	(%)
X^1O_2	Syrefraktionsmätvärdet innan tidsförskjutning	(%)
X_{CO_2}	Koldioxidvärdet efter tidsförskjutning	(%)
X^1CO_2	Koldioxidmätvärdet innan tidsförskjutning	(%)
X_{CO}	Kolmonoxidvärdet efter tidsförskjutningen	(%)
X^1CO	Kolmonoxidmätvärdet innan tidsförskjutning	(%)
t	Tid från att försöket startade	(s)
t_d	Tid som mätvärdet för O_2 förskjuts	(s)
t^1_d	Tid som mätvärdet för CO_2 förskjuts	(s)
t^2_d	Tid som mätvärdet för CO förskjuts	(s)

Från rådatan till beräkningarna i "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) hämtas värdena för tidsförskjutningskonstanterna för utrustningen som används vid försöket där $t_d=17$, $t^1_d=15$ och $t^2_d=18$. Värden för X^1CO , $X_{CO}(t)$, X^1CO_2 , $X_{CO_2}(t)$, X^1O_2 och $X_{O_2}(t)$ avlästes från en indatafil. Indatafilen är samma som används vid försök 10 i Anderssons rapport (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013).

Nästa steg i standarden är att massflödet i ventilationskanalen beräknas enligt ekvation 5.

$$m_e = C * \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad (5)$$

Där:

m_e	Massflödet i ventilationskanalen	(kg/s)
C	Flödeskonstant	(-)
Δp	Tryckskillnad statiskt och dynamiskt tryck	(Pa)
T_e	Absoluta temperaturen av gas i (eng)"Orifice metern"(K)	

Konstanten C är apparatberoende och hämtas i mitt räkneexempel från datafilen från försök 10, där är $C=0,042$. Värdet för T_e och Δp avlästes också från indatafilen.

Nästa steg i standarden är att beräkna syreförbrukningsfaktorn och syrefraktionen i den omgivande luften.

Syreförbrukningsfaktion beräknas enligt ekvation 6.

$$\Phi = \frac{X^0_{O_2} * (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} * (1 - X^0_{CO_2})}{X^0_{O_2} * (1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})} \quad (6)$$

Där:

$$X^0_{O_2} \quad \text{Det initiala mätvärdet för syrgasfraktionen} \quad (-)$$

$$X^0_{CO_2} \quad \text{Det initiala mätvärdet för koldioxidfraktionen} \quad (-)$$

$X^0_{CO_2}$ och $X^0_{O_2}$ avlästes från datafilen från Anderssons rapport (Petra Andersson, 2013).

Omgivandeluftens syrefraktion beräknas enligt ekvation 7.

$$X^a_{O_2} = (1 - X^0_{H_2O}) * X^0_{O_2} \quad (7)$$

Där:

$$X^0_{H_2O} \quad \text{Molfractionen vatten i omgivande luften} \quad (-)$$

Molfractionen vatten i omgivande luften beräknas enligt ekvation 8.

$$X^0_{H_2O} = \frac{H}{100 * p} * \exp\left(23,2 - \frac{3816}{T_a - 46}\right) \quad (8)$$

Där:

$$H \quad \text{Relativa fuktigheten i omgivningen luften} \quad (\%)$$

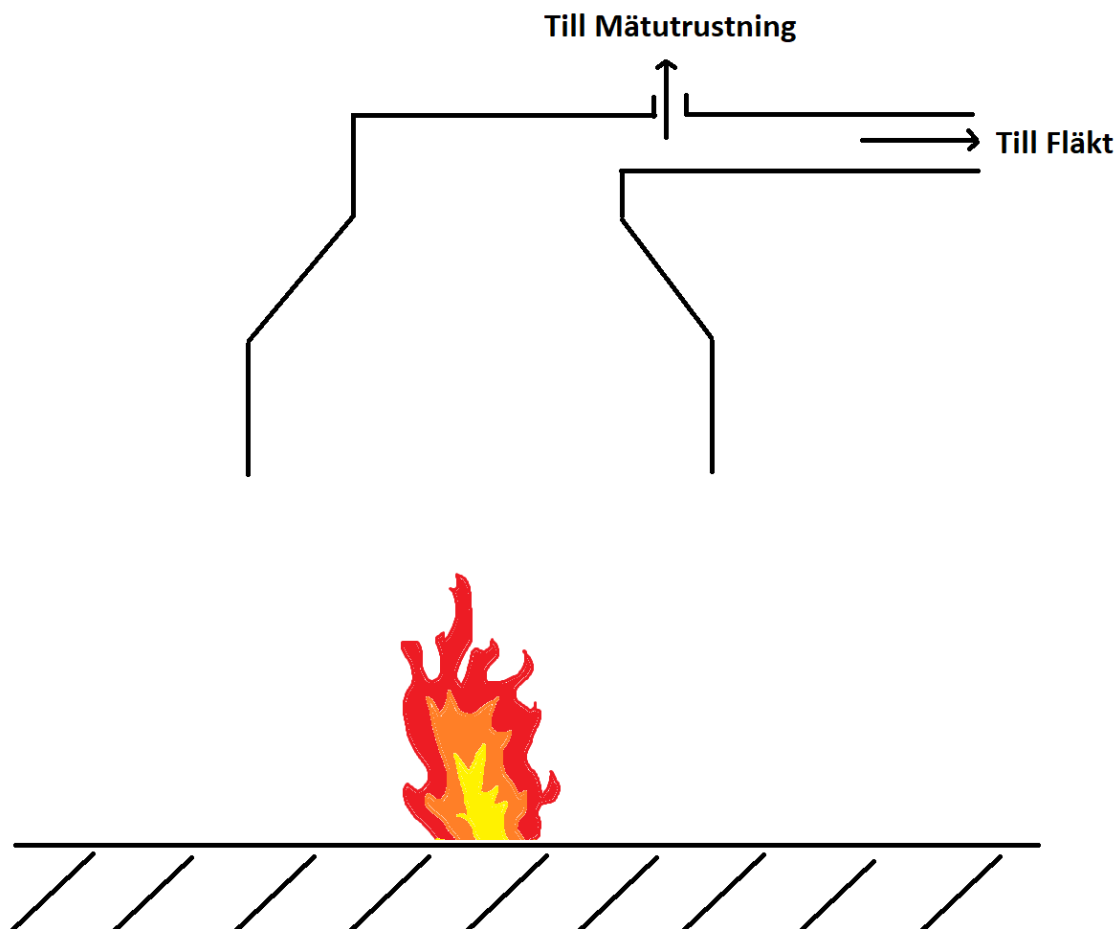
$$p \quad \text{Trycket i omgivningen} \quad (\text{Pa})$$

$$T_a \quad \text{Temperaturen i omgivningen} \quad (\text{K})$$

Från rådatan till beräkningarna i "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) hämtas värdet för relativa fuktigheten = 36%, Trycket = 100 962 Pa och Temperaturen = 294,95K.

2.5.2 Hur OCC fungerar och byggs upp

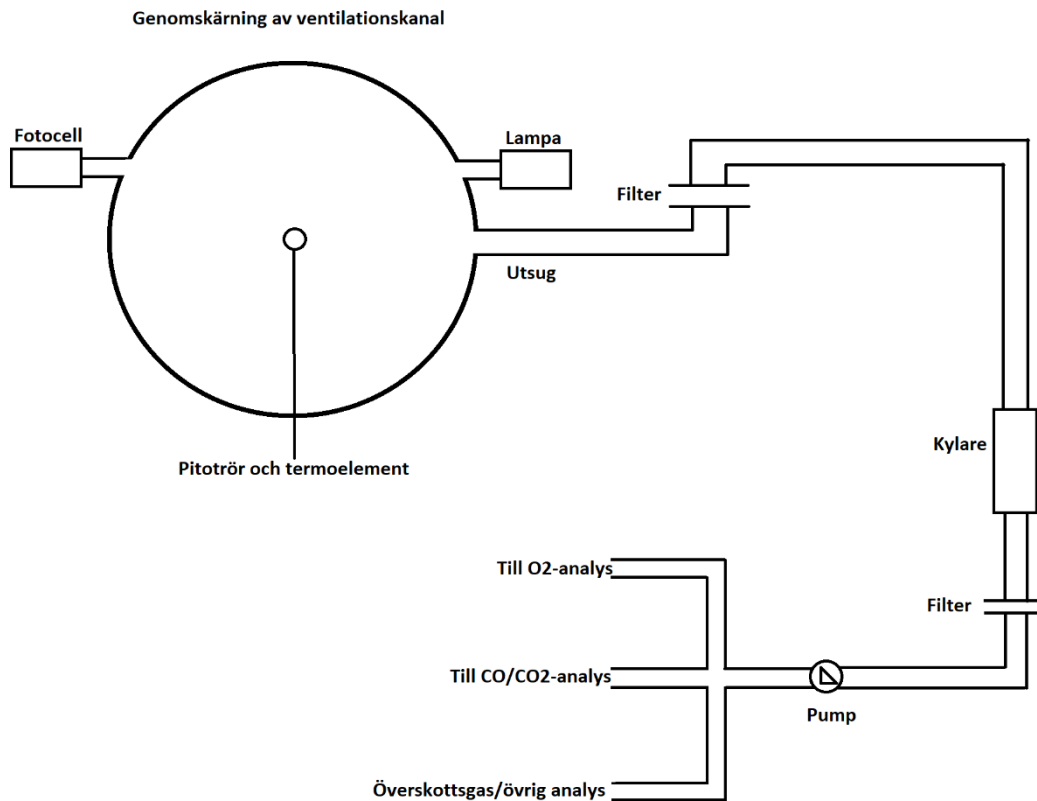
För att kunna mäta de nödvändiga parametrarna så behövs ett omfattande testsystem byggas. Mätningarna görs med en huv som suger upp alla brandaser och sedan sugas gaserna vidare ut i en ventilationskanal. I ventilationskanalen så sugas sedan gaserna vidare och ofta ut till det fria. I ventilationskanalen så sugas även lite av gaserna ut för analys i de mätinstrument som används för att mäta effektutvecklingen med OCC metoden. Som ett exempel på hur en typisk mätutrustning kan se ut så presenteras de två schematiska bilderna på uppbygganden av en mätutrustning från brandlaboratoriet vid Lunds universitet. Bilderna är skisser baserade på bilder från en laborationshandledning från Lunds universitet (Lunds Universitet, 2020), skisserna syns i Figur 5 och Figur 6.



Figur 5. Skiss från schematisk bild av uppsamlingshuvens i brandlaboratoriet vid Lunds universitet.

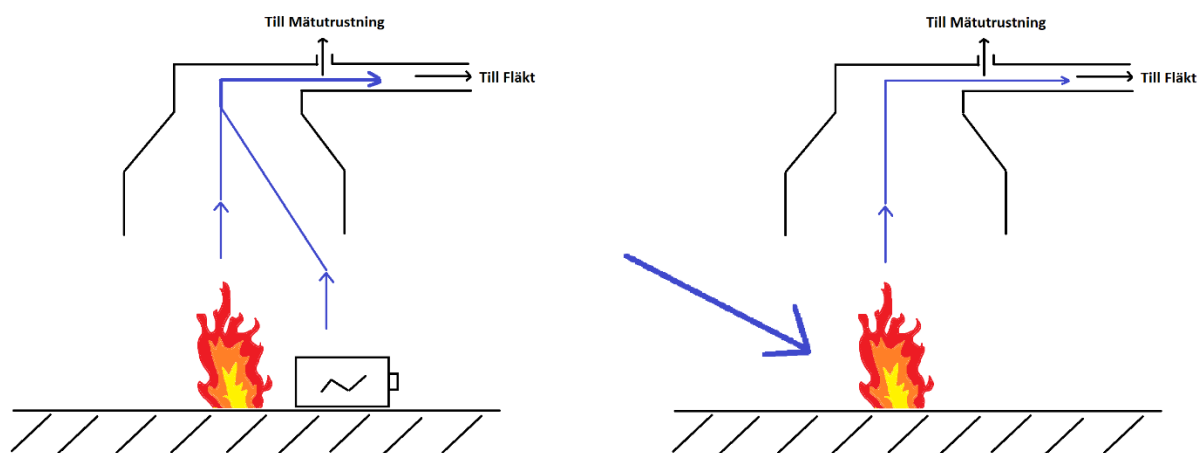
I huvens, se Figur 5, så samlas samtliga brandgaser upp från branden och förs vidare ut i en ventilationskanal för att till sist ventileras ut. Innan gaserna ventileras ut så tas prover av gaserna, se Figur 6, för att analyseras. Många olika prover och resultat registreras för att få ett så exakt värde på effektutvecklingen som möjligt. I litteraturen så nämns en rad olika sätt att mäta de olika parametrarna på men eftersom typen av mätinstrument inte påverkas av att just litium-jon batterier är bränslet så presenteras inte variationen vidare. I Figur 6 ses exempel på mätinstrument där temperatur mäts (med termoelement i Figur 6), gasflöde (med pitotrör i Figur 6), gasernas optiska täthet

(med lampa o fotocell i figur 6, dock inte nödvändigt mätvärde för effektutveckling), koncentration syre, koldioxid och kolmonoxid. Alla mätningar görs med jämna mellanrum för att få en kontinuerlig bild över hur effektutvecklingen ändrar sig över tiden.



Figur 6. Schematisk bild över mätutrustningen i brandlaboratoriet för analys av brandgaser vid Lunds universitet.

För att tydligare kunna förklara metoden och hur flödena i apparaten ser ut så har skissen utifrån bilderna från laborationshandledningen från Lunds universitet redigerats för att visa ett brandförlopp med ett litium-jonbatteri.



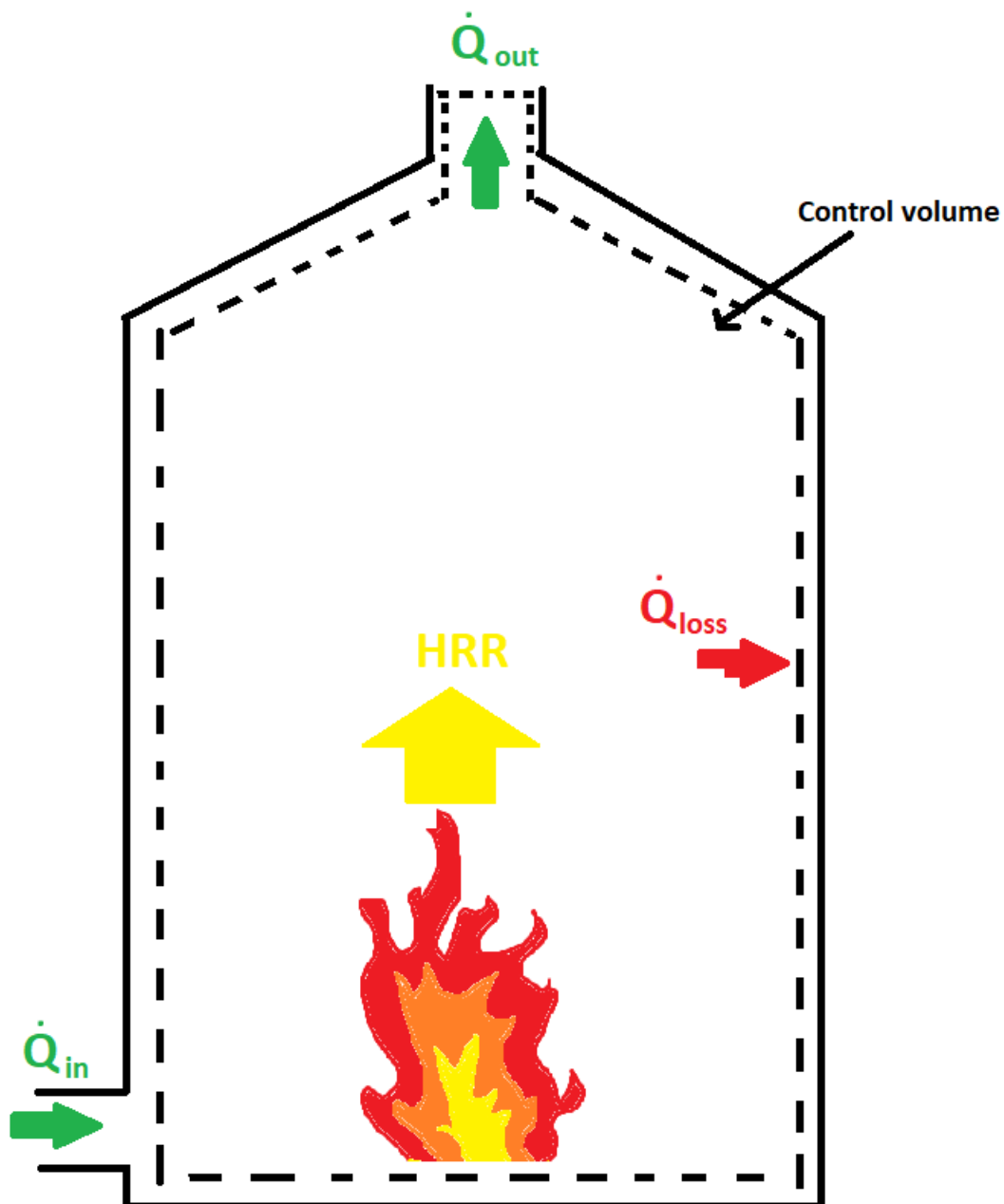
Figur 7. Förklaring av flödet i OCC apparaten.

I Figur 7 så representerar de blåa pilarna syreflödet, i den vänstra bilden så brinner ett batteri och i den högra så brinner ett godtyckligt bränsle som inte utvecklar syre t.ex trä. I branden med trä så transporteras syre in från omgivning och delar av syret förbrukas vid förbränningen vilket leder till att mindre syre flödar ut från branden och når mätutrustningen än vad som fanns från början och med skillnaden mellan dessa så kan effektutvecklingen beräknas (se avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC"). Om det antas att effektutvecklingen för batteribranden är lika stor som den för träbranden så borde det förbrukas ungefär lika mycket syre i båda bränderna (det beror lite på förbränningsvärmen m.m. för bränslet egentligen men för enkelhetens skull antas detta) alltså borde syreflödet till mätutrustning vara lika stort för båda bränderna. Men eftersom batteriet utvecklar syre när det brinner så kommer extra syre att nå mätutrustningen vilket leder till att skillnaden i syrekonzentration kommer att minska mellan gasen i ventilationskanalen och omgivande luft. En mindre skillnad i koncentration mellan omgivningen och gaserna leder i sin tur till att den uppskattade effektutvecklingen minskar, alltså underskattas effektutvecklingen om bränslet utvecklar syre. En underskattade effektutveckling är farlig då det kan göra att skydden för brand i batteriet inte dimensioneras för att klara av den verkliga branden utan en brand som är mindre kritisk än vad den egentligen är.

