

# Literatuuronderzoek naar de brandeffecten van Lithium-ion batterijbranden



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs J. Vos, H. Brans en J. Reinders

Datum 2 april 2024

Foto cover Shutterstock

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Samenvatting

Het doel van dit literatuuronderzoek is om een gedetailleerd beeld te krijgen van het verloop van een Li-ion batterijbrand, de brandkenmerken en de gevolgen daarvan. Hiertoe wordt naar kwantitatieve gegevens van het brandgedrag van Li-ion batterijbranden gezocht. De volgende onderzoeksvragen staan centraal: 1) Welke factoren hebben invloed op het ontstaan van een batterijbrand en het brandgedrag? 2) Welke schadecriteria zijn er voor de gevolgen van brand en hoe kunnen deze worden berekend? 3) Wat zijn de kenmerken van het brandverloop en welke relevante parameters voor de bepaling van de effecten van een batterijbrand kunnen hierbij bepaald worden?

Het blijkt dat de thermal runaway is het voornaamste gevaar van Li-ion batterijen. Een thermal runaway zal zichzelf in stand houden door zich te verspreiden naar naastgelegen cellen. Dit geldt voor alle subtypen Li-ion batterijen. Li-ion batterijen kunnen falen als ze buiten hun operationele grenzen worden gebruikt, interne defecten vertonen of verouderen. De gevolgen van een thermal runaway, die schaal met de capaciteit van de batterij, zijn een batterijbrand met fakkels, toxische gassen, explosiegevaar en wegschietende celonderdelen.

Voor zowel letsel aan personen als schade aan materialen blijkt de warmtestraling van belang, in combinatie met de blootstellingsduur. Vanaf een warmtestraling van  $1 \text{ kW/m}^2$  kan bij een lange blootstellingsduur letsel ontstaan. Bij toenemende warmtestraling wordt de benodigde blootstellingsduur korter. Voor schade aan materialen wordt uitgegaan van een blootstellingsduur van ten minste 30 minuten. Er is sprake van twee schadeniveaus: een niveau waarbij het materiaal in brand raakt dan wel bezwijkt, en een lager niveau waarbij onomkeerbare schade ontstaat. Dit laatste kan al gebeuren bij een warmtestraling van  $2 \text{ kW/m}^2$ . Er is een model beschreven waarmee op basis van de Surface Emissive Power de warmtestraling op een bepaalde afstand van het vuur kan worden bepaald.

In de aanloopfase van een batterijbrand ontstaan gassen, die kunnen ontsnappen als het drukventiel opengaat en vervolgens ontbranden. Dit leidt tot een fakkel, waarna een meer stabiele brandfase volgt, tijdens welke met tussenpozen fakkels ontstaan. Hierbij kunnen ook (brandende) onderdelen van de cel wegschieten, die zelf weer voor nieuwe branden kunnen zorgen. Hierdoor kan een batterijbrand lang aanhouden. Wegschietende celonderdelen kunnen ruim een halfuur na vrijkomen nog voor een gevaarlijke concentratie in de lucht zorgen. De thermische propagatie van een thermal runaway is afhankelijk van de opbouw van een batterij en het contactoppervlak tussen de cellen. Parallel geschakelde cellen kunnen extern kortsluiting veroorzaken, wat de thermische propagatie versnelt. Gemeten temperaturen van batterijbranden leverde waardes op van circa  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  of hoger.

Tussen de capaciteit van een batterijpakket en de maximale waarde van de HRR is een wiskundige verband, net als tussen de THR en de batterijcapaciteit. De THR blijkt lineair te schalen met de batterijcapaciteit. Experimenteel bepaalde warmtestralingsniveaus tonen aan dat branden van kleine batterijen op korte afstand stralingswaardes kunnen genereren die bij langere blootstellingsduur schade kunnen aanrichten. Grotere batterijen kunnen tot op enkele meters voor schadelijke warmtestralingsniveaus zorgen.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>1 Risico's van Li-ion batterijen</b>	<b>7</b>
1.1 Gevaren	7
1.2 Faaloorzaken	8
1.3 Gevolgen	8
1.4 Samenvatting	9
<b>2 Schadecriteria en modellering van brand</b>	<b>10</b>
2.1 Schadecriteria voor personen	10
2.2 Schadecriteria voor materialen	11
2.3 Fysisch model	12
2.4 Samenvatting	13
<b>3 Verloop en fysische effecten van batterijbranden</b>	<b>15</b>
3.1 Brandverloop	15
3.2 Heat Release Rate (HRR) en Total Heat Release (THR)	17
3.3 Fakkellengte	20
3.4 Wegschietende cellen en onderdelen	21
3.5 Thermische Propagatie	22
3.6 Brandtemperatuur	23
3.7 Warmtestraling	24
3.8 Samenvatting	24
<b>4 Conclusie</b>	<b>26</b>
<b>Literatuurlijst</b>	<b>28</b>

# Inleiding

## Aanleiding

Oplaadbare Lithium-ion batterijen worden op steeds grotere schaal toegepast. Waar de batterijen van mobiele telefoons slechts enkele watturen (Wh) groot zijn, worden tegenwoordig batterijen met een capaciteit van tientallen kilowatturen (kWh, auto's) of zelfs megawatturen (MWh, batterijopslagsystemen) toegepast. Aan het gebruik van deze Li-ion batterijen zijn risico's verbonden, die schalen met de grootte van het batterijpakket. Deze risico's zijn voornamelijk het gevolg van een zogeheten thermal runaway-reactie in een batterij. Hierbij loopt de temperatuur in de batterij zeer snel en zeer sterk op, waardoor de batterij explosief tot ontbranding kan komen. De brand kan dan nabij voorwerpen doen ontbranden en vervolgens escaleren, bijvoorbeeld tot een woningbrand. Ook komen bij dit proces brandbare en giftige gassen vrij. Deze kunnen vluchtmogelijkheden beperken, die voornamelijk afhangen van de rookontwikkeling (Brandweeracademie, 2020). Ontsteking van de brandbare gassen kan daarnaast zelfs een explosie veroorzaken.

Eerder onderzoek heeft een duidelijk beeld geschetst van het [thermal runaway-proces](#) (IFV, 2021; NIPV, 2023a, 2023c). In dit onderzoek wordt naar kwantitatieve gegevens van het brandgedrag van Li-ion batterijbranden gezocht.

## Doelstelling

Het doel van dit literatuuronderzoek is om een gedetailleerd beeld te krijgen van het verloop van een Li-ion batterijbrand, de brandkenmerken en de gevolgen daarvan.

## Onderzoeksvragen

Om bovenstaand doel te bereiken zijn antwoorden op de volgende onderzoeksvragen nodig.

1. Welke factoren hebben invloed op het ontstaan van een batterijbrand en het brandgedrag?
2. Welke schadecriteria zijn er voor de gevolgen van brand en hoe kunnen deze worden berekend?
3. Wat zijn de kenmerken van het brandverloop en welke relevante parameters voor de bepaling van de effecten van een batterijbrand kunnen hierbij bepaald worden?

De onderzoeksvragen corresponderen met de hoofdstukken van dit rapport. Aan het eind van elk hoofdstuk wordt in de vorm van een samenvatting de onderzoeksvraag beantwoord.

## Onderzoeksmethode

Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een literatuurstudie. Hierbij is via Elsevier science gezocht naar literatuur die specifiek ingaat op de effecten van een brandend batterijpakket, de bijbehorende fakkels, de hitte die hierbij vrijkomt en de warmtestraling die wordt gegenereerd. Ook is gezocht hoe deze effecten schalen met de grootte van het batterijpakket. Verder is onderzocht hoe de thermal runaway zich uitbreidt. Termen waar onder andere op is gezocht, zijn 'battery fire', 'battery heat flux', 'jet flame', 'battery fire radiation', 'battery thermal runaway' en combinaties hiervan. Voor de vaststelling van de schadecriteria is ook gebruikgemaakt van richtinggevende documenten uit het werkveld van de omgevingsveiligheid.

## Afbakening

In deze studie is de invloed van een Li-ion batterijbrand op de omgeving onderzocht. De aandacht gaat hierbij uit naar de warmtestraling van een brandende batterij, van een batterijpakket of van een (steek)vlam of fakkel van (direct) ontstoken vrijkomende gassen. Het gaat hier uitsluitend om de effecten van een Li-ion batterij(pakket), niet de batterij als onderdeel van bijvoorbeeld het chassis van een auto, waarvan onderdelen kunnen mee branden. De toxische effecten en explosiegevaaren van batterijbranden worden alleen globaal besproken.

## Leeswijzer

In hoofdstuk 1 worden de gevaren en risico's van Li-ion batterijbranden kort omschreven. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de letsel- en schadeniveau's die een gevolg zijn van door brand uitgestraalde hitte, waarbij ook een model wordt gepresenteerd om deze hitte te kunnen beschrijven. Hoofdstuk 3 beschrijft de literatuur waarin onderzoek is gedaan naar de fysische effecten van Li-ion-batterijbranden en de propagatie hiervan. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies.

# 1 Risico's van Li-ion batterijen

## 1.1 Gevaren

Het voornaamste gevaar van Lithium-ion batterijen is dat ze in [thermal runaway kunnen raken, waarbij giftige en brandbare gassen en dampen vrijkomen](#) (NIPV, 2023b). Deze gassen zijn vooral afkomstig van de elektrolyt in de batterij. Bij ontsteking kan hierdoor de batterij of het batterijpakket gaan branden, waarbij ook fakkels kunnen ontstaan. Deze branden kunnen flinke schade aanrichten aan de omgeving. Ook kunnen de vrijgekomen gassen en rook zich ophopen in afgesloten ruimtes, waardoor explosiegevaarlijke concentraties kunnen ontstaan. Tevens zorgen deze gassen en rook ervoor dat de vluchtmogelijkheden in bijvoorbeeld woningen bemoeilijkt worden (Brandweeracademie, 2020). Een bijkomend probleem van een thermal runaway is dat deze zichzelf in stand houdt.

