

5. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag

Gefährdungspotential von Batteriespeicherkraftwerken

Brände von Lithium-Ionen-Batterien

Alexander Saupe, M.Sc.
Genius Entwicklungs GmbH, Rangsdorf, Deutschland, a.saupe@genius-group.de

Kurzfassung

Batteriespeicherkraftwerke werden im Rahmen der Energiewende zur Zwischenspeicherung von elektrischer Energie, für die Abdeckung von Spitzenlasten und zur Sicherstellung der Netzstabilität immer öfter geplant und in Betrieb genommen [1]. Die Energiespeicherung ist sowohl für den Privatanwender, als auch für die kommerzielle Nutzung interessant.

Dabei bedient man sich der energetisch höherwertigen Batterietechnik auf Lithiumbasis [2], deren Zellen ein großes Gefährdungspotential darstellen, sollten diese ihre innere Stabilität verlieren.

Durch eine Vielzahl an Auslösern [3] können bereits einzelne Zellen in eine sogenannte Thermal Runaway Reaktion gelangen [4]. Diese exotherme Reaktion, bei der Temperaturen bis 1.000 °C auftreten, wird durch teilweise heftige Zellbrände mit Jetflames bis zu mehreren Metern sowie Trümmerwurf begleitet. Hinzu kommt der Ausstoß von karzinogenen, toxischen und brennbaren Gasen, welche zudem das Risiko, der Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre, erzeugen. Selbst bei gleicher Bauart und gleichem Batteriezelltyp ist eine Vorhersage des Abbrandverhaltens kaum möglich, da sich diese je nach chemischer Zusammensetzung, interner Bauweise, Ladezustand, Alter oder sogar nach Lagerungsposition ändert [5].

Die Batteriemodule in den Kraftwerken sind meist in mann hohen Regalen sehr dicht und in sehr großen Stückzahlen verbaut. Zwischen den Regalen befinden sich meist nur schmale Gänge, die zur Wartung genutzt werden. Eine brandschutztechnische Trennung zwischen den Modulen oder den Schränken ist nicht gegeben.

Dahingehend wird das Versagen einer einzelnen Zelle einen Dominoeffekt auslösen, welcher einen Kompletterlust der baulichen Anlage zur Folge haben kann. Die Gefährdungen der Rettungskräfte, Bevölkerung und Umwelt kommen ebenfalls noch hinzu.

Konventionelle Löschanlagen, wie Sprinkler- oder Inertgasanlagen, bieten dabei kaum einen ausreichenden Schutz für diese Art von Brandlast, da sie entweder wirkungslos sind oder zu weiteren Gefährdungen, wie Kurzschlüssen und Kontaminationen führen.

Es stellt sich daher die Frage, ob die vorherrschenden Regelwerke für den Bau von Batteriespeichieranlagen ein ausreichendes brandschutztechnisches Schutzniveau darstellen, um eine derartige kritische Infrastruktur im hochtechnisierten Industrieland Deutschland sicher zu betreiben?

Eine simple Segmentierung der einzelnen Schränke mit einem thermisch und elektrisch isolierenden Brandschutzmittel erreicht die Begrenzung des Schadereignisses auf die Ausbruchstelle und verhindert den vollständigen Verlust eines Bauwerks, welches einen Wert von meist mehreren Millionen Euro aufweist.

1 Einleitung

Die in Deutschland gesellschaftlich gewollte Energiewende fordert Lösungen elektrische Energie in großen Mengen zu speichern und bedarfsgerecht für das tägliche Leben, nachhaltige Mobilität und kommerzielle Anwendung zu nutzen.

Die dabei genutzten Batterien auf der Basis von Blei-, Nickel oder Natriumbasis werden dabei immer mehr von Batterien auf Lithiumbasis mit höherer elektrischer Energiedichte abgelöst [2]. Ihre Verbreitung im täglichen Leben aber auch in der industriellen Anwendung steigt von Jahr zu Jahr. Beispielsweise lag der Anteil in Verkehr gebrachter Gerätebatterien für Sekundärbatterien (wieder aufladbare Batterien) auf Lithiumbasis im Jahr 2010 bei 54 % [6] und 2015 schon bei 62 % [7].