2.6 SERA

En mindre vanlig metod för att mäta effektutveckling är sensibel enthalpy rise approach (SERA). Att mäta effektutveckling med SERA har gjorts länge, grundkonceptet användes redan 1970 vid Ohio State University (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020). SERA metoden går ut på att genom olika värmebalanser konstatera en brands effektutveckling. Eftersom metoden använder värmeflöden för att mäta effektutvecklingen istället för syrgasförbrukningen som OCC använder så är det möjligt att metoden är bättre anpassad än OCC metoden för att mäta effektutvecklingen av en brand som producerar komplicerade brandgaser som innehåller syre, så som litiumjonbatterier.

Vid brandeffektutvärdering med SERA metoden så behövs en del testutrustning, ett exempel på den utrustning som behövs visas i Figur 8. Utrustningen består av en behållare som innesluter hela testet. Behållaren fungerar också som definitionen av kontrollvolymen inom vilken alla beräkningar för värmetransport görs. Själva branden i behållaren har också en egen kontrollvolym runt sig för att beräkna värmetransporten till och från branden till behållaren.



Figur 8. Schematisk bild av testutrustningen som används vid effektutvecklings mätningstest, bilden är en skiss baserad på bild från Fire Safety Journal 114 (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020).

I kontrollvolymen varierar värmeförhållandena över tid. Av branden genereras det värme i form av brandeffekt (HRR, i Figur 8). Av omgivningen ändras värmeförhållandena genom värmetransport in och ut genom kontrollvolymen. Från omgivningen transporteras värme in med den inströmmande luften (\dot{Q}_{in} , i Figur 8) (som också syresätter branden). Från kontrollvolymen transporteras värme ut med brandgaserna (\dot{Q}_{out} i Figur 8) och ut genom behållarens väggar mm. (\dot{Q}_{loss} i Figur 8) (Värmetransporten sker ut genom väggarna eftersom temperaturen i kontrollvolymen antas vara högre än omgivningens temperatur). En värmebalans för luften i kontrollvolymen blir då (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020):

$$\dot{Q}_{air} = HRR + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{loss} \quad (9)$$

Där resultatet (\dot{Q}_{air}) är entalpiändringen av luften i kontrollvolymen (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020). Från ekvation 9 kan ekvationen sedan utvecklas till ekvation 10. I Voigts et.al artikel "CFD-analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020) hämtas beräkningarna som behöver göras för att komma fram till ekvation 13. Det första som görs i Voigts et.al artikel är ett par antaganden, först så antas energin som går åt för att värma gaserna i volymen (\dot{Q}_{air}) kunna representeras av \dot{Q}_{loss} . Sedan antas att massflödet luft ut genom ventilationskanalen, med specifika värmekapaciteten $c_{p,air}$, är mycket större än massflödet av bränsle vilket gör att ekvation 9 kan skrivas om till ekvation 10.

$$HRR = \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{loss} = \dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) + \dot{Q}_{loss} \quad (10)$$

Där:

T_{out}	temperaturen av gaserna i utblåset	(K)
T_{amb}	temperaturen av omgivningen	(K)
\dot{m}	Massflödet i ventilationskanalen	(kg/s)
$c_{p,air}$	specifik värmekapacitet	(J/kg*K)

\dot{Q}_{loss} kan sedan splittras upp i två termer enligt ekvation 11.

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_{amb} + \dot{Q}_w \quad (11)$$

Där:

\dot{Q}_w	värmeflödet som ändrar temperaturen på apparaten.
\dot{Q}_{amb}	värmeflödet från apparaten till omgivningen

För en homogen temperatur T_w av apparaten så kan \dot{Q}_{loss} skrivas om till ekvation 12:

$$\dot{Q}_{loss} = c_1 * (T_w - T_{amb}) + c_2 * \frac{dT_w}{dt} \quad (12)$$

Där:

c_1	konstant som bestäms via kalibreringen	(kW/K)
c_2	konstant som bestäms via kalibreringen	(kJ/K)
$\frac{dT_w}{dt}$	Temperaturstegringen på väggen av apparaten	(K/s ²)

Med insättning i ekvation 10 så fås ekvation 13.

$$HRR = \dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) + c_1 * (T_w - T_{amb}) + c_2 * \frac{dT_w}{dt} \quad (13)$$

För att få bra resultat av metoden så behöver en rad kalibreringar att göras, genom dessa tas c_1 och c_2 fram, dessa är specifika för apparaten och effektutvecklingen. För att kunna göra dessa kalibreringar behöver man köra ett test med en känd effektutveckling, dock finns det inte möjlighet att göra en sådan kalibrering inom ramen för detta arbete.

Om inte temperaturen kan antas vara homogen i hela apparaten så måste en modifikation av ekvation 13 göras, även metoden för denna modifiering finns beskriven av Voigt et.al. (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020). Eftersom temperaturen i en apparats vägg sällan kan antas vara homogen så tas hänsyn till temperaturfördelningen i väggen, i Voigt et.als artikel så beskrivs en metod för att avgöra om det är motiverat att ta hänsyn till temperaturfördelningen baserat på väggens egenskaper och dess biottal. När temperaturfördelningen i väggen tas hänsyn till så skrivs ekvation 13 om till ekvation 23. Härledningen från ekvation 13 till ekvation 23 beskrivs i ekvation 14 till ekvation 23.

I den första termen i ekvation 14 så är $T_{w,surf}$ genomsnittstemperaturen av ytan på utsidan av apparatväggen eftersom den termen representerar värmeutbytet mellan apparaten och omgivningen. I term nummer två är $T_{w,vol}$ genomsnittstemperaturen av apparatväggen då den termen representerar värmen som krävs för att värma upp hela apparaten.

$$\dot{Q}_{loss} = c_1 * (T_{w,surf} - T_{amb}) + c_2 * \frac{dT_{w,vol}}{dt} \quad (14)$$

$T_{w,surf}$ och $T_{w,vol}$ är svåra eller näst intill omöjliga att mäta så därför så förenklas mätningen av dessa till att:

$$T_{w,surf} \approx T_{w,o} \quad (15)$$

Där:

$$T_{w,o} \quad \text{Uppmätt temperatur på utsidan av apparatväggen (K)}$$

Och:

$$T_{w,vol} \approx \frac{1}{D} * \int_0^D T_{w,c}(d) dd \quad (16)$$

Där:

$$T_{w,c}(d) \quad \text{Temperaturen i en viss punkt längs en genomskärning (K)}$$

I figur 4 i artikeln (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020) så visar författarna en bild för att beskriva de nya parametrarna. I bilden så beskrivs parametrarna i ekvation 15 och 16 bildligt. I artikeln så presenterar de en rad ekvationer, ekvationerna 17-19. Med hjälp av ekvationerna så kan $T_{w,c}(d)$ bestämmas genom att lösa följande endimensionella problem.

$$\frac{\partial T_{w,c}(t,d)}{\partial t} = a * \frac{\partial^2 T_{w,c}(t,d)}{\partial d^2} \quad (17)$$

$$T_{w,c}(t, d = 0) = T_{w,i}(t) \quad (18)$$

$$T_{w,c}(t, d = D) = T_{w,o}(t) \quad (19)$$

Konvektion och strålning är de två huvudsakliga mekanismerna för värmeöverföring i apparaten. De korresponderande värmeflödena kan beskrivas enligt ekvation 20 och ekvation 21.

$$\dot{Q}_{conv} = h * A * (T_{w,surf} - T_{amb}) \quad (20)$$

Där:

$$h \quad \text{Värmeöverföringskoefficienten} \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

$$A \quad \text{Arean av väggytan} \quad (\text{m}^2)$$

$$\dot{Q}_{amb} = \sigma * \varepsilon * A * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) \quad (21)$$

Där:

$$\sigma \quad \text{Stefan-Boltzmann-konstanten} \quad (\text{W/m}^2\text{K}^2)$$

$$\varepsilon \quad \text{Emissiviteten av väggytan} \quad (-)$$

Vid hög-emissiva bränder så kan strålning bli den dominanta värmeöverföringsmekanismen speciellt för höga temperaturer och material med hög emissivitet. Det gör att \dot{Q}_{amb} kan skrivas enligt ekvation 22.

$$\dot{Q}_{amb,r} = c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) \quad (22)$$

Där:

$$c_{1,r} \quad \text{Ny kalibrationskonstant} \quad (\text{W/K})$$

Med insättning i ekvation 13 så fås ekvation 23.

$$HRR = \dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) + c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) + c_{2,r} * \frac{dT_{w,vol}}{dt} \quad (23)$$

Där:

$$c_{2,r} \quad \text{Ny kalibrationskonstant*} \quad (\text{J/K})$$

$$\tilde{T}_{w,vol} \quad \text{Genomsnittstemperaturen i apparatväggen} \quad (\text{K})$$

*Konstanterna är andra än de för ekvation 13.

Det är den här förbättrade ekvationen som återfinns i annan litteratur som behandlar liknande ämnen som till exempel Sascha Voigts, Felix Straubigs, Stephan Palis, Arno Kwades och Christian Knausts artikel "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021) som använder ekvationen i deras jämförelse mellan OCC och SERA. Det är

även den förbättrade versionen som kommer att användas vid beräkningarna i det här arbetet.

3 Jämförelse mellan OCC och SERA

OCC metoden och SERA metoden använder olika metod för att mäta effektutvecklingen. För att kunna jämföra de båda metoderna och osäkerheterna i dem så tillämpas, i det här arbetet, de båda metoderna på ett fall, nämligen försök 10 i Petra Anderssons et.al rapport "Investigation of fire emissions from Li-ion Batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013). Jämförelsen görs i följande steg:

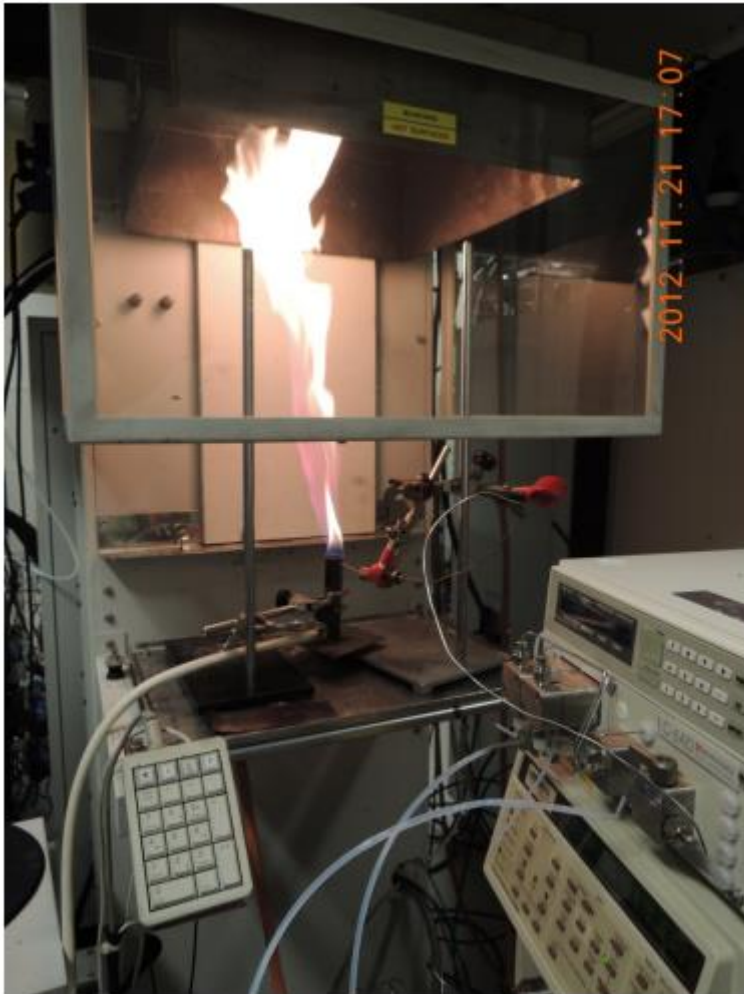
- En kontrollräkning av försök 10 i Petra Anderssons et.al rapport "Investigation of fire emissions from Li-ion Batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) utförs för att kontrollera att beräkningsmetoden utförs på rätt sätt.
- Beräkna hur stor inverkan det syre som utvecklas från ett litium-jonbatteri som brinner har på effektutvecklingen som mäts av OCC metoden. Hur mycket större den verkliga effektutvecklingen är än den som mäts upp.
- Utred vilka ingående parametrar i SERA metoden som påverkar resultatet av en mätning av effektutveckling med SERA metoden mest.
- Utred hur pass väl de parametrar som påverkar resultatet i SERA metoden mest behöver mätas för att SERA metoden ska ge ett säkrare resultat än OCC metoden.
- Utvärdera om det går att konstatera att en av metoderna fungerar bättre än den andra för att mäta effektutvecklingen.

Varje steg i jämförelsen mellan metoderna beskrivs vidare under vardera avsnitt nedan.

3.1 Introduktion av försöket som används

Försöket som beräkningarna för OCC metoden utgår ifrån (försök 10 i (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013)) går ut på att i en konkalorimeter elda elektrolyten DMC med LiPF_6 salt i en propanflamma. I rapporten så mäts både effektutvecklingen vid branden och koncentrationen av andra gaser så som HF (vätefluorid) som också kan produceras vid bränder i litium-jonbatterier. Resultaten från rapporten som används är mätningen av effektutvecklingen mätt genom OCC metoden i en konkalorimeter. I försöket (försök 10) så sprutades det in elektrolyt (DMC) tillsammans med 1M LiPF_6 salt med en hastighet på 18ml/min. Munstycket som elektrolyten och saltet sprutades ut genom samt propanflamman som elektrolyten och saltet eldades i visas i Figur 9.

Försök 10 antas representera en förbränning av ett batteri trots att det egentligen är en förbränning av ett salt och en elektrolyt i en propanflamma (se beskrivning ovan). Det antas medföra osäkerheter i resultatet vilka diskuteras i diskussionen i avsnitt "5.2.1. Antaganden och osäkerheter i OCC metoden".



Figur 9. Testutrustningen som användes för att utföra försök 10 i Petra Anderssons rapport (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013).

Effektutvecklingen från propanflamman som används för att förbränna elektrolyt och saltblandningen är konstant på ca 4 kW under försöket, se Figur 11. Eftersom propanflamman är tänd även under tiden som elektrolyt och saltblandningen sprutas in så bidrar den också till effektutvecklingen. Effektutvecklingen för propanflamman (ca 4kW) behövs därför tas bort från den totala effektutvecklingen för att få ut effektutvecklingen för elektrolyt och salt blandningen. Elektrolyten och saltet sprutas in under 2 minuter mellan 240-360s i Figur 11. Det betyder att effektutvecklingen för saltet och elektrolyten är ca 3,5-4,5 kW. I Anderssons rapport så presenteras problem med att det i munstycket som elektrolyten och saltet sprutas ut ur fastnar salt som sätter igen munstycket. Det ledde till att en spray var svår att få till i en del försök. Det kan ha lett till att elektrolyten och saltet inte kom ut som en spray utan som en stråle. Det kan i sin tur ha lett till att all elektrolyt och salt inte förbrändes och effektutvecklingen skulle egentligen ha varit högre. Dock kommer jag i detta arbete inte att jämföra med insprutat mängd DMC vilket gör att försöket i rapporten ändå kan tjäna som ett exempel för beräkningarna i detta arbete.

3.2 Beräkningar OCC

3.2.1 Kontrollräkning av beräkningsgången för OCC

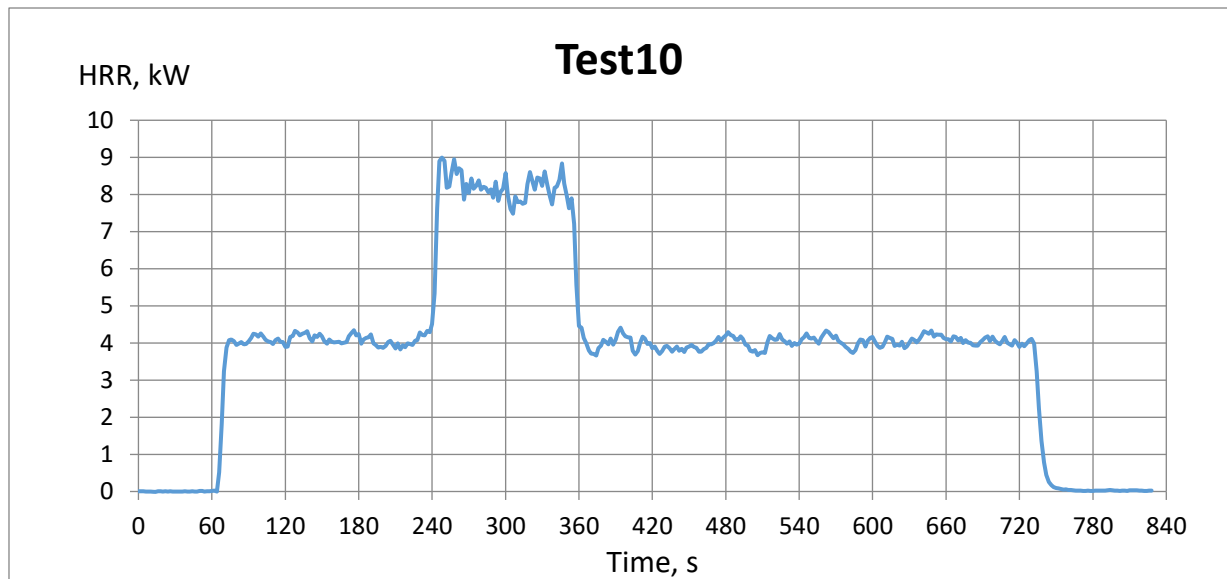
För att kontrollera beräkningsgången för OCC så gjordes beräkningarna som är beskrivna i så i avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC" med indatan som användes vid försök 10 i Anderssons et.al rapport. Indatan från försök 10 i Anderssons et.al rapport presenteras inte i rapporten utan erhöles via en Excell fil från en av författarna och utifrån datan i Excel filen så gjordes sedan de beräkningar som beskrivs nedan i kapitlet.