Daarnaast kan een thermal runaway zich door de vrijkomende hitte uitbreiden naar nabijgelegen cellen, waardoor deze ook in thermal runaway kunnen raken. Dit noemt men thermische propagatie. Deze propagatie is zeer moeizaam te stoppen (Barowy et al., 2021; P. A. Christensen et al., 2021). Zelfs als de vlammen gedoofd zijn, kan binnen in een batterijcel of -pakket de thermal runaway en thermische propagatie doorgaan, waardoor de brand alsnog weer kan opvlammen. Hierdoor zal het proces zich uitbreiden en lange(re) tijd aanhouden, meestal tot er geen brandbaar materiaal meer over is. Voor grotere batterijen kunnen meerdere cellen (bijvoorbeeld acht) gecombineerd worden tot een module. Als er gekeken wordt naar thuisbatterijen of batterijen van elektrische auto's, dan worden er vaak meerdere modules gecombineerd tot een batterijpakket (Willstrand et al., 2020). Het is ook mogelijk dat een thermal runaway zich uiteindelijk van module tot module uitbreidt. De maximale effecten van een thermal runaway nemen daarom toe met de capaciteit van een batterij.

Globaal gezien bestaat een Li-ion cel uit drie werkzame componenten: de anode die aan de minpool verbonden is, de kathode die aan de pluspool verbonden is en de elektrolyt, een vloeibaar mengsel van lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven, dat voor de verbinding tussen de twee polen zorgt (NIPV, 2023c). In de huidige generatie Li-ion batterijen worden verschillende materialen voor de kathode gebruikt, afhankelijk van de toepassing. NCA<sup>1</sup>-batterijen worden toegepast wanneer opslagdichtheid van belang is. Batterijen met een NMC<sup>2</sup>-anode kunnen daarnaast snel opgeladen worden en ondersteunen meer oplaadcycli. Wanneer dit minder van belang is, wordt er vaak gekozen voor LCO<sup>3</sup>-anodes, die voor een stabiele lading zorgen. Bij een brand van een batterij met een LFP<sup>4</sup>-kathode komt minder warmte vrij door de lagere energiedichtheid (NIPV, 2023c). De effecten van een thermal runaway van al deze subtypen zijn echter vergelijkbaar.

---

<sup>1</sup> Nikkel cobalt aluminiumoxide.

<sup>2</sup> Nikkel mangaan cobaltoxide.

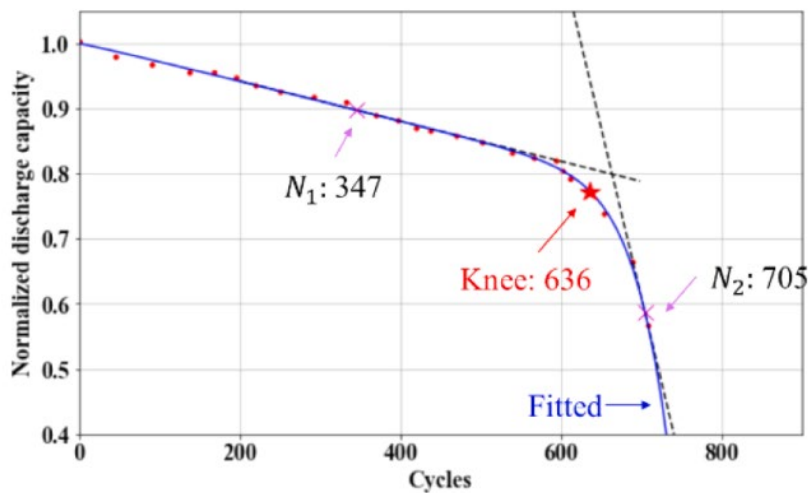
<sup>3</sup> Layered cobaltoxide.

<sup>4</sup> Lithium ijzerfosfaat.

## 1.2 Faalorzaken

Li-ion batterijen hebben operationele grenzen waarbinnen ze gebruikt dienen te worden. Als ze buiten deze grenzen (en dus verkeerd) gebruikt worden, kunnen ze in thermal runaway raken. Hierbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan blootstelling aan te hoge of lage temperatuur, te snel laden, overladen, te diep ontladen of het fysiek beschadigd worden (NIPV, 2023a). Interne defecten kunnen ook de oorzaak zijn van een thermal runaway (NIPV, 2023b). Dit kan een defect in een enkele cel of module zijn, maar ook een defect in het batterijmanagementsysteem (BMS) dat er in principe voor zorgt dat de batterij niet buiten de operationele grenzen komt.

Een andere faalorzaak is veroudering: batterijen degraderen van nature met het aantal laadcycli dat ze hebben ondergaan, wat zorgt voor een grotere kans op falen. Een laadcyclus bestaat uit het (volledig) laden en ontladen van een batterij. Als er gekeken wordt naar het verloop van de capaciteit van batterijen met het aantal laadcycli, vertoont dit vaak een 'knee', het punt waarna de degradatie sneller gaat (Diao et al., 2022). Zie hiervoor ook Figuur 1.1. Hier is te zien dat de relatieve capaciteit (de capaciteit ten opzichte van de fabriekscapaciteit, die op 1 is gezet) tot aan de *knee* gestaag lineair afneemt. Bij de *knee* krijgt een tweede degradatiemodus de overhand en gaat degradatie opeens veel sneller. In dit specifieke geval vindt dit plaats na ongeveer 600 laadcycli, maar het dit aantal is afhankelijk van het batterijtype. Aan de buitenkant is echter niet te zien dat een batterij degradeert en mogelijk richting falen gaat, wat preventie van een thermal runaway bemoeilijkt.



**Figuur 1.1 Na een bepaald aantal laadcycli vertoont de degradatie van batterijen een 'knee', waarna degradatie sneller gaat (Diao et al., 2022)**

## 1.3 Gevolgen

Door de vorming van de gassen en dampen gedurende de (aanloop naar de) thermal runaway zal er drukopbouw optreden in de (gesloten) batterijcellen, modules en pakketten. Als de druk hoog genoeg wordt, zal een batterijcel openbarsten, waarbij gas vrijkomt dat vrijwel altijd zal ontbranden. Ook kunnen (onderdelen van) batterijcellen worden gelanceerd



door de opgebouwde druk. Door de hoeveelheid aanwezige cellen schalen deze effecten met de opslagcapaciteit van de batterijen.

Naast de brandeffecten zijn er nog andere effecten. Een deel van de gassen die vrijkomen en de as die ontstaat door de brand is giftig of kan water verontreinigen. Daarnaast kunnen de vrijgekomen gassen zich verspreiden en zich in een gesloten omgeving ophopen, zeker bij grotere batterijen. Als er nog genoeg brandbare gassen aanwezig zijn, kan vertraagde ontsteking plaatsvinden, met een wolkbrand tot gevolg, of, indien de gassen (deels) zijn ingesloten, een gaswolkexplosie (Bwalya et al., 2015).

In deze studie staan de effecten centraal van een brandende batterij met de bijbehorende fakkels en hierbij vrijkomende hitte. Om deze te kunnen beoordelen zal in hoofdstuk 2 eerst kort worden ingegaan op de letsel- en schadeniveaus die brand kan veroorzaken.

## 1.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk is gekeken wat de gevaren en risico's van falende Li-ion batterijen zijn, hoe deze batterijen kunnen falen en wat hier de gevolgen van zijn. Een thermal runaway is het voornaamste gevaar van Li-ion batterijen. Deze thermal runaway zal zichzelf in stand houden door zich te verspreiden naar naastgelegen cellen. Dit geldt voor alle subtypen van Li-ion batterijen, hoewel de effecten kunnen verschillen.

De gevolgen van een thermal runaway, die schaal met de capaciteit van de batterij, zijn een batterijbrand met fakkels, giftige gassen en explosiegevaar indien gassen zich ophopen. Ook kunnen er onderdelen van de cel wegschieten.

Li-ion batterijen kunnen falen als ze buiten hun operationele grenzen worden gebruikt. Ook een intern defect of veroudering kan een oorzaak van falen zijn. Het is aangetoond dat de degradatie van Li-ion batterijen significant sneller verloopt na een bepaald aantal laadcycli.

## 2 Schadecriteria en modellering van brand

De ernst van de verwondingen aan personen of materiële schade die een brand kan aanrichten, zijn een gevolg van de hitte van de brand in combinatie met de blootstellingsduur, met daarnaast de effecten van gevormde toxische verbrandingsproducten. In dit hoofdstuk wordt specifiek gekeken naar de effecten van de hitte van en blootstellingsduur aan een brand. Hitteoverdracht vindt voornamelijk plaats via warmtestraling. Hieronder wordt dit verder uitgewerkt aan de hand van de publicatie *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade*' (PGS, 2005a).

### 2.1 Schadecriteria voor personen

Voor letselberekeningen wordt er in het algemeen van uitgegaan dat personen die zich binnen de omvang van een brand bevinden en die dus aan direct vlamcontact worden blootgesteld, zullen overlijden (PGS, 2005a). Voor personen die zich hierbuiten bevinden, wordt de ernst van het letsel bepaald door de mate waarin ze aan de straling van de vlammen (de warmtestraling uitgedrukt in  $\text{kW/m}^2$ ) worden blootgesteld. Factoren die hierbij een rol spelen zijn met name het stralingsniveau en de blootstellingstijd. De mate van bescherming (door kleren bijvoorbeeld) zal uiteraard ook van invloed zijn, net als de leeftijd van de betreffende persoon.

Letsel veroorzaakt door warmtestraling kan opgedeeld worden in eerste-, tweede- en derdegraads brandwonden. Grote derdegraads brandwonden worden bij slachtofferberekeningen vaak als dodelijk letsel beschouwd, maar ook bij (kleinere) tweede- en derdegraads brandwonden bestaat een kans op overlijden. Dit zal afhangen van het percentage van de huid dat is verbrand, alsook de leeftijd van de getroffen persoon. Om een voorbeeld te geven: bij een verbrand oppervlak van 50 % is de kans op overlijden voor een kind van 0-9 jaar 20 % en voor een volwassene van 30-35 jaar 60 %, terwijl iemand van 65 jaar of ouder vrijwel zeker zal overlijden (Lawrence, 1991).

Persoonlijk letsel kan al ontstaan bij langdurige blootstelling aan een warmtestraling van  $1 \text{ kW/m}^2$  (vergelijkbaar met de straling van de zon op een intense zomerdag) (PGS, 2005a). De tijd totdat de pijngrens wordt bereikt dan wel blaarvorming optreedt, neemt af met een toenemende stralingsintensiteit (Buettner, 1951; Stoll & Greene, 1959).

