

Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2023

Auteur	H. Brans
Contactpersoon	T. Hessels
Datum	12 juli 2023
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.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inleiding	5
1	Onderzoeksmethode	7
1.1	Fase 1: Achtergrondkennis verzamelen	7
1.2	Fase 2: Literatuurstudie	7
1.3	Fase 3: Veiligheidsanalyse	8
2	Lithium-ion	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Systeembeschrijving	10
2.3	Systeemtypen	14
2.4	Literatuurstudie Veiligheid: huidige situatie	16
2.5	Literatuurstudie Veiligheid: toekomstige subtypen	20
2.6	Veiligheidsanalyse	24
3	Sodium-ion (Natrium-ion)	26
3.1	Inleiding	26
3.2	Systeembeschrijving	26
3.3	Systeemtypen	27
3.4	Literatuurstudie Veiligheid	28
3.5	Veiligheidsanalyse	28
4	Redox-Flow	30
4.1	Inleiding	30
4.2	Systeembeschrijving	30
4.3	Systeemtypen	32
4.4	Literatuurstudie Veiligheid	33
4.5	Veiligheidsanalyse	36
5	Beschouwing	37
5.1	Nieuwe generaties Lithium-ion	37
5.2	Sodium-ion	38
5.3	Redox-Flow	39
6	Conclusie	40
	Literatuurlijst	41

Samenvatting

Batterijen vormen een cruciaal onderdeel voor een toekomstbestendige energietransitie. Door overheden en het bedrijfsleven wordt daarom veel geïnvesteerd in de ontwikkeling van nieuwe energieopslagsystemen. Een belangrijk onderdeel hiervan is de zoektocht naar alternatieve materialen voor bijvoorbeeld lithium, nikkel en kobalt, die nu worden toegepast in Lithium-ion batterijen. Dit rapport beschrijft in hoofdlijnen een aantal belangrijke ontwikkelingen op het gebied van (grootschalige) batterijopslag vanuit het perspectief van de veiligheid.

Het blijkt dat bij elk nieuw batterijtype veiligheidsrisico's blijven bestaan. Voor de nieuwe generatie Lithium-ion batterij gelden in hoofdlijnen dezelfde risico's als voor de huidige Lithium-ion batterijen. Het veiligheidsprobleem van de thermal runaway met de bijbehorende effecten toxische wolk, batterijbrand en dampwolkexplosie of wolkbrand, blijft bij alle subtypen Lithium-ion bestaan. Met de introductie van Solid-State batterijen zullen de grootte van de kans en ernst van deze effecten wel afnemen, maar de genoemde effecten zullen niet volledig worden uitgesloten. Aangezien de effecten van vergelijkbare aard en de systeemopbouw hetzelfde zijn, verwachten wij dat de mate van bestrijdbaarheid slechts beperkt wordt verbeterd ten opzichte van de huidige Lithium-ion batterijen.

De veiligheidsrisico's van Sodium-ion batterijen zijn van vergelijkbare aard gebleken als die van Lithium-ion batterijen. Uit wetenschappelijke experimenten is gebleken dat een Sodium-ion batterijcel ook in thermal runaway kan raken. Wel is het aannemelijk dat de snelheid en ernst van de thermal runaway lager zijn dan bij Lithium-ion batterijcellen, omdat de energiedichtheid lager is. Aangezien de systeemopbouw van Sodium-ion batterijsystemen eveneens bestaat uit goed verpakte batterijcellen, zal de bestrijdbaarheid naar verwachting ook worden bemoedigd door het feit dat de cellen tijdens een incident amper zijn te koelen. Na de introductie van de eerste Lithium-ion solid-state batterijen zullen ook Sodium-ion solid-state batterijen volgen, waardoor de veiligheid zal worden verbeterd.

Voor wat betreft de Redox-Flow batterij is gebleken dat alle subtypen toxische vloeistoffen bevatten als werkzame stof van het systeem. Als gevolg daarvan zijn de veiligheidsrisico's van Redox-Flow batterijen met name toxisch van aard. Er zijn bij deze hoofdcategorie batterij geen aanwijzingen gevonden voor een thermal runaway en de werkzame (vloeistof)stoffen zijn niet brandbaar (met uitzondering van het waterstof in Waterstof-Broom batterijen). Een incident met een Redox-Flow batterij zal daarom in zekere zin van vergelijkbare aard zijn als een lekkage van een toxische vloeistof. De huidige IBGS-procedures kunnen een richtlijn bieden voor de incidentbestrijding daarvan.

Inleiding

Aanleiding

De eerste introductie van Lithium-ion buurtbatterijen in Nederland maakte de brandweer enigszins bezorgd.¹ In de afgelopen jaren hebben NIPV en de brandweer in Nederland steeds meer geleerd over de technologie, veiligheidsrisico's en bestrijding van incidenten met Lithium-ion batterijen. De technische ontwikkelingen en innovaties op het gebied van nieuwe batterijen staan echter niet stil en zijn omvangrijk. Ook het aantal batterijsystemen voor stationaire opslag, ook wel energieopslagsystemen (EOS'en) genoemd, en elektrische voertuigen zullen in de komende jaren in wereldwijd en ook in Nederland enorm toenemen. Het is van belang voor de brandweer in Nederland om hierop voorbereid te zijn.

De energieproductie en het energieverbruik bij duurzame opwekking, zoals zon- en windenergie, zijn namelijk niet altijd synchroon in tijd en locatie. Om leveringszekerheid te garanderen zijn energieopslagsystemen nodig, zoals batterijen. Daarmee vormen ze een cruciaal onderdeel voor een toekomstbestendige energietransitie. Door overheden en het bedrijfsleven wordt veel geïnvesteerd in de ontwikkeling van nieuwe energieopslagsystemen, mede om versneld tot volwaardige alternatieven voor fossiele brandstoffen te komen.

Een belangrijk onderdeel hiervan is de zoektocht naar alternatieve materialen voor bijvoorbeeld lithium, nikkel en kobalt, die nu worden toegepast in Lithium-ion batterijen. Het doel van deze zoektocht is enerzijds om nieuwe materialen met een hogere energiedichtheid te ontwikkelen, zodat er meer energie kan worden opgeslagen. Anderzijds zijn fabrikanten op zoek naar alternatieven voor de huidige metalen in batterijen, omdat de hoeveelheid daarvan op de wereld beperkt is en de winning ervan in bepaalde gevallen onder slechte arbeidsomstandigheden plaatsvindt.

Om alle doelen te realiseren zijn nieuwe batterijtypen in ontwikkeling met nieuwe materialen of met nieuwe eigenschappen. Dit rapport beschrijft in hoofdlijnen een aantal belangrijke ontwikkelingen op het gebied van (grootschalige) batterijopslag vanuit het perspectief van de veiligheid.

Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om vanuit veiligheidsperspectief de ontwikkelingen van nieuwe batterijen in hoofdlijnen te beschrijven en vooruit te blikken op de betekenis daarvan voor het bedrijfsleven, de brandweer en veiligheidsregio's.

Om dit doel te bereiken is de studie in drie fasen uitgevoerd met elk een eigen doelstelling:

1. Achtergrondkennis verzamelen: Een beeld verkrijgen van de hoofdcategorieën nieuwe batterijtypen die in een vergevorderd stadium van ontwikkeling zijn en potentie hebben om in de komende tien jaar in Nederland op de markt te komen.

¹ EenVandaag, Brandweer bezorgd over wildgroei buurtbatterij. <https://eenvandaag.avrotros.nl/item/brandweer-bezorgd-over-wildgroei-buurtbatterij/>.

2. Literatuurstudie: Het bestuderen van de wetenschappelijke literatuur over de veiligheid van elke nieuwe hoofdcategorie batterijtype.
3. Veiligheidsanalyse: Op basis van de kennis uit de wetenschappelijke literatuur en onze eigen expertise een verwachting geven voor de grootte van de kans, ernst van het effect en mate van bestrijdbaarheid van een incident met deze nieuwe batterijtypen.

Afbakening

- > We beperken ons tot de batterijchemie. Dit houdt in dat we kijken naar veiligheid die intrinsiek is aan het type batterij en de gebruikte materialen. Ontwikkelingen binnen de overige componenten van een energieopslagsystemen, zoals bijvoorbeeld het Battery Management System (BMS) en connectoren, vallen daarmee buiten beschouwing.
- > Binnen elk nieuw batterijtype zijn meerdere potentiële materialen of subtypen in ontwikkeling. Het is vaak nog niet bekend welke potentiële materialen 'winnaars' worden en naar verhouding grootschalig op de markt komen. Bovendien is het ondoenlijk om tientallen subtypen in detail te beschouwen. Mede op basis van externe expertise is de afbakening van de in dit rapport besproken batterijtypen gemaakt, te weten: Lithium-ion, Sodium-ion en Redox-Flow.
- > Batterijsystemen zullen in de toekomst ook in omvang toenemen. Specifieke veiligheidsrisico's gerelateerd aan schaalvergroting zijn in dit rapport niet onderzocht.
- > We kijken naar de veiligheid van de batterijtypen, en niet naar de veiligheid bij de winning van grondstoffen en bijbehorende arbeidsomstandigheden

1 Onderzoeksmethode

Wereldwijd werken duizenden onderzoeksinstituten, bedrijven en universiteiten aan de batterijtechnologie van de toekomst. Daarnaast wordt in nieuwsartikelen over dit onderwerp gesproken over doorbraken en duiken daarin allerlei nieuwe termen op, van nanotechnologie en solid-state tot luchtbatterijen. Het is dan ook logisch dat een zoekterm over nieuwe batterijen te veel resultaten oplevert om allemaal te kunnen bestuderen. De studie is daarom in drie fasen uitgevoerd met elk een eigen aanpak.

1.1 Fase 1: Achtergrondkennis verzamelen

De eerste fase stond in het teken van het verkrijgen van basale achtergrondkennis over verschillende stromingen binnen de ontwikkelingen rondom nieuwe batterijen. In de eerste fase van het onderzoek zijn hiervoor twee gesprekken gevoerd met professor Mark Huijben, hoogleraar nanotechnologie voor energieopslag aan de Universiteit Twente. Vragen die in die gesprekken centraal stonden waren:

1. Op welke gronden is een scheiding te maken tussen ontwikkelingen die al vergevorderd zijn en ontwikkelingen die nog een lange weg te gaan hebben? In antwoord hierop zijn eerst de huidige batterijontwikkelingen toegelicht en daarna de nieuwe ontwikkelingen besproken.
2. Welke nieuwe batterijtypen worden als meest veelbelovend gezien en verkeren al in een vergevorderd stadium van ontwikkeling? Als richtlijn werd gehanteerd dat de nieuwe batterijtechniek potentie had binnen tien jaar op de markt te komen voor energieopslag-systemen en elektrische voertuigen.

De belangrijkste batterijtypen die uit deze getrapte analyse naar voren kwamen, waren de nieuwe generatie Lithium-ion (Lithium-Silicium, Solid-State Lithium-ion en Lithium-Metal), Sodium-ion en Redox-Flow. In dit rapport worden derhalve deze drie typen behandeld.

1.2 Fase 2: Literatuurstudie

Met de basiskennis is in de tweede fase een gericht literatuuronderzoek uitgevoerd naar de veiligheidsaspecten van deze nieuwe batterijtypen. Er is gezocht naar wetenschappelijke literatuur over de veiligheid en het ontwikkelstadium van nieuwe batterijtypen. Veel van de gevonden artikelen gaan over de microscopische problematiek in de ontwikkeling van de materialen. Immers, een materiaal moet eerst in een laboratorium stabiel en bruikbaar blijken voordat het verder geïmplementeerd kan worden. Hoewel de stabiliteit een indicatie geeft voor de veiligheid, was het in bepaalde gevallen lastig om concreet na te gaan welke faaloorzaken en effecten wel of niet zijn uitgesloten. De beschikbare literatuur was op een aantal punten nog beperkt, mede omdat het nieuwe technieken betreft.

Om die reden is een aantal keer contact opgenomen met de auteurs van de artikelen en batterijontwikkelaars met als doel de kennishiaten te dichten. Zo is er onder andere

mailcontact geweest met drie experts van de universiteit van Tianjin, China, die nauwgezet ontwikkelingen volgen rondom solid-state batterijen en specifiek onderzoek doen naar de veiligheid daarvan. Daarnaast is telefonisch contact geweest met ontwikkelaars in Nederland die nieuwe materialen voor Lithium-ion batterijen produceren. Gezien het feit dat de Redox-Flow batterij een relatief nieuw systeem betreft voor Nederland en andere veiligheidsrisico's kent dan Lithium-ion batterijen, was het hiervoor van toegevoegde waarde om ook een werkbezoek te brengen aan een batterijontwikkelaar in Nederland. Er is in het contact met experts met name gevraagd naar hun verwachtingen met betrekking tot de effecten bij een incident. Een belangrijke vraag daarbij was in hoeverre een thermal runaway nog kan optreden in de nieuwe batterijtypen.

1.3 Fase 3: Veiligheidsanalyse

Met de informatie uit de oriëntatie en de verdiepende literatuurstudie is in de derde fase een veiligheidsanalyse uitgevoerd. De centrale vraagstelling was wat de onderzochte batterijtypen voor de veiligheid in de praktijk gaan betekenen. Aangezien deze studie nieuwe batterijtypen betreft, zijn er nog zover ons bekend geen incidenten mee geweest. De veiligheidsanalyse is daarom uitgevoerd op basis van onze eigen kennis en ervaringen en eigen interpretatie (deductie) van de resultaten uit de literatuurstudie.

In fase 2 van de studie zijn de werking, inwendige structuur en gebruikte materialen van alle batterijtypen goed bestudeerd om een gedegen begrip van elk batterijtype te verkrijgen. Vervolgens is een veiligheidsanalyse uitgevoerd op basis van gevolgtrekking uit de literatuurstudie. Dit is gedaan aan de hand van het schema in Tabel 1.1, dat is samengesteld op basis van hetgeen we in de literatuur hebben gevonden. In deze tabel zijn kans, effect en bestrijdbaarheid van een incident gekoppeld aan twee criteria. Zo impliceert een hogere stabiliteit van de materialen bijvoorbeeld een lagere kans op een incident. Om de grootte van de kans, de ernst van de effecten en mate van bestrijdbaarheid enigszins te kunnen visualiseren wordt in de beschouwing gebruikgemaakt van radardiagrammen, die zijn ingevuld aan de hand van de veiligheidsanalyse in de afsluitende paragraaf van elk hoofdstuk over een hoofdcategorie batterijtype.