Det första som gjordes var att tidsförskjuta fraktionerna för koldioxid, kolmonoxid och syre enligt ekvation (2, ekvation 3 och ekvation 4 med lika mycket tid som använts i försök 10. Sedan beräknades massflödet enligt ekvation 5. Efter det så beräknades syreförbrukningsfaktorn och syrgasfraktionen i den omgivande luften med hjälp av ekvation 6 och ekvation 8. Molfraktionen vatten i den omgivande luften beräknades med ekvation 8. Som indata till ekvationerna så användes data från datafilen från försök 10. Varje beräkning gjordes också för varje tidpunkt som mätningarna i försök 10 gjordes i, alltså varannan sekund under ca 650 s, detta gjordes dock enkelt med hjälp av beräkningsprogrammet Excel. Effektutvecklingskurvan som beräknades fram blev då den som presenteras i Figur 10.



Figur 10. Kontrollberäknad effektutveckling för försök 10 i Anderssons et.al rapport.

Den effektutvecklings kurva som presenteras för försök 10 i Petra Anderssons rapport et.al "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson Petra, Blomqvist Per, Lorén Anders, Larsson Fredrik, 2013) visas i Figur 11.



Figur 11. Effektutveckling som presenteras i Petra Anderssons rapport et.al " Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013).

Effektutvecklingen som beräknats fram genom kontrollberäkningen är näst in till identisk med den som beräknats fram i rapporten och därför anses metoden som används i det här arbetet vara korrekt. Små skillnader i graferna antas vara på grund av antalet decimaler som kopieras över i Excel-bladen som användes för beräkningarna.

3.2.2 Syrgasens påverkan på uppmätt effektutveckling i OCC metoden

3.2.2.1 Hur mycket syrgas produceras vid brand i ett litium-jonbatteri

För att kunna beräkna inverkan av producerat syre behöver mängden syre som produceras uppskattas. I Vijay Somandepalli och Hubert Biteaus artikel "Cone Calorimetry as a Tool for Thermal Hazard Assessment of Li-Ion Cells" (Somandepalli & Biteau, 2014) gör de experiment med att bränna litium-jon battericeller i konkalorimetern. I experimentet så använder de sig av litium-jonbatterier av pås-typ som hade måtten 60mm x 60mm x 4,7mm och vägde 37.85 gram. Cellerna var LCO celler på 2.1 Ah. Genom en rad tester och experiment så konstaterade de att batterierna bestod av materialen som presenteras i Tabell 1 och Tabell 2 nedan (Värdena i tabellerna är hämtade från Somandepalli och Biteaus artikel). Notera speciellt att detta batteri innehåller syre både i lösningsmedlen i elektrolyten och i elektroden.

Tabell 1. Innehållet i battericellerna i experimentet.

Component	Mass %
Tape	0,2
Label	0,5
Separator	6,4
Electrolyte w/o Salt	9,5
Outer Packaging (top)	2,2
Outer Packaging (Bottom)	2,1
Positive Tab	0,9
Negative Tab	0,9
LiCoO ₂ Coated, positive electrode	42,4
Graphitecoated, negative electrode	34,9

Tabell 2. Elektrolytens komposition i cellerna.

Chemical Compound	% Volume in Electrolyte	% Mass in Electrolyte
Ethylene Carbonate	15,1	12
Dimethyl Carbonate	3,1	3
Diethyl Carbonate	70,8	76
Propylene Carbonate	9,8	9

Cellerna de använder i experimenten hade olika laddningsgrad, en cell med 0% SOC, en med 50% SOC och en med 100% SOC. Alla celler hade blivit laddade en gång innan testen genomfördes.

För att starta branden i batteriet i experimentet använde de konkalorimeterns kon som sattes på 35 kW/m². Gaserna från testen samlades upp med utrustningen och analyserades för att mäta effektutvecklingen. Både mängden syre som konsumerats i förbränningen och mängden syre som producerats av cellen presenteras i artikeln (tabell 4 i (Somandepalli & Biteau, 2014)). Mängden av de olika gaserna i avgaserna mäts av analysinstrumenten som finns i OCC apparaten. Genom integration av kurvorna som produceras av analysinstrumenten fås mängden av gaserna som produceras av cellen (Däribland mängden syre som produceras). Från experimentet så mättes cellernas maximala effektutveckling, totalt avgiven energi och massavbränning. Effektutvecklingen beräknades med OCC metoden och med Carbon dioxide generation

calorimetry (CDG). Uppmätt toppeffektutveckling var 12 KW för 50% SOC (se figur 4 i Somandepalli och Biteau), vilket gör att dessa försök ligger i samma storleksordning som försök 10 och kan användas som ett räkneexempel här. Utifrån beräkningarna med OCC och CDG så konstaterade Somandepalli och Biteau att metodiken för OCC som normalt används för att beräkna effektutveckling inte är applicerbar för kvantitativ mätning av effektutveckling för litium-jon celler. De skriver "The latter observation clearly suggests that the constants determined by Huggett and Tewarson for use in OCC and CDG are not suitable for the tested Li-ion cells." Huggett och Tewarson har kommit fram till den konstant på 13.1 MW/kg (O_2) som normalt används när ämnet som förbränns inte är känt (Somandepalli & Biteau, 2014). De konstaterar att i stället för konstanterna som används för okända organiska föreningar så ska specifika konstanter användas för att beräkna effektutvecklingen från litium-jonbatterier.

De resultat som kommer användas i beräkningarna för jämförelsen mellan metoderna från Somandepalli och Biteau är mängden syre som produceras och förbrukas i deras experiment. När de eldar deras batteri som är laddat till 50% SOC av en maxladdning på 4,2 V och 2100 mAh så räknar de fram att det förbrukas 17,87g syre, producerades 3,14g syre från batteriet (av detta är 1.16g från katoden, resten från elektrolyten) och tillförs från luften 14,73g syre totalt under brandförloppet.

Det antas i arbetet att syrgasinnehållet från batteriet kan tillämpas för beräkningar med försök 10 trots att försök 10 inte är en förbränning av ett litium-jonbatteri utan bara en elektrolyt och saltblandning. Osäkerheter med antagandet presenteras och diskuteras i avsnitt "5.2.1. Antaganden och osäkerheter i OCC metoden".

3.2.2.2 Hur påverkas effektutvecklingen av det producerade syret

För att avgöra hur pass stor inverkan den producerade mängden syre har på den uppmätta effektutvecklingen gjordes ett par beräkningar. Det första som gjordes var att räkna ut hur pass stor andel av syret som förbrukas under förbränningen som producerats av själva batteriet, se ekvation 24.

$$\frac{m_{O_2p}}{m_{O_2f}} = F \quad (24)$$

Där:

m_{O_2p}	Massa syre som produceras	(g)
m_{O_2f}	Massa syre som förbrukas	(g)
F	Relationen mellan producerad och förbrukad massa syre(%)	

Med antagandet att allt syre som batteriet kan producera produceras och sedan förbrukas i förbränningen samt med insättning i ekvation 24 blir relationen mellan producerad och förbrukad massa syre $3,14/17,87=0,176$.

För att utvärdera hur mycket högre effektutvecklingen egentligen är jämfört med den effektutveckling som mäts av OCC utrustningen så görs beräkningen i avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC" fast med en korrigerad syrefraktion för det producerade syret. Eftersom syrefractionen som används i beräkningarna i avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC" anges i volymprocent och relationen som beräknats fram från värden från

litteraturen i ekvation 24 ovan anges i massprocent så kan det medföra att relationen inte är tillämpbar mellan aggregationstillstånden. Det utreds i avsnittet nedan.

Om det antas att syret beter sig som en idel gas samt att temperaturen och trycket i det producerade syret är den samma som i allt det förbrukade syret så kan relationen för massa tillämpas för relationen för volym eftersom:

Idealagaslagen lyder:

$$p * V = n * R * T \quad (25)$$

Där:

$$P = \text{trycket i gasen} \quad (\text{Pa})$$

$$V = \text{gasens volym} \quad (\text{m}^3)$$

$$n = \text{substansmängden} \quad (\text{mol})$$

$$R = \text{gaskonstanten} \quad (\text{J/mol} \cdot \text{K})$$

$$T = \text{absoluta temperaturen} \quad (\text{K})$$

Substansmängden kan även skrivas

$$n = \frac{m}{M} \quad (26)$$

Där:

$$M = \text{molmassan för gasen}$$

Då blir ideala gaslagen:

$$p * V = \frac{m * R * T}{M} \quad (27)$$

Vilket ska skrivas om till:

$$m = \frac{p * V * M}{R * T} \quad (28)$$

Massfraktion mellan förbrukat och producerat syre kan då skrivas som:

$$\frac{m_p}{m_f} = \frac{\frac{p * V_p * M}{R * T}}{\frac{p * V_f * M}{R * T}} \quad (29)$$

Där:

$$m_p = \text{massa producerat syre} \quad (\text{kg})$$

$$m_f = \text{massa förbrukat syre} \quad (\text{kg})$$

$$V_p = \text{volym producerat syre} \quad (\text{m}^3)$$

$$V_f = \text{volym förbrukat syre} \quad (\text{m}^3)$$

R är en konstant, M är samma mellan förbrukat och producerat syre, då båda är samma gas. Eftersom temperaturen och trycket för både det producerade och förbrukade syret mäts vid mätutrustningen i avgaskanalen så är det troligt att trycket och temperaturen är nästintill identiska i det producerade och förbrukade syret. Ekvationen kan då skrivas enligt nedan, genom att stryka identiska värden mot varandra:

$$\frac{m_p}{m_f} = \frac{V_p}{V_f} \quad (30)$$

Alltså kan relationen för massa användas för relationen för volym. $\frac{V_p}{V_f}$ är alltså 0,176

För att korrigera syrefraktionen (X_{O_2}) för det producerade syret i beräkningarna i avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC" så görs följande beräkningar.

Genom att beräkna hur stor skillnaden är mellan syrgasfraktionen (mäts i volymfraktion) som är i rummet/vid mätutrustningen innan försöket (försök 10 i Petra Anderssons rapport et.al " Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson Petra, Blomqvist Per, Lorén Anders, Larsson Fredrik, 2013)) startar ($X^0 O_2$) och syrgasfraktionen vid mätutrustningen vida varje mätpunkt under försöket (X_{O_2}) så kan skillnaden i syrgasfraktion som uppstår på grund av förbränningen beräknas. Skillnaden i syrgasfraktion representerar alltså det syre som förbrukas under förbränningen.

Volymfraktionen syre som förbrukas kan beskrivas som:

$$X_{O_2, \text{förb}} = X^0 O_2 - X_{O_2} \quad (31)$$

Där:

$X_{O_2, \text{förb}}$	Fraktionen förbrukat syre	(-)
$X^0 O_2$	Det initiala mätvärdet för syrgasfraktionen	(-)
X_{O_2}	Syrefraktionsvärdet efter tidsförskjutning	(-)

Tidsförskjutningen som menas för X_{O_2} är den tidsförskjutningen som krävs för att korrigera för tiden det tar för syrgasen att nå mätutrustningen, enligt avsnitt "2.5.1 Beräkningsgång OCC".

Efter att syrgasfraktionen som förbrukats har beräknats så kan en korrigerad syrgasfraktion beräknas.

Den korrigerad syrgasfraktionen går ut på att beräkna hur pass mycket lägre syrgasfraktionen skulle vara utan syrgasproduktion från batteriet än den som mäts av mätinstrumenten vid försöket. Den korrigerade syrgasfraktionen kan beräknas fram genom att subtrahera den syrgasfraktion som det producerade syret bidrar med från den, i mätinstrumenten, uppmätta syrgasfraktionen. Det görs enligt ekvation 32 nedan:

$$X_{O_2, \text{korr}} = X_{O_2} - X_{O_2, \text{producerat}} \quad (32)$$

Där:

$$X_{O_2, \text{korr}} \quad \text{Korrigerad syrefraktion för producerat syre} \quad (-)$$

$$X_{O_2, \text{producerat}} \quad \text{Producerad syrgasfraktion av batteriet} \quad (-)$$

Syrgasfraktionen som det producerade syret bidrar med ($X_{O_2, \text{producerat}}$) beräknas fram med hjälp av den relation mellan förbrukat syre och producerat syre som tagits fram tidigare i kapitlet. Där är relationen mellan producerat syre och förbrukat syre enligt ekvation 33 nedan:

$$\frac{m_p}{m_f} = \frac{V_p}{V_f} = 0,176 \quad (33)$$

Det betyder att volymfraktionen syrgas som produceras av batteriet och volymfraktionen syrgas som förbrukas vid förbränningen förhåller sig till varandra med samma relation. Alltså enligt ekvation 34 nedan:

$$\frac{X_{O_2, \text{producerat}}}{X_{O_2, \text{förb}}} = 0,176 \quad (34)$$

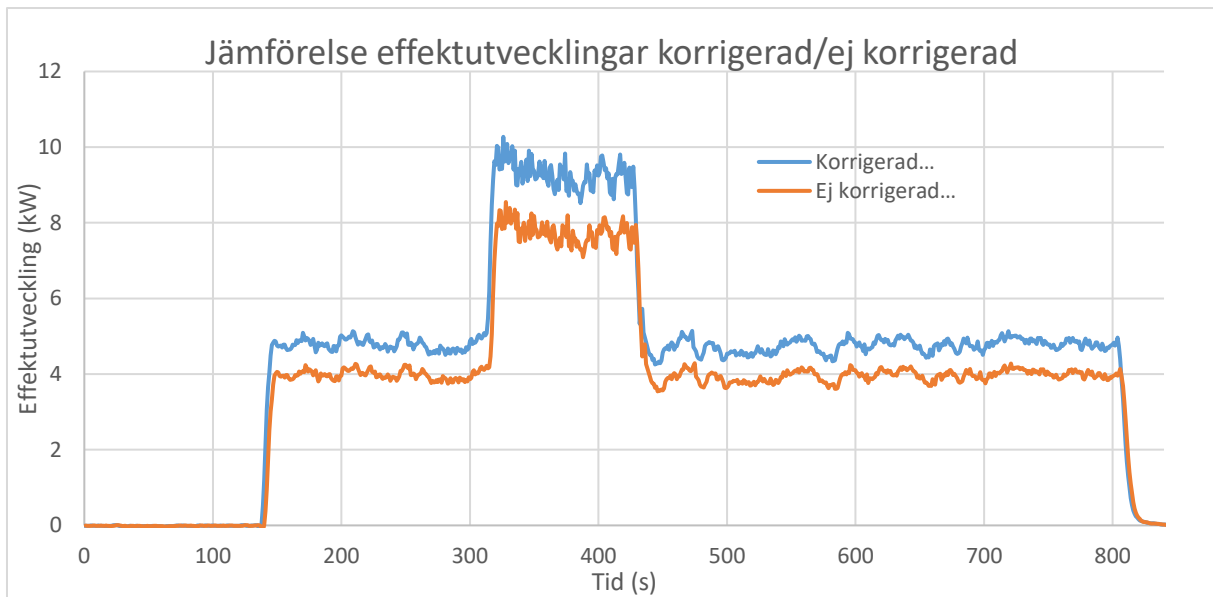
Vilket då kan skrivas om till:

$$X_{O_2, \text{producerat}} = X_{O_2, \text{förb}} * 0,176$$

Med insättning i ekvation 32 blir ekvationen enligt ekvation 35 nedan:

$$X_{O_2, \text{korr}} = X_{O_2} - X_{O_2, \text{förb}} * 0,176 \quad (35)$$

Beräkningen för effektutvecklingen enligt avsnitt 2.5.1 gjordes sedan igen med datan från försök 10 i Petra Anderssons rapport et.al " Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson Petra, Blomqvist Per, Lorén Anders, Larsson Fredrik, 2013) fast med en korrigerad syrefraktion enligt ekvation 35. Det resulterade i den effektutvecklings kurva som kan ses i Figur 12 nedan.



Figur 12. Effektutvecklingen för försök 10 med och utan korrigerad syrgasfraktion. Blå graf = korrigerad syrgasfraktion, Orange graf = ej korrigerad syrgasfraktion.

För att lättare kunna jämföra effektutvecklingen så beräknades hur mycket större effektutvecklingen är efter korrigeringen och innan korrigeringen. Det görs genom att beräkna skillnaden mellan effektutvecklingen efter och innan korrigeringen och sedan dela skillnaden med effektutvecklingen innan korrigeringen (och multiplicerad med 100 för att få ut svaret i %) för att ta reda på den procentuella ökningen.

På grund av stora variationer i värden i det inledande skedet i beräkningen så blir grafen svårt att tyda om starten och slutet tas med i beräkningen. Grafen behandlas därför för att bara inkludera själva tidsspannet när saltet och elektrolyten tillsätts till brännaren i försök 10. Grafen blir då tydligare och mer lätt att tyda, se Figur 13.



Figur 13. Hur mycket större effektutvecklingen blir i procent innan och efter korrigeringen för syrgasfraktionen.

Från avläsning i grafen i Figur 13 blir felet som det extra syret inducerar i OCC metoden ungefär 20% för fallet som har undersökts.