Indien een persoon aan hitte wordt blootgesteld zal deze proberen te vluchten. De blootstellingsduur is dan afhankelijk van de vluchtsnelheid en/of schuilmogelijkheden (PGS, 2005a). De vluchtsnelheid zal afhankelijk zijn van zaken als leeftijd, inrichting van de vluchtroute (rookvrij, geen obstakels, duidelijk aangegeven) en de mate van bekendheid met de vluchtroute. Als vuistregel kan aangenomen worden dat de blootstellingsduur de tijd is om op zodanige afstand te komen dat de stralingsintensiteit lager is dan  $1 \text{ kW/m}^2$ . In (Hymes,

1983) wordt een vluchtsnelheid van 6 m/s gegeven. In (PGS, 2005a) wordt geadviseerd uit te gaan van 4 m/s, met 5 seconden reactietijd.

Kleding zal een beschermende werking hebben en brandwonden deels kunnen voorkomen, zolang deze niet vlam vat (PGS, 2005a). Mocht dit wel gebeuren, dan is de kans op overlijden vrijwel 100 %. Bij een stralingsintensiteit van 20 kW/m<sup>2</sup> is de verwachting dat dit na 1 minuut gebeurt (Hilado C. J. & Murphy, 1978).

Indien een gaswolk ontbrandt, ontstaat een kortstondige wolkbrand of gaswolkexplosie (PGS, 2005a). Er wordt in het algemeen van uitgegaan dat personen die zich binnen de omvang van de wolkbrand bevinden, komen te overlijden. Door de korte blootstellingsduur is te verwachten dat persoonlijk letsel voor personen buiten de wolk relatief gering zal zijn. Wel kunnen eventuele secundaire branden ontstaan door de wolkbrand. Ook kan een druk- en schokgolf voor extra letsel zorgen.

## 2.2 Schadecriteria voor materialen

Voor materialen zijn er twee schadeniveaus (PGS, 2005a). Niveau 1 is het niveau waarbij het oppervlak in brand geraakt dan wel breekt of bezwijkt. Niveau 2 is het niveau waarbij ernstige verkleuring of schade optreedt en de materialen vervangen zullen moeten worden. Ook hier is de blootstellingsduur weer van belang. In Tabel 2.1 zijn schadeniveaus weergegeven voor blootstellingstijden van meer dan 30 minuten. Hierbij wordt uitgegaan van de aanwezigheid van vuur, zonder dat er sprake is van direct contact met het materiaaloppervlak. Bij gebrek aan vuur zal de kritische stralingsintensiteit hoger zijn, bij direct vlamcontact lager (Lie, 1957, 1972). Ook is aangegeven wat de kritische temperatuur van het materiaal is, dat wil zeggen de temperatuur die minimaal moet worden bereikt om schade van dit niveau te kunnen veroorzaken.

**Tabel 2.1 Kritische stralingsintensiteiten en temperaturen voor verschillende materialen (PGS, 2005a)**

Materiaal	Kritische stralingsintensiteit (kW/m <sup>2</sup> )		Kritische temperatuur (°C)	
	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2
Glas	4	n.v.t.	120 <sup>5</sup>	n.v.t.
Hout <sup>6</sup>	15	2	410	100
Kunststoffen	15 <sup>7</sup>	2	n.v.t.	100
Staal	100	25	500 <sup>8</sup>	200 <sup>9</sup>

<sup>5</sup> Bij een temperatuurverschil van 100 °C ontstaan scheuren (Dekker, 1972).

<sup>6</sup> Dit gaat om geveerd hout.

<sup>7</sup> Er bestaat een vrij grote variatie binnen kunststoffen; daarom is een redelijk gemiddelde genomen dat gelijkgesteld is aan hout (Zorgman, 1979).

<sup>8</sup> Globale waarde, afhankelijk van de samenstelling (Twilt & Witteveen, 1985).

<sup>9</sup> De moffellakken worden aangetast.

Als brandbare materialen in de vlammen aanwezig zijn (bijvoorbeeld bij een wolkbrand), zullen deze vlam vatten (PGS, 2005a). Er wordt aangenomen dat dat de schade binnen de wolk volledig is en dat de schade buiten de wolk is vrijwel verwaarloosbaar is.

## 2.3 Fysisch model

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat warmtestraling in principe de dominante parameter is voor de hitteoverdracht van een brand. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van een model dat gebruikt kan worden om deze warmtestraling te bepalen, zoals omschreven in *Methods for the calculation of physical effects – yellow book (PGS 2) (PGS, 2005b)*.

Om te weten hoeveel schade de warmte bij een brand kan aanrichten, is het van belang om te weten hoeveel van de uitgestraalde warmte ontvangen wordt door het aangestraalde object. Om de uitgestraalde warmte te kunnen vaststellen, moet de Surface Emissive Power (SEP) bepaald worden (PGS, 2005b). Theoretisch kan dit gedaan worden met de zogeheten Stefan-Boltzmann vergelijking, die gebaseerd is op de vlamtemperatuur. In de praktijk blijkt deze vergelijking echter niet goed toepasbaar, omdat de temperatuur van een vlam lastig te bepalen is en niet gelijk is over de hele vlam. Betreffende dit laatste worden echter wel vorderingen in gemaakt, door de brandtemperatuur te bepalen met behulp van infraroodcamera's (Muñoz et al., 2004) en CFD (Tondini et al., 2019).

Een alternatieve manier om de theoretisch maximale  $SEP_{theor}$  te bepalen werkt op basis van het brandvermogen en het vlamoppervlak:

$$SEP_{theor} = \frac{\dot{Q}}{A_f}$$

Hierin is ( $\dot{Q}$ ) het brandvermogen, de verbrandingsenergie die per seconde vrijkomt, ook wel de Heat Release Rate (HRR in kJ/s of kW) genoemd.  $A_f$  is het oppervlak van het stralend lichaam (vlamlichaam).

HRR (of  $\dot{Q}$ ) is te meten of te berekenen (Brzezinska & Bryant, 2022):

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_e$$

Hierin is  $\dot{m}$  de verbrandingssnelheid (kg/s) en  $\Delta H_e$  de verbrandingsenergie per kg (J/kg). Het vlamoppervlak is vaak lastig te bepalen, mede doordat dit gedurende de brand erg fluctueert.<sup>10</sup> Dit is specifiek een probleem bij batterijbranden, waar de fakkels die ontstaan geen vaste lengte hebben en vaak van korte duur zijn: in de literatuur is een tijd van ongeveer 10 seconden te vinden (Q. Wang et al., 2017). Dit zorgt dus voor een snel veranderend vlamoppervlak. Ook moet er rekening mee worden gehouden dat dit een tweedimensionale benadering is van een complex driedimensionaal probleem. Toch lijkt deze methode bruikbaar dan een model op basis van de Stefan-Boltzmann vergelijking.

Om tot de actuele waarde van de Surface Emissive Power ( $SEP_{act}$ ) te komen, moet de fractie  $\chi_r$  van de HRR die als straling vrijkomt bepaald worden:

$$SEP_{act} = \chi_r SEP_{theor} = \chi_r \frac{\dot{Q}}{A_f} = \chi_r \frac{\dot{m}\Delta H_e}{A_f}$$

<sup>10</sup> Met behulp van camera's is dit overigens wel te volgen in de tijd.

De fractie  $\chi_r$  is afhankelijk van het type vuur (bijvoorbeeld een fakkel of een plasbrand), maar ook van het materiaal dat brandt en is daardoor lastig om exact te bepalen. Bij een koolwaterstofbrand ligt deze waarde voor een fakkel meestal tussen de 0,1 en 0,15; voor een plasbrand tussen de 0,1 en 0,4 (Burgess & Hertzberg, 1974; Chamberlain, 1987; PGS, 2005b).

De SEP wordt in het algemeen semi-empirisch bepaald (Chamberlain, 1987; Cook et al., 1990; Hulbert W. G. Rew P. J., 1996; PGS, 2005b; Rew et al., 1997). Semi-empirische modellen zijn van nature erg afhankelijk van experimentele data. Voor het beschrijven van de warmte wordt een model gebruikt dat ervan uitgaat dat de warmte door een vast object wordt uitgestraald. Verder wordt er rekening mee gehouden dat as, roet en zwarte rook een deel van de straling opnemen. Dit leidt uiteindelijk tot de daadwerkelijke uitgestraalde warmte  $SEP_{act}$ .

Om van de  $SEP_{act}$  naar de warmtestraling op een bepaald object te kunnen gaan, spelen twee factoren een rol. De eerste is de 'view factor' ( $F$ ) (Mudan, 1987). Effectief geeft deze aan hoeveel van de uitgestraalde warmte 'gevoeld' wordt door het aangestraalde object. Voor deze view factor worden vaak eenvoudige vormen gebruikt, zoals cilinders, vlakke platen en bollen. Verder hangt de view factor af van onder andere de afstand tussen de radiator (het uitstralende object) en het ontvangende object.

De tweede factor die van belang is, is de doorlaatbaarheid van warmte in lucht ( $\tau_{air}$ ) (PGS, 2005b). De waarde van deze factor is 1 minus de absorptiefactor, die afhangt van de absorberende componenten in de lucht. In de praktijk bestaan deze voornamelijk uit water en CO<sub>2</sub>. De absorptiefactor van water en CO<sub>2</sub> kan ingeschat worden aan de hand van de omgevingstemperatuur en de vlamtemperatuur. Vervolgens hangt de doorlaatbaarheid af van de afstand tussen de vlam en het aangestraalde object. Het blijkt dat de vochtigheidsgraad nagenoeg geen invloed heeft op de doorlaatbaarheid (PGS, 2005b). Effectief komt het erop neer dat voor een brand op 3 m afstand de doorlaatbaarheid ongeveer 0,9 is. Uiteindelijk leidt dit tot een formule voor de warmtestraling op een bepaalde afstand,  $\phi_q(r)$ :

$$\phi_q(r) = SEP_{act} * F * \tau_{air}.$$

In het volgende hoofdstuk zal verder worden ingegaan op literatuur met betrekking tot de  $SEP_{act}$ , alsmede de onderliggende factoren die daarbij een rol spelen.

## 2.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk is gekeken naar de schadecriteria die er zijn voor personen en materialen, en is gekeken naar een model dat deze criteria probeert te beschrijven.

Voor zowel letsel aan personen als schade aan materialen blijkt dat de warmtestraling van belang is, in combinatie met de blootstellingsduur. Vanaf een warmtestraling van 1 kW/m<sup>2</sup> kan er letsel ontstaan, hoewel dit gepaard moet gaan met een lange blootstellingsduur. Bij toenemende warmtestraling wordt de benodigde blootstellingsduur korter. Deze blootstellingsduur zal over het algemeen beperkt zijn, omdat er rekening gehouden moet worden met het feit dat personen kunnen vluchten.