Diese Batterietechnik kommt dabei auch zum Einsatz, um beispielsweise als Zwischenspeicher für regenerativ erzeugten Strom zu dienen, um Spitzenlasten abzudecken und die Netzstabilität sicherzustellen [1]. Aber auch im privaten Bereich werden vermehrt Batterieanlagen eingesetzt, um die eigene gewonnene elektrische Energie selbst zu nutzen, da sich die Netzeinspeisung durch Kürzung der Zulagen kaum noch lohnt [8].

So kann man immer öfter von der Inbetriebnahme großer Batteriespeicherkraftwerke in den Medien lesen. 2014 wurde in Schwerin ein Batteriespeicherkraftwerk von 5 MW elektrischer Leistung mit über 25 600 Lithium-Ionen-Zellen und 2015 wurde in Feldheim ein 10 MW-Speicher mit 3 360 Lithium-Ionen-Speichermodule eingeweiht. Ebenfalls 2015 ging ein 13 MW-Batteriespeicherkraftwerke in Lünen ans Netz. Hier dienen 650 ausrangierte Batteriesysteme aus Elektrofahrzeugen zur Energiespeicherung [9].

Diese sogenannte Second-Life-Nutzung von Batterien aus Elektrofahrzeugen ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht von besonderem Interesse [10]. Es bleibt jedoch unbekannt, welchen Belastungen, Stress und ggf. äußeren Einwirkungen diese Speichermodule ausgesetzt waren. Denn sollten die Lithium-Batterien ihre innere Stabilität verlieren, entsteht ein großes Gefährdungspotential durch Brand, Explosion und gefährlichen Gasen.

Dass diese Gefährdung nicht nur theoretischer Natur ist, bestätigen immer häufiger werdende Berichte von Bränden, welche auf Lithium-Ionen-Batterien zurückzuführen sind. Am besten bekannt sind die Brände von Tesla-Fahrzeugen 2013 in den USA und 2016 in Norwegen und Frankreich [11]. Aber auch kleinere Lithium-Batterien verursachten Wohnungs- und Gebäudebrände, welche sogar Todesopfer zur Folge hatten. In Kanada verursachte die Batterie eines Laptops einen Wohnungsbrand mit Todesfolge (2009) [12], 2006 wurde ein USA-Labor, in dem Lithium-Ionen-Batterien getestet wurden, zerstört.

Auch in Deutschland kam es bereits zu zahlreichen Brandereignissen durch Lithium-Batterien. Neben Bränden in Recycling-Anlagen, bspw. 2012 in Bremerhaven, verursachte 2016 ein elektrisches Spielzeug beim Aufladen in Potsdam einen Wohnungsbrand [13]. Des Weiteren brannte ein Elektrofahrradgeschäft 2017 in Hannover vollständig aus. [14]

Es ist somit zu erkennen, dass Lithium-Batterien zwar große Vorteile gegenüber bisher verwendeten Batterietechnologien haben und immer mehr Anwendungen finden, allerdings muss durch die großflächige Verwendung bzw. der Einsatz in sensiblen Bereichen der Energieversorgung (als kritische Infrastruktur) auch das Gefahrenpotential erkannt und vorbeugende Maßnahmen eingeleitet werden.

2 Gefahrenpotential Lithium-Ionen-Batterien

2.1 Auslöser des thermischen Durchgehens

Verliert eine Lithium-Ionen-Zelle oder -Batterie ihre interne Stabilität entsteht ein unkontrollierbarer exothermer chemischer Prozess, der meist in einem thermischen Durchgehen (Thermal Runaway) endet.

Der Thermal Runaway wird dabei in der Regel durch zu hohe Zelltemperaturen ausgelöst. Dabei werden vor allem die Separator-Schichten zerstört, der Elektrolyt verdampft und führt zum Zellbersten oder bei höheren Temperaturen wird das Kathodenmaterial zerstört [3].