3.3 Kan SERA metoden vara säkrare än OCC metoden

3.3.1 Ingående parametrar i SERA

Ingen SERA mätning som liknade experimentet i försök 10 hittades i litteraturen, speciellt inte med indata tillgänglig. Därför användes mätvärden från indata till försök 10 i Anderssons et.al rapport (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) i så stor utsträckning som möjligt när beräkningarna för analysen gjordes. Försök 10 är dock utfört som en OCC mätning med mätpunkter anpassade för OCC metodiken och inte SERA metodiken. Det kan innebära mätpunkter placeras så att värden anpassas för att ge bra resultat för OCC metoden men som i sin tur kan leda till osäkerheter i om de används i SERA metoden. Detta diskuteras vidare i avsnitt "5.2.2 Antaganden och osäkerheter i SERA metoden"

Ekvation 23 presenteras här igen för tydlighetsskull för att gå igenom de olika parametrar som används.

$$HRR = \dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) + c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) + c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (23)$$

Massflödet (\dot{m}) antas till medelvärdet för massflödet i 10 alltså ca 0,024 kg/s. $c_{p,air}$ antas till 1000 J/(kg*K) eftersom den specifika värmekapaciteten är det vid rumstemperatur. Omgivningens temperatur (T_{amb}) är 293K enligt mätdata från försök 10. Temperaturen i utloppet (T_{out}) antas till temperaturen i ventilationskanalen som är ungefär 520K under delen av försökt då förbränning sker. Effekttutvecklingen antas till genomsnittseffekttutvecklingen, med korrigerad syrgasfraktion, under intervallet då elektrolyten och saltet sprutas in. Den korrigerade effekttutvecklingen används i beräkningarna eftersom det är den effekttutvecklingen som en är den riktiga effekttutvecklingen för branden. Effekttutvecklingen antas då till 9500 W.

Övriga parametrar i ekvation 23 finns inte att tillgå från Försök 10 då detta försök gjordes i OCC och inte i SERA. Experimentutrustningen för försök 10, se Figur 9, är inte konstruerad som en testutrustning för SERA mätning och har därför inte några helt omslutande väggar utan har en övre huv och en bottenplatta som inte sitter ihop. För att ändå kunna utföra beräkningar med datan från försök 10 så antas det att det finns väggar som omsluter apparaten. Genomsnittstemperaturen på utsidan av väggarna av apparaten ($\tilde{T}_{w,surf}$) uppskattas då genom att välja ett värde mellan temperaturen av de utströmmande gaserna och omgivningens temperatur. Flamman som bildas kan ses i Figur 9, flammen är inte stor nog för att nå huven och den antas inte heller nudda någon av de antagna väggarna heller. Därför så antas att väggarna till omslutningen inte värms upp till någon större del utan hålls hyfsat nära omgivningens temperatur. Temperaturen på utsidan av de tänkta omslutande väggarna sätts därför lågt till 310K.

Parametrarna $c_{2,r}$ och $c_{1,r}$ bestäms normalt via kalibrering, dock finns det ingen sådan kalibrering att tillgå, istället får värden uppskattas från litteraturen. I Voigts et.al artikel "CFD-analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020) presenterar de kalibreringskonstanter för olika försök, det försök med den effektutveckling som var mest lik effektutvecklingen i försök 10 i Anderssons et.al rapport var försök 2 i deras artikel. Försök 2 i artikeln görs genom en CFD simulering av en SERA apparat. Apparaten som simulerades var 4x4x2,3m (LxBxH) och är konstruerad av (eng)"cementboards" med en stålram för att hålla upp konstruktionen. Ingående parametrar för väggarna i apparaten presenteras i Voigts et.als artikel (tabell 1, i artikeln). Branden som ansätts i apparaten hade en konstant effektutveckling hela tiden på 562,5 KW, eftersom branden gjordes i simuleringar. Kalibreringskonstanterna från försöket valdes att användas trots den stora skillnaden i effektutveckling och storlek på apparaten eftersom inget bättre alternativ hittades i litteraturen. Kalibreringskonstanterna i försök 2 i Voigts et.al (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020) artikel är $c_{1,r} = 1,23 * 10^{-6}$ och $c_{2,r} = 1,5 * 10^5$.

Inget bra värde för $\frac{dT_{w,surf}}{dt}$ går att uppskatta eller att hittas i litteraturen därför så beräknas $\frac{dT_{w,surf}}{dt}$ genom att sätta in alla värden, som presenterats innan, i ekvation 23. Det ger följande problem:

$$0.024 * 1000 * (520 - 293) + 1,23 * 10^{-6} * (310^4 - 293^4) + 1,8 * 10^5 * \frac{dT_{w,vol}}{dt} = 9500(36)$$

Löses problemet för $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ så blir värdet på $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ 0,0097 °C/s.

3.3.2 Känslighetsanalys. Osäkerheter i SERA metoden.

För att utreda hur pass stor inverkan varje parameter har på osäkerheten av resultatet från en SERA mätning så utförs en känslighetsanalys för metoden. Ingående värden för parametrarna i känslighetsanalysen presenteras i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Ingående parametrars värden i SERA känslighetsanalysen.

Parameter	Värde från uppskattning eller indata
$c_{2,r}$	$1,8 * 10^5$
$\frac{dT_{w,vol}}{dt}$	0,0097 °C/s
T_{amb}	293K
T_{out}	520K
$\tilde{T}_{w,surf}$	310K
$c_{1,r}$	$1,23 * 10^{-6}$
$c_{p,air}$	1000 J/(kg*K)
\dot{m}	0.024 kg/s

Beroende på vilken parameter som mäts så är de förväntade mätosäkerheten mycket olika. En litteraturundersökning utförs därför för att uppskatta förväntade mätosäkerheter för vardera ingående parameter i SERA analysen.

3.3.2.1 Osäkerheter i ingående parametrar

Temperaturmätning av omgivningens temperatur

Temperaturmätning sker ofta med termoelement och därför så hämtades information om hur säkert termoelement kan mäta temperaturen. Enligt (Kee, Asako, Sidik, Che, & Azwadi, 2020) så är osäkerheterna i mätningarna med termoelement mellan +/- 0,42 °C och +/- 0,40 °C. Företaget N4 presenterar liknande resultat på deras hemsida (N4SverigeAB, 2023) för deras termometrar, i kylrum så har de en mätosäkerhet på +/- 0,2 °C och i frysrums +/- 0,4 °C. Eftersom mätningarna av omgivningens temperatur i försöket inte sker i riktigt så kontrollerade former som i ett kylrum och där temperaturen hålls konstant över en längre tid på samma sätt, så antas felet i temperaturmätningarna vara något högre. Dessutom så tas ingen hänsyn till hur pass väl som en punkt i ett rum representerar medeltemperaturen i rummet och hur temperaturen kan variera beroende på var i rummet mätaren befinner sig. Temperaturmätningen av omgivningens temperatur antas därför kunna göras med en variation som är högre än den för ett termoelement och antas till en säkerhet på ca +/- 1°C.

Temperaturmätning av temperaturen i utloppet

Temperaturmätningen i utloppet antas också ske med termoelement. Temperaturen i utloppet är mycket högre än temperaturen i omgivningen. I rapporten "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001) skriver författarna om osäkerheter i temperaturmätning vid just OCC tester. I deras rapport så konstaterar de att temperaturmätningen sker med en osäkerhet på ca 0,5%. De tar dock inte hänsyn till hur pass väl temperaturmätningen i en punkt i kanalen representerar medeltemperaturen i kanalen och hur temperaturen varierar i kanalen. Temperaturen i en punkt i kanalen antas inte kunna perfekt representera medeltemperaturen i kanalen. Osäkerheten i temperaturmätningen för utloppstemperaturen antas därför vara något högre än osäkerheten som föreslås av författarna i rapporten "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI". Osäkerheten i temperaturmätningen i utloppen antas ske med en osäkerhet på +/-1%.

Specifika värmekapaciteten för luft

Specifika värmekapaciteten för luft varierar beroende på temperaturen något men ett konstant värde på 1000 J/(kg*K) används generellt vid konstant temperatur för enklare beräkningar enligt (De matematiska institutionerna vid KTH och stockholmsuniversitet, 2023). Vid en temperatur på 200°C (493K) är enligt (Dimensionera.se, 2023) den specifika värmekapaciteten 1 027 J/(kg*K). Temperaturen är något under den temperatur som används för beräkningarna och skalas värmekapaciteten upp med ekvationen $((1027-1000)*(520/493))$ så blir den specifika värmekapaciteten ca 1030 J/(kg*K) och har därför ett fel på ca 30 J/(kg/K).

Massflödet ut ur apparaten

Osäkerheten i mätningen av massflödet ut ur en apparat (med samma system för att mäta massflödet som det som använts vid försök 10) är enligt (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001) rapport "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" +/-3,2% vilket också är värdet som kommer att användas här.

Genomsnittstemperaturen på utsidan av apparatens väggar

I det värsta troliga fallet så är temperaturmätaren som ska representera medeltemperaturen på utsidan av väggen placerad i en extrempunkt för temperaturen, alltså antingen den med lägst eller högst temperatur. Eftersom inga temperaturmätare finns placerade på utsidan av väggarna av testutrustningen i försök 10 i Petra Anderssons rapport et.al "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson Petra, Blomqvist Per, Lorén Anders, Larsson Fredrik, 2013) så kan ingen maximal temperatur av utsidan av väggen mätas. Utrustningen i försök 10 har ju inte ens några egentliga väggar utan består av en huv och båttenplatta. En maximal temperatur på utsidan av väggen får därför uppskattas utifrån temperaturen i utloppet. Temperaturen i utloppet är ca 520 K och en maximal temperatur på utsidan av väggen uppskattas till ca 490K om det hade funnits väggar. Den lägsta temperaturen på väggarna antas till en temperatur vid rumstemperaturen till ca 293K. Medeltemperaturen på utsidan av väggen beror på hur stora del av av väggen som har olika temperaturer, inga värden finns i utdatan för detta heller så den uppskattas enligt avsnitt "3.3.1 Ingående parametrar i SERA" till 310K. Maximala avvikelserna uppåt i temperatur blir då 490-310= 180K och nedåt 17K.

Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar

Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar beror på skillnaden i temperaturen på in och utsidan av väggen samt väggens temperatur. Ju högre skillnaden är mellan väggens temperatur och insidan desto snabbare värms väggen upp och ju större skillnad mellan väggens temperatur och omgivningen desto snabbare kyls väggen. Genomsnittstemperaturökningen (eller om temperaturen i väggen sjunker, temperaturminskningen) varierar under brandförloppet allt eftersom väggen värms upp mer och mer. Därför anses det svårt att uppskatta ett förväntat fel i parametern. Genomsnittstemperaturökningen(/minskningen) (tidsderivatan) beräknas m.h.a. temperaturmätningen av väggen i mätvärdena ett mätintervall innan och efter tidpunkten då temperaturökningen(/minskningen) beräknas. Osäkerheter i mätvärdet beror då på hur pass väl temperaturökningen(/minskningen) över ett mätintervall i en punkt kan representera temperatur(/minskningen) i samma mätintervall för hela apparaten. Osäkerheten i representationen och temperaturmätningarna är svåra att kvantifiera för parametern och därför ska parametern utredas vidare i arbetet, se avsnitt "4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar, $\frac{d\tilde{T}_{w.vol}}{dt}$ ".

Kalibreringskonstanterna

För att få bra resultat av metoden så behöver en rad kalibreringar att göras för att ta fram konstanterna $c_{1,r}$ och $c_{2,r}$, dessa är specifika för apparaten och effektutvecklingen. Ju fler kalibreringar som görs och ju bättre de utförs ju lägre blir osäkerheten i kalibreringskonstanterna. Osäkerheter i kalibreringskonstanterna är därför beroende av utförandet vid ett experiment. I arbetet så anpassas kalibreringskonstanter från ett experiment som utförts i litteraturen och är därför inte anpassade för fallet som utreds här, vilket leder till stora osäkerheter. Osäkerheterna som det innebär behandlas i diskussionen, men de osäkerheterna är inte intressanta för en jämförelse av metoderna och behandlas därför inte vidare i den här delen av arbetet.

Max och min-värde för parametrarna i SERA metoden presenteras i tabellen nedan.

Tabell 4. Parametrars maximala, faktiska och minsta värde enligt resonemangen ovan.

Parameter	Min-värde	Faktiskt värde	Max-värde
$c_{2,r}$	-	$1,8 * 10^5$	-
$\frac{dT_{w,vol}}{dt}$	*	0,0097 °C/s	*
T_{amb}	292	293K	294
T_{out}	515	520K	525
$\tilde{T}_{w,surf}$	293	310K	490
$c_{1,r}$	-	$1,23*10^{-6}$	-
$c_{p,air}$	970	1000 J/(kg*K)	1030
\dot{m}	0,023	0.024 kg/s	0.025

*Parametern kvantifieras inte men utreds vidare i avsnitt "4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar, $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ ".

Beräkning av effektutvecklingen gjordes sedan med max och min värdet för varje parameter, se Tabell 4, och med faktiskt värde för övriga parametrar för att utreda varje parameters påverkan på effektutvecklingen. Beräkning av effektutvecklingen gjordes med hjälp av ekvation 23. Effektutvecklingen för max och minvärdet på varje parameter presenteras i Tabell 5 nedan.

Tabell 5. Effektutvecklingen för max, faktiskt och min värdet på varje parameter.

Parameter	Min-värde	Faktiskt värde	Max-värde
$c_{2,r}$	-	9500W	-
$\frac{dT_{w,vol}}{dt}$	*	9500W	*
T_{amb}	9650W	9500W	9350W
T_{out}	9370W	9500W	9630W
$\tilde{T}_{w,surf}$	7200W	9500W	69000W
$c_{1,r}$	-	9500W	-
$c_{p,air}$	9340W	9500W	9664W
\dot{m}	9330W	9500W	9680W

*Parametern kvantifieras inte men utreds vidare i avsnitt "4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar, $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ ".

Utifrån effektutvecklingarna som presenteras i Tabell 5 så kan det konstateras att det är parametrarna $\tilde{T}_{w,surf}$ och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ som har signifikant mest påverkan på resultatet av effektutvecklingen och kommer därför utredas vidare i avsnitt "3.3.2 Variation av parametrar".

3.3.2 Variation av parametrar

Parametrarna som påverkar resultatet som mest är $\tilde{T}_{w,surf}^4$ och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$. För att utreda hur pass stor osäkerhet som kan tillåtas i dessa parametrar för att SERA metoden ska producera säkrare resultat än OCC metoden så utförs ett antal beräkningar som presenteras i detta avsnitt.

De ingående parametrarna i beräkningen är de samma som i avsnitt "3.3.1 Ingående parametrar i SERA" ovan. Parametrarna presenteras nedan i Tabell 6 för tydlighet skull.

Tabell 6. Ingående parametrar till beräkningar.

Parameter	Värde från uppskattning eller indata
$c_{2,r}$	$1,8 * 10^5$
$\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$	0,0097 °C/s
T_{amb}	293K
T_{out}	520K
$\tilde{T}_{w,surf}$	310K
$c_{1,r}$	$1,23 * 10^{-6}$
$c_{p,air}$	1000 J/(kg*K)
\dot{m}	0.024 kg/s
HRR	9500

Ekvationen för beräkning av effektutveckling med SERA metoden, ekvation 23, presenteras också igen för tydlighetsskull.

$$HRR = \dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) + c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) + c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (23)$$

Enligt avsnitt "3.2.2.2 Hur påverkas effektutvecklingen av det producerade syret" så gör det producerade syret att effektutvecklingen underskatta med 20% vid användning av OCC metoden. Mätosäkerhet (i parametrarna $\tilde{T}_{w,surf}^4$ och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$) som leder till att effektutvecklingen över/underskattas med 20% med hjälp av SERA metoden beräknas därför.

För variationen som tillåts i parametern $\tilde{T}_{w,surf}^4$ görs följande beräkningar:

Beräkningen går ut på att beräkna hur stor $\tilde{T}_{w,surf}^4$ är om alla andra parameterat hålls konstanta enligt indatan och effektutvecklingen ökas eller minskas med 20%. För att sedan beräkna skillnaden mellan $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den ökade eller minskade effektutvecklingen och $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den riktiga effektutvecklingen.

Först så gjordes beräkningarna för en ökad effektutveckling. Den första som då behövde göras av att beräkna hur pass stor effektutvecklingen blir om den ökas med 20% enligt ekvation 37.

$$HRR_{ökad} = 9500 * 1,20 = 11400 \quad (37)$$

Där:

$$HRR_{ökad} = \text{Korrigerade effektutvecklingen ökad med 20\%} \quad (W)$$

Sedan ställs ekvation 23 upp med all indata känd utom $\tilde{T}_{w,surf}^4$ enligt ekvation 3838.

$$11400 = 0.024 * 1000 * (520 - 293) + 1,23 * 10^{-6} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - 293^4) + 1,8 * 10^5 * 0,0097 \quad (38)$$

Sedan beräknas varje sektion av ekvationen var för sig vilket resulterar i ekvation 39) nedan:

$$11400 = 5460,7 + 1,23 * 10^{-6} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - 7370050801) + 1745,14 \quad (39)$$

Ekvation 39) behandlas vidare och skrivs om så $\tilde{T}_{w,surf}^4$ hamnar ensamt på en sida lika med tecknet enligt ekvation 40:

$$\frac{(11400 - 5460,7 - 1745,14)}{1,23 * 10^{-6}} + 7370050801 = \tilde{T}_{w,surf}^4 \quad (40)$$

Ekvation 40 behandlas vidare och termen på vänster sida av lika med tecknet beräknas vilket resulterar i ekvation 41:

$$10779925447 = \tilde{T}_{w,surf}^4 \quad (41)$$

Ekvation 41 är en fjärdegradsekvation och har därför flera rötter/lösningar. Ekvationen löses grafiskt i en grafminiräknare genom att plotta X^4 och $y=10779925447$ och beräkna skärningspunkterna mellan graferna. Enbart skärningspunkter med positiva X värden kontrollerades då temperaturen inte kan vara negativ eftersom den mäts i absolut temperatur (K). Den enda skärningspunkten som identifierades är $Y=10779925447$ och $X=322,22116$.

Skillnaden mellan $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den ökade effektutvecklingen och $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den riktiga effektutvecklingen blir då enligt ekvation 42:

$$\text{Skillnaden i } \tilde{T}_{w,surf}^4 = 322,22116 - 310 = 12,22116 \quad (42)$$

Maximal mätosäkerhet i $\tilde{T}_{w,surf}^4$ för att SERA metoden ska resultera i ett säkrare resultat än OCC metoden är därför 12 °C om effektutvecklingen överskattas.