Tabel 1.1 Criteria veiligheidsanalyse

Aspect	Criteria en Toelichting
Kans	<p>Stabiliteit van de Materialen</p> <p>De stabiliteit van batterijen wordt doorgaans onderverdeeld in thermische, elektrische en mechanische stabiliteit. Als een materiaal een hogere stabiliteitsmarge heeft, wil dat zeggen dat het een tolerantie heeft voor een groter temperatuurbereik of voltageverschil. Het zal dan bij bijvoorbeeld hoge temperaturen of een elektrische storing minder snel falen of afbreken.</p> <p>Intrinsieke faalmechanismen</p> <p>Hieronder worden faalmechanismen verstaan die intrinsiek zijn aan het systeem of ontwerp van de batterij en uit zichzelf kunnen plaatsvinden tijdens het opladen en ontladen.</p>
Effect	<p>Aard van de effecten</p> <p>De bekende effecten zijn brand, explosie en een toxische wolk. Er wordt gekeken welke van deze drie effecten mogelijk zijn bij elk nieuw type.</p> <p>Impact van de effecten</p> <p>Afhankelijk van de toegepaste materialen en aard van de effecten kan de ernst van de effecten per subtype verschillen.</p>
Bestrijdbaarheid	<p>Thermal Runaway</p> <p>Op dit moment wordt de bestrijdbaarheid ernstig bemoeilijkt doordat er bij Lithium-ion batterijen een thermal runaway kan plaatsvinden. Hierdoor houdt het incident zichzelf in stand, ook al wordt het actief bestreden.</p> <p>Gevaren voor incidentbestrijders</p> <p>De bestrijdbaarheid kan verslechterd worden als er een explosiedreiging of gevaar voor toxische blootstelling bestaat.</p>

2 Lithium-ion

2.1 Inleiding

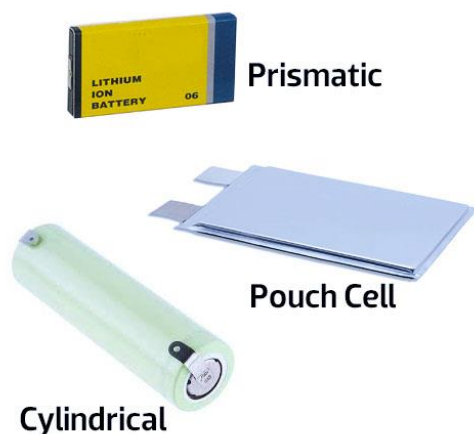
De industrie zal de komende tien jaar nog zeker vasthouden aan het gebruik van de Lithium-ion batterij. De Lithium-ion batterij wordt namelijk volop doorontwikkeld totdat de grenzen van de theoretisch ideale batterij worden bereikt. De ontwikkeling van nieuwe, geavanceerde, materialen vormt hiervoor de basis. Zodra een nieuw materiaal is ontdekt en beschikbaar komt voor een van de basiscomponenten (anode, kathode of elektrolyt) ontstaat een nieuw subtype (Battery 2030+, 2022; Lu et al. 2019). Het principe van de batterij blijft in essentie hetzelfde, alleen wordt deze steeds efficiënter doordat er continu nieuwe geavanceerde materialen bijkomen met fijnere en complexere structuren. De term nanotechnologie wordt daarbij genoemd; dit houdt in dat materialen nog verder tot op het kleinste niveau worden geoptimaliseerd.

2.2 Systeembeschrijving

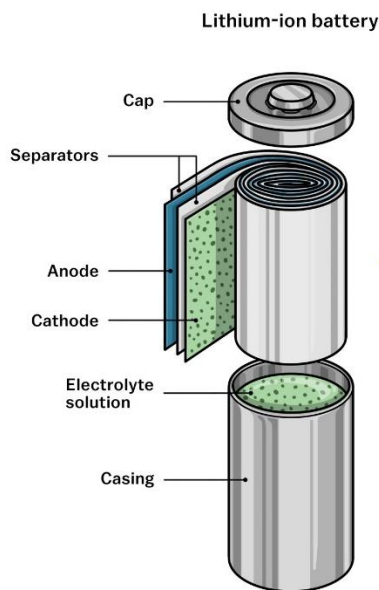
2.2.1 Werkingsprincipe: anode (-), kathode (+) en elektrolyt

De basiseenheid van een Lithium-ion batterij is de batterijcel. Batterijcellen bestaan in drie verschillende vormen, namelijk: cilindrische, pouch en prismatische cellen (Figuur 2.1). In Figuur 2.2 is een voorbeeld van een cilindrische cel – de meest voorkomende – schematisch weergegeven. Binnenin de batterijcel zitten verschillende laagjes materialen opgerold, die de werkzame componenten van de batterijcel vormen.

Types of Lithium Batteries

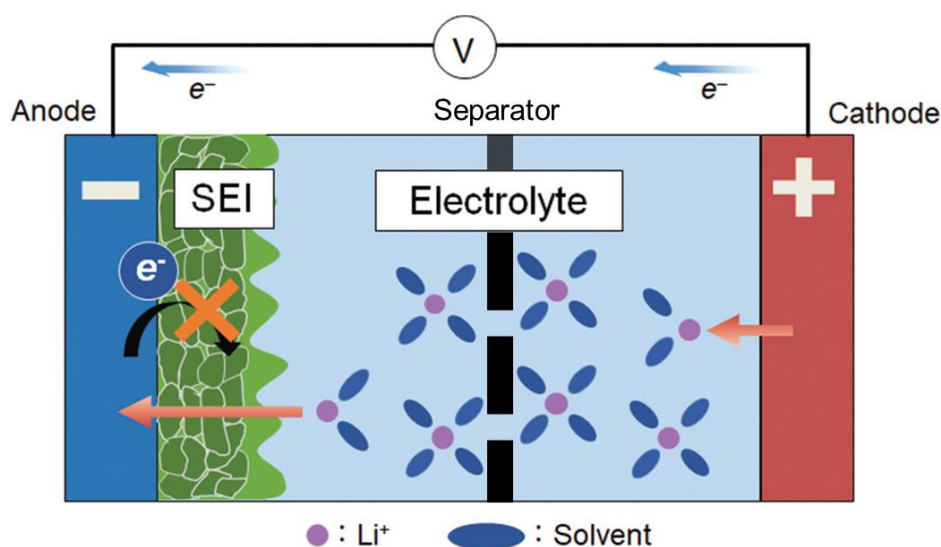


Figuur 2.1 Prismatische, pouch en cilindrische batterijcel (bron: <https://www.hylasermachine.com/news-battery-welding.html>)



Figuur 2.2 Inwendige van cilindrische Lithium-ion batterijcel (source: Eliana Rodgers for vox.com)

De drie werkzame componenten van een batterijcel zijn de anode, kathode en het elektrolyt. In de huidige batterijcellen is het elektrolyt een vloeistof, waardoor een separator noodzakelijk is om de anode en kathode fysiek van elkaar te scheiden. De anode is verbonden met de minpool en de kathode met de pluspool van de batterij. Daartussenin bevindt zich het elektrolyt. Voor alle drie de componenten kunnen verschillende materialen worden gekozen, waardoor verschillende subtypen ontstaan. In Figuur 2.2 is een lithium-ion batterijcel weergegeven. De anode is in de huidige batterijcellen gemaakt van grafiet en de kathode van materiaal dat bestaat uit lithiumverbindingen. Het elektrolyt is vloeibaar en bestaat uit een mengsel van lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven.



Figuur 2.3 Schematische weergave van Lithium-ion batterij (bron: Takenaka et al. 2021)

In Figuur 2.3 zijn de drie basiscomponenten (anode, kathode en elektrolyt), de separator en het Solid Electrolyte Interphase (SEI) schematisch weergegeven en wordt de werking ervan geïllustreerd. In de figuur is namelijk weergegeven hoe het opladen in zijn werk gaat met lithiumionen (Li+) en elektronen (e-). In deze [link](#) is een mooie animatie van dit proces weergegeven.

Tijdens het gebruik bewegen lithiumionen zich heen en weer door het elektrolyt van de kathode naar de anode en vice versa. Tegelijkertijd verlaten elektronen de batterijcel en vloeien door het elektrische circuit om zo een elektrische stroom te vormen. Hiermee komt de primaire eigenschap van het elektrolyt naar voren: het laat wel ionen door, maar geen elektronen. In Figuur 2.3 is de richting bij het opladen schematisch weergegeven. Bij het opladen vindt dit proces namelijk plaats van kathode (+) naar anode (-), net zolang totdat alle lithiumionen en elektronen weer bij elkaar komen in de anode, en de batterij volledig is opgeladen. Gedurende het opladen is een externe voeding (V) nodig die de energie levert, zoals bijvoorbeeld een windmolen of zonnepaneel. Bij het ontladen vindt het proces in omgekeerde richting plaats, namelijk van anode (-) naar kathode (+) en kan in de plaats van de voeding een motor komen die de energie weer verbruikt.

Batterijen zijn formeel gezien elektrochemische cellen. Dit betekent dat er elektrochemische reacties plaatsvinden tijdens het opladen en ontladen. De elektrochemische reactie vindt bij Lithium-ion batterijen plaats tussen de lithiumionen en elektronen. Bij vertrek vanaf de anode of kathode splitst een neutraal lithiatoom (Li) zich namelijk elke keer in een positief lithiumion (Li+) en een negatief elektron (e-). Bij aankomst verenigen elektron en ion zich weer tot een lithiatoom. Voor dit proces is het van belang dat de elektrochemische reacties gecontroleerd plaatsvinden. De batterijcel dient hiervoor stabiel te zijn, wat wil zeggen dat er geen ongewenste effecten of reacties plaatsvinden.

Het Solid Electrolyte Interphase (SEI) functioneert hierbij als een beschermlaagje. Het SEI is geen laagje materiaal dat er in de fabriek wordt aangehecht, maar een microscopisch afzettinglaagje dat wordt gevormd en zich hecht aan de anode tijdens de eerste paar laadcycli. Er staat namelijk een spanningsverschil tussen de anode (minpool) en kathode (pluspool). Om ervoor te zorgen dat de batterijcel toch stabiel blijft, is een zorgvuldig samengesteld elektrolyt met de juiste eigenschappen noodzakelijk. Ter versterking hiervoor is het SEI bedoeld. Het SEI voorkomt onder meer dat elektronen ongecontroleerd overspringen als de batterijcel vol is, hetgeen ook schematisch is weergegeven in de figuur, en vormt daarmee een belangrijke factor voor de stabiliteit van batterijcellen.

Ten slotte bevindt zich bij alle huidige batterijcellen met vloeibare elektrolyten ook een separator in het elektrolyt. Aangezien het elektrolyt vloeibaar is, zorgt de separator ervoor dat de anode en kathode elkaar niet fysiek kunnen raken. De functie van de separator is hiermee het voorkomen van interne kortsluiting. Hij speelt verder geen rol bij het opladen en ontladen of de elektrochemische reactie. In de toekomst zullen er ook batterijen met een vaste stof elektrolyt beschikbaar komen, waarbij de separator niet meer nodig is.

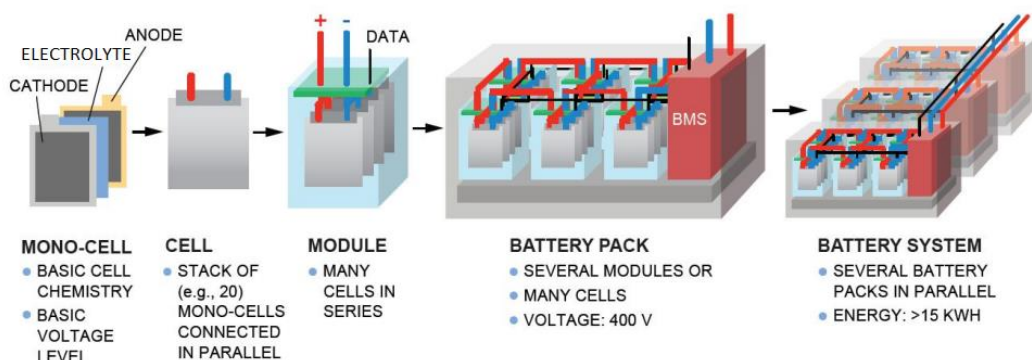
In Tabel 2.1 staat de functie van de drie basiscomponenten (anode, kathode en elektrolyt) en het SEI nog een keer samengevat.

Tabel 2.1 Werkzame componenten van batterijcel en SEI

Anode (-)	SEI	Elektrolyt en Separator	Kathode (+)
Minpool en plek waarin alle lithiumdeeltjes zich bevinden als de batterij volledig is opgeladen.	Microscopisch afzettingslaagje op de anode en noodzakelijk om de stabiliteit van de batterijcel te waarborgen.	Het elektrolyt is het medium waardoor lithiumionen heen en weer bewegen. Bij vloeibare elektrolyten zit er in het elektrolyt ook een separator. De separator is een ion-doorlatend membraam dat ervoor zorgt dat de anode en kathode elkaar niet fysiek kunnen raken.	Pluspool en plek waarin alle lithiumdeeltjes zich bevinden als de batterij leeg is.

2.2.2 Opbouw van het energieopslagsysteem

Met meerdere batterijcellen samen kan een energieopslagsysteem worden opgebouwd. In Figuur 2.4 is schematisch de opbouw van een Lithium-ion energieopslagsysteem weergegeven. De batterijcel vormt hierin de basiseenheid; deze bestaat uit een anode, kathode en elektrolyt. Meerdere batterijcellen samen vormen een batterijmodule. Deze batterijmodules worden samengevoegd in een batterijpakket en zijn aangesloten op een Battery Management System (BMS). Het BMS is verantwoordelijk voor het binnen operationele grenzen werken van de batterij en dus ook de veiligheid. Op dit moment regelt en stuurt het BMS vooral op moduleniveau. In de ideale situatie zou dit op individueel celniveau moeten zijn, want dan kan een afwijkende batterijcel in een vroeg stadium gedetecteerd en direct afgeschakeld worden. In lijn hiermee zijn er ontwikkelingen met 'slimme batterijen' die als het ware zichzelf kunnen monitoren (Battery 2030+). Een groter batterijsysteem kan uit meerdere batterijpakketten bestaan die aan elkaar zijn gekoppeld.



Source: Alexander Otto, Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems ENAS, presentation of May 30, 2012, "Battery Management Network for Fully Electrical Vehicles Featuring Smart Systems at Cell and Pack Level."

Figuur 2.4 Opbouw van Lithium-ion energieopslagsysteem

2.3 Systeemtypen

2.3.1 Huidige systemen: variaties aan de kathode

In Tabel 2.2 zijn de huidige subtypen Lithium-ion weergegeven. De naamgeving van de huidige Lithium-ion subtypen verwijst naar het materiaal van de kathode. Dit is in Tabel 2.2 weergegeven. De meeste innovaties aan de Lithium-ion batterij waren tot nu toe namelijk aan de kathode. De hoofduitdaging voor de kathode is in essentie om een zo hoog mogelijke energiedichtheid te behalen met ruim beschikbare elementen. Daarnaast wordt geprobeerd de poederdeeltjes waaruit de kathode bestaat van de optimale grootte te maken. Op dit moment worden voornamelijk nikkel, mangaan en kobalt gebruikt in de kathode van Lithium-ion batterijen. Fabrikanten willen steeds minder nikkel en kobalt gebruiken vanwege prijsfluctuaties en de onethische kant van de winning. Om die reden wordt LFP (Lithium-IJzer-Fosfaat) op dit moment steeds meer toegepast; dit kent minder materiaaltekorten en ethische problemen rondom de winning (Huijben, 2022).

Tabel 2.2 Huidige subtypen Lithium-ion: variaties aan de kathode

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
NMC	Grafiet	Vloeibaar, bestaand uit een mengsel van:	Lithium-nikkel-mangaan-kobaltoxide
NCA			Lithium-nikkel-kobaltoxide
LMO		> Lithiumzouten	Lithium-mangaanoxide
LTO		> Oplosmiddelen > Additieven	Lithiumtitanaat
LFP			Lithium-ijzer-fosfaat

In de toekomst zullen er ook nieuwe materialen voor de anode en het elektrolyt bijkomen. Hierin kan vervolgens worden gevarieerd en als gevolg hiervan zal de naamgeving niet altijd meer gekoppeld zijn aan het kathodemateriaal. In de volgende paragrafen is daarom duidelijk aangegeven aan de hand van de basiscomponenten wat de nieuw te verwachten subtypen inhouden.