Voor schade aan materialen ligt de situatie anders; hier wordt uitgegaan van een blootstellingsduur van tenminste 30 minuten. Ook worden twee schadeniveau's gegeven: een niveau waarbij het materiaal in brand raakt dan wel bezwijkt en een lager niveau waarbij onomkeerbare schade ontstaat. Het blijkt dat dit laatste al kan gebeuren bij een warmtestraling van  $2 \text{ kW/m}^2$ , bijvoorbeeld bij hout en kunststoffen. Glas kan al bezwijken bij een warmtestraling van  $4 \text{ kW/m}^2$ .

Als laatste is een model beschreven op basis van de Surface Emissive Power (SEP) dat gebruikt kan worden om de warmtestraling op een bepaalde afstand te bepalen.

# 3 Verloop en fysische effecten van batterijbranden

## 3.1 Brandverloop

In deze paragraaf wordt het brandverloop van een batterijbrand besproken. Als er wat dieper op het brandverloop van een batterijcel wordt ingegaan, blijkt dat door de gasvorming bij een thermal runaway de druk in een cel toeneemt, totdat deze zo hoog is geworden dat het drukventiel opengaat (of een cel openbreekt). De druk waarbij dit gebeurt, hangt af van het ontwerp van dit ventiel, maar wordt tussen de 1,5-3,5 MPa gemeten (Fang et al., 2021; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2023). Na het openen van het ventiel zal door de hoge druk een mengsel van gas en onderdelen uit de batterijcel spuiten. Bij ontbranding zullen er eerst vonken en een vlam vrijkomen, die een fakkel vormen. Dit verandert langzaam in een stabiele brand. Door de hitte die hierbij vrijkomt, kunnen nabijgelegen cellen in thermal runaway raken (zie paragraaf 3.5), waardoor het proces zich voortzet in en bij nabijgelegen batterijcellen (Fang et al., 2021).

Afhankelijk van de opbouw van een batterij kunnen de individuele cellen grotendeels los van elkaar in thermal runaway raken, waardoor het brandverloop eruitziet als een stabiele brand met in tussenpozen een fakkel, een resultaat van plotseling vrijkomend gas. Door dit proces kan een batterijbrand, afhankelijk van de grootte en dus de hoeveelheid cellen, lang (>1 uur) duren. Het is echter ook mogelijk dat het grootste deel van de individuele cellen tegelijk in thermal runaway gaat, waardoor de effecten elkaar overlappen en er dus een enkele, grotere brand is (Voigt et al., 2021). Het schematische verloop van een batterijbrand is in Figuur 3.1 op de volgende pagina weergegeven. Dit gaat om een brand van een batterij met een capaciteit van 0,2 kWh.



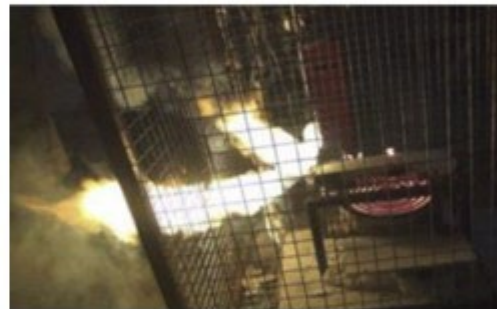
1. Een batterij gaat in thermal runaway



2. Bij het openen van het ventiel komen heftige fakkels vrij



3. De batterij brandt stabiel



4. Bij het falen van nieuwe cellen komen nieuwe fakkels vrij



5. Als er geen brandbaar materiaal meer is, zal de brand doven

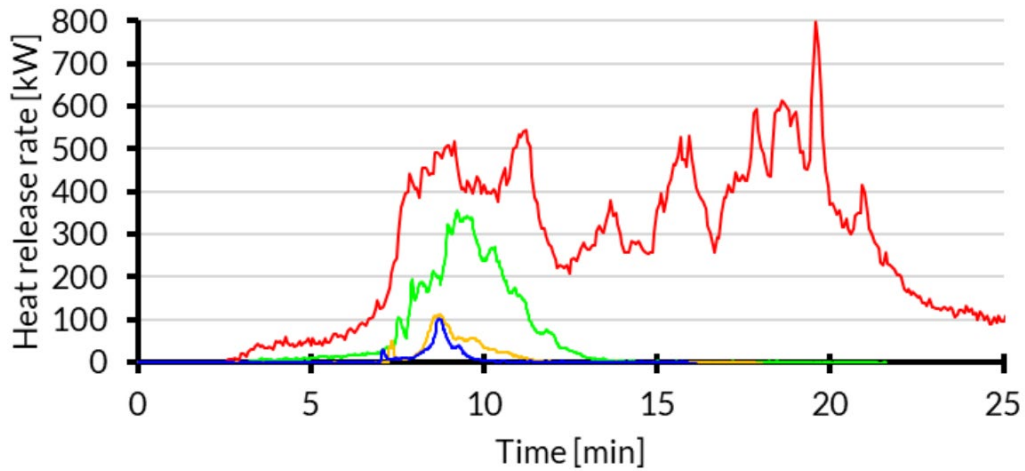
**Figuur 3.1 Schematisch verloop van een batterijbrand in 5 stappen. Stap 3 en 4 zullen elkaar afwisselen. Gebaseerd op Q. Wang et al., 2017**

Na verloop van tijd, als de brandbare onderdelen op raken, zal de brand minder fel worden, totdat deze uitgaat. Als er echter cellen in de batterij aanwezig zijn die nog niet gebrand hebben, dan kunnen deze door de aanwezige hitte alsnog in thermal runaway raken, waardoor de brand weer kan opvlammen.

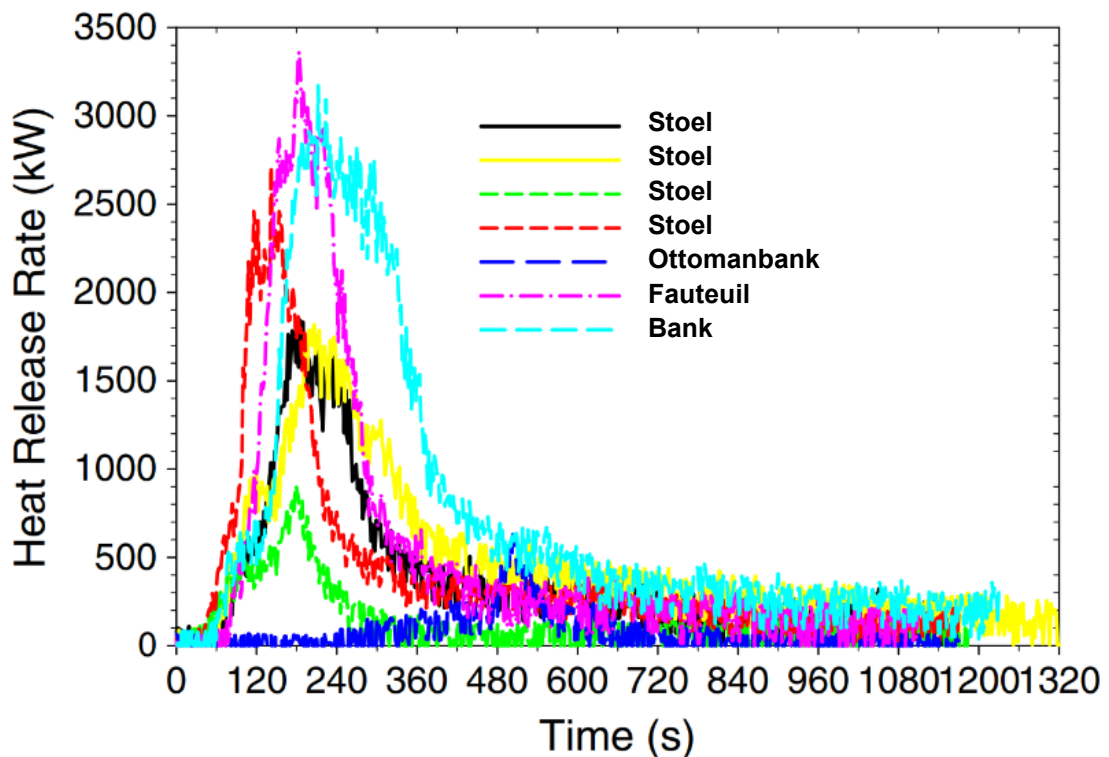
In Figuur 3.2 is te zien hoe het warmteverloop (heat release rate, HRR) eruitziet van verschillende groottes batterijen die in thermal runaway raken. Te zien is het verloop van een enkele cel (0,15 kWh, blauw), van twee cellen (0,3 kWh, geel), een module (1,2 kWh, groen) en een batterijpakket (8,4 kWh, rood). Het is, zeker bij het batterijpakket, duidelijk te zien dat de HRR met tussenpozen op en neer gaat, wat overeenkomt met het falen van een of meerdere nieuwe cellen en dus het optreden van nieuwe fakkels. Een batterijbrand kan hierdoor relatief lange tijd aanhouden. In het voorbeeld weergegeven in Figuur 3.2 brandt het ruim 20 minuten. Ter illustratie is in Figuur 3.3 het brandverloop van een aantal meubels weergegeven. Hieruit blijkt dat de brand één relatief kortdurende (circa 6 minuten) en intense



periode kent, en daarna geleidelijk uitdooft. Van herhaaldelijk opnieuw oplaaien van de brand is geen sprake.



Figuur 3.2 Voorbeeld van het verloop van batterijbranden (Willstrand et al., 2020)



Figuur 3.3 HRR voor verschillende meubelen (Bwalya et al., 2015)

### 3.2 Heat Release Rate (HRR) en Total Heat Release (THR)

Zoals beschreven in paragraaf 2.3 is het van belang de HRR van batterijbranden te bepalen om SEP te kunnen berekenen. Er is veel onderzoek gedaan naar deze HRR. In Tabel 3.1 staan in de literatuur gevonden waarden voor de maximale waarde van de HRR gedurende

branden van verschillende soorten batterijen of batterijpakketten. De maximale HRR wordt meestal gemeten op het moment dat een of meerdere cellen falen tijdens de stabiele brandfase, waardoor er dus een fakkel boven op de stabiele fase vrijkomt. Ook vermeld is de Total Heat Release (THR), de totale warmte die vrijkomt tijdens de brand.