Om effektutvecklingen underskattas så blir beräkningen nästintill identisk med beräkningen ovan. Den enda skillnaden är att effektutvecklingen är mindre.

Det första som görs i beräkningen för minskad effektutveckling är att beräkna effektutvecklingen om den minskas med 20% enligt ekvation 43:

$$HRR_{minskad} = 9500 * (1 - 0,2) = 7600 \quad (43)$$

Där:

$$HRR_{minskad} = \text{Korrigerade effektutvecklingen minskad med 20\% (W)}$$

Sedan ställs ekvation 23 upp med all indata känd utom $\tilde{T}_{w,surf}^4$ enligt ekvation 44:

$$7600 = 0.024 * 1000 * (520 - 293) + 1,23 * 10^{-6} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - 293^4) + 1,8 * 10^5 * 0,0097 \quad (44)$$

Sedan följs beräkningsgången exakt som för den ökade effektutvecklingen, vilket resulterar i följande 4 grads ekvation 45:

$$7690494553 = \tilde{T}_{w,surf}^4 \quad (45)$$

Ekvationen löses på samma sätt som fjärdegradsekvationen med den ökade effektutvecklingen. Ekvationen löstes grafiskt i en grafminiräknare genom att plotta X^4 och $y=7690494553$ och beräkna skärningspunkterna mellan graferna. Enbart skärningspunkter med positiva X värden kontrollerades då temperaturen inte kan vara negativ eftersom den mäts i absolut temperatur (K). Den enda skärningspunkten som identifierades är $Y=7690494553$ och $X=296,1342$.

Skillnaden mellan $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den minskade effektutvecklingen och $\tilde{T}_{w,surf}^4$ vid den riktiga effektutvecklingen blir då enligt ekvation 46:

$$\text{Skillnaden i } \tilde{T}_{w,surf}^4 = 310 - 296,1342 = 13,8658 \quad (46)$$

Maximal mätosäkerhet i $\tilde{T}_{w,surf}^4$ för att SERA metoden ska resultera i ett säkrare resultat än OCC metoden är därför 13°C om effektutvecklingen underskattas.

För variationen som tillåts i parametern $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ görs följande beräkningar:

Beräkningen går ut på att beräkna hur stor $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ är om alla andra parameterat hålls konstanta enligt indata och effektutvecklingen ökas med 20%. För att sedan beräkna skillnaden mellan $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ vid den ökade effektutvecklingen och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ (0,0097 K/s) vid den riktiga effektutvecklingen.

Först så beräknas hur pass stor effektutvecklingen blir om den ökar med 20% enligt ekvation 37, precis som vid beräkningen för $\tilde{T}_{w,surf}^4$:

$$HRR_{ökad} = 9500 * 1,20 = 11400 \quad (37)$$

Sedan ställs ekvation 23 upp med all indata känd utom $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ enligt ekvation 47.

$$11400 = 0.024 * 1000 * (520 - 293) + 1,23 * 10^{-6} * (310^4 - 293^4) + 1,8 * 10^5 * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (47)$$

Sedan beräknas varje sektion av ekvationen var för sig vilket resulterar i ekvation (48) nedan:

$$11400 = 5460,7 + 2294,1 + 1,8 * 10^5 * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (48)$$

Ekvation 48) behandlas vidare och skrivs om så $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ hamnar ensamt på en sida lika med tecknet enligt ekvation 49:

$$\frac{11400 - 5460,7 - 2294,1}{1,8 * 10^5} = \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (49)$$

Ekvation 49 behandlas vidare och termen på vänster sida av lika med tecknet beräknas vilket resulterar i ekvation 50:

$$0,02025 = \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (50)$$

Skillnaden mellan $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ vid den ökade effektutvecklingen och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ vid den riktiga effektutvecklingen blir då enligt ekvation 51:

$$\text{Skillnaden i } \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} = 0,02025 - 0,0097 = 0,0105508566 \quad (51)$$

Maximal mätosäkerhet i $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ för att SERA metoden ska resultera i ett säkrare resultat än OCC metoden är därför 0,01 °C/s om effektutvecklingen överskattas.

Samma beräkning som ovan görs för fallet om effektutvecklingen underskattas.

Det första som görs i beräkningen för minskad effektutveckling är att beräkna effektutvecklingen om den minskas med 20% enligt ekvation 43:

$$HRR_{minskad} = 9500 * (1 - 0,2) = 7600 \quad (43)$$

Sedan ställs ekvation 23 upp med all indata känd utom $\tilde{T}_{w,surf}^4$ enligt ekvation 52:

$$7600 = 0.024 * 1000 * (520 - 293) + 1,23 * 10^{-6} * (310^4 - 293^4) + 1,8 * 10^5 * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (52)$$

Sedan följs beräkningsgången exakt som för den ökade effektutvecklingen, vilket resulterar i följande konstaterade enligt ekvation 53:

$$-0,000860321 = \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} \quad (53)$$

Temperaturstegringen/förändringen i väggen blir då negativ vilket inte är ett rimligt värde för en förbränning.

Skillnaden mellan $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ vid den minskad effektutvecklingen och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ vid den riktiga effektutvecklingen blir då enligt ekvation 54:

$$\text{Skillnaden i } \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} = 0,0097 - (-0,000860321) = 0,010560321 \text{ (54)}$$

Maximal mätosäkerhet i $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ för att SERA metoden ska resultera i ett säkrare resultat än OCC metoden är därför 0,01 °C/s om effektutvecklingen underskattas.

4Resultat

4.1 Kan SERA metoden utföras säkrare än OCC metoden.

Utifrån den indatan som hämtades från litteraturen och de beräkningar som görs i avsnitt "3.2 Beräkningar OCC" så medför det producerade syret i batteriet att effektutveckling underskattas md 20%. För att SERA metoden ska ge ett resultat som är säkrare än det som produceras av OCC metoden så behöver den ha en osäkerhet som är mindre än 20% för effektutvecklingen.

Ingen full osäkerhetsanalys av SERA metoden görs inom ramen för arbetet eftersom det inte hinns med under tidsramen. Istället så diskuteras osäkerheter i de parametrar som har störst inverkan på resultatet och utifrån de parametrarnas ingående osäkerheter så diskuteras hur vida det är rimligt att SERA metoden kan producera ett säkrare resultat än OCC metoden. Enligt avsnitt "3.3.2.1 Osäkerheter i ingående parametrar" så är det parametrarna $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ och $\tilde{T}_{w,surf}$ som påverkar osäkerheten i resultatet från SERA metoden mest. $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ och $\tilde{T}_{w,surf}$ måste enligt avsnitt "3.3.2.1 Osäkerheter i ingående parametrar" mätas med minst den säkerhet som anges Tabell 7 nedan:

Tabell 7. Säkerheten som krävs för de ingående parametrarna i SERA metoden med störst inverkan på osäkerheten.

Parameter	Effektutvecklingen överskrids	Effektutvecklingen underskrids
$\tilde{T}_{w,surf}$	12°C	13°C
$\frac{dT_{w,vol}}{dt}$	0,01 °C/s	0,01 °C/s

Det minsta värdet av de säkerheterna som krävs för $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ och $\tilde{T}_{w,surf}$ blir dimensionerande och är det värde som kommer användas vidare i arbetet. $\tilde{T}_{w,surf}$ måste därför mätas med en säkerhet på 12°C och $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ måste mätas med en säkerhet på 0,01°C/s.

Möjligheten till att mäta de båda parametrarna med en säkerhet som motsvarar den som krävs för att SERA metoden ska producera ett säkrare resultat en OCC metoden diskuteras i nästa avsnitt.

4.2 Genomsnittstemperaturen på utsidan av apparatens väggar, $\tilde{T}_{w,surf}^4$

Osäkerheter i parametern $\tilde{T}_{w,surf}^4$ diskuteras kort i avsnitt "3.3.2.1 Osäkerheter i ingående parametrar" det här avsnittet bygger vidare på den diskussionen. Diskussion av alla osäkerheter i SERA metoden sker under diskussion kapitlet "5.2.2 Antaganden och osäkerheter i SERA metoden".

Resultatet av temperaturmätningen på väggens utsida beror mycket på var på väggen som temperaturmätaren placeras. Olika placeringar på väggen representerar medeltemperaturen av utsidan på väggen olika bra, och stora temperaturskillnader kan uppstå beroende på hur branden beter sig i volymen. Om flammor från en brand träffar en vägg så kan det innebära att väggen värms upp mycket lokalt, men inte över andra delar vilket leder till stora temperaturskillnader. I Zhao och Magens artikel "CFD Modeling of Jet Fires of Different Configurations" (Zhao & Magenes, 2016) så visar de resultat från när en jetflamma träffar en vägg i en simulering. Resultatet presenteras i en figur som visar temperaturen på väggen med färger, varje färg representerar ett temperaturspann. Genom att läsa av skillnaden mellan den lägsta och högsta temperaturen på väggen så kan man se hur stor temperaturskillnad som kan uppkomma över väggen. Enligt figuren från Zhao och Magens artikel skiljer temperaturerna på väggen mellan 1100 och 800 °C, alltså 300 °C från centrum där flammen träffar till utkanten. Det är mätt över en vägg och inte över alla väggar i en apparat. Temperaturen av en vägg som inte träffas av flammen kommer vara betydligt lägre än temperaturen av en vägg som träffas av flammen. Temperaturskillnaden är därför större än de 300 °C som är temperaturskillnaden på väggen som träffas av flammen. Är det i början av brandförloppet då brandgaserna inte hunnit fylla upp volymen och värma nedre delarna av väggar eller bottenplattan kommer de väggarna ha en temperatur lik den omgivande temperaturen på t.ex. 20-50 °C. Det kan då innebära en temperaturskillnad på upp emot 1050 °C mellan den varmaste punkten och de kallaste punkterna.

Resultatet från Zhao och Magens artikel behandlar den sidan av väggen vetter mot branden och som träffas av flammen, men parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ (genomsnittstemperaturen på utsidan av apparatens väggar) mäts på utsidan av väggen, alltså inte den sidan som vetter mot branden. Värmen måste då transporteras genom väggen för att värma upp utsidan och beroende på materialet på som väggen är uppbyggt av blir temperaturen på utsidan olika. Är väggen konstruerad av ett material med mycket bra värmekonduktivitet så som t.ex. stål eller andra metaller så blir temperaturen högre på utsidan. Är väggen konstruerad av ett material med låg värmekonduktivitet (alltså bra isoleringsförmåga) t.ex. gips, cement eller något keramiskt material så blir temperaturen på utsidan lägre. Väggens tjocklek spelar också stor roll, ju tjockare väggen är desto lägre blir temperaturen på utsidan medan desto tunnare den är desto varmare blir utsidan. En mycket tunn vägg av ett högkonduktivt material kommer därför nästan ha identisk temperatur med insidan medan en tjock vägg med låg lågkonduktivitet kommer ha en temperatur som mer liknar temperaturen av omgivningen.

Material med hög värmekonduktivitet medför att värme transporteras lätt genom väggen eftersom värme lätt leds genom materialet. En hög värmekonduktivitet innebär även att värme transporteras lätt inom väggen alltså i väggens plan. Det gör att värmen lätt sprids i väggen och temperaturen jämnas ut mer över väggens plan. En vägg med hög värmekonduktivitet har därför en relativt jämn temperatur över väggarna. Material med låg värmekonduktivitet transporterar värme sämre både genom väggen och längs med väggens plan. Värme jämnar då ut sig sämre över väggens plan vilket innebär att temperaturen jämnar ut sig sämre över väggens plan. Det gör att temperaturskillnader över väggen inte jämnar ut sig lika snabbt utan större temperaturskillnader uppstår över väggen.

Värmeöverföringen till omgivningen från väggen påverkar såklart också temperaturen på väggen. Om väggen kan överföra stora mängder värme genom konvektion, strålning eller konduktion, om den står i kontakt med något fast material, så kommer temperaturen på väggen att öka långsammare och stabiliseras på en lägre temperatur. Det eftersom värme då transporteras ut från väggen till större delar och inte stannar kvar i väggen för att värma upp den. Men om väggen inte kan överföra lika stora mängder värme till omgivningen kommer temperaturen av väggen att öka snabbare och stabiliseras på en högre temperatur. Det för att värmen då stannar kvar till större delar i väggen och då värmer upp väggen mera.

En möjlighet för att förbättra resultatet av mätningen av genomsnittstemperaturen på ytan av apparatens väggar är att öka antalet mätpunkter som temperaturmätningen görs i. Med flera mätpunkter så kan temperaturen av alla väggar mätas vilket då bättre kan ta hänsyn till om en vägg värms upp mer än de andra t.ex. om den skulle träffas av mycket varma brandgaser eller av flammor från branden. Ju fler mätpunkter som kan placeras ut ju bättre kommer mätningen av genomsnittstemperaturen apparatens väggar kunna mätas. Om ett slags finmaskigt nät av punkter kan placeras på väggen kan temperaturen av väggen mätas ännu säkrare och lokala variationer kan mätas upp bättre vilket vidare förbättrar säkerheten i mätningarna. Det bästa vore om man kunde mäta temperaturen kontinuerligt i ett plan längst med väggen för att få en så bra upplösning på temperaturskillnader över väggen som möjligt. Inget exempel på en sådan mätutrustning kunde hittas i litteraturen. En idé på en sådan mätutrustning hade kunnat varit någon slags IR-kamera som kan mäta genomsnittstemperaturen av en vägg, men det går inte in på vidare i den här rapporten. Den mätutrustning som mäter temperaturen påverkar också hur pass väl temperaturen av en vägg kan mätas. Om utrustningen har en liten intern osäkerhet så gör det att varje mätning/punkt som mätningen görs i har en mindre osäkerhet. Det gör att osäkerheten för den totala genomsnittstemperaturen av väggen minskar eftersom varje mätvärde avviker mindre för det faktiska värdet.

I artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021) gör författarna ett test med att mäta temperaturen på in och utsidan av väggen vid en SERA analys (de gör även en OCC analys i samma apparat som SERA analysen i artikeln). Deras testutrustning och placering av sensorerna kan ses i figur 1 i deras rapport. Utifrån figuren kan det avläsas att de har placerat sensorerna på olika platser i höjddled men också på olika väggar i apparaten.

I deras artikel så mäter de temperaturen i 9 olika punkter för att hitta den punkt som bäst representerar medeltemperaturen i väggen. Temperaturen på in och utsidan av väggen som de mäter upp redovisas i figur 6 i deras artikel. I deras figur så presenteras även temperaturen i mitten av väggen vilken beräknats genom att lösa ekvation 17 till ekvation 19. Testet som figur 6 i deras artikel visar temperaturen för går ut på att elda en pöl med etanol vilket ger en effektutveckling på ca 500 kW. Testet utförs för att ta fram kalibreringskonstanterna är SERA utrustningen som används i deras arbete.

Från avläsning i figur 6 i deras artikel så syns det att temperaturen på insidan av väggen varierar beroende på mätpunkt, vid den tidpunkt då skillnaden är som störst så är den maximala temperaturen ca 280°C och den lägsta ca 75 °C, en skillnad på ca 205°C. På utsidan av väggen så varierar temperaturen mindre mellan mätpunkterna, vid den tidpunkt då skillnaden är som störst så är den maximala temperaturen ca 120°C och den lägsta ca 45 °C, en skillnad på ca 75°C. Apparaten som de utför testet i består av (eng) "cementboards" och är monterade på en stålram och har måtten 4x4x4 meter. Kalibreringskonstanterna tas fram baserat på temperaturmätningarna, faktum kvarstår dock att beroende på lutning av flamma etc. kan temperaturen på ytan vara olika vid samma effektutveckling.

Väggens temperatur antas mätas av termoelement som placera på väggens yta. Hur termoelementen fästs på väggens yta spelar också roll för hur pass väl väggens temperatur kan mätas. Har termoelementen direkt kontakt med väggen så kan temperaturen av väggen mätas mer exakt än om det uppstår mellanrum mellan termoelementet och väggen. För att placera termoelementen så det har direkt kontakt med väggen så behöver de förses med någon slags anordning för att hålla fast dem. Vid användning av lim är det viktigt att säkerställa att limmet är värmetåligt så att termoelement hålls kvar på platsen de placerats. Smälter limmet så finns det risk att termoelementen lossnar och inte kan mäta temperaturen av vägen längre. Lim eller annan anordning som håller fast termoelementen kan även påverka temperaturmätningen genom att t.ex. isolera termoelementet från väggen vilket hade lätt till att termoelementet mäter en lägre temperatur än vägens faktiska temperar. Det är därför viktig att säkerställa att termoelementen faktisk mäter väggens temperatur och att de inte lossnar eller på annat sätt påverka under brandförloppet så att de inte mäter väggens temperatur längre.

Det kan konstateras utifrån litteraturen att det uppstår variationer i temperaturen över ytan på väggen. Beroende på hur pass många mätpunkter som mätningarna görs i och hur pass bra mätutrustningen som mätningarna görs med är så blir resultatet av mätningarna olika säkert. Mätningarna behöver göras med en säkerhet som är bättre än 12 °C för att SERA metoden ska vara bättre än OCC metoden. Det finns mätutrustning som har en mindre ingående osäkerhet än den som krävs för $\tilde{T}_{w,surf}$ t.ex. termoelement som enligt rapporten "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001) har en osäkerhet på 0,5% vilket vid 310K (den antagna genomsnittstemperaturen på ytan av apparatens väggar) är 1,55°C (310*0,005).

Att utifrån punktmätningar med termoelement representera genomsnittstemperaturen av utsidan av väggarna är som beskrivit i kapitlet inte lätt. Variationer i temperaturen över väggens yta och problematik med att representera hela väggens temperatur med mätningar i en punkt/punkter gör att det blir osäkerheter i hur pass väl parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ kan representera av mätningarna. Ingen exakt kvantifiering av osäkerheterna i parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ kan göras i det här arbetet. Det anses inte vara helt omöjligt att mäta parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ med den säkerhet som krävs (+/-12°C) men det anses inte håller vara självklart att det är görbart. Med hjälp av många punktmätningar av termoelement eller med något mätinstrument som kan mäta temperaturen med bra upplösning över hela ytan finns det därför möjlighet att kunna mäta parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ med tillräcklig säkerhet för att SERA metoden ska kunna producera en säkrare effektutveckling än OCC metoden.