2.3.2 Lithium-Silicium: nieuw materiaal voor de anode

Van oorsprong bestaat de anode van Lithium-ion batterijen uit grafiet en door de jaren heen zijn hieraan eigenlijk alleen maar kleine verbeteringen aan doorgevoerd. Om een grote stap voorwaarts te zetten in energiedichtheid is de overstap naar een nieuw materiaal nodig. In een vergevorderd stadium van ontwikkeling is silicium (Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Lithium-Silicium: nieuw materiaal voor de anode

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
Lithium-Silicium (Lithium-Silicon)	> Grafiet-Silicium nanodeeltjes > Puur Silicium	Huidige vloeibare elektrolyten	Huidige kathodematerialen

Lithium-Silicium of Lithium-Silicon is de term voor het eerste nieuwe subtype van Lithium-ion. Bij Lithium-Silicium is een hoeveelheid nanodeeltjes silicium aan de anode toegevoegd of is de hele anode van silicium gemaakt. Het grootste probleem bij de toepassing van silicium is dat silicium uitzet en weer krimpt gedurende het gebruik. In eerste instantie worden daarom anodes verwacht waarbij een kleine hoeveelheid silicium is toegevoegd aan het grafiet. Deze worden al gemaakt. Zodra er een geschikte oplossing is voor het uitzetten en krimpen zullen hiervoor ook anodes van puur silicium in de plaats komen (Sun et al. 2022).

2.3.3 Solid-State Lithium-ion

Solid-State Lithium-ion

Bij een solid-state batterij is het vloeibare elektrolyt vervangen door een vaste stof elektrolyt (Solid-State Electrolyte). Onder de kandidaats-materialen in ontwikkeling worden zogeheten Inorganic Solid Electrolytes (ISE) gezien als veelbelovend. Deze materiaalsoort heeft namelijk een hoge ionische geleidbaarheid (laat makkelijk lithiumionen door) en is niet brandbaar. Op dit moment wordt veel verwacht van op granaat (een groep mineralen) en sulfide gebaseerde ISE (Guo et al. 2022).

Daarnaast neemt een vaste stof minder ruimte in. Hierdoor is minder verpakkingsmateriaal nodig en wordt tegelijkertijd de energiedichtheid in termen van kWh per kilogram batterijcellen verhoogd. Er wordt volop geëxperimenteerd met allerlei potentiële materialen en composietmaterialen. Het is nog niet bekend welke materialen daarvan 'de winnaars' worden, maar veel bedrijven claimen desondanks vergevorderd te zijn met de ontwikkeling van solid-state batterijen (Huijben, 2022).

Tabel 2.4 Solid-State: nieuwe vaste stoffen voor het elektrolyt

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
Hybrid-Solid-State Lithium-ion	Huidige en nieuwe anodematerialen	Combinatie van vloeibaar en vaste stof elektrolyt, als aanloopfase naar een volledig vast elektrolyt.	Huidige en nieuwe kathodematerialen
Solid-State Lithium-ion		Vaste stof elektrolyt > Inorganic Solid Electrolytes > Garnet-based > Sulfide-based > Polymer-based	

Hybrid-Solid-State

Onder de noemer solid-state batterijen vallen vaak ook zogeheten hybrid solid-state batterijen. De hybrid solid-state, quasi solid-state of liquid-solid batterijen zijn in zekere zin een soort tussenstap naar de batterijen met een volledig vast elektrolyt. De toepassing van een hybride elektrolyt houdt in dat een kleinere hoeveelheid vloeibaar elektrolyt al dan niet in combinatie met een vaste stof elektrolyt is gebruikt. Enkele fabrikanten is het al gelukt om de productie van hybrid solid-state batterijen op te zetten (Yu et al. 2022).

2.3.4 Lithium-Metal (All-Solid-State Lithium-ion)

Bij Lithium-Metal is de anode gemaakt van puur lithiumpmetaal. De capaciteit van de anode is hiermee maximaal. Het probleem bij een anode van puur lithiumpmetaal is echter dat gedurende het gebruik lithiumionen zich ongelijkmatig vastnestelen op het oppervlak van de

anode en zo een ongewenste en uitstekende vertakking (dendriet) vormen. Dendrieten kunnen vanuit de anode door het inwendige van de batterijcel heen groeien en interne kortsluiting veroorzaken. De vorming van dendrieten is tevens een probleem bij de huidige Lithium-ion batterijen, en juist bij een anode van puur lithiummetaal is de vorming van dendrieten het sterkst. Als oplossing hiervoor wordt gewerkt aan allerlei tussenlaagjes en coatings (Huijben, 2022). In aanvulling hierop wordt ook gezocht naar een aangepast elektrolyt (Zhang et al. 2021).

Van de combinatie van een vaste stof elektrolyt met een anode van puur lithiummetaal zijn de verwachtingen hoog (Huo et al. 2021). Deze combinatie betekent namelijk een winst in zowel energiedichtheid als stabiliteit. Tegelijkertijd houdt dit in dat pas na de introductie van Solid-State batterijen de eerste (Solid-State) Lithium-Metal batterijen worden verwacht. In de wetenschappelijke literatuur wordt hiervoor ook de term All-Solid-State gebruikt. Lithium-Zwavel (Lithium-Sulphur) wordt ook wel eens genoemd. Met Lithium-Zwavel wordt doorgaans een toekomstig Lithium-Metal subtype bedoeld, waarbij zwavel als nieuw kathodemateriaal is toegepast.

Tabel 2.5 Lithium-Metal: anodes van puur lithiummetaal

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
Lithium-Metal All-Solid-State	Puur lithiummetaal	Vaste stof elektrolyt > Inorganic Solid Electrolytes > Garnet-based > Sulfide-based	Huidige en nieuwe kathodematerialen
Lithium-Air	Puur lithiummetaal	Nog onbekend	Lucht

Lithium-Air

In de theoretisch ideale batterij is de anode gemaakt van puur lithiummetaal en de kathode van lucht. Aan het einde van de tijdlijn van nieuwe subtypen Lithium-ion batterijen staat daarom Lithium-Air. Er wordt al geruime tijd onderzoek gedaan naar dit theoretische concept, maar tot nu toe is er nog geen stabiel ontwerp geschikt voor productie (Matsuda et al. 2022). Over dit theoretisch ideale subtype zijn daarom op dit moment nog geen concrete uitspraken te doen.

2.4 Literatuurstudie Veiligheid: huidige situatie

Bij huidige Lithium-ion batterijen wordt de thermal runaway als het belangrijkste veiligheidsrisico gezien (Zhang et al. 2021). In deze paragraaf wordt het begrip thermal runaway toegelicht op basis van onze huidige kennis over Lithium-ion batterijen.

2.4.1 Thermal Runaway

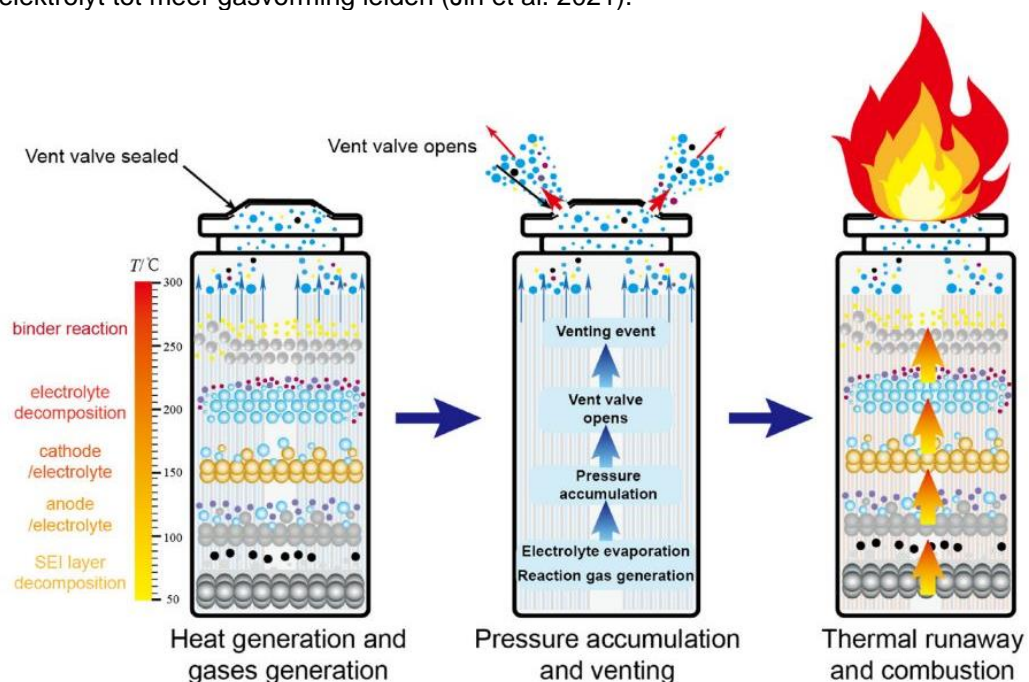
Het inwendige van de batterijcel is ontworpen om onder normale gebruiksomstandigheden stabiel te blijven. Dit is van belang, omdat er tijdens het opladen en ontladen voortdurend elektrochemische reacties plaatsvinden. Zodra de inwendige componenten of het beschermlaagje (SEI) echter beschadigd raken, wordt het elektrochemische proces

verstoord. De oorzaken hiervan worden onderverdeeld in de categorieën thermisch, elektrisch en mechanisch. Voorbeelden van thermische oorzaken zijn oververhitting of een externe brand. Elektrische oorzaken zijn bijvoorbeeld overladen, diepontlading of geforceerd opladen met te hoge stromen. Mechanische oorzaken kunnen doorboring of verpletting zijn. Belangrijk hierbij is dat het verloop van een thermal runaway en de aard van de effecten bij alle drie de oorzaken gelijk kunnen zijn (Christensen, 2022).

In aanvulling daarop kan veroudering of degradatie van de batterijcel van invloed zijn. Plating en de vorming van dendrietten zijn daar voorbeelden van. Plating houdt in dat lithiumionen worden geforceerd door het opladen met een te hoge laadstroom of bij lage temperaturen en daardoor niet in de anode worden opgenomen, maar een afzettinglaagje van lithiummetaal op de anode vormen. Plating kan op termijn de vorming van dendrietten bevorderen.

In aanloop naar een thermal runaway warmt de batterijcel op, waardoor het gewone elektrochemische proces in de cel verstoord raakt. Dit houdt in dat ongewenste chemische reacties het gewone proces verdringen. De ongewenste processen kunnen al beginnen bij een temperatuur vanaf 60 °C. Dit zijn exotherme reacties waarbij hitte vrijkomt, evenals een grote hoeveelheid toxische en brandbare gassen. Het inwendige van de batterij raakt hierdoor steeds verder beschadigd en de batterijcel warmt op (Wu, 2021). In het algemeen vindt eerst afbraak van het SEI plaats, daarna van elektrolyt en anode en uiteindelijk van de kathode. Zodra een temperatuur rond de 200 °C wordt bereikt – afhankelijk van het subtype – gaan de exotherme reacties en hitteontwikkeling zich zodanig versterken dat de situatie catastrofaal wordt. Vanaf dit kantelpunt is er sprake van een thermal runaway.

In essentie houdt het ongewenste proces vanaf dat moment zichzelf in stand en nemen de ongewenste reacties (met hittevorming en drukopbouw door de gevormde gassen) gestaag toe. De verhitte batterijcel breekt als gevolg hiervan open, waardoor de gevormde brandbare en toxische gassen vrijkomen (Figuur 2.5). In aanvulling hierop zal verdamping van het elektrolyt tot meer gasvorming leiden (Jin et al. 2021).



Figuur 2.5 Thermal Runaway (Kong et al. 2022)

Door **thermische propagatie** (het aanstralen van naburige batterijcellen) kan het proces zich uitbreiden naar andere batterijcellen, waardoor deze opeenvolgend ook in thermal runaway raken (Figuur 2.6).



Figuur 2.6 Thermische propagatie (bron: evservice.eu)

2.4.2 Effecten van een thermal runaway

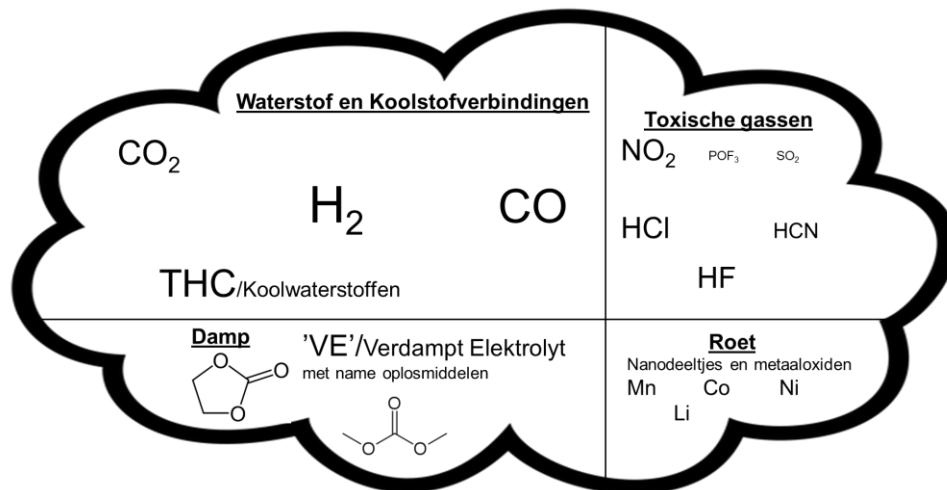
De effecten van een thermal runaway kunnen zijn:

- > vrijkomen van een toxisch en brandbaar gasmengsel
- > batterijbrand
- > dampwolkexplosie / wolkbrand

Vrijkomen van een toxisch en brandbaar gasmengsel

Tijdens een thermal runaway komen brandbare en toxische gassen vrij. Het openbreken van batterijcellen maakt een ploffend geluid en het vrijkomen van de gassen een sissend geluid.

Gassen en dampen die onder meer vrijkomen zijn weergegeven in Figuur 2.7 op de volgende pagina. De grootte van de letters geven hierin een indicatie voor de hoeveelheid (het volume) die per gas vrijkomt. THC staat in deze figuur voor Total Hydrocarbon Content. Zowel gasvolume als gaspercentages variëren sterk per type batterij en daarmee per incident (Baird et al. 2019; Christensen 2022). Verder is er slechts in beperkte mate wetenschappelijk onderzoek uitgevoerd naar de exacte samenstelling, verhouding en volume van het gasmengsel zelf. Bovendien is het experimenteel gezien lastig om de (volledige) gaswolk te analyseren en ontsteekt de wolk tijdens de meeste incidenten. In elk van de bekeken artikelen en experimenten werd slechts een deel van het gasmengsel geanalyseerd. Voor het samenstellen van deze figuur zijn daarom resultaten van verschillende wetenschappelijke artikelen samengevoegd. De samenstelling van de gassen is daarnaast afhankelijk van het subtype en de State of Charge.