Die Ursachen für das Erreichen hoher Zelltemperaturen sind dabei vor allem auf die folgenden Punkte zurückzuführen [15]:

- Logistiksäden (mechanische Krafteinwirkung, wie Stöße, Verbiegen usw.)
- erhöhte äußere thermische Belastung (bspw. Feuer)
- Überladung
- Tiefenentladung
- Kurzschluss (intern)
- Kurzschluss (extern)
- interne chemische Zersetzungs- und Ablagerungsvorgänge (Dendritenbildung)

Das Problem für den Anwender ist dabei jedoch, dass interne Schädigungen so gut wie nicht feststellbar sind. D.h. auch eine augenscheinlich elektrisch einwandfreie Zelle lässt keinen Rückschluss auf die internen Zustände der Batterie zu. Dies gilt natürlich nicht für äußere Beschädigungen.

Um irreversible Schäden vorzubeugen ist sicherzustellen, dass sich Lithium-Ionen-Zellen im vorgegebenen Betriebsfenster befinden und arbeiten. Selbst wenn sie das Betriebsfenster nur kurzzeitig verlassen und dann wieder dahin zurückkehren ist nicht ausgeschlossen, dass interne Schädigungen aufgetreten sind, deren Folgen nicht absehbar sind.

Die Abbildung 1 zeigt ein schematisches Betriebsfenster für eine Lithium-Ionen-Batterie auf der Basis von Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) als Kathodenmaterial und Graphit-Anode. Es wird deutlich wie klein der Arbeitsbereich ist und wie leicht dieser im Alltag verlassen werden kann.

Betrachtet man bspw. den oberen vertretbaren Temperaturbereich, wird deutlich, dass eine Batterie vor Sonneneinstrahlung geschützt werden muss. Denn durch direkte Sonneneinstrahlung sind Oberflächentemperaturen von mehr als 60 °C ohne weiteres erreichbar. Hier droht das Verdampfen tiefsiedender Bestandteile des Elektrolyten und damit die Gefahr eines Zellberstens. Ferner ist ein Selbsterhitzungsverhalten der Batteriezellen zu beobachten, was zum Zusammenbruch der Elektroden-Elektrolyt-Grenzschicht (SEI: solid electrolyte interface) führt und bis zum Thermal Runaway führen kann [5].

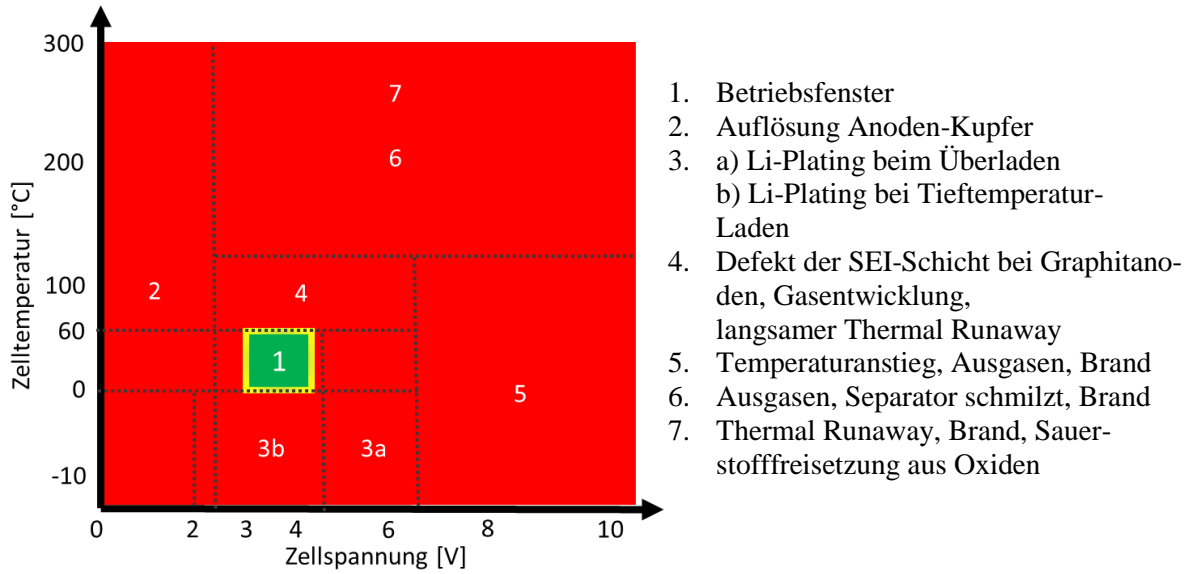


Abbildung 1: Schematisches Betriebsfenster für eine Lithium-Ionen-Zelle (NMC) mit Graphit-Anode (Richtwerte) [16]