4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar,

$$\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$$

I artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021) beräknas genomsnittstemperaturökningen i väggen genom att lösa ekvation 17 till ekvation 19. Genomsnittstemperaturen av väggen beror då på temperaturen på insidan av väggen och temperaturen på utsidan av väggen i den genomsnittliga där temperaturmätningen görs. Eftersom temperaturmätningen görs med termoelement så är osäkerheten i varje mätning minst 0,5% och temperaturen på insidan av väggen är högre än den på utsidan. Vilket gör att temperaturmätningen på insidan innebär ett större fel än på utsidan. Om temperaturen antas vara ca 490K på insidan innebär det ett fel på ca 2,45°C (490*0,005). På utsidan om temperaturen är låg och liknar den omgivande temperaturen på ca 293K så innebär osäkerheten i termoelementet ett fel på 1,47°C (293*0,005). Det är fel som är större än den osäkerhet som kan tillåtas enligt avsnitt "3.3.2 Variation av parametrar" där det konstateras att genomsnittstemperaturökningen i väggen behöver mätas med en säkerhet som är på +/-0,01 °C/s.

En intressant parameter i genomsnittstemperaturökningen är tiden som genomsnittstemperaturökningen mäts över. Om genomsnittstemperaturökningen mäts över en minut alltså 60 sekunder så blir temperaturökningen 60 gånger så stor (om temperaturen ökar linjärt under hela tiden). Eftersom säkerheten som $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ behöver mätas med beror på ur pass stor $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ är så hade $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ inte behövts mätas med lika liten säkerhetsmarginal om $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ mätts över ett större tidsintervall. Det hade kunnat ledat till att möjligheten till att utföra SERA metoden säkrare än OCC metoden ökat. Det kräver dock att effektutvecklingen i apparaten hålls hyfsat konstant under brandförloppet under en längre tid. I Voigt et.als artikel "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021) så presenterar författarna även effektutvecklingen från 3 olika batteribränder baserat på mätpunkterna. Resultatet presenteras i figur 10 i deras artikel.

I figur 10 i deras artikel syns det att effektutvecklingen vid batteribränder varierar mycket under brandförloppet och hålls nästan aldrig konstanta. Att mäta temperaturökningen över en längre tid representerar därför inte effektutvecklingen bra alls. Det krävs därför att temperaturmätningen sker med korta tidsintervaller för att representera effektutvecklingen på ett korrekt sätt. Eftersom temperaturökningen behöver ske med små tidsintervall så blir temperaturökningen i varje tidsintervall liten och kräver därför en mycket exakt temperaturmätning för att kunna uppskatta temperaturstegringen rätt.

Att representera genomsnittstemperaturökningen med mätningar av temperaturökningen i en punkt har samma problematik som vid mätningen av genomsnittstemperaturen på apparatens väggar. Temperaturökningen i en punkt har svårt att representera temperaturökningen i hela apparatens väggar. För att få bättre mätresultat kan det precis som för mätningen av genomsnittstemperaturen på apparatens väggar göras mätningar i flera punkter där desto fler punkter som mätningar förs i desto bättre blir representationen av genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar. Men även om mätningar kan göras med en bra upplösning över alla apparatens väggar så är det omöjligt att med den mätutrustning som finns att tillgå mäta temperaturstegringen i väggen med så pass hög pressionen så att den säkerheten som krävs för att producera ett resultat som är bättre än det som mäts upp med OCC metoden kan uppnås.

4.4 Slutgiltiga konstateranden

Det finns viss möjlighet att kunna mäta parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ med så pass bra precision att resultatet från en SERA mätning har en högre säkerhet än det som produceras av en OCC mätning. Parametern $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ kan dock inte mätas med den precision som krävs för att SERA metoden ska producera ett resultat som är säkrare än det som produceras med OCC metoden.

Då syret medför att effektutvecklingen alltid underskattas är det säkert att effektutvecklingen alltid underskattas med OCC metoden för litium-jonbatterier. Effektutvecklingen som mäts upp med SERA metoden går inte att veta om den över eller underskattar den verkliga effektvecklingen.

Med de antaganden som gjorts i detta arbete dras slutsatsen att en mätning med OCC metoden producerar ett säkrare resultat för det fall som utretts.

5 Diskussion

I detta arbete har det gjorts en uppskattning av osäkerheter vid mätning av HRR med OCC och SERA metoden. Arbetet har gjorts baserat på data tillgänglig i litteraturen och flera antaganden och anpassningar har behövts göras för att få fram en uppskattning.

5.1 Studerat fall och tillämpning av data

Fallet som arbetet baseras på (benämns i arbetet generellt som försök 10) är ett av en rad experiment som görs i rapporten "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013). I försök 10 så eldas en elektrolyt (DMC) och ett (i batterier vanligt förekommande) salt, LiPF_6 , i en propanflamma. Från försöket så finns indata för alla parametrar som krävs för att utföra beräkningarna i OCC metoden (alla parametrar listas inte här då de är väldigt många). Vissa av parametrarna som används för att göra beräkningar med OCC metoden används även för att utföra beräkningar med SERA metoden. De parametrar som används i båda metoderna är massflödet, temperaturen i utloppet och temperaturen i omgivningen. Parametrar som används i SERA metoden men som inte finns i indatan från försök 10 är luftens värmekapacitet, kalibreringskonstanterna, genomsnittstemperaturen av utsidan av apparatens väggar och genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar.

För att kunna ha gjort en jämförelse av OCC metoden och SERA metoden trots att komplett indata saknas för SERA metoden så har indata från försök 10 kombinerats med indata från litteraturen. Den indatan är inte specifik för försök 10 och har därför behövt anpassas för att kunna användas med fallet.

5.2 Osäkerheter i metoderna

5.2.1. Antaganden och osäkerheter i OCC metoden

Vid beräkningarna i avsnitt "3.2 Beräkningar OCC" så görs en rad antaganden. Antagandena som görs presenteras och diskuteras i det här kapitlet för att utreda hur de kan ha påverkat resultatet av arbetet.

Det första antagandet som görs är att syrgasutvecklingen från ett batteri kan användas även för det fall som utreds i arbetet, försök 10. Försök 10 utgörs av en förbränning av en elektrolyt (DMC) som vanligt används i batterier tillsammans med ett salt (LiPF_6) som också vanligt används i batterier i en propanflamma. Syrgasproduktionen från ett batteri är troligtvis annorlunda än syrgasproduktionen från elektrolyt/salt blandningen. Men för att kunna utreda påverkan på effektutvecklingen utav syrgasproduktionen från ett batteri så behövde syrgasproduktionen från ett batteri användas. Därför anpassades syrgasproduktionen från ett batteri i litteraturen till branden i försök 10. Påverkan på effektutvecklingen kommer i ett verkligt fall att inte vara identisk med den som presenteras i resultatet av arbetet. Det eftersom syrgasproduktionen och branden inte hör ihop. Batterier och dess effektutveckling samt syrgasproduktion varierar mycket mellan batterityp och kemi. Den uppmätta effektutvecklingen från batterierna påverkas därför olika från fall till fall och ingen mätning kommer vara samma för 2 olika batterier. Fallet som skapas med kombinationen av försök 10 och den producerad syrgasen från

ett annat batteri antas därför vara representativt för ett batteri som brinner och kan därför används som beräknings fall.

Batterier varierar i syrgasinnehåll och möjlig syrgasproduktion. Batteriet som används i beräkningarna innehåller mycket syre vilket innebär att det också kan producera mycket syre. Det leder i sin tur till en hög syrgasproduktion. Eftersom syrgasinnehållet och därför också syrgasproduktionen varierar mellan batterier så varierar också påverkan på effektutvecklingen. Då batteriet som används som grund i beräkningarna har ett högt syrgasinnehåll så innebär det att det har en stor påverkan på effektutvecklingen förhållandevis. Ett batteri som har lägre syrgasinnehåll kommer ha mindre påverkan på effektutvecklingen. Fallet som utreds i arbetet ger därför en hög uppskattning av felet som syrgasproduktionen från ett litium-jonbatteri har på effektutvecklingen.

Försök 10 används som beräkningsexempel i arbetet då det var ett väl utfört försök med all data tillgänglig. Försöket är dock inte utfört med ett batteri utan bara elektrolyt och salt. Eftersom inget bättre försök fanns tillgängligt i litteraturen, där datan fanns tillgänglig, så användes försöket ändå. Det för att kunna ge en uppskattning av felet som syret från ett litium-jonbatteri inducerar i OCC metoden. I figur 10 i artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021) så presenteras effektutvecklingen vid bränder i 3 olika litium-jon batterier. Från figuren syns det att effektutvecklingen dalar upp och ner mycket under branden och inte hålls konstant någon längre tid. Effektutvecklingen i försök 10 varierar mycket mindre och hålls till stora delar konstant under brandförloppet. Det kan därför konstateras att effektutvecklingen för fallet som utreds och den typiska effektutvecklingen för ett batteri skiljer sig till stora delar i hur de beter sig under brandförloppet. Eftersom de skiljer sig från varandra i hur de beter sig kan det även ha påverkat hur effektutvecklingen och syrgasproduktionen påverkar varandra och därför påverkat resultatet. Hur påverkan hade kunnat se ut är svår att uppskatta då kemien och därför också branden i ett batteri är komplicerad. Därför konstateras det bara att det kan ha påverkat resultatet och orsakat osäkerheter i hur stort fel som induceras av det producerade syret från batteriet.

Ett annat antagande som görs är att allt syre som kan frigöras i batteriet frigörs vid branden. I ett verkligt scenario så är det möjligt att inte hela batteriet brinner upp utan restprodukter finns kvar efter förbränningen vilket gör att allt syre inte frigörs. En annan möjlighet är att de kemiska reaktionerna som sker för att frigöra syret inte sker i lika stor utsträckning som antas eller att de inte sker fullt ut. Det hade gjort att mindre syre frigörs vid förbränningen än det som antas i rapporten. Det gör att mängden syre som frigörs vid förbränningen överskattas. Överskattas mängden syre som frigörs så blir den uppmätta effektutvecklingen närmare den verkliga än vad som konstateras i arbetet.

Ett till antagande som görs är att allt syre som batteriet frigör konsumeras i förbränningen av batteriet. Det är troligt att stora delar av det syre som frigörs av batteriet konsumeras vid förbränningen av batteriet. Det då syret frigörs nära förbränningen, eftersom det är batteriet både brinner och frigör syret. Men det är troligt att allt syre som frigörs inte går åt i förbränningen utan lite av syret kan frigöras utan att

ingå i förbränningen. Det är speciellt troligt om det frigörs tidigt i förbränningsförloppet eftersom branden då är mindre och kräver mindre syre för förbränningen. Om syre frigörs från batteriet utan att det ingår i förbränningen så används mer av det syret som tillförs av luften för förbränningen vilket hade gjort att den faktiska effektutvecklingen och den uppmätta effektutvecklingen är mer lika varandra och felet i OCC mätningen blir mindre. Syret som frigör av batteriet kommer dock att sugas upp av huven i OCC utrustningen och bidra till en ökad syrgashalt i ventilationskanalen. Det kommer då att ledda till en underskattning av effektutvecklingen ändå. Mängden syrgas som produceras, och inte förbrukats, och mängden syrgas som istället tillförs av luften kommer vara identisk om effektutvecklingen är lika hög. Samma fel uppstår därför i OCC mätningen om syrgasen som produceras ingår i förbränningen eller om den inte gör det och istället direkt sugas upp av huven.

Ett annat antagande som görs vid beräkningarna av påverkan som den producerade syrgasen har på effektutvecklingen som mäts av OCC metoden är att all syrgas som produceras av batteriet antas inducera fel i OCC mätningen. Syrgasen som antas inducera fel kommer då både från nedbrytningen av katoden och från elektrolyten. Egentligen så hade syret i elektrolyten kunnat tas hänsyn till i beräkningar, genom att räkna bort det. Det hade kunnat räknas bort genom att beräkna hur många mol DMC som sprutades ut under försöket och sedan beräkna hur mycket syre som tillförs med elektrolyten. DMC har kemiska formeln $OC(OCH_3)_2$ vilket betyder att en mol bränsle innehåller 3 mol syre eller 1.5 mol syrgas.

Antalet mol DMC som sprutades ut hade alltså kunnat multiplicerats med 3 för att ta reda på hur många mol syre som sprutats ut vilket sedan hade kunnat räknats om till syrgasfraktion som kunnat subtraherats från syrgasfraktionen i beräkningarna. Det kan göras eftersom det är samma princip för alla alkoholer som eldas i en OCC så länge som antalet mol bränsle som förbränns per sekund är känt. En våg som avläses med tidsintervall eller flödesmätare kan användas för detta beroende på utformning av test. Det hade gjort att enbart felkällor som är specifika för litium-jon batterier hade tagits hänsyn till. Men eftersom det ofta kan vara svårt att veta exakt mängd elektrolyt i ett batteri och speciellt massavbränningen av elektrolyten så valdes den att ta hänsyn till. Det gör att resultatet lättare kan appliceras på batterier generellt utan att fler parametrar för batteriet behöver utredas för batteriet. Men det gör också att det är en mer parameter som skiljer sig mellan fallet som används för beräkningarna i arbetet och fallet som syrgasutvecklingen som används i arbetet kommer ifrån. I fallet som syrgasutvecklingen hämtas ifrån så innehåller batteriet mest dietylcarbonat (76% av totala massanelektrolyt), mindre DMC (3 % totala massanelektrolyt) och andra elektrolyter (21% totala massanelektrolyt).

För att bättre representera ett verkligt fall så borde egentligen syrgashalten som produceras av elektrolyten ha antagits istället för den som används i arbetet. Även fast korrigeringen hade varit än bättre representation av verkligheten så används den inte i arbetet. Det eftersom i arbetet vill det göras en maxuppskattning av felet som kan induceras i OCC metoden av syrgasproduktionen vid brand i ett litium-jonbatteri vilket den antagna syrgasproduktionen motsvarar.

5.2.2 Antaganden och osäkerheter i SERA metoden

I beräkningarna för SERA metoden så görs desto mer antaganden eftersom indata till beräkningarna saknas till stora delar.

Eftersom försök 10 i Anderssons et.al rapport "Investigation of fire emissions from Li-ion batteries" (Andersson, Blomqvist, Lorén, & Larsson, 2013) är utfört som en OCC mätning så finns inte en SERA apparat för fallet. Det leder till att ett fiktivt fall för beräkningar av SERA metoden behöver tas fram. Det innebär i sin tur att en del antaganden och uppskattningar behöver göras. Uppskattningar och antaganden som görs är att väggar finns i det fiktiva fallet, temperaturen på utsidan av de fiktiva väggarna uppskattas, temperaturökningen av hela volymen av väggen beräknas utifrån uppskattningarna/antagandena, att indatan från försök 10 kan tillämpas vid en SERA beräkning trots att den är avsedd för att göra OCC beräkningar och att kalibreringskonstanter från ett annat fall från litteraturen kan tillämpas för det fiktiva fallet.

Eftersom försök 10 är en OCC mätning så saknar utrustningen väggar, det antas därför att det finns väggar i det fiktiva fallet som utreds i arbetet. Hade väggar funnits hade det påverkat brandförloppet på många olika sätt. Det hade påverkat till exempel, luftflödena in till förbränningen vilket påverkar hur flamman betar sig. Väggarna hade påverkat hur brandgasernas flöden ut ur apparaten ser ut, alltså hur fort de ventileras ut, hur de blandas tillbaka in i plymen mm. I och med att väggar finns så stannar mer brandgaser nära branden vilket gör att branden blir varmare vilket i sin tur kan påverka effektutvecklingen (dock inte för fall 10 där bränslet förs in i flamman med kontrollerad hastighet). Väggarna påverkar även återstrålningen till branden vilket gör att branden blir varmare vilket kan påverka effektutvecklingen. I ett fall där väggar hade funnits hade effektutvecklingen och andra brandparametrar därför sett annorlunda ut än i ett fall utan väggar. Då datan från försök 10 används i beräkningarna för SERA metoden så antas fel mot ett verkligt fall uppstå på grund av detta. Men eftersom fallet som utreds är fiktivt så noteras enbart att det hade inneburit en skillnad men det utreds inte vidare.

Att data från en OCC mätning används för att göra beräkningar för en SERA beräkning kan också inne bära osäkerheter på andra sätt. Det finns risk att mätpunkter och mätutrustning har anpassats för att ge ett bra mätvärde för att användas vid OCC beräkningar men att dessa anpassningar kan innebära sämre mätningar för SERA beräkningar. Detta antas dock enbart innebära mindre påverkan på mätvärdena och inte påverka resultatet märkvärt. Temperaturmätningen från OCC datan för omgivande luften och temperaturen i den utströmmande luften samt massflödet i ventilationskanalen antas därför kunna appliceras väl på SERA beräkningen. Resterande parametrar i SERA beräkningen finns inte representerade i datan till OCC metoden och har därför uppskattats.

Den första ingående parametrarna som uppskattades var värmekapaciteten för luften. Värmekapaciteten antas vara 1000, samma som för luft vid ca 20°C för enkelhetens skull trots att den varierar med temperaturen. Att värmekapaciteten hålls konstant under beräkningarna är ett vanligt antagande och föreslås bland annat i boken Enclosure Fire Dynamics (Karlsson & Quintiere, 1999). Detta inducerar en viss osäkerhet i resultatet men eftersom andra osäkerheter är mycket större så undersöks inte osäkerheten vidare.

De andra ingående parametrarna som uppskattades var kalibreringskonstanterna. Kalibreringskonstanterna, $c_{1,r}$ och $c_{2,r}$, som antas kunna vara tillämpbara för det fiktiva fallet kommer från ett experiment med ett fall där effektutveckling var på 562,5 kW. Experimentet är en CFD simulering med en apparat som är mycket större i storlek än den som försök 10 utförs i. Apparaten som kalibreringskonstanterna hämtas ifrån är stor som ett rum medan apparaten i försök 10 utförs i är stor som en låda. Eftersom effektutvecklingen och apparaten för det fiktiva fallet skiljer sig mycket från fallet som kalibreringskonstanterna hämtas ifrån så är det troligt att kalibreringskonstanterna kan skilja sig mycket mellan fallen. Det finns därför mycket stora osäkerheter i kalibreringskonstanterna som används för det fiktiva fallet. Exakt hur stora osäkerheterna kan vara är oklart och är svårt att utreda utan att utföra experiment på den fiktiva utrustningen. Men det kan konstateras att de är mycket stora.