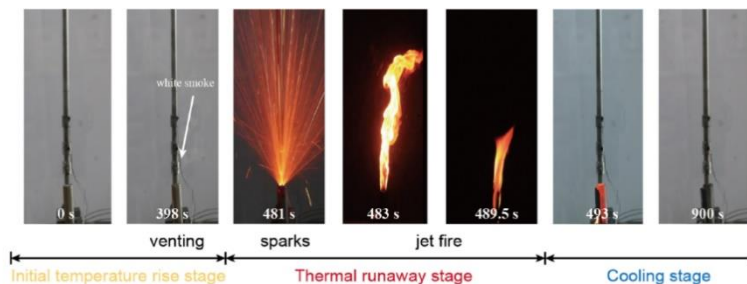
Figuur 2.7 Toxisch en brandbaar gasmengsel Thermal Runaway Lithium-ion

Batterijbrand

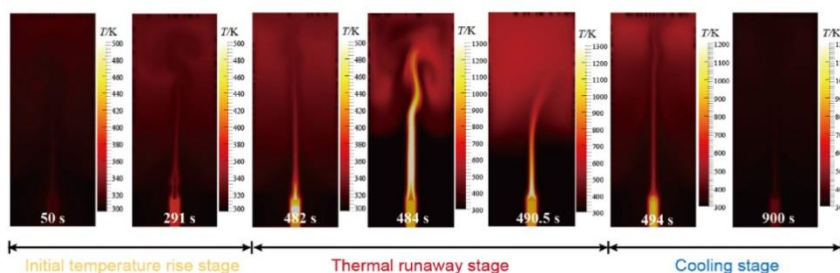
In de meeste gevallen is sprake van een directe ontsteking van de brandbare gassen, wat leidt tot een brand in een batterijpakket. Tijdens een batterijbrand vinden met tussenpozen fakkels en explosies plaats, wat wordt verklaard door het opeenvolgend openbreken of exploderen van individuele batterijcellen. Het brandgedrag van een enkele batterijcel ten gevolge van thermal runaway kan namelijk worden beschreven in drie fasen en is hieronder weergegeven in Figuur 2.8 (Kong et al. 2022):

1. verhitting van de batterijcel tot het moment van ontsteking
2. het openbreken van de batterijcel gepaard met een heftige fakkels
3. een afnemende fase.

Doordat tijdens de brand de hitte zich verder over batterijcellen verspreidt (thermische propagatie), raken telkens nieuwe batterijcellen en daaropvolgend batterijmodules in thermal runaway. Zo kan binnen enkele minuten een beginnende brand van een of enkele cellen zich al snel uitbreiden.



(a) Experiment results of the overall evolution for the cell under thermal abuse



(b) Simulation results of the overall evolution for the cell under thermal abuse

Figuur 2.8 Brandverloop van enkele batterijcel tijdens thermal runaway (bron: Kong et al. 2022)

Dampwolkeexplosie / wolkbrand

Onder bepaalde omstandigheden kan het voorkomen dat er geen directe ontsteking plaatsvindt tijdens een thermal runaway. Bij vertraagde ontsteking kan dan een hevige dampwolkeexplosie plaatsvinden door de opgehoopte gassen. In het bijzonder moet in situaties waarbij de gasconcentratie niet tijdig kan worden verlaagd of bij het falen van noodventilatie met het gevaar op explosie rekening worden gehouden. De meest recente inzichten geven aan dat ook verdampte elektrolyten bijdragen aan het explosiegevaar (Jin et al. 2021).

Bestrijdbaarheid

Het feit dat een thermal runaway zichzelf in stand houdt maakt dat de bestrijding ervan moeizaam verloopt. Daarbovenop komt het feit dat batterijcellen doorgaans goed zijn verpakt, wat koeling van buitenaf lastig maakt. Als gevolg daarvan is een brand veroorzaakt door een thermal runaway langdurig. Opgemerkt dient te worden dat de thermal runaway niet direct stopt zodra de brand is geblust. Zolang de gasproductie door de thermal runaway nog in gang is of de batterij instabiel, blijft het gevaar op herontsteking en explosie bestaan (Christensen, 2022).

2.4.3 Verband tussen batterijchemie en ernst van thermal runaway

Op dit moment wordt de brandbaarheid van huidige vloeibare elektrolyten als het voornaamste intrinsieke veiligheidsprobleem gezien (Zhang et al. 2021). Dit betekent dat het elektrolyt een belangrijke factor voor de stabiliteit van de batterijcel is en daarmee de veiligheid. Ter vermindering van dit probleem met de huidige batterijtypen bestaan verschillende strategieën, waaronder het toevoegen van allerlei additieven zoals brandvertragers. Van betekenis is dat de samenstelling en stabiliteit van het elektrolyt de grootste invloed hebben op zowel de kansen als effecten van een thermal runaway.

Naast de invloed van het gebruikte elektrolyt blijkt uit incidentdata dat de ernst van de effecten bij incidenten met NMC-batterijen groter is dan bij LFP-batterijen. Aangezien de energiedichtheid van een NMC-kathode hoger is dan een LFP-kathode, wijst dit op een statistische correlatie tussen energiedichtheid van de kathode en effectgrootte van een incident (Yu et al. 2022).

2.5 Literatuurstudie Veiligheid: toekomstige subtypen

2.5.1 Lithium-Silicium

Eenzijds laten thermische testen door producenten van silicium anodes zien dat hun nieuwe materialen thermisch stabiel zijn en er zodoende geen aanwijzingen zijn dat het materiaal zelf brandgevaarlijk is. Anderzijds geven zij aan dat het voor hen nog onbekend is welke invloed het toevoegen van silicium aan de anode heeft op het gedrag van batterijcellen tijdens incidenten. De reden hiervan is dat producenten van silicium anodes alleen het materiaal voor de anodes leveren, dat door batterijfabrikanten wordt verwerkt in de huidige batterijen (Huijben, 2022; Spreafico, 2022).

Zolang nog gebruikgemaakt wordt van vloeibare elektrolyten is een belangrijke bron van de veiligheidsrisico's nog aanwezig. Zo is dan een thermal runaway nog zeker mogelijk. Fabrikanten van silicium anodes verwachten veiligheidswinst te behalen zodra hun silicium anodes in Solid-State Lithium batterijen worden verwerkt (zie de volgende paragraaf). De

verwachting van Lithium-Silicium is in beginsel een verbetering in prestaties, maar nog niet in veiligheid (Huijben, 2022; Spreafico, 2022; Li et al. 2022; Wang et al. 2022).

2.5.2 Solid-State Lithium-ion

Er wordt veel verwacht van solid-state batterijen als het gaat om veiligheidswinst. In de wetenschappelijke literatuur is overeenstemming over het vooruitzicht dat met Solid-State Lithium de veiligheid van Lithium-ion batterijen wordt verhoogd. De vooruitzichten zijn namelijk dat de mechanische, elektrische en thermische stabiliteit van de batterijcellen hiermee wordt verhoogd. Een vast materiaal is sterker en een aantal belangrijke potentiële materialen zijn bovendien niet brandbaar. Daarnaast wordt de kans op de vorming van dendrietten verminderd, doordat een vaste stof de vorming ervan onderdrukt. Als gevolg hiervan wordt de veiligheid van dit batterijtype bijna als een vanzelfsprekendheid gezien (Guo et al. 2022).

Toch moet deze vanzelfsprekendheid op dit moment nog genuanceerd worden, omdat veiligheidsrisico's niet volledig kunnen worden uitgesloten. Zo is het nog onduidelijk of de vorming van dendrietten nog problematisch zal zijn, zoals bij een falend battery management system of extreem overladen. Ook is het brandgedrag van een falende batterijcel tijdens een incident nog onbekend en ontbreekt kennis over het (mogelijke) proces van thermal runaway in Solid-State Lithium (Guo et al. 2022).

Daarnaast is een vaste stof elektrolyt niet onbreekbaar. Bij een botsing of door externe druk veroorzaakt door het stapelen van batterijcellen bij grotere systemen kan het elektrolyt alsnog barsten of scheuren en kortsluiting ontstaan. Uit experimenten is gebleken dat bij kortsluiting of beschadiging nog steeds giftige en brandbare gassen kunnen vrijkomen. Bij hoge temperaturen kunnen deze gassen ontbranden (Huo et al. 2022; Chen et al. 2020; Chung et al. 2017; Guo et al. 2022; Wu et al. 2022).

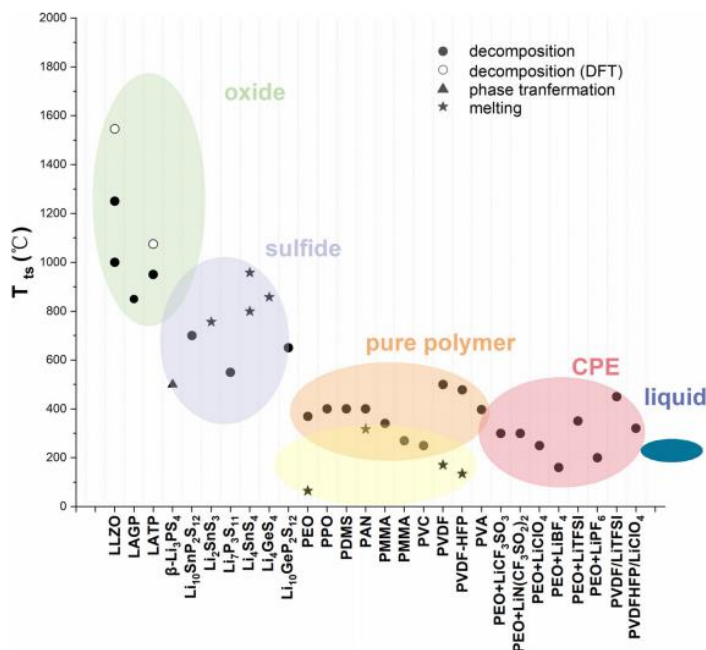
In al deze gevallen blijft de kans op ongewenste chemische reacties en het daaruit vrijkomen van giftige en brandbare gassen bestaan (Huo et al. 2022; Chen et al. 2020; Chung et al. 2017; Guo et al. 2022; Wu et al. 2022). Wel is bekend dat de vrijgekomen hitte bij ontbranding lager is dan bij batterijen met vloeibare elektrolyten. Verder wordt de kans op explosie verlaagd, omdat er minder brandbare gassen en dampen vrijkomen (Huijben 2022; Wu et al. 2022).

Ten slotte is het van belang om te benadrukken dat een groot aantal potentiële materialen in ontwikkeling is met elk hun eigen verschillende eigenschappen. Zo kan het veiligheidsvoordeel van het ene materiaal niet van toepassing zijn voor het andere materiaal. De algemene verwachting is echter wel dat Solid-State aanzienlijke veiligheidsvoordelen oplevert en dat zowel de kans op als het effect van de thermal runaway verminderen.

Thermal Runaway bij Solid-State batterijen

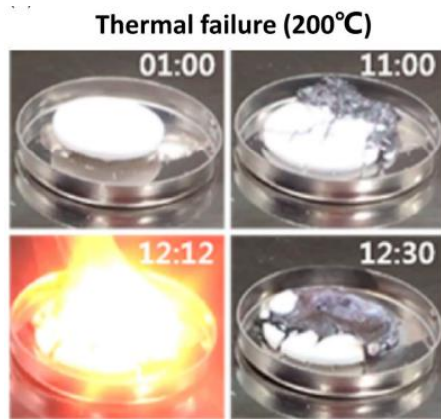
Uit het bovenstaande blijkt dat Solid-State batterijen gunstiger eigenschappen hebben dan de huidige batterijen. Een belangrijke vraag is of een thermal runaway nog steeds kan plaatsvinden bij Solid-State batterijen. Er wordt namelijk vaak beweerd dat een thermal runaway uitgesloten zou zijn bij Solid-State batterijen. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen is onder meer contact gezocht met drie experts verbonden aan de Universiteit van Tianjin die specifiek hiernaar onderzoek hebben gedaan (Wu et al. 2022).

Allereerst is het belangrijk om te benadrukken dat voor de hybride Solid-State batterijen geldt dat het thermal-runaway-proces vergelijkbaar is met dat van de huidige Lithium-ion batterijen. Voor de nieuwe solid-state batterijen met een vaste stof elektrolyt geldt dat er in wezen nog een gebrek aan kennis is over het (mogelijke) proces van thermal runaway. Op basis van meerdere onderzoeken (Wu et al. 2021, Wu et al. 2022, Huang et al. 2022 en Bates et al. 2022) kan wel gezegd worden dat een thermal runaway bij Solid-State batterijen in ieder geval plaats zal vinden bij hogere temperaturen dan bij de huidige Lithium-ion batterijen met een vloeibaar elektrolyt. Dit is in overeenstemming met Figuur 2.9 (Wu et al. 2021). Hierin zijn de afbraaktemperaturen weergegeven van verschillende kandidaat-materialen voor het vaste stof elektrolyt en ter vergelijking in het blauw van vloeibare elektrolyten. Dit zijn de temperaturen waarbij het materiaal smelt, een faseovergang ingaat of wordt afgebroken, hetgeen ook bij een thermal runaway gebeurt. Uit de figuur wordt direct zichtbaar dat de afbraaktemperaturen van Solid-State elektrolyten hoger liggen dan bij vloeibare elektrolyten, hetgeen een hogere thermische stabiliteit impliceert. De stabiele gebruikstemperatuur is namelijk groter.



Figuur 2.9 Afbraaktemperaturen Vaste Stof Elektrolyt-kandidaten (bron: Wu et al. 2021)

Hierbij dient een belangrijke kanttekening geplaatst te worden. Al mocht het vaste stof elektrolyt zelf onbrandbaar of stabiel zijn, dan kan alsnog lithiummetaal bij temperaturen vanaf 180 °C ontbranden. Dit bleek ook tijdens laboratoriumtesten zoals weergegeven in Figuur 2.10. Daarnaast kan bij temperaturen vanaf 250 °C ook de kathode in thermal runaway raken (Wu et al. 2022; Guo et al. 2022; Wu et al. 2021).



Figuur 2.10 Thermisch falen puur lithiummetaal (bron: Wu et al. 2021)

Hoewel een thermal runaway niet volledig is uit te sluiten, tonen wetenschappelijke studies wel aan dat de vrijgekomen energie lager is. Dit houdt in dat de te verwachten effecten minder heftig zijn (Yu et al. 2022). De veiligheidsvooruitzichten van Solid-State batterijen zijn dus gunstig, maar incidenten worden niet helemaal uitgesloten.

2.5.3 Lithium-Metal (All-Solid-State)

De term Lithium-Metal wordt ook gebruikt voor reeds bestaande niet-oplaadbare Lithium-Metal batterijen, ook wel primaire cellen genoemd. Deze paragraaf richt zich op de nieuw te ontwikkelen oplaadbare Lithium-Metal batterijen.

De sterke vorming van dendrieten bij anodes van puur lithiummetaal vormt een belangrijk stabiliteitsprobleem bij de ontwikkeling van Lithium-Metal batterijen (Jiang et al. 2022). Als gevolg hiervan blijft de kans op interne kortsluiting in belangrijke mate aanwezig, waardoor een Lithium-Metal batterij voor wat betreft het aspect interne kortsluiting niet per se veiliger wordt dan de huidige Lithium-ion batterijen (Bates et al. 2022).

Bijkomend veiligheidsprobleem is daarbij dat lithiummetaal zeer reactief is met zuurstof en kan ontbranden. Bij een incident met puur lithiummetaal moet daarom al het lithiummetaal volledig zijn uitgebrand of veilig gesteld (Guo et al. 2022). Om deze redenen wordt beargumenteerd dat een niet-brandbaar elektrolyt gewenst of zelfs noodzakelijk is (Zhang et al. 2021). Een vaste stof elektrolyt vormt, zoals beschreven, hiervoor een kandidaat die veel aandacht heeft, omdat de combinatie ervan met een anode van puur lithiummetaal stabiel lijkt. Solid-State Lithium-Metal batterijen zijn daarom het logische vervolg van de eerste generaties solid-state batterijen.