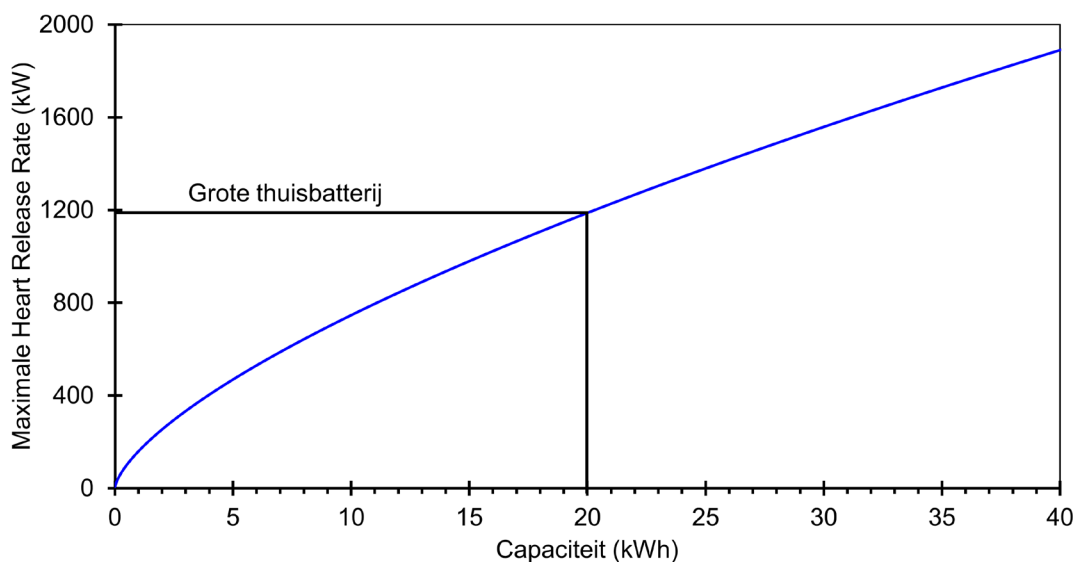
**Tabel 3.1 HRR en THR-waardes voor verschillende batterijpakketten**

Bron	Batterijcapaciteit (kWh)	Maximale HRR (kW)	THR (MJ)
Chen et al., 2019	0,3367	59,5	4,364
	0,95238	442,6	16,490
Liu et al., 2022	0,4914	246,36	5,9032
Voigt et al., 2023	5 (2 modules van 2,5 kWh)	1800	
Wang et al., 2023	1296	7000 <sup>11</sup>	3800

Door (Willstrand et al., 2020) is een verband afgeleid tussen de batterijcapaciteit en de maximale HRR. Uit experimenten met individuele batterijcellen en modules werd het volgende verband afgeleid, met  $E$  de batterijcapaciteit in Wh:

$$\text{Maximale HRR (kW)} = 1,56E^{0,67}$$

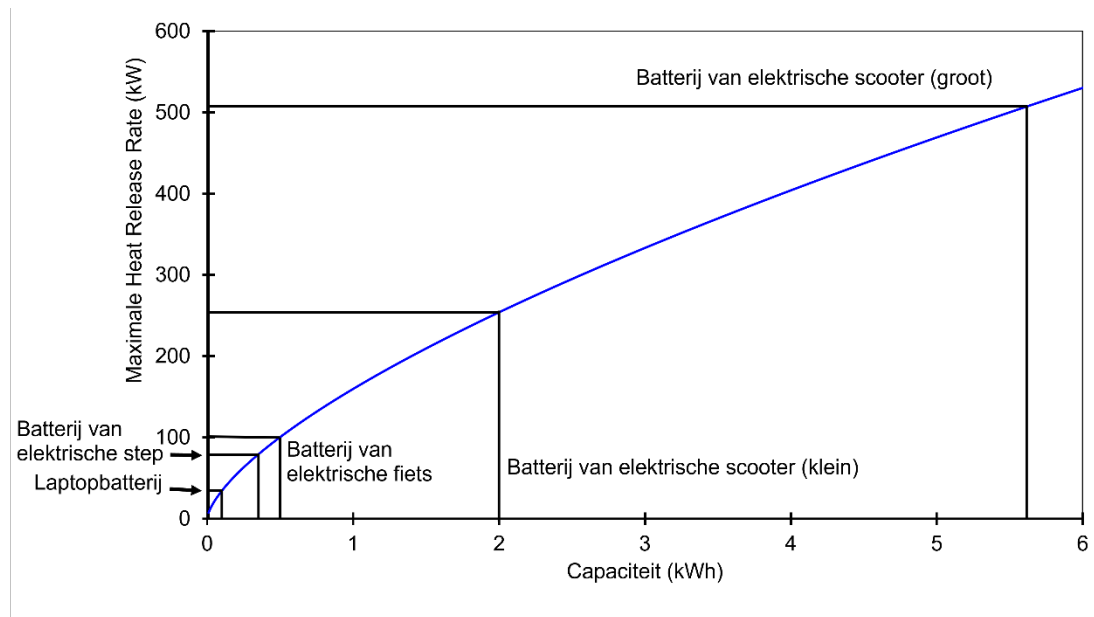
In Figuur 3.4 is dit verband weergegeven. Ook is hierin te zien wat de maximale HRR van een (grote) thuisbatterij van 20 kWh is.



**Figuur 3.4 Maximale HRR van een batterij, afhankelijk van de batterijcapaciteit. Gebaseerd op Willstrand et al., 2020**

<sup>11</sup> Doordat nooit alle modules tegelijk branden, zal de maximale HRR niet extreem hoog zijn; de brand duurt alleen een stuk langer.

In Figuur 3.5 is dit verband voor een kleiner bereik van de capaciteit weergegeven, om zo te laten zien wat de maximale HRR is van batterijen van een aantal alledaagse apparaten.

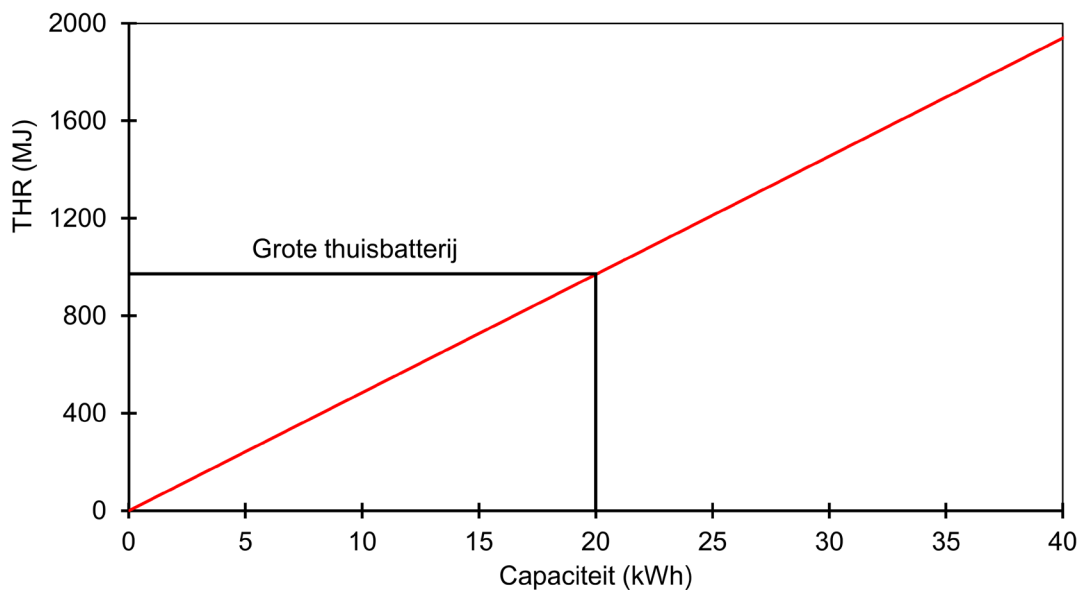


**Figuur 3.5 Maximale HRR van een batterij met lagere concentraties, afhankelijk van de batterijcapaciteit. Gebaseerd op Willstrand et al., 2020**

In hetzelfde onderzoek werd ook een verband afgeleid tussen de batterijcapaciteit en de THR, met ditmaal  $E$  in kWh:

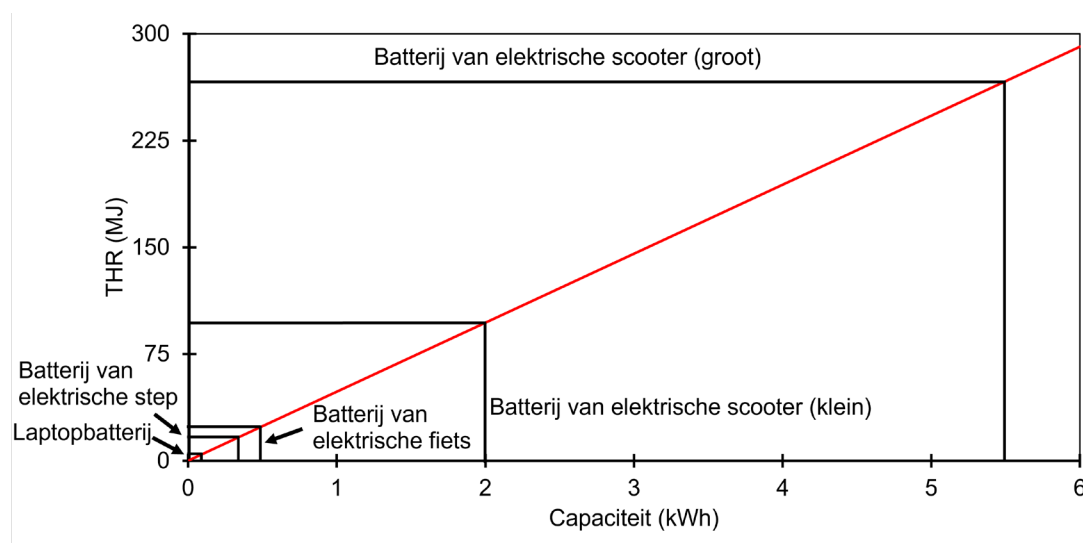
$$THR(MJ) = 48.5E$$

In Figuur 3.6 is dit verband weergegeven en is tevens aangegeven wat de verwachte THR van een (grote) thuisbatterij van 20 kWh is.