Om osäkerheterna är i storleksordningen ett antal tio potenser så hade det haft en mycket stor inverkan på hela resultatet av rapporten, på allt från resultatet av känslighetsanalysen till hur stor mätosäkerhet som kan tillåtas i parametrarna för SERA metoden för att vara säkrare än OCC metoden. Om kalibreringskonstanterna avviker mycket från de värden som är antagna i det fiktiva fallet så innebär det att inverkan av termerna $c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4)$ och $c_{2,r} * \frac{dT_{w,vol}}{dt}$ uppskattas på fel sätt. Om $c_{1,r}$ och $c_{2,r}$ är mindre än vad som antas i arbetet så innebär det att de andra parametrarna i termen $\dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb})$ hade kunnat ha en större inverkan på effektutvecklingen än vad de har enligt resultatet och att de parametrarna också bör analyseras vidare. Om $c_{2,r}$ är mindre så innebär det även att temperaturstegringen är högre i det fall som utreds. Då behöver temperaturstegringen inte mätas med samma precision som presenteras i resultatet och det hade kunnat finnas möjlighet att parametern kan mätas med så pass bra motsäkerhet att SERA metoden hade kunnat vara säkrare än OCC metoden. Det antas inte vara orimligt att felet i kalibreringskonstanterna är så pass stort att det kan ändra resultatet av arbetet. Det är därför en signifikant felkälla som bör minskas eller elimineras i framtida arbeten, det tas upp i avsnitt "5.4 Förbättringsförslag och förslag till vidare utredning".

Eftersom väggarna i egentligen inte finns i det fiktiva fallet som utreds för SERA metoden så kan inte temperaturen på utsidan av apparatens väggar och temperaturökningen i apparatens väggar mätas i det fiktiva fallet. Värdet för temperaturen på utsidan av de fiktiva väggarna till apparaten fick därför uppskattas för det fiktiva fallet utifrån temperaturen i utloppet och omgivningens temperatur i försök 10. Temperaturökningen i apparatens väggar var svårare att uppskatta och beräknades i stället fram med ekvationslösning för det fiktiva fallet. Det gör att temperaturen på utsidan av apparatens väggar och temperaturökningen i apparatens väggar vilka

representeras i beräkningarna av parametrarna $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ och $\tilde{T}_{w,surf}$ medför stora osäkerheter i hur bra de representerar ett verkligt fall. Parametrarna $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ och $\tilde{T}_{w,surf}$ diskuteras till delar i avsnitt "4.1 Kan SERA metoden utföras säkrare än OCC metoden." men diskuteras vidare här.

Problemen med att mäta genomsnittstemperaturen av utsidan av den fiktiva apparatens väggar är många. I avsnitt "4.1 Kan SERA metoden utföras säkrare än OCC metoden." konstateras det att temperaturen på väggen varierar över ytan vilket gör att placeringen av mätinstrumenten spelar stor roll för resultatet. Det konstateras även att flera mätpunkter utspridda över väggar krävs för att mäta genomsnittstemperaturökningen på ett bra sätt samt att mätningarna behöver göras mycket noggrant. Desto fler mätpunkter som placeras ut över väggen desto bättre blir resultatet av genomsnittstemperaturmätningen. Det gör att lokala temperaturhöjningar kan representeras bättre i mätresultatet.

Nya problem uppstår dock när flera temperaturmätare används för att representera temperaturen av väggen. Ett problem som uppstår är hur pass mycket av väggens yta som ska representeras av varje mätare. Om t.ex. 4 mätare placeras på och en vägg en av mätarna råkar hamna i en punkt som värms upp mycket mer än resten av väggen. Om då det antas att $\frac{1}{4}$ del av väggen har temperaturen som mäts upp i mätpunkten med den förhöjda temperaturen så finns det risk att temperaturen av väggen överskattas. För att motverka att för stora delar av väggen antas ha en för hög temperatur så kan flera mätpunkter placeras ut, då blir arean av väggen som antas ha en för hög temperatur mindre för varje extra temperaturmätare.

Det leder dock i sin tur till problem med att uppskatta hur många temperaturmätare som är tillräckligt många för att, med tillräcklig säkerhet, uppskatta temperaturen av väggen. Även osäkerheter i hur temperaturmätarna ska fördelas över apparatens ytor finns. Det kan vara mer motiverat att placera många temperaturmätare där stora temperaturgradienter antas uppstå medan färre temperaturmätare krävs där temperaturen av väggen är mer konstant över ytan. Antal temperaturmätare, rimlig täckningsyta och fördelning av temperaturmätare över apparaten bör därför utredas vidare för att mätningar med SERA metoden ska kunna utföras med så små osäkerheter som möjligt. En idé som nämns som en möjlig lösning till problematiken i avsnitt "4.2 Genomsnittstemperaturen på utsidan av apparatens väggar, $\tilde{T}_{w,surf}^4$ " är att mäta temperaturen av ytorna med en utrustning som kan mäta temperaturen med en fin upplösning över hela ytan. En sådan utrustning hade kunnat vara en IR-kamera som med bra upplösning och säkerhet kan mäta temperaturen av en yta och dessutom, med ett tidsintervall, logga temperaturen (förslagsvis i en dator).

Som beskrivs i avsnitt "4.3 Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar, $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ " så beror säkerheten som $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ måste mäta med, med tiden den mäts över. Det konstateras även att effektutvecklingen (och därför även temperaturen) varierar mycket över ett brandförlopp, med ett batteri, och att de aldrig hålls konstanta. Eftersom effektutvecklingen inte är konstant över någon längre period utan alltid ökar eller minskar så måste temperaturökningen av väggen mätas med små tidsintervall för att

bra representera effektutvecklingen i verkligheten. Temperaturstegring vid en punkt kan mätas genom att ta skillnaden i temperatur i punkten innan och punkten efter och sedan beräkna temperaturökningen genom att dela temperaturökningen mellan punkterna på två. Temperaturökningen blir då mycket beroende av att temperaturmätningen kan göras med små felmarginaler som kan mäta små temperaturökningar över korta tidsspann. Temperaturen vid temperaturmätning svänger ofta upp och ned mellan mätpunkter och visar mer en trendlinje av hur temperaturen rör sig i mätpunkten. Det kan både bero på mätutrustningen men också på hur branden beter sig. I en brand där mycket turbulens bildas så är det rimligt att temperaturen svänger upp och ned då flammen rör sig och brandgaserna når temperaturmätaren i puffar istället för som i en laminär stråle. Detta är tydligt i den första grafen i figur 6 i artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" (Voigt, Straubig, Palis, Kwade, & Knaust, 2021).

Parametern $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ är derivatan av temperaturen och om temperaturen svänger upp och ned mellan mätvärden i mätpunkter så svänger också värdet på $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ mellan mätvärden. Vid en SERA beräkning så kan det innebära att den beräknade effektutvecklingen svänger upp och ned på ett sätt som inte motsvarar verkligheten, speciellt om parametern $c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ är den dominerande parametern i ekvation 23 för påverkan på effektutvecklingen vid beräkningen. Om temperaturen minskar från mätpunkten/mätpunkterna innan till nästa mätpunkt så innebär det ännu större problem eftersom derivatan av temperaturerna då blir negativ, alltså blir $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ negativ. Är $c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ den dominerade parametern för effektutvecklingen så riskerar effektutvecklingen också att bli negativ vilken inte är möjligt vid en brand. Detta fenomen observeras också i litteraturen. I artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" av Voigt et.al (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020) så observerar de att effektutvecklingen blir negativ i vissa punkter när de använder sig av SERA metoden för att mäta effektutvecklingen, se figur 10 i deras artikel. I figuren syns det att HRR kurvan ibland går under 0 och blir upp till 1 MW negativ.

I artikeln så förklarar de också varför. De skriver " \dot{Q}_{wall} gets negative when the HRR drops very fast and the wall starts cooling down. An overall negative value of the HRR is obtained, when \dot{Q}_{wall} is stronger negative than the positive sum of \dot{Q}_{out} and \dot{Q}_{amb} ." (ekvationerna för \dot{Q}_{wall} , \dot{Q}_{out} och \dot{Q}_{amb} presenteras i avsnitt "2.6 SERA". Det betyder att det finns problematik i SERA metoden med att mäta effektutvecklingen speciellt om temperaturen går snabbt upp och ned. Det kommer fram till samma konstaterande. Att om $c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ är termen med störst påverkan på effektutvecklingen kan effektutvecklingen bli negativ. Vilket sker om termen $c_{2,r} * \frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt} (\dot{Q}_{wall})$ är större negativ än vad $\dot{m}c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb}) (\dot{Q}_{out})$ och $c_{1,r} * (\tilde{T}_{w,surf}^4 - T_{amb}^4) (\dot{Q}_{amb})$

termerna tillsammans är positiva. Eftersom effektutvecklingen inte kan bli negativ i verkligheten så kan det konstateras att osäkerheter och fel kan uppkomma i SERA metoden om temperaturändringen i väggen ändras fort nedåt. Men eftersom felet kan ske när temperaturen sjunker fort så är det även rimligt att anta att samma fel kan uppkomma när temperaturen ökar fort och i stället då leda till att effektutvecklingen överskattas. Hur stor inverkan detta har på resultatet utreds inte vidare i arbetet men det konstateras ett det har en betydande inverkan på osäkerheten i metoden eftersom effektutvecklingen till och med kan bli negativ.

Osäkerheter i mätning av $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$ uppstår även i möjligheten till att uppskatta genomsnittstemperaturen av volymen av apparatens väggar. Eftersom mätningar av temperaturen enbart kan göras på insidan och utsidan av väggen är det svårt att veta hur temperaturprofilen i väggen ser ut. I boken "Enclosure Fire Dynamics" (Karlsson & Quintiere, 1999) visar författarna en figur av hur temperaturen fördelar sig i en vägg, se figur 6.3 i boken. Hur temperaturen fördelar sig i väggen beror på ett antal parametrar, som beror på väggens egenskaper, tiden väggen värms upp och temperaturen. I boken så visas temperaturprofilen i väggen med 2 olika kurvor en böjd och en rak beroende på ovan nämnda parametrar. Är temperaturprofilen i väggen som den böjda kurvan är det svårt att uppskatta genomsnittstemperaturen av väggen eftersom temperaturen inte är fördelad jämnt över genomskärningen av väggen. Den inre delen av väggen är då mycket varmare än utsidan och antas det att väggen har en temperatur mitt emellan temperaturen på in och utsidan så finns det risk att temperaturen överskattas. Det påverkar också temperaturökningen av väggen och det kan antas att temperaturstegringen i väggen sker snabbare än vad den egentligen gör vilket gör att effektutvecklingen överskattas. Detta leder till vidare osäkerheter i mätningarna av parametern $\frac{dT_{w,vol}}{dt}$.

I beräkningsmetoden för SERA metoden så görs antagandet att massflödet ut ur kontrollvolymen är mycket större än massflödet bränsle. Detta antagande görs för att kunna ställa upp den första termen i ekvation 23 ($\dot{m} * c_{p,air} * (T_{out} - T_{amb})$), ekvationen för beräkning av effektutveckling i SERA metoden. Massflödet bränsle består av propangasen i brännaren och elektrolyt/saltblandningen som sprutas in i flaman. Ingen beräkning har gjorts i arbetet för massflödet av bränslet så ingen siffra på hur stort det är finns. Massflödet ut ur kontrollvolymen är känt från datan till beräkningarna för OCC metoden. Massflödet antas vara stort i förhållanden till massflödet bränsle eftersom OCC metoden kräver att alla brandgaser som bildas vid förbränningen sugas upp i huven vilket kräver ett högt massflöde. Massflödet i huven antas därför vara högt i förhållande till massflödet bränsle. Enligt teorin så är det därför troligt att relationen kommer vara uppfylld. Men så fallet som utreds för SERA metoden är fiktivt så kan det bestämmas att relationen uppfylls i fallet oavsett.

I beräkningsmetoden för SERA metoden så görs antagandet att energiåtgången för att värma upp gaserna i kontrollvolymen/apparaten kan representeras av energitransporten ut ur kontrollvolymen. Antagandet görs eftersom det antas vara ett högt flöde i kontrollvolymen som gör att gaserna i kontrollvolymen inte stannar i den och värms upp utan ventileras ut snabbt. Då kan värmen som går åt för att värma

gaserna i volymen försummas och istället mäts i gaserna som ventileras ut ur kontrollvolymen. I fallet som utreds så är som sagt flödet högt i huven för att säkerställa att alla brandgaser som produceras fångas upp av huven. Det är därför troligt att antagandet kan tillämpas bra i det fall som tillämpas. Hade dock flödet varit lågt och gaserna står stilla i kontrollvolymen och speciellt om alla gaser inte ventileras ut så blir värmen som krävs för att värma upp gaserna betydande och kan inte antas representeras av värmeflödet ut med de utventilerade brandgaserna.

I beräkningsmetoden som tillämpas för SERA metoden så antas det att värmetransporten från väggarna till omgivningen domineras av strålning. Alltså tas inte hänsyn till konduktion och konvektion som värmetransport från väggarna till omgivningen. Det antagandet baseras på att väggarna som apparaten byggs upp av har en hög emissivitet och att de har en hög temperatur. Eftersom apparaten som används för fallet som undersöks i arbetet inte har några väggar så behöver de parametrarna hittas på för att kunna göra en jämförelse. Emissiviteten beror enbart på materialet som väggen är uppbyggd av och har satts till ett högt värde. Temperaturen av väggen har uppskattats utifrån den omgivande temperaturen och temperaturen av gaserna som strömmar ut ur kontrollvolymen. Temperaturen som väggen uppskattas ha är inte speciellt hög. Risken är då att strålning inte är den dominerande värmeöverföringsmetoden för värmetransport från väggarna. Då underskattas värmetransporten ut ur väggen och eftersom den uppmätta effektutvecklingen i SERA metoden beror på värmetransporten så underskattas även effektutvecklingen då.

I känslighetsanalysen som utförs för SERA metoden görs ett antal antaganden. Det för att utreda vilka parametrar i SERA metoden som påverkar resultatet av effektutvecklingen mest. Antagande som görs i känslighetsanalysen kan påverka vilka parametrar som konstateras ha störst påverkan på effektutvecklingen. Är antagandena felaktiga kan det leda till att fel parametrar väljs att analyseras och då konstateras ett felaktigt resultat.

Det första antagandet som görs i känslighetsanalysen är att temperaturen för den omgivande luften kan mätas med en säkerhet på ± 1 °C. Det antagandet anses vara konservativt då tillverkare anser att deras termometrar kan mäta temperaturen med en säkerhet på ca $\pm 0,4$ °C.

Det andra antagandet som görs i känslighetsanalysen är att temperaturen i utloppet kan mätas med en säkerhet på $\pm 1\%$. Det antagandet anses också vara konservativt då det författarna av rapporten "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001) konstaterar att termoelement kan mäta temperaturen med den säkerhet på 0,5%.

Det tredje antagandet som görs är att massflödet ut ur apparaten kan mätas med en säkerhet på $\pm 3,2\%$. Det är det värde som konstateras av en undersökning i samma rapport som behandlar termoelementen "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001). Rapporten anses vara utförd på ett korrekt och vetenskapligt sätt och resultatet kan litas på. Men även om rapporten skulle

underskatta felet i massflödet så kan felet dubblas till +/-6,4% och ändå inte ha en signifikant inverkan på resultatet av effektutvecklingen. Antagandet anses därför vara okej att göra. Parametrarna "genomsnittstemperaturen på apparatens väggar" och "genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar" är de parametrar som utreds vidare och antaganden i känslighetsanalysen påverkar därför inte dem eftersom de ändå utreds vidare.

5.3 Diskussion av resultat

Resultatet av arbetet visar att det är parametrarna $\tilde{T}_{w,surf}$ och $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ som påverkar mätningen av effektutvecklingen, med SERA metoden, signifikant mest. Det visar också att mätningar av parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ måste göras med en säkerhet på minst 12 °C och parametern $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ måste mätas med en säkerhet på minst 0,0106 °C/s. Eftersom ingen metod för att mäta $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ med tillräcklig precision kunde hittas så konstateras det att SERA metoden inte kan utföras säkrare än OCC metoden.

Osäkerheter i arbetet anses dock vara för stora för att en slutsats ska kunna konstateras om vilken av metoderna som faktiskt är bäst för att mäta effektutvecklingen i litium-jonbatterier. En slutsats om kan dras av arbetet trots de många osäkerheterna är att SERA metoden behöver utföras mycket noggrant för att kunna vara ett alternativ till OCC metoden. Det producerade syret medför i OCC metoden inte ett enormt fel utan felet är runt 20 %. För att SERA metoden ska medföra en förbättring gentemot OCC metoden så måste SERA metoden utföras på ett sätt som innebär små fel. Det innebär att mätningarna till SERA metoden behöver göras mycket noggrant.

Genomsnittstemperaturen av ytorna bör därför representeras av flera mätpunkter för att de ska representera genomsnittstemperaturen så bra som möjligt.

Genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar bör mätas i korta tidsintervall, med en korrekt uppskattning av genomsnittstemperaturen av apparatens väggar och med temperaturmätningar som innebär små felmarginaler. Om alla parametrar mäts säkert, kalibrering av utrustningen görs noggrant med en välkänd brand och försök med SERA metoden görs på ett noggrant sätt så finns det möjlighet att metoden kan medföra ett säkrare resultat än OCC metoden vid förbränning av litium-jon batterier. Vidare utredningar krävs dock för att kunna konstatera det.