Voor de eerste Lithium-Metal batterijen zijn dus nog een aantal stappen te zetten om de stabiliteitsproblemen behorend bij puur lithiummetaal op te lossen. Dit maakt het lastig om al concrete uitspraken te doen over de veiligheid. Uit de studies blijkt wel dat ook voor anodes van puur lithiummetaal geldt dat de veiligheid hoger is bij toepassing van een vaste stof elektrolyt dan van een vloeibaar elektrolyt (Yu et al. 2022). Voor wat betreft Lithium-Zwavel batterijen geldt dat, net als bij de experimenten bij Solid-State batterijen, een thermal runaway kan plaatsvinden bij hogere temperaturen in vergelijking met de huidige subtypen (Huang et al. 2022).

2.6 Veiligheidsanalyse

In onderstaand schema (Tabel 2.6) is onze veiligheidsanalyse aan de hand van de literatuurstudie naar nieuwe generatie Lithium-ion batterijen weergegeven. Hierin zijn onze verwachtingen voor de kans op, effecten en bestrijdbaarheid van incidenten met de nieuwe batterijtypen weergegeven op basis van de criteria genoemd in de onderzoeksmethode. Het huidige subtype Li-ion NMC is als basis gebruikt en de nieuwe subtypen worden hiermee vergeleken.

Tabel 2.6 Veiligheidsanalyse Lithium-ion

	Kans	Effect	Bestrijdbaarheid
Li-ion NMC	Door mechanische, thermische of elektrische faaloorzaken kan een thermal runaway ontstaan. Er wordt gebruikgemaakt van een brandbaar vloeibaar elektrolyt dat een lage stabiliteitsmarge heeft.	Brand, explosie en een toxische wolk zijn alle drie reële effecten bij een thermal runaway. Deze effecten zijn ernstig .	De bestrijdbaarheid van het incident is problematisch door de thermal runaway. Daarnaast komt er een grote hoeveelheid toxische en brandbare gassen vrij, die een bedreiging vormt voor omstanders.
Li-ion LFP	De kans op thermal runaway hangt in eerste instantie samen met de stabiliteit van het elektrolyt. Het elektrolyt is van dezelfde samenstelling als bij NMC-batterijen; zodoende is de kans op een incident vergelijkbaar.	De aard van de effecten is hetzelfde als bij Li-ion NMC. Wel kan de ernst ervan lager zijn doordat de energiedichtheid van LFP lager is.	Vergelijkbaar met NMC.
Lithium-Silicium	Vergelijkbaar met Li-ion NMC en LFP.	Vergelijkbaar met Li-ion NMC.	Vergelijkbaar met Li-ion NMC en LFP.
Hybrid-Solid-State	Het thermal runaway proces is vergelijkbaar, maar er zit minder vloeibaar elektrolyt in de batterijcel waardoor de stabiliteit enigszins verbeterd moet zijn. De kans op een incident is naar verwachting iets lager .	De aard van de effecten is hetzelfde als bij Li-ion NMC. Wel kan de ernst ervan lager zijn doordat er minder brandbaar elektrolyt in zit verwerkt.	Vergelijkbaar met Li-ion NMC en LFP.
Solid-State Lithium-ion	Mechanische, thermische en elektrische stabiliteit zullen alle toenemen. De stabiliteitsmarge van het elektrolyt neemt aanzienlijk toe. De kans op een incident zal daarmee aanzienlijk lager zijn.	Er komt minder hitte vrij bij een thermal runaway en de kans op een explosie is lager. Effecten (brand, explosie en toxische wolk) zijn nog wel mogelijk .	Doordat er minder hitte vrijkomt, zal de snelheid van thermische propagatie lager moeten zijn. Dit houdt in dat de thermal runaway makkelijker beperkt moet kunnen worden tot een module.

Lithium-Metal / All-Solid-State	Door toepassing van het vaste stof elektrolyt wordt de stabiliteit aanzienlijk verhoogd. Echter, puur lithiummetaal kan probleem vormen en hiervoor is nog geen gedegen oplossing.	Er komt minder hitte vrij bij een thermal runaway en de kans op een explosie is lager.	In principe moet deze verbeterd zijn, omdat kans op en effect van een thermal runaway zijn verlaagd. Een nieuw probleem is dat puur lithiummetaal veilig gesteld moet worden, omdat het zeer reactief is met zuurstof en water.
--	---	---	--

3 Sodium-ion (Natrium-ion)

3.1 Inleiding

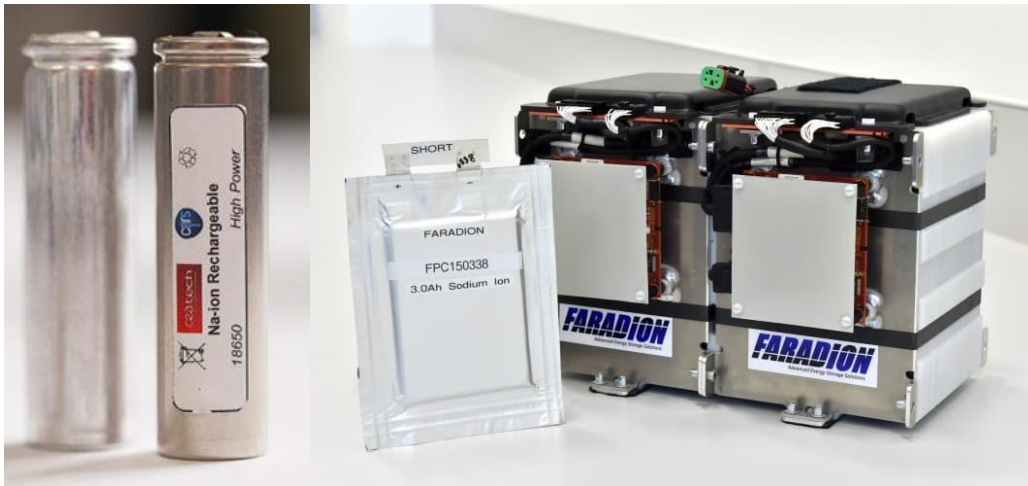
Sodium-ion of Natrium-ion batterijen hebben dezelfde werkingsprincipes als Lithium-ion batterijen; de systemen zijn ook op dezelfde manier opgebouwd. (Het chemische symbool van natrium is Na, de Engelse benaming is sodium.) Lithium-ion batterijen zijn echter al geruime tijd op de markt, terwijl Sodium-ion batterijen nieuw zijn. Dit kan worden verklaard door het feit dat lithiumdeeltjes kleiner zijn dan natriumdeeltjes. Lithiumdeeltjes kunnen daardoor makkelijker door het inwendige van een batterij kunnen bewegen. Ook zijn Lithium-ion batterijcellen in verhouding lichter, waardoor de energiedichtheid (kWh per kg) hoger is. Het voordeel van natrium daarentegen is dat er veel meer van op de wereld beschikbaar is. Daardoor zal de winning ervan eenvoudiger zijn. Dit maakt dat het nieuwe type Sodium-ion batterijen met name interessant zal zijn voor de stationaire opslag, zoals thuisbatterijen en buurtbatterijen, omdat beperking van het gewicht daarbij minder belangrijk is dan bijvoorbeeld voor elektrische voertuigen. De uitvindingen die voortvloeien uit de ontwikkeling van Lithium-ion batterijen kunnen op termijn ook op Sodium-ion batterijen worden toegepast.

Dit hoofdstuk gaat over het nieuwe batterijtype Sodium-ion. Dit dient niet verward te worden met de Molten Salt battery, een ander reeds bestaand batterijtype. Andere termen voor de Molten Salt battery zijn SMC (Sodium Metal Chloride), ZEBRA of zoutbatterij. De Molten Salt battery is niet hetzelfde type als de sodium-ion batterij. Het heeft weliswaar ook natrium (sodium) als grondstof, maar dan in de vorm van gesmolten zout op een temperatuur van ongeveer 250 graden Celsius.

3.2 Systeembeschrijving

Zoals hierboven beschreven is het werkingsprincipe van Sodium-ion in essentie gelijk aan dat van de Lithium-ion batterijen (zie Paragraaf 2.2). Van buitenaf zien Sodium-ion batterijen er dan ook hetzelfde uit (Figuur 11). Het verschil zit in de binnenkant, op microscopisch niveau. Er bewegen namelijk natriumionen heen en weer in plaats van lithiumionen. In de bijbehorende elektrochemische reactie zijn in de plaats daarvan dan ook natriumionen (Na^+) en elektronen (e^-) betrokken.

In de ontwikkeling van de Sodium-ion batterij wordt de huidige kennis over Lithium-ion veelvuldig toegepast. De uitdaging hierbij is dat natriumionen groter zijn dan lithiumionen en daardoor lastiger door het materiaal van de batterij bewegen. De verwachting is dat we daarom in de eerste generaties Sodium-ion batterijen bekende materialen en technieken zullen terugzien die ook in de huidige generaties Lithium-ion worden gebruikt. Deze materialen laten namelijk in de regel makkelijker toepasbaar en deeltjes door in tegenstelling tot de meer geavanceerde materialen. Als materiaal voor de anode wordt bijvoorbeeld aan hard carbon gewerkt. Op de langere termijn zullen uiteindelijk de innovaties op het gebied van Lithium-ion ook toegepast kunnen worden op Sodium-ion (Kallitsis et al. 2022; Huijben, 2022).



Figuur 11 Natrium-ion cilindrische cel, pouch cell en module (bron: Faradion)

3.3 Systeemtypen

Net als bij de Lithium-ion batterij kunnen bij de Na-ion batterij verschillende werkzame materialen worden gebruikt voor de anode, kathode en het elektrolyt. Naar verwachting zal de ontwikkeling van subtypen Na-ion via een soortgelijke keten verlopen als bij Lithium-ion (Lu et al. 2019; Huijben, 2022). Die ontwikkeling is globaal weergegeven in Tabel 3.1. In eerste instantie zullen Natrium-ion batterijen met een vloeibaar elektrolyt op de markt komen en een anode van op koolstof gebaseerde materialen. De eerste kathodes kunnen zijn samengesteld uit nikkel en mangaan, zogeheten transitie-metalen. Op termijn zijn verbeterde anodes en kathodes te verwachten en zullen de eerste vaste stof elektrolyten beschikbaar komen, waardoor er ook Solid-State Natrium-ion batterijen zullen ontstaan.

Tabel 3.1 Mogelijke materialen Natrium-ion

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
Sodium-ion	Diverse anodematerialen zijn in ontwikkeling, waaruit verschillende subtypen zullen ontstaan: > Cold Based Carbon > Hard Carbon > Titaniumnitride	Vloeibaar, bestaand uit een mengsel van: > Natriumzouten > Oplosmiddelen > Additieven	Diverse kathodematerialen zijn in ontwikkeling, waaruit verschillende subtypen zullen ontstaan: > Natrium- transitie-metaal-oxiden > Polyanion
Hybrid-Solid-State		Combinatie van vloeibaar en vaste stof elektrolyt, als aanloopfase naar een volledig vast elektrolyt.	
Solid-State Sodium-ion		Toekomstig vaste stof elektrolyt	

3.4 Literatuurstudie Veiligheid

De wetenschappelijke literatuur over de veiligheid van Natrium-ion is nog beperkt. Uit de beschikbare studies komt naar voren dat de veiligheidsproblematiek vooralsnog vergelijkbaar is met die van Lithium-ion batterijen (Wang et al. 2019). Zo zijn in een experiment een Lithium-ion en Natrium-ion pouch cel onder dezelfde omstandigheden in thermal runaway gebracht (Robinson et al. 2017). De conclusie van dit experiment was dat tijdens een thermal runaway vergelijkbare ongewenste reacties plaatsvinden in beide batterijcellen, namelijk exotherme reacties die hitte produceren en toxische en brandbare gassen. De samenstelling van de vrijkomende gassen en dampen bleek uit een experimentele analyse van vergelijkbare aard als bij de huidige Lithium-ion batterijen (Bordes et al. 2022).

Wel leek de thermal runaway in de Natrium-ion batterijcel langzamer te verlopen. Uit een ander experiment bleek dat het materiaal van de kathode van een Natrium-ion batterij in thermal runaway raakt bij 254 graden Celsius. Deze temperatuur is vergelijkbaar met die van een kathode in een Lithium-ion batterij (Cui et al. 2022).

Tevens wordt bij Natrium-ion batterijen het elektrolyt als belangrijke factor voor de stabiliteit benoemd. Aangezien er op dit moment nog geen geschikt vaste stof elektrolyt bestaat, zullen we eerst Natrium-ion batterijen met een vloeibaar elektrolyt zien, waarbij wel gezocht wordt naar geschikte additieven om de veiligheid te verbeteren. Het lastige hierbij is dat uit testen blijkt dat een minieme wijziging in de mengverhouding van het elektrolyt direct invloed heeft op de elektrochemische prestaties (Mosallanejad et al. 2021).

Solid-State Sodium-ion

De veiligheidswinst van vaste stof elektrolyten bij Lithium-ion wordt ook bij Natrium-ion batterijen verwacht. In de literatuur wordt geschreven dat de ionische geleidbaarheid van de meeste kandidaat-materialen lager is, hetgeen op dit moment een afname in de prestaties zou betekenen ten opzichte van de minder veilige vloeibare elektrolyten. Vooral op dit vlak is daarom nog vooruitgang te boeken bij ontwikkelaars (Wang et al. 2019).

3.5 Veiligheidsanalyse

In onderstaand schema (Tabel 3.2) is onze veiligheidsanalyse aan de hand van de literatuurstudie naar Natrium-ion batterijen weergegeven. Aangezien uit de literatuurstudie bleek dat de veiligheidsproblematiek vergelijkbaar is met die van Lithium-ion batterijen, zijn kans op, effecten en bestrijdbaarheid van incidenten met Natrium-ion batterijen vergeleken met die van Lithium-ion batterijen.

Tabel 3.2 Veiligheidsanalyse Sodium-ion

	Kans	Effect	Bestrijdbaarheid
Sodium-ion	Door mechanische, thermische of elektrische faaloorzaken kan een thermal runaway ontstaan. Er wordt gebruikgemaakt van een brandbaar vloeibaar elektrolyt dat een lage stabiliteitsmarge heeft, waardoor de kans op een incident vergelijkbaar is met de huidige Li-ion batterijen.	Brand, explosie en een toxische wolk zijn alle drie reële effecten bij een thermal runaway.	Ervan uitgaand dat dezelfde knelpunten bestaan als bij Li-ion zal bestrijding vooralsnog problematisch zijn. Uit een experiment blijkt dat het thermal-runaway-proces iets langzamer verloopt.
Solid-State Sodium-ion	De kans op een incident wordt lager . Mechanische, thermische en elektrische stabiliteit zullen alle toenemen. De stabiliteitsmarge van het elektrolyt neemt aanzienlijk toe.	Er komt minder hitte vrij bij een thermal runaway en de kans op explosie is lager. Houd er rekening mee dat alle effecten (brand, explosie en toxische wolk) nog wel mogelijk zijn.	Doordat er minder hitte vrijkomt, zal de snelheid van thermische propagatie naar verwachting lager zijn. Dit houdt in dat de thermal runaway makkelijker beperkt kan worden tot een module.