**Figuur 3.6 THR van een batterij, afhankelijk van de batterijcapaciteit. Gebaseerd op Willstrand et al., 2020**

In Figuur 3.7 is wederom het verband weergegeven voor kleinere waarden van de batterijcapaciteit, om zo weer de THR van batterijen van alledaagse apparaten te zien.



**Figuur 3.7 THR van een batterij met lagere concentraties, afhankelijk van de batterijcapaciteit. Gebaseerd op Willstrand et al., 2020**

In Tabel 3.2 zijn literatuurwaarden gegeven voor de HRR en THR van een aantal meubels (Bwalya et al., 2015). Deze waarden gaan over de volledige verbranding van de meubels; er is dus geen poging gedaan om ze te blussen.

**Tabel 3.2 HRR en THR-waardes voor meubels**

Voorwerp	Gewicht voorwerp (kg)	Maximale HRR (kW)	THR (MJ)
Polyester stoel	30	1843	461
Acrylic / polyester stoel	32,9	2710	481
Boekenkast, met boeken	66,2	433	881
Kleding op een stalen hanger	41,1	1855	942

Uit de tabel blijkt dat de THR van dit soort meubelbranden vergelijkbaar is met die van een brand van een batterij met een capaciteit van 10-20 kWh (zie Figuur 3.6).

### 3.3 Fakkellengte

Uit onderzoek blijkt dat de fakkels die worden gevormd tijdens een batterijbrand een flinke lengte kunnen bereiken. De lengte is afhankelijk van het aantal cellen dat tegelijk faalt en dus van de batterijcapaciteit. Een literatuuroverzicht hiervan wordt gegeven in Tabel 3.3. Fakkellengtes tot meer dan 2 m worden gerapporteerd.

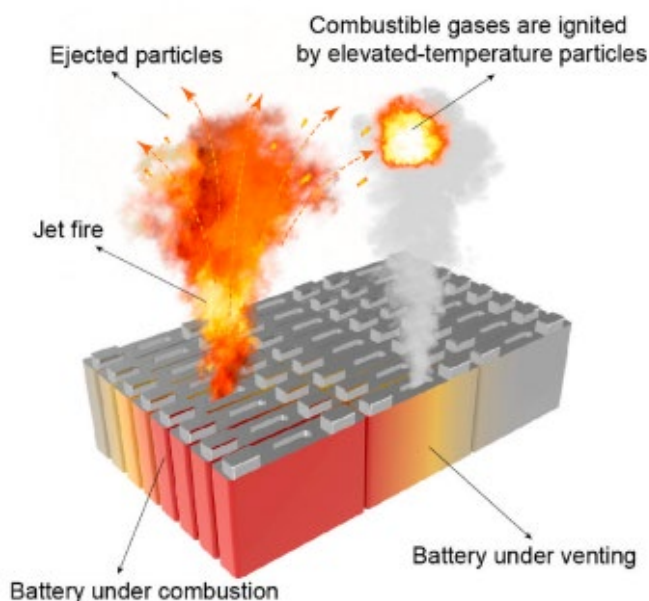
**Tabel 3.3 Fakkellengtes van batterijen met verschillende capaciteit**

Batterijcapaciteit	Fakkellengte
Enkele cel	36 cm (Liu et al., 2022) – 80 cm (Zhao et al., 2023)
0,2 kWh	Fakkel van 1,2 m, vuurbal van 1,5 m. Stabiele brandfase: 40 cm vlammen (Q. Wang et al., 2017)
1,7 kWh	>2 m, in verschillende richtingen (P. A. Christensen et al., 2021)

### 3.4 Wegschietende cellen en onderdelen

Naast brand bestaat het gevaar dat celonderdelen uitgestoten worden. Op het moment dat het drukventiel opengaat, zal de overdruk binnen 0,003 s afnemen naar de atmosferische druk (Zhang et al., 2023). Hierbij kunnen onderdelen van de batterij wegschieten en in de vlam branden. Hierdoor kan de warmtestraling tot 1,75 maal hoger zijn dan voor een vergelijkbare brand zonder wegschietende onderdelen.

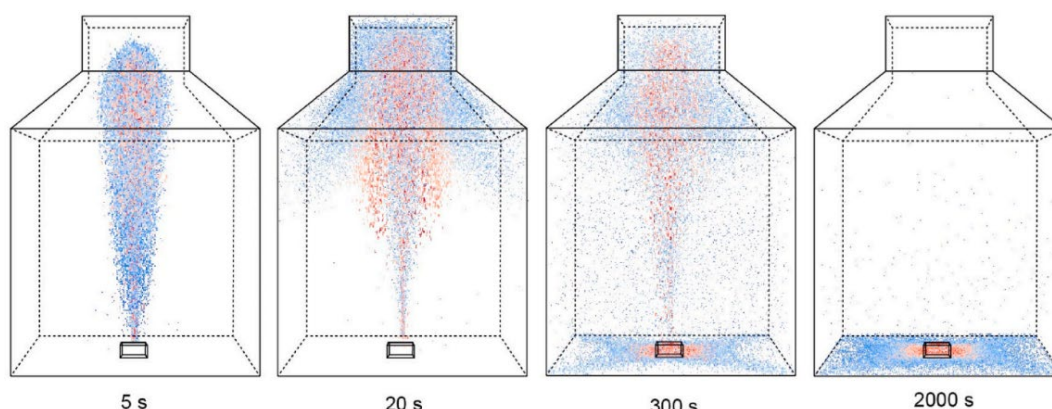
Als deze onderdelen in aanraking komen met de gassen van een cel die nog niet ontbrand is, zullen de gassen ontbranden (Wang, Kong et al., 2023). Op deze manier draagt het wegschieten van onderdelen dus ook bij aan het verspreiden van de brand (Figuur 3.8).



**Figuur 3.8 uitgestoten celonderdelen kunnen gassen van nabijgelegen cellen doen ontbranden (Wang, Kong et al., 2023)**

De uitgestoten onderdelen zijn zichtbaar in de vorm van een omgekeerde kegel en, na een tijdje, als een soort parapluvorm. De wat grotere onderdelen zullen dicht bij de batterij neerkomen, maar kleine onderdelen (<0,2 mm) kunnen verder weg terechtkomen. Extreem kleine onderdelen (kleiner dan 0,01 mm) kunnen zelfs na de brand nog lange tijd in de lucht blijven. De onderdelen van een enkele cel zorgen ruim een halfuur na het vrijkomen nog voor een voor de gezondheid gevaarlijke concentratie in de lucht. Voor een visualisatie

hiervan, zie Figuur 3.9. Hier zijn de kleinste onderdelen in blauw aangegeven, grotere onderdelen (0,5 mm) zijn rood gekleurd.



**Figuur 3.9** Verdeling van batterijonderdelen in de tijd (Wang, Kong et al., 2023)

Bij het openen van het drukventiel van een batterij komen veel gassen vrij. Deze gassen zijn brandbaar en bepalen grotendeels het brandgedrag van een batterij. Als deze gassen echter niet ontbranden, kunnen brandbare lucht-gasmengsels ontstaan (Barowy et al., 2021; Christensen, 2022) die bij vertraagde ontsteking kunnen leiden tot een wolkbrand of, bij ophoping in een afgesloten omgeving, tot een explosie. Ook kan gas zich ophopen in de batterij, waarbij de druk weer kan toenemen en er grotere onderdelen (bijvoorbeeld hele cellen) weg kunnen schieten (Larsson, 2017). Hierdoor kunnen ook weer grotere, brandende onderdelen wegschieten, die secundaire branden en andere schade kunnen veroorzaken (Larsson, 2017; TedXmedia nl, z.d.).

### 3.5 Thermische Propagatie

Zoals eerder aangegeven, kan een thermal runaway zich snel verspreiden in een batterijpakket dat bestaat uit meerdere modules en/of cellen. Dit is thermische propagatie. Dit gebeurt zodra deze modules en/of cellen een temperatuur van ongeveer 200 °C bereiken. De verspreiding verloopt snel (2-10 min) naar naastgelegen en bovengelegen modules, maar langzaam (1 uur) naar ondergelegen modules (Barowy et al., 2021). Er zijn ook experimenten gedaan waarbij de thermal runaway zich helemaal niet verspreidde naar beneden, omdat de kritieke temperatuur niet werd bereikt in deze onderliggende cellen (Voigt et al., 2023).

De plaats waar de thermal runaway begint, is van invloed op de verspreiding. Als dit het midden van een batterijpakket is, zal de thermal runaway zich over het algemeen sneller uitbreiden dan aan de rand van het pakket (Ouyang et al., 2018; Q. Wang et al., 2019). Op celniveau is naast de positie de vorm ook van belang. Cilindrische cellen zullen een thermal runaway minder snel verspreiden dan zakvormige cellen ('pouches'), omdat er een kleiner contactoppervlak is tussen de cellen, waardoor warmte minder snel van cel naar cel wordt overgedragen (Lamb et al., 2015). Ook maken de elektrische verbindingen tussen de cellen uit. Deze kunnen parallel of in serie geschakeld zijn. Cellen die parallel geschakeld zijn, zullen sneller in thermal runaway raken als er eenmaal één cel in thermal runaway is, omdat ze dan (extern) kortsluiting maken. Cellen die in serie zijn geschakeld, raken minder snel in

thermal runaway (Lamb et al., 2015). Helaas is aan de buitenkant van een batterijpakket niet te zien hoe de opbouw van de batterij in elkaar zit.

Verschillende batterijpakketten kunnen elkaar in thermal runaway brengen. In een experiment werd een relatief groot batterijpakket (28,9 kWh, opgebouwd uit negen modules) in een container in thermal runaway gebracht. Hierdoor werd een direct naastgelegen batterijpakket van ongeveer 9 kWh aangestoken. Een batterijpakket van 9 kWh dat op 90 cm afstand lag, raakte echter niet in thermal runaway (Barowy et al., 2021). Wel zijn in vijf van de negen modules een aantal cellen kapotgegaan doordat de temperatuur boven de 130 °C kwam, waarbij het drukventiel openging. Hierbij kwam gas vrij, maar dit werd niet ontstoken en zorgde dus ook niet voor een verdere verspreiding van hitte. De twee wel brandende batterijpakketten brandden ongeveer 3 uur en waren toen volledig uitgebrand. Nadat deze brand gedoofd was, vonden er geen nieuwe thermal runaways plaats. Vooral rondom de twee batterijpakketten die in brand hebben gestaan was thermische schade te zien. De rest van de container had weinig schade opgelopen. Wel was er overal as neergekomen, met de dikste laag op de vloer.