Syrgasproduktionen av batteriet som brinner innebär att effektutvecklingen som mäts upp av OCC metoden kommer att underskattas. I fallet som utreds så underskattas effektutvecklingen med 20%. Eftersom SERA metoden inte påverkas av syret som produceras och inte påverkas av någon annan parameter som innebär att effektutvecklingen alltid överskattas eller alltid underskattas så går det inte att veta om effektutvecklingen under- eller överskattas. Felet i OCC metoden går att korrigera för genom att öka effektutvecklingen med 20% för det beräknade fallet. Felet i SERA metoden går dock inte att korrigera för eftersom det kan vara både över och under det värde som är uppmätt. Felet i OCC mätningen innebär bara ett totalt fel på 20% nedåt alltså ett spann mellan 0 och 20% fel. Felet i SERA metoden kan slå både uppåt och neråt och hur stort det blir beror t.ex. på temperaturmätningen.

Något som inte tas hänsyn till i arbetet är OCC metodens egen osäkerhet, som inte beror på att den uppmätta syrgasfraktion är fel. I OCC metoden finns det precis som i SERA metoden, osäkerheter som beror på osäkerheter i mätutrustningen. I rapporten "Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI" (Andersson, Alexandersson, Lönnermarks, Hees, & Wetterlund, 2001) så utreder författarna den ingående osäkerheten i OCC metoden. I deras rapport så konstaterar de att osäkerheten i OCC metoden beror på hur stor effektutvecklingen är och en rad andra parametrar. De konstaterar att osäkerheten i OCC metoden är ca 11% vid en effektutvecklingsnivå på ca 150 kW och ca 7% vid en effektutvecklingsnivå på 1 MW. Ingen fullskalig osäkerhetsanalys av SERA metoden görs i det här arbetet utan enbart en analys av de parametrar som påverkar resultatet mest i SERA metoden i det fall som utreds. Eftersom den fullskaliga osäkerheten inte tas hänsyn till i någon av metoderna utan enbart en parameter isolerad i taget så blir jämförelsen mellan metoderna mer korrekt utan att ta hänsyn till den ingående osäkerheten i OCC metoden.

5.4 Förbättringsförslag och förslag till vidare utredning.

I arbetet så kan inget resultat konstateras om vilken av metoderna som passar bäst till att mäta effektutvecklingen från litium-jonbatteriet på grund av osäkerheterna i de beräkningar, uppskattningar och antaganden som görs i arbetet. Många osäkerheter grundar sig i att inget experiment med de båda metoderna kunde utföras, och antaganden och uppskattningar som fick istället göras utifrån data från litteraturen. För att komma fram till ett konstaterande behöver osäkerheterna minskas eller tas bort. För att ta bort osäkerheterna, samt andra allmänna förbättringar, så presenteras en rad förbättringsförslag i det här kapitlet.

5.4.1 Identiska experiment för båda metoderna.

En möjlig vidareutveckling hade varit att göra två experiment, ett med SERA metoden och ett med OCC metoden. Båda experimenten skulle då utföras med samma bränsle för att kunna direkt jämföra resultaten från experimenten. Det hade gjort att data och effektutveckling direkt kan jämföras mot varandra utan att tillföra fel och felkällor som uppkommer i antaganden och anpassningar av resultat som görs för att jämförelse mellan dem ska vara möjlig. Det hade kunnat leda till ett konstaterande av vilken metod som är bäst lämpad för mätning av effektutvecklingen vid brand i litium-jonbatterier.

En variant av detta görs i artikeln "Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires" av Voigt et.al (Voigt, Sträubig, Palis, Knaust, & Kwade, 2020). De gör en SERA mätning och en OCC mätning i samma apparat istället för 2 separata apparater för vardera metod. De konstaterar dock inte vilken metod som lämpar sig bäst av de båda metoderna vilket gör att det fortfarande är en relevant vidare utredning av arbetet.

För att göra jämförelsen så krävs det att SERA metoden görs mycket noggrant och att kalibreringar för apparaten görs för den effektutveckling som antas uppstå vid experimentet. Kalibreringen är viktig att göra för att kunna eliminera osäkerheterna som uppstår i det här arbetet på grund av att kalibreringskonstanter som inte är anpassade för apparaten och effektutvecklingen används. Genomsnittstemperaturen av

apparatens väggar/genomsnittstemperaturökningen av apparatens väggar bör även mätas som en genomsnittstemperatur av många sensorer/punkter för att få en bra uppskattning av genomsnittstemperaturen. Även andra fel som tas upp i arbetet bör strävas efter att minskas/elimineras vid en experimentell jämförelse av metoderna.

5.3.2 Anpassning av förbränningsentalpin till bränslet

Förbränningsentalpin (per massenhet syre som förbrukas) som används i arbetet är en generell förbränningsentalpi som normalt sett används vid förbränningar när bränslet är okänt. Men är bränslet och förbränningsreaktionerna kända så kan förbränningsentalpin för bränslet beräknas fram med en rad kemiska formler. Hur detta görs beskrivs inte i detalj här eftersom det inte är intressant för diskussionen, information om tillvägagångssätt finns lätt tillgängligt på internet. Med en förbränningsentalpi som är anpassad till bränslet så blir effektutvecklingen som beräknas fram med OCC metoden mer lik den verkliga effektutvecklingen. Det gör då även att jämförelsen mellan effektutveckling från OCC metoden och effektutvecklingen från SERA metoden blir mer korrekt. Eftersom ju mer korrekt de olika metoderna utförs desto bättre blir jämförelsen av metoderna.

5.3.3 Anpassning av OCC metoden för litium-jonbatterier som bränsle

En annan möjlig vidare utredning av arbetet är att utreda huruvida OCC metoden kan anpassas för att mäta effektutvecklingen i litium-jon batterier.

Batterier utvecklar olika mycket syre när de brinner beroende på vilka ämnen batteriet är uppbyggt av. I artikeln "Cone Calorimetry as a Tool for Thermal Hazard Assessment of Li-Ion Cells" (Somandepalli & Biteau, 2014) beskriver de den kemiska reaktionen som sker när batteriet laddas upp. I artikeln så behandlar de "LCO" batterier som har en katod som består av $LiCoO_2$. I V. Somandepalli och H. Biteaus artikel skriver de "In a Li-ion cell, the SOC is controlled by the balance of lithiation between the anode and cathode which modifies the electrodes' composition [2]. At 0% SOC, Li^+ ions are mostly intercalated into the cathode and the chemical composition of the active cathode material remains $LiCoO_2$. When the cell is charged, the cathode become progressively de-lithiated and the Li^+ ions move to the anode [29]. At 100% SOC, the composition of cathode is approximated by $Li_{0.5}CoO_2$ accounting for the de-lithiation of the active cathode material."

Ingen exakt information om hur mycket av katodens massa/totala mängd $LiCoO_2$ som övergår till $Li_{0.5}CoO_2$ beroende på batteriets laddningsgrad hittades i litteraturen. En mer utförlig litteraturundersökning om det bör därför utföras eller så bör det bestämmas via experiment. De beskriver även i sin artikel att vid termisknedbrytning så faller $Li_{0.5}CoO_2$ sönder och bildar $\frac{1}{2}LiCoO_2 + \frac{1}{6}Co_3O_4 + \frac{1}{6}O_2$. Co_3O_4 sönderfaller sedan och bildar $3CoO + \frac{1}{2}O_2$. Hur mycket av $Li_{0.5}CoO_2$ och Co_3O_4 som sönderfaller vid en termisknedbrytning bör undersökas vidare, en artikel som behandlar sönderfallet är Qingsong Wangs artikel "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery" (Qingsong, o.a., 2012) och kan därför vara intressant att studera vidare. I V. Somandepalli och H. Biteaus artikel "Cone Calorimetry as a Tool for Thermal Hazard

Assessment of Li-Ion Cells” (Somandepalli & Biteau, 2014) skriver de att en mol $Li_{0.5}CoO_2$ potentiellt kan utveckla 0,25 mol syrgas om det antas att reaktionen enbart har ett steg (eng. singel step reaction). Detta förutsätter att allt syre som är möjligt att avge avges, i verkligheten är det troligt att allt syre inte avges.

Om det går att utifrån batterityp uppskatta en relation mellan laddningsgrad och avgivet syre så skulle det även kunna gå att utifrån massan av elektroden uppskatta det fel som det avgivna syret kommer inducera i OCC metoden. Om felet är känt så hade det även varit möjligt att kompensera för det i beräkningarna med OCC metoden. Det är då möjligt att eliminera/minska felet som det avgivna syret har på OCC metoden och öka säkerheten vid mätningar av effektutvecklingen med OCC metoden för litium-jonbatterier.

5.3.4 Kvantifiering av osäkerheter i mätmetoderna.

I arbetet så utförs ingen osäkerhetsanalys av de båda metoderna när de används för att mäta effektutvecklingen från litium-jonbatterier. Om en osäkerhetsanalys hade utförts för de båda metoderna hade osäkerheterna i metoderna kunnat kvantifieras. Ingen osäkerhetsanalys utförs dock i arbetet eftersom det inte fanns tillräckligt med tid att åtgå. För att kunna utföra en osäkerhetanalys behöver en del vidare arbete utföras. Det första som behöver göras är att kvantifiera osäkerheterna för varje ingående parameter i metoderna. Det andra som behöver göras är att välja metod/tekniskt program som för att utföra osäkerhetanalysen med. Det sista som behöver göras är att utföra osäkerhetanalysen och tolka resultatet. I det här arbetet så har osäkerheten i många av de ingående parametrarna uppskattats med vissa parametrar återstår fortfarande att uppskattas.

Till framtida arbete inom ämnet så föreslås det därför att en kvantifiering av osäkerheterna i de ingående parametrarna uppskattas. Vidare bör en metod väljas och sedan bör en osäkerhetanalys utföras för varje metod. Med resultatet kan en kvantifiering av osäkerheterna i metoderna konstateras. Det hade underlättat jämförelsen mellan metoderna och potentiellt gjort det möjligt att kunna konstatera vilken av metoderna som bäst lämpar sig för att mäta effektutveckling från litium-jonbatterier.

5.3.5 Andra förbättringsförslag

Några andra förslag på förbättringar som inte går in i på samma detaljnivå är:

- Undersök andra batterier eller flera olika batterier med andra batteri-kemier för att få en mer generell bild av hur produktionen av syre ser ut i litium-jon batterier.
- Göra samma eller liknande beräkningar som görs i arbetet fast med kalibreringskonstanter i SERA metoden för en apparat och effektutveckling som liknar den apparat som används vid OCC mätningen mer. Det hade lett till en mer pålitlig och korrekt jämförelse mellan metoderna men innebära mindre arbete än att utföra experiment med båda metoderna.

6 Slutsats

Arbetets mål var att uppskatta och kvantifiera det fel/den osäkerhet som syrgasproduktionen från ett litium-jon batteri ger när HRR mäts med OCC för ett specifikt test fall. Utifrån arbetet så konstateras det att ett maximalt fel som det producerade syret i det fiktiva fallet kan medföra i OCC metoden är att effektutvecklingen underskattas med 20%.

Målet var även att uppskatta hur pass väl en mätning med SERA metoden behöver göras för att ge ett resultat som är bättre än resultatet som fås med en OCC mätning för det valda testfallet. Utifrån det uppskattade maximala felet i OCC metoden så konstateras det att det krävs att parametern $\tilde{T}_{w,surf}$ mäts med en säkerhet på 12 °C och att parametern $\frac{d\tilde{T}_{w,vol}}{dt}$ mäts med en säkerhet på 0,0106 °C/s för att SERA metoden ska ge ett resultat som är säkrare än OCC metoden.

Syftet med examensarbetet var att ge en uppfattning av osäkerheter och storleken av dessa i de båda metoderna som används för att mäta effektutvecklingen. Ingen kvantifiering av den totala osäkerheten i de båda metoderna hanns med under arbetet. Det som hanns med var att identifiera många osäkerheter i de båda metoderna samt att kvantifiera vissa av de identifierade osäkerheterna.

Arbetet syftade till att fungera som underlag för bedömning av vilken av metoderna som lämpar sig bäst för mätning av effektutveckling vid bränder i litium-jonbatterier. Eftersom osäkerheterna är för stora i arbetet så kan inget konstaterande göras om vilken av metoderna som bäst lämpas sig för att mäta effektutvecklingen från litium-jonbatterier. Arbetet kan dock användas som underlag för framtida undersökningar som skulle kunna leda till ett konstaterande.

Trots att ingen slutsats om vilken av metoderna som generellt är bäst lämpad för att mäta effektutvecklingen i litium-jonbatterier kan dras så kan andra slutsatser dras av arbetet.

- Syreproduktionen som sker i ett litium-jonbatteri när det brinner medför ett signifikant fel i mätningarna av effektutvecklingen med hjälp av OCC metoden. Felet som det producerade syret medför i OCC metoden innebär att effektutvecklingen underskattas.
- För att SERA metoden ska kunna utgöra ett alternativ för till OCC metoden behövs det att temperaturmätningarna görs noggrant och på ett sätt som representerar de parametrar som ingår i beräkningarna, speciell hänsyn bör tas till att mäta genomsnittstemperaturen på ytan av apparatens väggar och genomsnittstemperaturstegringen i apparatens väggar med hög precision.
- Det sista som konstateras är att vidare utredningar, beräkningar och experiment kan leda till att en slutsats om vilken av metoderna som kan lämpas sig bäst för att mäta effektutvecklingen i litium jon batterier. För att kunna konstatera detta så krävs det att experiment utförs med båda metoderna och att kalibreringskonstanter noggrant tas fram anpassade för fallet som utreds.

Referenser

- Andersson, P. (den 21 09 2020). *Risker-Säkerhet Litium-Jon Batterier*. Föreläsning vid Lunds Tekniska Högskola, Lund, Skåne, Sverige.
- Andersson, P., Alexandersson, J., Lönnermarks, A., Hees, P. V., & Wetterlund, i. (2001). Uncertainties in measuring heat and smoke release rates in the Room/Corner Test and the SBI.
- Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Larsson, F. (2013). *Investigation of fire emissions from Li-jon batteries*. Sverige: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Antti, V., & Justin, S. (2014). Lithium ion battery production. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, ss. Volume 46, p 80-85.
- Batteriföreningen. (2019). *Battericellens uppbyggnad*. Hämtat från Batteriföreningen: <https://batteriforeningen.se/battericellens-uppbyggnad/>
- Brohez, & Sylvain. (den 1 07 2005). Uncertainty analysis of heat release rate measurement from oxygen consumption calorimetry. Department of Chemical Engineering, Faculte Polytechnique de Mons, Belgium.
- De matematiska institutionerna vid KTH och stockholmsuniversitet. (den 06 02 2023). *MATH.se*. Hämtat från Sveriges universitets matematikportal: http://wiki.math.se/wikis/forberedandefysik/index.php/Tabellen_%C3%B6ver_specifika_v%C3%A4rmekapaciteter
- Dimensionera.se. (den 06 02 2023). *Luft*. Hämtat från Luft egenskaper: <https://www.dimensionera.se/materialegenskaper/luft.php>
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics, third edition*. University of Edinburgh, Scotland, UK: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Enright, C. M., & Fleischmann, P. A. (1999). Uncertainty of Heat Release Rate Calculation of the ISO56604 Cone Calorimeter Standard Test Method. *Fire Technology, Vol. 35*.
- Hall, N. (den 13 05 2021). *National Aeronautics and Space Administration*. Hämtat från Combustion: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/combst1.html>
- Höst, M., Regnell, B., & Runeson, P. (2011). *Att genomföra examensarbete skriven*. Lund.
- Janssens, M. L. (1991). *Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption*. Fire Technology.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press Inc.
- Kee, Y. Y., Asako, Y., Sidik, Che, T. L., & Azwadi, N. (2020). Uncertainty of Temperature measured by Thermocouple. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 54-62.

- Kennedy, R. W., Marr, K. C., & Ezekoye, O. A. (2021). Gas release rates and properties from Lithium Cobalt Oxide lithium ionbattery arrays. *Journal of Power Sources*, Volume 487.
- Larsson, F. (2017). *Lithium-ion Battery Safety-Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas*. Göteborg, Sweden: Department of Physics Chalmers University of Technology.
- Lunds Universitet, L. T. (2020). Laborationshandledning Effektmätning. *Effektmätning*. Lund, Skåne: Avdelningen för Brandteknik.
- N4SverigeAB. (den 06 02 2023). *n4.nu*. Hämtat från Kalibrering av termometrar och logtags: <https://n4.nu/kalibrering-av-termometrar/>
- PennState. (2018). *BATTERIES*. Hämtat från Center of nanoscale science: <https://www.mrsec.psu.edu/content/batteries>
- PVC Forum. (2017). *Faktablad om PVC ooch brand*. Stockholm: IKEM.
- Qingsong, W., Jinhua, S., & Guanquan, C. (2005). Lithium Ion Battery Fire and Explosion. *Fire Safety Science–Proceedings Of The Eighth International Symposium*, ss. 375-382.
- Qingsong, W., Ping, P., Xuejuan, Z., Guanquan, C., Jinhua, S., & Chunhua, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, ss. 210-224.
- Ravdel, B., Abraham, Gitzendanner, R., DiCarlo, J., Lucht, B., & Campion, C. (2003). *Thermal stability of lithium-ion battery electrolytes*. *Journal of Power Sources*.
- Somandepalli, V., & Biteau, H. (2014). Cone Calorimetry as a Tool for Thermal Hazard Assessment of Li-Ion cells. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, Vol. 3, No. 2, 222-233. vol 3. no2.
- Svenska institutet för standarder. (2005). *General requirements for competence of testing and calibration laboratories, ISO/IEC 17025*.
- Swedish standard institutes. (2019). *appendix G, kapitel G3.4, SVENSK STANDARD SS-ISO 5660-1:2019*. Swedish standard institutes.
- Voigt, S., Straubig, F., Palis, S., Kwade, A., & Knaust, C. (2021). Experimental comparison of Oxygen Consumption Calorimetry and Sensible Enthalpy Rise Approach for determining the heat release rate of large-scale lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, Volume 126.
- Voigt, S., Sträubig, F., Palis, S., Knaust, C., & Kwade, A. (2020). CFD-Analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to Determine the Heat Release Rate of Electric-Vehicle-Scale Lithium-Ion Battery Fires. *Fire Safety Journal Vol. 114, Issue No. 102989*.
- Zhao, J., & Magenes, L. (2016). *CFD Modeling of Jet Fires of Different Configurations CFD Modeling of Jet Fires of Different Configurations*.