4 Redox-Flow

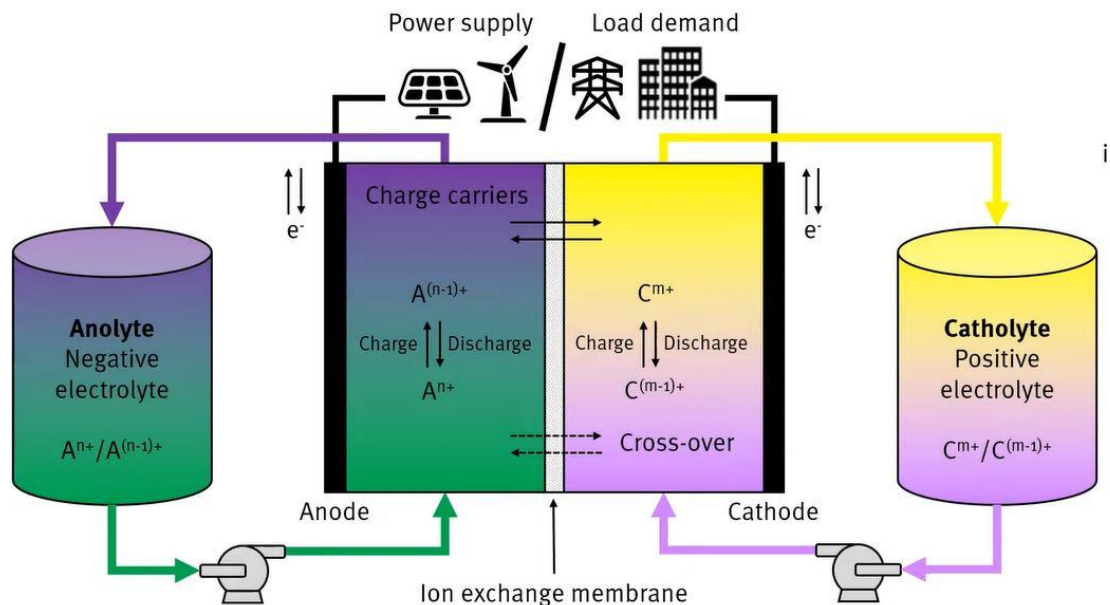
4.1 Inleiding

De Redox-Flow batterij is een energieopslagsysteem waarin de energie wordt opgeslagen in vloeistoffen of in een vloeistof en gas. Redox-Flow batterijen zijn relatief grote installaties en dat maakt ze vooral relevant voor grootschalige stationaire energieopslag. Een belangrijk aspect hiervan is dat de opslagtanks van de vloeistoffen (in de toekomst) aanzienlijk kunnen worden vergroot, waardoor de batterij gedurende een langere periode (dagen in plaats van uren) op maximaal vermogen energie kan leveren. Daardoor heeft dit systeem potentie om een grote dynamische toevoer van energie zoals geproduceerd door zonne- en windparken op te kunnen slaan (Wittman et al. 2022).

4.2 Systeembeschrijving

4.2.1 Werking van het systeem

Redox-Flow batterijen bestaan niet uit individuele batterijcellen, maar uit opstellingen van stacks en opslagtanks. Stacks zijn elektrochemische cellen waarin de elektrochemische reacties plaatsvinden tijdens het opladen en ontladen. Door deze stacks worden vloeibare of gasvormige elektrolyten rondgepompt vanuit opslagtanks. In de stacks stromen de elektrolyten langs elkaar heen, waardoor de elektrochemische reactie plaatsvindt die de batterij oplaadt en ontladt. Het concept van Redox-Flow batterijen maakt het mogelijk om zowel energie-inhoud als vermogen onafhankelijk te kunnen verhogen. De energie-inhoud kan namelijk verhoogd worden door de opslagtanks te vergroten en het vermogen door meer stacks toe te voegen.



Figuur 4.1 Werking van Redox-Flow batterij (bron: Wu, 2022)

Tabel 4.1 Werkzame componenten van Redox-Flow batterij

Anode-elektrolyt 'Anolyt' (-)	Membraam	Kathode-elektrolyt 'Katholyt' (+)
Vloeistof verbonden aan de minpool van de batterij.	Ion-doorlatend membraam dat de vloeistoffen anolyt en katholyt van elkaar scheidt. Het membraam laat waterstofionen door bij het opladen en ontladen, maar moet voorkomen dat de vloeistoffen met elkaar mengen (cross-over).	Vloeistof verbonden aan de pluspool van de batterij.

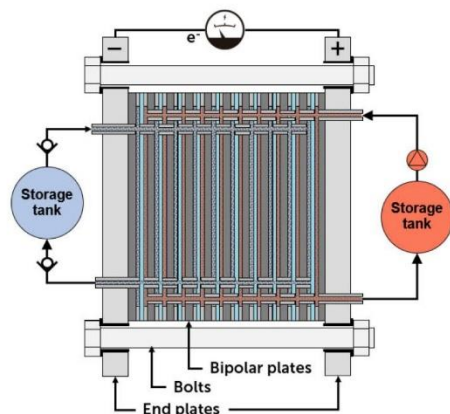
In Tabel 4.1 zijn de werkzame componenten van een Redox-Flow batterij weergegeven. Er zijn meerdere combinaties van elektrolyten, ofwel 'anolyt-katholyt-paren' in ontwikkeling. De meeste daarvan bestaan uit een vloeistof-vloeistof-paar. Andere subtypen zijn een vloeistof-gas-paar en vloeistof-metaal-paar, soms hybride varianten genoemd. In dit rapport is gekozen om de veiligheidsaspecten van All-Vanadium en waterstof-broom batterijen te bestuderen (Tabel 4.2). De reden hiervoor is dat de All-Vanadium batterij namelijk al in Nederland wordt verkocht en de waterstof-broom batterij momenteel in Nederland wordt ontwikkeld. De All-Vanadium batterij dient als voorbeeld van een batterij met twee vloeibare elektrolyten en de waterstof-broom batterij als voorbeeld van een batterij met vloeistof en een gas. Bovendien zijn, behalve de Zink-Broom hybride met een vloeistof-metaal-paar, de meeste overige varianten (elektrolytenparen) nog in een priller stadium van ontwikkeling.

Tabel 4.2 Redox-Flow subtypen

Subtype	Anode-elektrolyt 'Anolyt' (-)	Kathode-elektrolyt 'Katholyt' (+)
All-V (vloeistof-vloeistof)	Vanadium ($V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+}$)	Vanadium ($V^{4+} \rightleftharpoons V^{5+}$)
H-Br (gas-vloeistof)	Waterstof	Broom

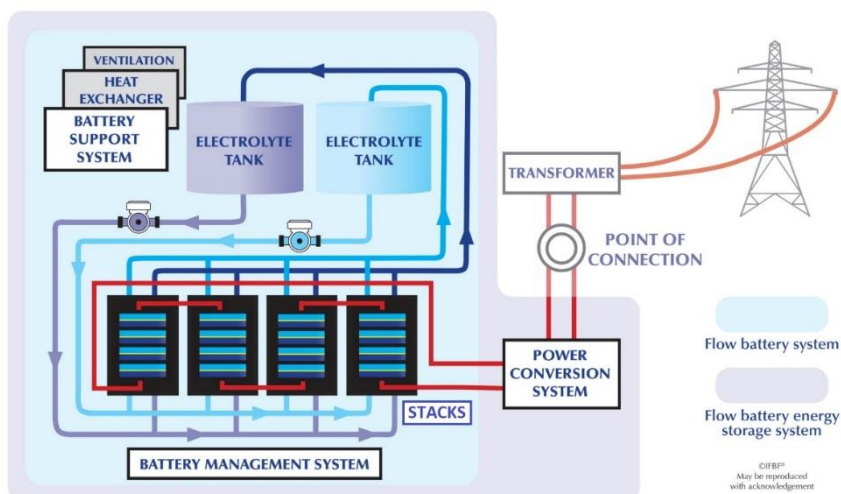
4.2.2 Opbouw van het energieopslagsysteem

In Figuur 4.2 is ter illustratie een voorbeeld van een stack (elektrochemische cel) weergegeven. Deze stacks zijn aangesloten op de opslagtanks en met behulp van een pomp worden de twee elektrolyten rondgepompt.



Figuur 4.2 Schematische weergave van een stack en foto van prototype (bron: Elestor)

Een schematische weergave van het gehele systeem is weergegeven in Figuur 4.3. Op deze afbeelding zijn twee opslagtanks weergegeven, die zijn verbonden aan vier stacks. Naast de werkzame componenten, namelijk de stacks en opslagtanks, zijn verder ook ondersteunende systemen weergegeven, zoals een Battery Management System (BMS) en ventilatie.

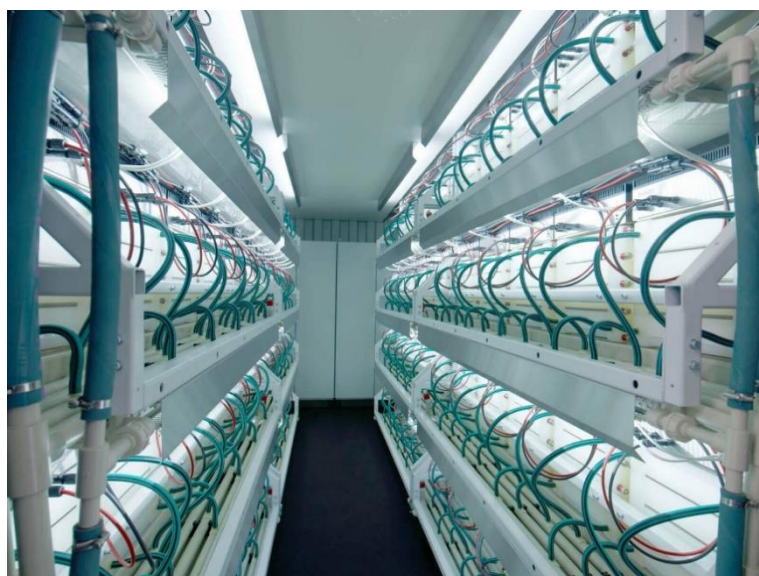


Figuur 4.3 Opbouw van Redox-Flow energieopslagsysteem (bron: IBBF)

4.3 Systeemtipes

4.3.1 All-Vanadium

De All-Vanadium (All-V) werkt met Vanadium in een negatief en een positief elektrisch geladen toestand. Het vanadium is opgelost in water en wordt opgeslagen in vloeistoftanks. Vanadium wordt onder andere gewonnen als restproduct in de staalproductie. Het systeem bestaat uit stapelbare zeecontainers waarin de stacks zich bevinden (Figuur 4.4).



Figuur 4.4 Stacks van All-Vanadium systeem (bron: CellCube)

4.3.2 Waterstof-Broom

De Waterstof-Broom (H-Br) batterij werkt met broom opgelost in water en waterstofgas. De voordelen van waterstof en broom zijn dat ze ruim beschikbaar, relatief goedkoop en recyclebaar zijn. Broom kan namelijk uit zeewater worden gewonnen. Het waterstof wordt opgeslagen in gastanks waarvoor verschillende mogelijkheden bestaan. Dit kan onder atmosferische druk in een gasdome, een soort dubbelwandige ballon, of onder druk in gastanks. Het broom is opgelost in water en wordt opgeslagen in vloeistoftanks. In Figuur 4.5 is het huidige prototype weergegeven. De paars-roze kleurige vloeistof in de doorzichtige buisleidingen is de broomoplossing. Interessant is dat aan de kleur van de vloeistof is te zien of de batterij opgeladen of leeg is: hoe paarser de kleur, hoe verder opgeladen de batterij is.



Figuur 4.5 Prototype Waterstof-Broom systeem (bron: Elestor)

4.4 Literatuurstudie Veiligheid

4.4.1 Algemene veiligheidsrisico's

Lekkage opslagtanks – toxische wolk

Een veiligheidsrisico vormen de grote opslagtanks met toxische vloeistoffen of gassen. Vanadium en broom zijn toxisch en schadelijk voor het milieu. Fabrikanten treffen hiervoor veiligheidsmaatregelen om zowel lekkage te voorkomen als de gevolgen daarvan te beperken. De preventieve maatregelen bestaan uit bijvoorbeeld dubbelwandige opslagtanks of opslagtanks onder de grond of onder water. Voorbeelden van mitigerende maatregelen zijn de toepassing van lekbakken of afdekzeilen, neutralisatiemiddelen, olie als beschermlaag in de lekbakken (om te voorkomen dat gelekte vloeistof gaat dampen), afdekking met water of het gebruik van zogenaamde 'binding agents'. Binding agents hechten zich aan de lekkende vloeistof waardoor deze niet verdampt (Lauret, 2022).

Wel blijft het mogelijk dat door een externe hitte-aanstraling van bijvoorbeeld een brand de installatie beschadigd raakt. Indien de opslagtanks ook beschadigd raken, dan kan dit leiden tot lekkage van de elektrolyten.

Bij alle onderzochte Redox-Flow batterijen zorgt een grote hoeveelheid toxische stoffen voor de werking van de batterij. Bij een ongeluk met de opslagtanks of lekkage van het elektrolyt

kunnen deze vrijkomen. Deze stoffen zijn schadelijk voor de gezondheid boven bepaalde grenswaarden en kunnen onder meer luchtwegklachten veroorzaken. Bij onverhoopt vrijkomen kunnen deze stoffen schade aan het milieu veroorzaken (Hadatsch, 2022; Lauret, 2022). Een (volledige) lekkage van een opslagtank zal leiden tot een toxische wolk. Deze dampen verspreiden zich met de wind. Afhankelijk van de plaatsing van de tanks kan hierdoor ook de bodem verontreinigd worden.

Vorming waterstofgas door potentiaalverschil

In het geval van een storing of verstoring in de batterij kan een (afwijkend) potentiaalverschil ontstaan tussen de anode en kathode, waarbij waterstofgas kan worden gevormd uit de gebruikte vloeistoffen. Dit geldt potentieel voor alle subtypen Redox-Flow batterijen. Onder normale gebruiksomstandigheden zal dit niet voorkomen, maar evengoed verdient dit faalmechanisme nader onderzoek. Idealiter is het voltage over de verschillende stacks gelijk en in balans, omdat anders onvolledige reacties kunnen plaatsvinden waardoor waterstofgas en zuurstof kunnen vrijkomen (Gundlapalli en Jayanti, 2021). Daarnaast kunnen deze ongewenste reacties ook schade toebrengen aan de batterij (Fetyan et al. 2019). In het geval van Redox-Flow batterijen wordt waterstof zelf niet verbrand, maar is het een ongewenst restproduct. Alleen bij de waterstof-broom variant is het een werkzame stof, maar dan niet in een verbrandingsreactie, maar in een elektrochemische reactie.

Elektrische kortsluiting

De elektrische installatie in en rondom de Redox-Flow batterij zal er in het algemeen op ontworpen zijn om elektrische kortsluiting zoveel mogelijk uit te sluiten. Hoewel onwaarschijnlijk, kan een externe kortsluiting ontstaan door (menselijke) fouten tijdens installatie, operatie en onderhoud. Een interne kortsluiting kan ontstaan door degradatie van het iondoorlatend membraam tussen de twee elektroden. Daarnaast kunnen zich in hybride varianten, waarbij een metalen plaat onderdeel is van de werkzame stoffen, dendrieten vormen en op termijn een interne kortsluiting veroorzaken (Whitehead et al. 2017).

Thermal runaway is niet van toepassing

Bij Redox-Flow batterijen speelt het veiligheidsrisico van een thermal runaway in principe geen rol. Er zijn namelijk geen aanwijzingen gevonden dat het mixen van elektrolyten leidt tot een thermal runaway (Hadatsch, 2022; Lauret, 2022). Ook is er gekeken of binnen Redox-Flow batterijen spontaan een reactie kan ontstaan tussen de gebruikte actieve stoffen, maar een dergelijk mechanisme is nooit gevonden. Bovendien is het overgrote deel van de actieve stoffen volledig gescheiden opgeslagen.