Naast de directe risico's van batterijbranden zijn er nog indirecte risico's, waarbij voornamelijk gedacht moet worden aan secundaire branden. Het is aannemelijk dat brandbare stoffen die zich in de vlammen van een batterijbrand bevinden, ook vlamvatten. Verder gelegen brandbare materialen kunnen aangestoken worden door de warmtestraling of door brandende wegschietende onderdelen. De risico's en gevaren hiervan zijn afhankelijk van de indeling van de ruimte waarin de batterijbrand plaatsvindt. Door deze verspreiding en doordat de bron van de thermal runaway nauwelijks te bereiken is met water, is een thermal runaway vrijwel niet te stoppen (Bwalya et al., 2015; Christensen et al., 2021), wat de bestrijding van een batterijbrand ingewikkeld maakt.

### 3.6 Brandtemperatuur

In paragraaf 2.3 is genoemd dat de vlamtemperatuur gebruikt kan worden om de SEP te bepalen. Hoewel de vlamtemperatuur niet gelijk is over de gehele vlam en dus niet eenduidig te bepalen is, wordt ze vaak gemeten om zo een indruk te krijgen van de intensiteit van een (batterij)brand. Er zijn verschillende experimenten gedaan waarbij de temperatuur van ofwel de vlam zelf is gemeten, of van de batterij of het batterijpakket tijdens thermal runaway. In Tabel 3.4 zijn resultaten van een aantal van deze experimenten weergegeven. In alle gevallen werden temperaturen van circa 600 °C of hoger gemeten.

**Tabel 3.4 brandtemperaturen van batterijbranden**

Bron	Hoogste brandtemperatuur	Plek gemeten
Voigt et al., 2021	Hoger dan 1000 °C	Brand
Jia et al., 2020	~800 °C	Batterij
Mao et al., 2021	~600 °C	Batterij
Q. Wang et al., 2017	~850 °C	Vlam
Q. Wang et al., 2019	~900 °C	Batterij

### 3.7 Warmtestraling

Hoewel onderzoek naar de warmtestraling van batterijen niet zo vaak plaatsvindt als het onderzoek naar de HRR en THR, is er toch wat literatuur hierover te vinden. In Tabel 3.5 zijn de gevonden waarden gezet, inclusief de grootte van de batterijen, de maximale HRR en de afstand waarop de warmtestraling gemeten is.

**Tabel 3.5 Warmtestralingen en maximale HRR van verschillende batterijen**

Bron	Grootte batterij (kWh)	Maximale HRR (kW)	Maximale warmtestraling (kW/m <sup>2</sup> )	Meetafstand (cm)
Ouyang et al., 2019	0,01638 <sup>12</sup>	9,2	1,43	25
Chen et al., 2019	0,3367	59,5	5,9	30
	0,95238	442,6	10,9	30
Ditch & Zeng, 2023	31,2 <sup>13</sup>	350	6,4	90
	46,8 <sup>14</sup>	1800	6,4	270

Hier is te zien dat zelfs de brand van een kleine batterij die uit drie cellen bestaat al een warmtestraling van meer dan 1 kW/m<sup>2</sup> kan veroorzaken op kleine afstand, wat voor derdegraads brandwonden kan zorgen bij lange blootstelling. Middelgrote batterijen kunnen warmtestralingen hoger dan 5 kW/m<sup>2</sup> veroorzaken op kleine afstand, terwijl grote batterijen dit zelfs op meer dan 2,5 m kunnen. Dit zijn warmtestralingen die brandwonden bij personen en schade aan verschillende bouwmaterialen tot gevolg kunnen hebben, zie ook Tabel 2.1.

### 3.8 Samenvatting

In dit hoofdstuk is gekeken naar het brandverloop van een batterijbrand, dat wil zeggen naar de ontwikkeling en verspreiding van de brand. Verder is onderzocht hoeveel hitte er vrijkomt bij deze branden en hoe dit schaalbaar is met de batterijcapaciteit. Als laatste is een inventarisatie gemaakt van warmtestralingen op bepaalde afstanden van batterijbranden.

In de aanloopfase van een batterijbrand ontstaan gassen, waardoor de druk in een batterijcel toeneemt, totdat het drukventiel opengaat. Hierdoor ontsnapt het gas, dat vaak direct ontbrandt. Dit leidt tot een fakkelt, waarna een meer stabiele brandfase volgt, tijdens welke met tussenpozen fakkels ontstaan (door het falen van een of meerdere nieuwe batterijcellen). Hierbij kunnen ook (brandende) onderdelen van de cel wegschieten, die zelf weer voor nieuwe branden kunnen zorgen. Pas als er geen brandbaar materiaal meer is of als de thermische propagatie stopt, komt er een einde aan dit proces. Dit zorgt ervoor dat een batterijbrand lange tijd kan aanhouden. Dit verschilt van het brandgedrag van bijvoorbeeld meubels, dat een korte, felle piek in de HRR vertoont, waarna de brand

<sup>12</sup> Drie cellen.

<sup>13</sup> LFP.

<sup>14</sup> LNO/LMO.



geleidelijk uitdooft. De THR van meubels komt overeen met die van een batterij met een capaciteit van ongeveer 10-20 kWh.

In de literatuur worden fakkellengtes tot meer dan 2 m gerapporteerd. Bij een thermal runaway wegschietende (kleine) celonderdelen kunnen ruim een halfuur na het vrijkomen nog voor een voor de gezondheid gevaarlijke concentratie in de lucht zorgen. De thermische propagatie van een thermal runaway is afhankelijk van de opbouw van een batterij. Naar boven en naar de zijkanten zal deze propagatie snel plaatsvinden, maar naar onderen zal dit langer duren of helemaal niet plaatsvinden. De vorm van de cellen is ook van belang, in het bijzonder de mate van contact tussen deze cellen. Bij meer contact zal de propagatie sneller gaan. Daarnaast maakt de elektrische schakeling van de cellen uit, omdat cellen die parallel zijn geschakeld, extern kortsluiting kunnen veroorzaken bij een thermal runaway, wat de thermische propagatie versnelt. Deze propagatie is bijna niet te stoppen, wat het bestrijden van een batterijbrand ingewikkeld maakt. Gemeten temperaturen van batterijbranden leverde waardes op van circa 600 °C of hoger.

Voor het bepalen van de SEP is onderzoek gedaan naar de HRR, de hoeveelheid verbrandingswarmte die per seconde vrijkomt. Het blijkt dat de maximale waarde van de HRR afhankelijk is van de capaciteit van het batterijpakket. Er is een wiskundig verband tussen deze twee factoren. Ook is er in de literatuur een wiskundig verband gevonden tussen de THR en de batterijcapaciteit. De THR blijkt lineair te schalen met de batterijcapaciteit.

De inventarisatie van experimenteel bepaalde warmtestralingsniveaus toont aan dat branden van kleine batterijen op korte afstand stralingswaardes kunnen genereren die bij langere blootstellingsduur schade kunnen aanrichten. Grotere batterijen kunnen tot op enkele meters voor schadelijke warmtestralingsniveaus zorgen.

# 4 Conclusie

Dit rapport beschrijft de resultaten van een literatuurstudie naar het brandgedrag van Li-ion batterijen, met in het bijzonder de effecten van een batterijbrand als gevolg van een thermal runaway. Onderstaande conclusies kunnen worden getrokken ten aanzien van de drie vragen die in het onderzoek centraal stonden.

## 1. *Welke factoren hebben invloed op het ontstaan van een batterijbrand en het brandgedrag?*

De thermal runaway is het voornaamste gevaar van Li-ion batterijen. Een thermal runaway zal zichzelf in stand houden door zich te verspreiden naar naastgelegen cellen. Dit geldt voor alle subtypen Li-ion batterijen, hoewel de effecten kunnen verschillen.

Li-ion batterijen kunnen falen als ze buiten hun operationele grenzen worden gebruikt. Ook een intern defect of veroudering kan een oorzaak van falen zijn. Het is aangetoond dat de degradatie van Li-ion batterijen significant sneller verloopt na een bepaald aantal laadcycli. De gevolgen van een thermal runaway, die schaalt met de capaciteit van de batterij, zijn een batterijbrand met fakkels, toxische gassen en explosiegevaar indien gassen zich ophopen. Ook kunnen er onderdelen van de cel wegschieten.

## 2. *Welke schadecriteria zijn er voor de gevolgen van brand en hoe kunnen deze worden berekend?*

Voor zowel letsel aan personen als schade aan materialen blijkt dat de warmtestraling van belang is, in combinatie met de blootstellingsduur. Vanaf een warmtestraling van  $1 \text{ kW/m}^2$  kan er letsel ontstaan, hoewel dit gepaard moet gaan met een lange blootstellingsduur. Bij toenemende warmtestraling wordt de benodigde blootstellingsduur korter. De blootstellingsduur zal over het algemeen beperkt zijn, omdat personen zullen proberen te vluchten.

Voor schade aan materialen wordt uitgegaan van een blootstellingsduur van ten minste 30 minuten. Er is sprake van twee schadeniveaus: een niveau waarbij het materiaal in brand raakt dan wel bezwijkt, en een lager niveau waarbij onomkeerbare schade ontstaat. Het blijkt dat dit laatste al kan gebeuren bij een warmtestraling van  $2 \text{ kW/m}^2$ , bij bijvoorbeeld hout en kunststoffen. Glas kan al bezwijken bij een warmtestraling van  $4 \text{ kW/m}^2$ .

Er is een model beschreven waarmee op basis van het concept van de Surface Emissive Power (SEP) de warmtestraling op een bepaalde afstand van het vuur kan worden bepaald.

## 3. *Wat zijn de kenmerken van het brandverloop en wat zijn de (meest) relevante parameters voor de bepaling van de effecten van een batterijbrand?*

In de aanloopfase van een batterijbrand ontstaan gassen, waardoor de druk in een batterijcel toeneemt, totdat het drukventiel opengaat. Hierdoor ontsnapt het gas, dat vaak direct ontbrandt. Dit leidt tot een fakkel, waarna een meer stabiele brandfase volgt, tijdens

welke met tussenpozen fakkels ontstaan (door het falen van een of meerdere nieuwe batterijcellen). Hierbij kunnen ook (brandende) onderdelen van de cel wegschieten, die zelf weer voor nieuwe branden kunnen zorgen. Pas als er geen brandbaar materiaal meer is of als de thermische propagatie stopt, komt er een einde aan dit proces. Dit zorgt ervoor dat een batterijbrand lange tijd kan aanhouden. Dit verschilt van het brandgedrag van bijvoorbeeld meubels, dat een korte, felle piek in de HRR vertoont, waarna de brand geleidelijk uitdooft. De THR van meubels komt overeen met die van een batterij met een capaciteit van ongeveer 10-20 kWh.