Unabhängig von der Art des Auslösers entstehen durch die inneren Prozesse und Zersetzung von Zellkomponenten ein fortlaufender Anstieg der Zelltemperatur, die weitere Zersetzungsreaktionen auslöst. Dieser Prozess beschleunigt sich immer weiter, was dann das thermische Durchgehen (Thermal Runaway) kennzeichnet. Am Ende dieses Prozesses steht häufig eine unkontrollierte Wärmeentwicklung der Zelle, die bis zum Zellbrand, Rauchgasentwicklung und ggf. weiterer Brandausbreitung führt. Die Abbildung 2 zeigt diese inneren Zellabläufe in logischem Zusammenhang.

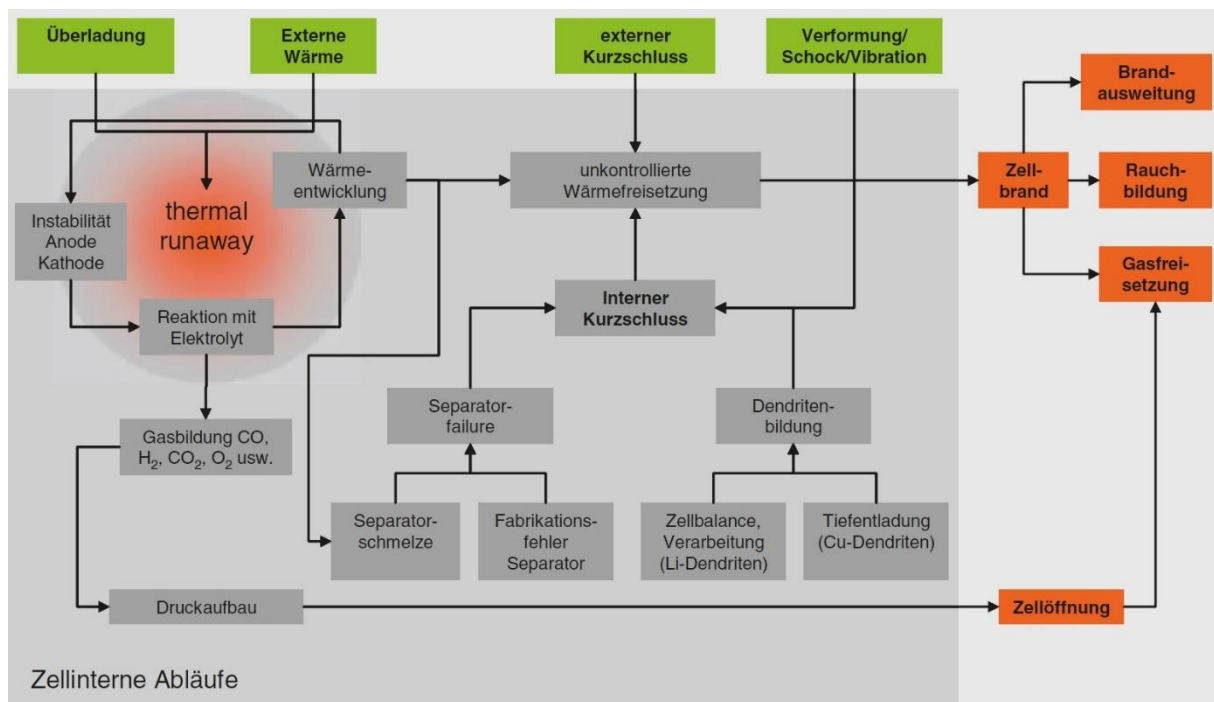


Abbildung 2: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen-Batterie [4]

2.2 Erscheinungsformen von Thermal Runaway Reaktionen

Verallgemeinert ist der Thermal Runaway daran zu erkennen, dass ein hoher Temperaturanstieg an der Zell- oder Batterieaußenhülle zu verzeichnen ist. Dabei ist ein Temperaturanstieg von bis zu 500 K innerhalb von 2 Minuten charakteristisch.