Daarnaast worden de potentiële gevolgen van thermische faaloorzaken ongevaarlijk geacht. Mocht een thermische faalsituatie in het actieve deel van de batterij (de stack) leiden tot het vrijkomen van energie of hitte, waardoor slechts een kleine fractie van het totaalvolume van de stoffen getroffen zal worden. De rest van de stoffen zit namelijk opgeslagen in de opslagtanks. Uit experimenten blijkt tevens dat de hoge warmtecapaciteit en het grote volume van het vloeibare elektrolyt eventuele vrijgekomen hitte goed kunnen opvangen (Wittman et al. 2020). Aangezien de stoffen worden rondgepompt, zal de hitte snel worden opgenomen en de installatie slechts beperkt opwarmen. Daarnaast zijn de vloeibare elektrolyten een oplossing in water en niet brandbaar (Wittman et al. 2020).

4.4.2 All-Vanadium

Kortsluitingsexperimenten met een All-Vanadium batterij veroorzaakten geen gevaarlijke situaties (Whitehead et al. 2017). De temperatuur van het elektrolyt in de stack nam weliswaar met ongeveer 25 °C toe, maar zodra de vloeistof weer in de vloeistoftank kwam, werd deze temperatuurstijging weer opgevangen. Als verklaring wordt genoemd dat gedurende het gebruik slechts ongeveer een procent van het Vanadium zich in de stack bevindt en het overgrote deel in de opslagtanks.

Daarnaast zijn er een aantal brandexperimenten uitgevoerd met componenten van Redox-Flow batterijen. Hieruit bleek dat de elektrolyten inderdaad niet brandbaar zijn en dat alleen een elektrodeframe brandbaar was (Chen et al. 2022).

Vanadium is een corrosieve vloeistof en kan bij contact met de huid en ogen ernstige brandwonden en oogletsel veroorzaken. Bij inademing kan het luchtwegklachten veroorzaken of schade aan een ongeboren kind (CellCube, 2022).

4.4.3 Waterstof-Broom

De Waterstof-Broom batterij zit momenteel nog in de prototypefase, waarbij op het gebied van veiligheid veel aandacht uitgaat naar preventieve maatregelen. Naast de reeds genoemde maatregelen gericht op lekkage van het elektrolyt, gaat er bij dit subtype ook aandacht uit naar de opslag van waterstof. Waterstof is een licht ontvlambaar gas dat al veelvuldig als energievorm wordt toegepast. Zodoende zijn veiligheidsrisico's met betrekking tot waterstof grotendeels bekend. Waterstof kan theoretisch in concentraties van 4 tot 75 vol% in lucht al ontbranden. In de meest ongunstige omstandigheden kan vrijgekomen waterstofgas leiden tot een explosie (Wittman et al. 2020). In de praktijk kan een explosie plaatsvinden bij een concentratie vanaf ongeveer 15 vol%.

Waterstof kan onder druk worden opgeslagen of onder atmosferische druk. Er bestaan momenteel prototypen die werkzaam zijn op verschillende drukken (van atmosferisch tot een ontwerpdruk van momenteel maximaal 8 bar), doch met een doel te komen tot 80 bar ten behoeve van aansluiting op het waterstofnetwerk. Het prototype dat waterstof opslaat onder atmosferische druk werkt met een dubbelwandige gasdome. Het voordeel van opslag onder atmosferische druk is dat veiligheidsrisico's gerelateerd aan opslag onder hoge druk (zoals een explosie of fakkel) zijn uitgesloten. Aangezien de gasdome buiten staat, kan deze wel onderhevig zijn aan externe invloeden. Een voorbeeld hiervan is blikseminslag, waarvoor een speciale bliksemafleider is ontworpen.

Broom is een agressief zuur en corrosieve vloeistof die toxische broomdampen geeft. Broomdampen zijn in lage concentraties al toxisch en kunnen leiden tot irritatie van luchtwegen en verstikking. Tegelijkertijd kunnen ze al vanaf een concentratie van enkele parts per million (ppm) door de sterke geur worden waargenomen, zodat omstanders vanzelf worden gealarmeerd door de onaangename geur of in ernstiger gevallen een oranje gekleurde wolk. Zelfredzamen kunnen zodoende tijdig vluchten. Bovendien zijn er (intrinsieke) mitigerende maatregelen genomen om verdamping te voorkomen. Eveneens zijn er maatregelen mogelijk om verdamping te beperken als deze toch optreedt. Het is wel belangrijk dat installaties hiertoe zijn ontworpen en dat er goede processen en middelen bestaan om in het geval van een calamiteit nadelige gevolgen zoveel mogelijk tegen te gaan. De bestrijding van broomdampen vereist de juiste persoonlijke beschermingsmiddelen en een bovenwindse benadering.

4.5 Veiligheidsanalyse

In het schema op de volgende pagina (Tabel 4.3) is onze veiligheidsanalyse aan de hand van de literatuurstudie naar Redox-Flow batterijen weergegeven. Hierin zijn onze verwachtingen voor de kans op, effecten en bestrijdbaarheid van incidenten met de nieuwe batterijtypen weergegeven.

Tabel 4.3 Veiligheidsanalyse Redox-Flow

	Kans	Effect	Bestrijdbaarheid
All-Vanadium / All-V	Alleen lekkage van de opslagtanks lijkt tot een incident te kunnen leiden. Hiervoor zijn maximale preventieve voorzieningen ingezet. Kortsluiting bleek geen ernstige gevolgen te hebben. De kans op een incident lijkt hiermee laag te zijn.	Brandgevaar is beperkt doordat de vloeistoffen niet brandbaar zijn. Er zijn geen aanwijzingen voor explosiegevaar. Vrijkomen van toxische stoffen is vrij ernstig , omdat deze giftig zijn.	Bestrijdbaar volgens bestaand protocol Incident Bestrijding Gevaarlijke Stoffen (IBGS). In principe moet een vloeistoflek met bestaande procedures en persoonlijke beschermingsmiddelen afgehandeld kunnen worden. De bestrijdbaarheid is echter wel tijdsintensief, omdat het een stof is die conform de gaspakkenprocedure benaderd moet worden.
Waterstof-Broom / H-Br	Hier is wel een opslagtank met brandbaar gas. De kans op een incident kan daardoor iets hoger zijn dan bij batterijen met All-V.	Bij volledig falen van de waterstof- en broomopslagtank kunnen de effecten ernstig zijn. Zowel een explosie als het vrijkomen van toxische stoffen zijn mogelijk. Broomdampen zijn al bij lage ppm schadelijk en verspreiden zich met de wind.	Bestrijdbaar volgens bestaand protocol IBGS. In principe moet een vloeistoflek met bestaande procedures en persoonlijke beschermingsmiddelen afgehandeld kunnen worden. De bestrijdbaarheid is echter wel tijdsintensief, omdat broom een stof is die conform de gaspakkenprocedure benaderd moet worden. Bovendien dient bodemverontreiniging als gevolgschade van de bestrijding ook voorkomen te worden. Verder dient rekening gehouden te worden met waterstof bij de bestrijding.

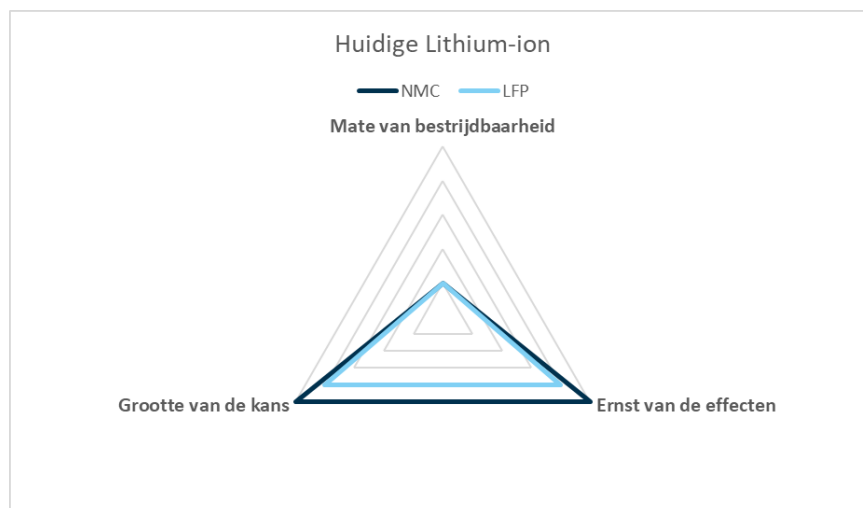
5 Beschouwing

In dit hoofdstuk wordt de veiligheidsanalyse uit de voorgaande hoofdstukken samengevat en gevisualiseerd met behulp van radardiagrammen. Hiermee wordt inzicht gegeven in de manier waarop de kans op, effecten en bestrijdbaarheid van incidenten met de verschillende nieuwe batterijtypen zich naar verwachting tot elkaar verhouden. De radardiagrammen zijn ingevuld aan de hand van de veiligheidsanalyses uit de afsluitende paragrafen van hoofdstuk 2, 3 en 4. Op de assen zijn de grootte van de kans, ernst van de effecten en mate van bestrijdbaarheid weergegeven. Het midden van het diagram staat voor de minimumwaarde, een punt aan de rand voor de maximumwaarde.

5.1 Nieuwe generaties Lithium-ion

Huidige situatie

Voor wat betreft de huidige Lithium-ion batterijen geldt dat het verschil in subtypen zit in het kathodemateriaal. Bij al deze subtypen kan een thermal runaway ontstaan. Nu wordt de kans op en de ernst van een thermal runaway in eerste instantie bepaald door de stabiliteit en samenstelling van het elektrolyt. Op dit moment is deze bij alle huidige subtypen nog (deels) vloeibaar, waardoor de belangrijkste factor in principe gelijk is. De secundaire factor die de ernst van de thermal runaway beïnvloedt, is de energiedichtheid van de kathode, en deze verschilt wel per subtype. Het bekendste voorbeeld hierbij is het onderscheid tussen NMC Li-ion en LFP Li-ion. De energiedichtheid is bij LFP lager dan bij NMC en zodoende zijn kans en effect iets lager, zoals weergegeven in het radardiagram in Figuur 5.1.



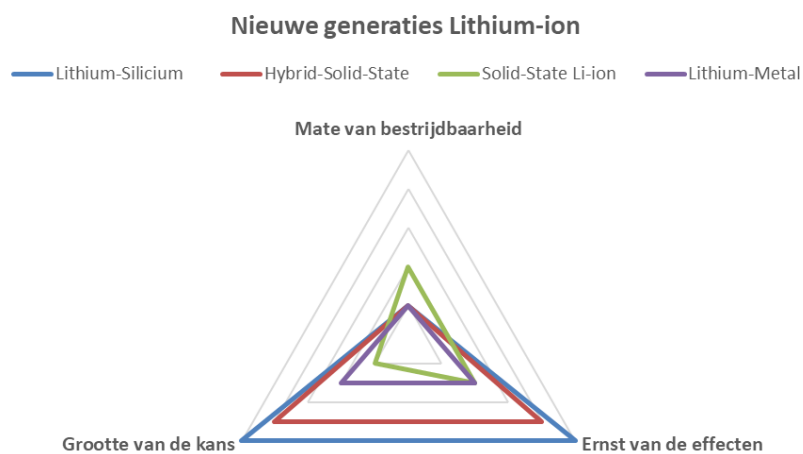
Figuur 5.1 Radardiagram huidige Lithium-ion

Nieuwe subtypen Lithium-ion

De belangrijkste veiligheidswinst voor nieuwe subtypen Lithium-ion batterijen wordt verwacht met de introductie van Solid-State batterijen. Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt inderdaad dat zowel kansen als effecten worden verlaagd met toepassing van een vaste stof elektrolyt. Echter, veiligheidsrisico's worden hiermee niet volledig uitgesloten. De belangrijkste les uit

onze studie is dat de kans op thermal runaway ook bij Solid-State batterijen blijft bestaan, maar dat een thermal runaway door de verhoogde stabiliteit van het vaste stof elektrolyt bij hogere temperaturen zal plaatsvinden dan bij de huidige Lithium-ion batterijen. In onderstaande radardiagram is weergegeven dat met de komst van Solid-State batterijen kans en effect zullen afnemen. De mate van bestrijdbaarheid zou ook enigszins moeten verbeteren, omdat een incident zich minder snel uitbreidt. Tegelijkertijd blijven de factoren ongewijzigd die de bestrijdbaarheid bemoeilijken, namelijk het feit dat batterijcellen goed verpakt zijn en dat een thermal runaway kan optreden. Daarom verwachten wij dat de mate van bestrijdbaarheid slechts beperkt wordt verbeterd. In Figuur 5.2 is het bijbehorende radardiagram weergegeven.

Voor wat betreft de bestrijdbaarheid kan de huidige kennis en kunde over incidentbestrijding van Lithium-ion batterijen ook worden toegepast op de nieuwe subtypen. De te verwachten effecten zijn namelijk hetzelfde.

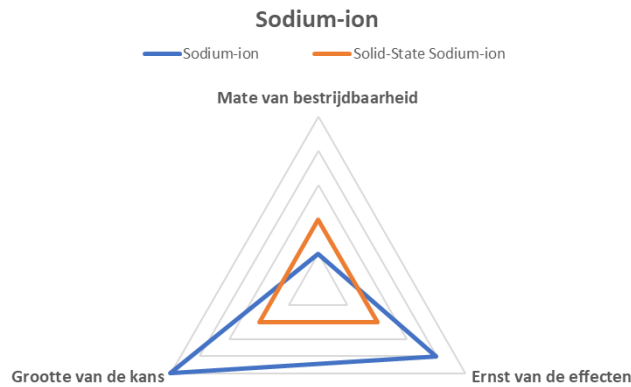


Figuur 5.2 Radardiagram veiligheidsanalyse nieuwe generatie Lithium-ion

5.2 Natrium-ion

Uit de veiligheidsstudie bleek dat de veiligheids- en stabiliteitsproblemen van Natrium-ion en Lithium-ion nagenoeg hetzelfde zijn. Bovendien zijn er al enkele experimenten uitgevoerd om na te gaan of bij Natrium-ion batterijen ook een thermal runaway kan optreden. Uit deze experimenten bleek dat dit inderdaad het geval is, maar dat er aanwijzingen zijn dat er iets minder hitte vrijkomt en het proces wat langzamer verloopt. Dit kan verklaard worden door de lagere energiedichtheid. In onderstaande radardiagram is weergegeven dat wij verwachten dat de veiligheid van de eerste generaties Natrium-ion batterijen vergelijkbaar is met die van de huidige Lithium-ion batterijen. Als een vaste stof elektrolyt ook beschikbaar komt voor Natrium-ion batterijen zal de veiligheid toenemen. Dit leidt tot het radardiagram in Figuur 5.3

Aangezien de veiligheidsrisico's van Natrium-ion vergelijkbaar zijn met die van Lithium-ion, kan overwogen worden om in eerste instantie het handelingsperspectief van Lithium-ion batterijen ook toe te passen op toekomstige incidenten met Natrium-ion batterijen.