In de literatuur worden fakkellengtes tot meer dan 2 m gerapporteerd. Bij een thermal runaway wegschietende (kleine) celonderdelen kunnen ruim een halfuur na het vrijkomen nog voor een voor de gezondheid gevaarlijke concentratie in de lucht zorgen. De thermische propagatie van een thermal runaway is afhankelijk van de opbouw van een batterij: snel naar boven en naar de zijkanten, langzamer of niet naar onderliggende cellen. Van belang hierbij is ook dat bij een groter contactoppervlak tussen deze cellen propagatie sneller zal gaan. Ook kunnen parallel geschakelde cellen bij een thermal runaway extern kortsluiting veroorzaken, wat de thermische propagatie versnelt. Deze propagatie is bijna niet te stoppen, wat het bestrijden van een batterijbrand ingewikkeld maakt. Gemeten temperaturen van batterijbranden leverde waardes op van circa 600 °C of hoger.

In de literatuur is een mathematische verband gevonden tussen de capaciteit van een batterijpakket en de maximale waarde van de HRR. Ook tussen THR en de batterijcapaciteit is een mathematisch verband gevonden. De THR blijkt lineair te schalen met de batterijcapaciteit.

De inventarisatie van experimenteel bepaalde warmtestralingsniveaus toont aan dat branden van kleine batterijen op korte afstand stralingswaardes kunnen genereren die bij langere blootstellingsduur schade kunnen aanrichten. Grotere batterijen kunnen tot op enkele meters voor schadelijke warmtestralingsniveaus zorgen.

# Literatuurlijst

- Barowy, A., Klieger, A., Regan, J., & Mckinnon, M. (2021). *UL 9540A Installation Level Tests with Outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups*.
- Brandweeracademie. (2020). *Rookverspreiding in woongebouwen*. IFV.
- Brzezinska, D., & Bryant, P. (2022). Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. *Energies* 15(2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15020649>
- Buettner, J. (1951). Effects of extreme heat and cold on human skin. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiant heat. *J Appl Physiol*, 3(12), 703–713.
- Burgess, D. S., & Hertzberg, M. (1974). *Radiation from pool flames. [Convection and radiation in hydrocarbon pool flames]*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:92301890>
- Bwalya, A., Gibbs, E., Lougheed, G., & Kashef, A. (2015). Heat release rates of modern residential furnishings during combustion in a room calorimeter. *Fire and Materials*, 39(8), 685–716. <https://doi.org/10.1002/fam.2259>
- Chamberlain, G. A. (1987). Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares. *Chemical Engineering Research & Design*, 65, 299–309. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:101095142>
- Chen, M., Dongxu, O., Liu, J., & Wang, J. (2019). Investigation on thermal and fire propagation behaviors of multiple lithium-ion batteries within the package. *Applied Thermal Engineering*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113750>
- Christensen, P. (2022). *Vapour Cloud Explosions*. [https://www.youtube.com/watch?v=u0I\\_7OtK7qI&t=2006s](https://www.youtube.com/watch?v=u0I_7OtK7qI&t=2006s)
- Christensen, P. A., Milojevic, Z., Wise, M. S., Ahmeid, M., Attidekou, P. S., Mrozik, W., Dickmann, N. A., Restuccia, F., Lambert, S. M., & Das, P. K. (2021). Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules. *Applied Thermal Engineering*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116623>
- Cook, J., Bahrami, Z., & Whitehouse, R. J. (1990). A comprehensive program for calculation of flame radiation levels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 3(1), 150–155. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0950-4230\(90\)85039-C](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0950-4230(90)85039-C)
- Dekker, J. (1972). *Gedrag van glas bij brand*. De Brandweer, juni 1972.
- Diao, W., Kim, J., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2022). Degradation modes and mechanisms analysis of lithium-ion batteries with knee points. *Electrochimica Acta*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141143>
- Ditch, B., & Zeng, D. (2023). Fire Hazard of Lithium-ion Battery Energy Storage Systems: 1. Module to Rack-scale Fire Tests. *Fire Technology*, 59(6), 3049–3075. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01041-6>
- Fang, J., Cai, J., & He, X. (2021). Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge. *Applied Thermal Engineering*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117399>
- Hilado C. J., & Murphy, R. M. (1978). *Ignition and flash-fire studies of cellulosic materials*. 2(4), 173–176.

- Hulbert W. G. Rew P. J. (1996). *Development of pool fire thermal radiation model*. HSE.
- Hymes, I. (1983). *Physiological and pathological effects of thermal radiation*.  
<https://doi.org/https://doi.org/>
- IFV. (2021). *Brandveiligheid van parkeergarages met elektrisch aangedreven voertuigen*.
- Jia, Y., Uddin, M., Li, Y., & Xu, J. (2020). Thermal runaway propagation behavior within 18,650 lithium-ion battery packs: A modeling study. *Journal of Energy Storage*, 31.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101668>
- Lamb, J., Orendorff, C. J., Steele, L. A. M., & Spangler, S. W. (2015). Failure propagation in multi-cell lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 283, 517–523.  
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2014.10.081>
- Larsson, F. (2017). *Lithium-ion battery safety: assessment by abuse testing, fluoride gas emissions and fire propagation*.
- Lawrence, J. C. (1991). The mortality of burns. *Fire Safety Journal*, 17(3), 205–215.  
[https://doi.org/10.1016/0379-7112\(91\)90002-G](https://doi.org/10.1016/0379-7112(91)90002-G)
- Lie, T. T. (1957). *Brandoverslag door straling*.
- Lie, T. T. (1972). *Fire and Buildings*. Applied Science Publishers Ltd.
- Liu, P., Sun, H., Qiao, Y., Sun, S., Wang, C., Jin, K., Mao, B., & Wang, Q. (2022). Experimental study on the thermal runaway and fire behavior of LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> battery in open and confined spaces. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 711–726. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.056>
- Mao, B., Liu, C., Yang, K., Li, S., Liu, P., Zhang, M., Meng, X., Gao, F., Duan, Q., Wang, Q., & Sun, J. (2021). Thermal runaway and fire behaviors of a 300 Ah lithium ion battery with LiFePO<sub>4</sub> as cathode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110717>
- Mudan, K. S. (1987). Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment. *Fire Safety Journal*, 12(2), 89–96. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(87\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0379-7112(87)90024-5)
- Muñoz, M., Arnaldos, J., Casal, J., & Planas, E. (2004). Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*, 139(3), 263–277. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.09.001>
- NIPV. (2023a). *Scenarioboek: Li-ion Thuisbatterij in woning*. <https://scenarioboeken.nipv.nl/li-ion-thuisbatterij-in-woning/>
- NIPV. (2023b). *Thermal runaway in een lithium-ion batterijpakket*.  
[https://www.youtube.com/watch?v=n\\_3x5GPFNcc](https://www.youtube.com/watch?v=n_3x5GPFNcc)
- NIPV. (2023c). *Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid*.
- Ouyang, D., Chen, M., & Wang, J. (2019). Fire behaviors study on 18650 batteries pack using a cone-calorimeter. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(6), 2281–2294. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7891-6>
- Ouyang, D., Liu, J., Chen, M., Weng, J., & Wang, J. (2018). An Experimental Study on the Thermal Failure Propagation in Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(10), A2184. <https://doi.org/10.1149/2.0721810jes>
- PGS. (2005a). *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade*.  
[www.vrom.nl/externeveiligheid](http://www.vrom.nl/externeveiligheid)
- PGS. (2005b). *Methods for the calculation of Physical Effects Due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*.
- Rew, P. J., Hulbert, W. G., & Deaves, D. M. (1997). *Modelling of Thermal Radiation From External Hydrocarbon Pool Fires*.
- Stoll, A. M., & Greene, L. C. (1959). Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation. *Journal of applied physiology*, 14(3), 373–382.  
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:27362715>

- TedXmedia. (2017). *Brand Auke Tweewielers Ede. (Accu explodeert)*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=69Rz-jFNYH0>
- Tondini, N., Thauvoye, C., Hanus, F., & Vassart, O. (2019). Development of an analytical model to predict the radiative heat flux to a vertical element due to a localised fire. *Fire Safety Journal*, 105, 227–243. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.001>
- Twilt, L., & Witteveen J. (1985). *Brandveiligheid Staalconstructies*. (2de dr.). Staalbouwkundig Genootschap.
- Voigt, S., Sträubig, F., Kwade, A., Zehfuß, J., & Knaust, C. (2023). An empirical model for lithium-ion battery fires for CFD applications. *Fire Safety Journal*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103725>
- Voigt, S., Sträubig, 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*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103447>
- Wang, G., Kong, D., Ping, P., Wen, J., He, X., Zhao, H., He, X., Peng, R., Zhang, Y., & Dai, X. (2023). Revealing particle venting of lithium-ion batteries during thermal runaway: A multi-scale model toward multiphase process. *eTransportation*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100237>
- Wang, G., Ping, P., Peng, R., Lv, H., Zhao, H., Gao, W., & Kong, D. (2023). A semi reduced-order model for multi-scale simulation of fire propagation of lithium-ion batteries in energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113672>
- Wang, Q., Huang, P., Ping, P., Du, Y., Li, K., & Sun, J. (2017). Combustion behavior of lithium iron phosphate battery induced by external heat radiation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 961–969. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.12.002>
- Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>
- Willstrand, O., Bisschop, R., Temple, A., & Anderson, J. (2020). *Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles*, RISE Report 2020:90.
- Zhang, P., Lu, J., Yang, K., Chen, H., & Huang, Y. (2023). A 3D simulation model of thermal runaway in Li-ion batteries coupled particles ejection and jet flow. *Journal of Power Sources*, 580. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233357>
- Zhao, R., Lai, Z., Li, W., Ye, M., & Yu, S. (2023). Development of a coupled model of heat generation and jet flow of lithium-ion batteries during thermal runaway. *Journal of Energy Storage*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107048>
- Zorgman, H. (1979). *Brandgedrag van kunststoffen*. *Plastica* 31, nr. 6, juni 1979.