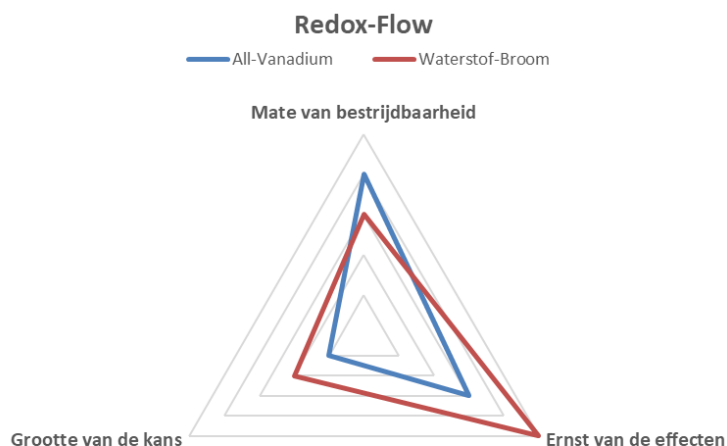


Figuur 5.3 Radardiagram veiligheidsanalyse sodium-ion

5.3 Redox-Flow

Uit de studie is gebleken dat in alle onderzochte Redox-Flow batterijen toxische vloeistoffen de werkzame stof vormen van het systeem. Als gevolg zijn veiligheidsmaatregelen van fabrikanten veelal gericht op het voorkomen van lekkage en beperken van de effecten daarvan. Verder bleek dat er geen aanwijzingen zijn voor een mogelijk thermal-runaway-proces. Wel kan bij Redox-Flow batterijen bij een elektrische storing een kleine hoeveelheid ongewenst waterstof worden gevormd. Desalniettemin bleek de kans op brand en explosie bij Redox-Flow in het algemeen beperkt, mede omdat de gebruikte vloeistoffen niet brandbaar zijn. Alleen bij de Waterstof-Broom variant dient wel met deze effecten rekening gehouden te worden, omdat dit het enige subtype is waarbij een brandbaar gas, namelijk waterstof, onderdeel uitmaakt van de werkzame stoffen. Dit is weergegeven in het radardiagram (Figuur 5.4).

De lekkage van toxische vloeistoffen is een reeds bestaand incident dat bekend is bij incidentbestrijders. Voor de bestrijding van een lekkage van de opslagtank kunnen daarom de reguliere IBGS-procedures hierbij als uitgangspunt dienen.



Figuur 5.4 Radardiagram veiligheidsanalyse Redox-Flow

6 Conclusie

In dit rapport zijn een aantal belangrijke ontwikkelingen rondom nieuwe batterijtypen vanuit veiligheidsperspectief onderzocht en samengevat. Uit deze studie is gebleken dat bij elk nieuw batterijtype veiligheidsrisico's blijven bestaan.

Voor de nieuwe generatie Lithium-ion batterij gelden in hoofdlijnen dezelfde risico's als voor de huidige Lithium-ion batterijen. Het veiligheidsprobleem van de thermal runaway met de bijbehorende effecten toxische wolk, batterijbrand en dampwolkexplosie of wolkbrand, blijft bij alle subtypen Lithium-ion bestaan. Met de introductie van Solid-State batterijen zullen de grootte van de kans en ernst van deze effecten wel afnemen, maar de genoemde effecten zullen niet volledig worden uitgesloten. Aangezien de effecten van vergelijkbare aard en de systeemopbouw hetzelfde zijn, verwachten wij dat de mate van bestrijdbaarheid slechts beperkt wordt verbeterd ten opzichte van de huidige Lithium-ion batterijen.

De veiligheidsrisico's van Sodium-ion batterijen zijn van vergelijkbare aard gebleken als die van Lithium-ion batterijen. Uit wetenschappelijke experimenten is gebleken dat een Sodium-ion batterijcel ook in thermal runaway kan raken. Wel is het aannemelijk dat de snelheid en ernst van de thermal runaway lager zijn dan bij Lithium-ion batterijcellen, omdat de energiedichtheid lager is. Aangezien de systeemopbouw van Sodium-ion batterijsystemen eveneens bestaat uit goed verpakte batterijcellen, zal de bestrijdbaarheid naar verwachting ook worden bemoedigd door het feit dat de cellen tijdens een incident amper zijn te koelen. Na de introductie van de eerste Lithium-ion solid-state batterijen zullen ook Sodium-ion solid-state batterijen volgen, waardoor de veiligheid zal worden verbeterd.

Voor wat betreft de Redox-Flow batterij is gebleken dat alle subtypen toxische vloeistoffen bevatten als werkzame stof van het systeem. Als gevolg daarvan zijn de veiligheidsrisico's van Redox-Flow batterijen met name toxisch van aard. Er zijn bij deze hoofdcategorie batterij geen aanwijzingen gevonden voor een thermal runaway en de werkzame (vloeistoffen) zijn niet brandbaar (met uitzondering van het waterstof in Waterstof-Broom batterijen). Een incident met een Redox-Flow batterij zal daarom in zekere zin van vergelijkbare aard zijn als een lekkage van een toxische vloeistof. De huidige IBGS-procedures kunnen een richtlijn bieden voor de incidentbestrijding daarvan.

Literatuurlijst

Albertus, O., Anandan, V. & Ban, C. Challenges for and Pathways toward Li-Metal-Based All-Solid-State Batteries. *ACS Energy Lett.* 2021, 6, 4, 1399–1404. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00445>

Bates, A.M., Preger, Y., Torres-Castro, L., Harrison, K.L., Harris, S.J., Hewson, J. (2022). Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries?, *Joule*, 6(4), 742-755, ISSN 2542-4351, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007>

Battery 2030+ (2022). Roadmap. <https://battery2030.eu/research/roadmap/>

Bordes, Arnaud & Marlair, Guy & Zantman, Aurélien & Chesnaye, Alexandra & Lore, Pierre-Alexandre & Lecocq, Amandine. (2022). Safety Evaluation of a Sodium-Ion Cell: Assessment of Vent Gas Emissions under Thermal Runaway. *ACS Energy Letters*. 7. 3386-3391. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c01667>

Chen, R., Nolan, A. M., Lu, J., Wang, J., Yu, X., Mo, Y., Chen, L., Huang, X., & Li, H. (2020). The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium. *Joule*, 4(4), 812–821. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.03.012>

Chen, M., Liu, P., Li, Y., Hu, Y., Hu, Z., & Wang, Q. (2022). Preliminary study on fire risk of redox flow battery components. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(6), 4131–4140. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10815-1>

Christensen, P. (2022). Presentatie van professor Paul Christensen, Newcastle University, 'Vapour Cloud Explosions' tijdens het EU Energy Storage Systems Safety Conference 2022 van NIPV.

Chung, H., Kang, B. (2017). Mechanical and Thermal Failure Induced by Contact between a $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ Solid Electrolyte and Li Metal in an All Solid-State Li Cell, *Chemistry of Materials*, 29(20), 8611.

Cui, G., Wang, H., Yu, F., Che, H., Liao, X., Li, L., Yang, W., & Ma, Z. (2022). Scalable synthesis of $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ with high safety and ultrahigh-rate performance for sodium-ion batteries. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 46, 280–286. <https://doi.org/10.1016/J.CJCHE.2021.06.008>

evservice.eu <https://www.evservice.eu/brandweer-komt-met-een-advies-voor-laadpalen-in-parkeergarages>

Faradion <https://www.greencarcongress.com/2015/11/20151127-rs2e.html> en <https://www.motorcyclenews.com/news/new-tech/sodium-ion-battery-niu/>

Fetyan, A., El-Nagar, G. A., Lauermaun, I., Schnucklake, M., Schneider, J., & Roth, C. (2019). Detrimental role of hydrogen evolution and its temperature-dependent impact on the performance of vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 32, 57–62. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2018.06.010>

Gebbie Lab (2020). Searching for a stable and efficient battery. Website van University of Wisconsin-Madison. Geraadpleegd in juli 2022 via:
<https://interfaces.che.wisc.edu/searching-for-a-stable-and-efficient-battery/#:~:text=Mechanical%20stability%20refers%20to%20how,in%20a%20few%20different%20ways.>

Gundlapalli, R. and Jayanti, S. (2021). Case studies of operational failures of vanadium redox flow battery stacks, diagnoses and remedial actions. *Journal of Energy Storage*, 33, 102078. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.102078>

Guo, Y., Wu, S., He, Y.-B., Kang, F., Chen, L., Li, H., & Yang, Q.-H. (2022). Solid-state lithium batteries: Safety and prospects. *EScience*. <https://doi.org/10.1016/j.esci.2022.02.008>

Gyuk, I. (2022). ES Safety and the future of lithium. Presentatie door Imre Gyuk tijdens het EU Energy Storage Systems Safety Conference 2022 van NIPV.

Hadatsch, B. (2022). Telefonisch contact met Bernhard Hadatsch, CellCube

Huang, L., Lu, T., Xu, G., Zhang, X., Jiang, Z., Zhang, Z., Wang, Y., Han, P., Cui, G. & Chen, L. (2022). Thermal runaway routes of large-format lithium-sulfur pouch cell batteries, *Joule*, 6(4), 906-922, ISSN 2542-4351, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.015>.

Huijben, M. (2022). Interviews met professor Mark Huijben, Universiteit Twente

Huo, J., Huang, K., Luo, Wei. et al. (2022). Evaluating Interfacial Stability in Solid-State Pouch Cells via Ultrasonic Imaging. *ACS Energy Lett.* 2022, 7, 2, 650–658. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02363>

IFBF (2022), website: <https://flowbatteryforum.com/what-is-a-flow-battery/>

Jiang, F.-N., Yang, S.-J., Cheng, X.-B., Shi, P., Ding, J.-F., Chen, X., Yuan, H., Liu, L., Huang, J.-Q., & Zhang, Q. (2022). Thermal safety of dendritic lithium against non-aqueous electrolyte in pouch-type lithium metal batteries. *Journal of Energy Chemistry*. Volume 72, September 2022, Pages 158-165. <https://doi.org/10.1016/J.JECHM.2022.05.005>

Jin, Y., Zhao, Z., Miao, S., Wang, Q., Sun, L., & Lu, H. (2021). Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station. *Journal of Energy Storage*, 42(August), 102987. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102987>

Kallitsis, E., Lander, L., Edge, J., Bravo Diaz, L., Brown, A., Kelsall, G., Offer, G., Korre, A. (2022). *Safe and sustainable lithium-ion batteries*. An Energy Futures Lab and IMSE White Paper. Imperial College Kondon.

Kong, D., Wang, G., Ping, P. & Wen, J. (2022). A coupled conjugate heat transfer and CFD model for the thermal runaway evolution and jet fire of 18650 lithium-ion battery under thermal abuse, *eTransportation*, 12, 100157, ISSN 2590-1168, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100157>

Lauret, J. (2022). Presentatie en gesprek met Joep Lauret, Elestor.

Li, H., Kong, X., Liu, C., & Zhao, J. (2019). Study on thermal stability of nickel-rich/silicon-graphite large capacity lithium ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114144. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114144>

Lu, Y., Rong, X., Hu, Y. S., Chen, L., & Li, H. (2019). Research and development of advanced battery materials in China. *Energy Storage Materials*, 23, 144–153. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2019.05.019>

Matsuda, S., Manai Ono, ab, Yamaguchi ab, S., & Uosaki ab, K. (2022). Criteria for evaluating lithium-air batteries in academia to correctly predict their practical performance in industry. *Mater. Horiz*, 9, 856. <https://doi.org/10.1039/d1mh01546j>

Mosallanejad, B., Malek, S. S., Ershadi, M., Daryakenari, A. A., Cao, Q., Boorboor Ajdari, F., & Ramakrishna, S. (2021). Cycling degradation and safety issues in sodium-ion batteries: Promises of electrolyte additives. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 895, 115505. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2021.115505>

Robinson, J. B., Finegan, D. P., Heenan, T. M. M., Smith, K., Kendrick, E., Brett, D. J. L., & Shearing, P. R. (2018). Microstructural Analysis of the Effects of Thermal Runaway on Li-Ion and Na-Ion Battery Electrodes. ASME. *Journal of Electrochemical Energy Conversion Storage*, 15(1), 011010. <https://doi.org/10.1115/1.4038518>

Spraefico, M. (2022). Telefonisch Contact met E-Magy Nederland.

Sun, L., Liu, Y., Shao, R., Wu, J., Jiang, R., & Jin, Z. (2022). Recent progress and future perspective on practical silicon anode-based lithium ion batteries. *Energy Storage Materials*, 46, 482–502. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2022.01.042>

Takenaka, N., Bouibes, A., Yamada, Y., Nagaoka, M., Yamada, A. (2021). Frontiers in Theoretical Analysis of Solid Electrolyte Interphase Formation Mechanism. *Advanced Matererials*, 33, 2100574. <https://doi.org/10.1002/adma.202100574>

Vox.com <https://www.vox.com/recode/23027110/solid-state-lithium-battery-tesla-gm-ford>

Wang, Z., Ouyang, D., Chen, M. et al. (2019). Fire behavior of lithium-ion battery with different states of charge induced by high incident heat fluxes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 2239–2247. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7899-y>

Wang, Y., Ren, D., Feng, X., Wang, L., & Ouyang, M. (2022). Thermal runaway modeling of large format high-nickel/silicon-graphite lithium-ion batteries based on reaction sequence and kinetics. *Applied Energy*, 306, 117943. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117943>

Wang, Y., Song, S., Xu, C., Hu, N., Molenda, J., & Lu, L. (2019). Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery—A short review. *Nano Materials Science*, 1(2), 91–100. <https://doi.org/10.1016/J.NANOMS.2019.02.007>

Whitehead, A. H., Rabbow, T. J., Trampert, M., & Pokorny, P. (2017). Critical safety features of the vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources*, 351, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.03.075>

Wittman, R. M., Perry, M. L., Lambert, T. N., Chalamala, B. R., & Preger, Y. (2020). Perspective—On the Need for Reliability and Safety Studies of Grid-Scale Aqueous Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090545.
<https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab9406>

Yujing Wu, Shuo Wang, Hong Li, Liquan Chen, Fan Wu (2021). Progress in thermal stability of all-solid-state-Li-ion-batteries. *InfoMat*. 2021;3(8):827–853.
<https://doi.org/10.1002/inf2.12224>

Wu, B. (2021). Lectures by Billy Wu, Imperial College London. What are redox flow batteries and why are they important? <https://www.youtube.com/watch?v=t9zwwgL7UpDA> en Battery fires! What happens when batteries are abused?
<https://www.youtube.com/watch?v=VWMfesebyt4>

Wu, S., Li, H. en He, Y. (2022). Mailcontact met experts: Shichao Wu, Hong Li en Yan-Bing He. Tianjin University, China.

Yang, Z., Ian He, J., Lai, W. E.-H., Peng, J., Liu, X. I.-H., He, X.-X., Guo, X. U.-F., Li, L., Ma, J. I.-M., Wu, M., & Chou, S.-L. (n.d.). *Fire-Retardant, Stable-Cycling and High-Safety Sodium Ion Battery*. <https://doi.org/10.1002/anie.202112382>

Yu, W., Chen, R., Gan, L., Li, H., & Chen, L. (2023). Battery Safety: From Lithium-Ion to SolidState Batteries, *Engineering*, 21, 9-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.022>

Zhao, H., Yang, F., Li, C., Li, T., Zhang, S., Wang, C., Zhang, Z., & Wang, R. (2023). Progress and perspectives on two-dimensional silicon anodes for lithium-ion batteries. *ChemPhysMater*, 2(1), 1-19.

Zhang, W., Lu, J., & Guo, Z. (2021). Challenges and future perspectives on sodium and potassium ion batteries for grid-scale energy storage. *Materials Today*, 50, 400–417.
<https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2021.03.015>