Visuell ist dabei ein Zellversagen zu beobachten. Die Zellen öffnen meist an den dafür vorgesehenen Überdrucköffnungen (zylindrische und prismatische Zelltypen) und setzen die Reaktionsgase aus dem Zellinneren schlagartig frei. Dabei kommt es durch die hohen Temperaturen meist zu einer Zündung der austretenden Gase (Flammenbildung) und es ist der klassische Zellbrand zu beobachten (siehe Abbildung 3). Die Temperaturen der Manteloberfläche liegen dabei meist zwischen 500 °C und 600 °C für zylindrischen Zellen und 700 °C bis 800 °C bei prismatischen bzw. pouchförmigen Zellen [17] [18]. Kurzzeitige Temperaturwerte von bis zu 1100 °C konnten ebenfalls schon aufgezeichnet werden.

In weiterführenden Untersuchungen [17], in denen zylindrische Zellen einer Flammenbeaufschlagung ausgesetzt wurden, konnten höhere Temperaturen (bis 700 °C) ermittelt werden, da die austretenden Reaktionsgase sich sofort explosionsartig entzündeten. Auch das sichtbare Flammenbild war deutlich größer.

Dies verdeutlicht, wenn Zellen einen eigenständigen Zellbrand entwickeln, so wird sich eine Brandausbreitung auf benachbarte Zellen einstellen, deren Brisanz sich durch den bereits bestehenden und einwirkenden Flammenbrand vergrößert.

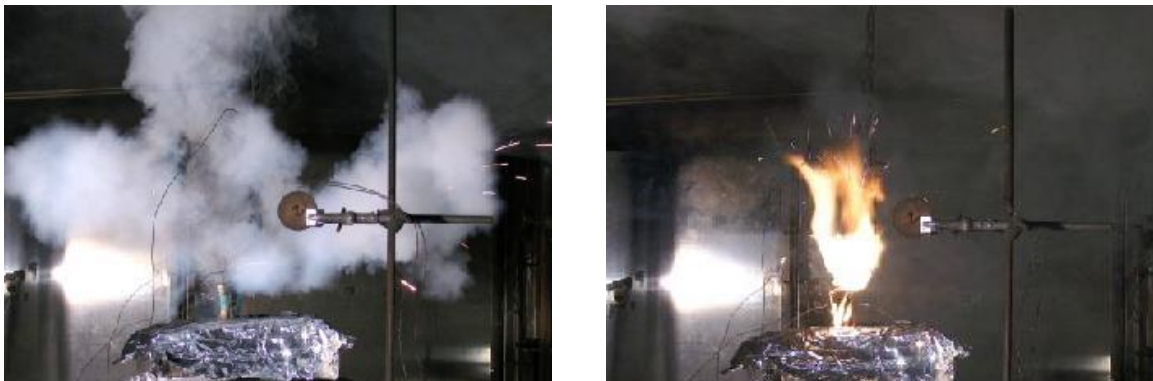


Abbildung 3: Beobachtungen beim Zellversagen von thermisch aufbereiteten zylindrischen Zellen [17]
rechtslinks: Gasfreisetzung aus Überdruckventilen, rechts: Selbstentzündung der Gase und Abbrand

Allerdings ist das Reaktions- bzw. Abbrandverhalten auch sehr stark abhängig von der chemischen Zusammensetzung, bspw. des verwendeten Kathodenmaterials.

Einige bekannte Verbindungen sind thermisch stabiler als andere. Viele setzen zusätzlich Sauerstoff bei der Thermal Runaway Reaktion frei und wieder andere zeigen ein kaum nennenswertes Abbrandverhalten [3]. Dies hat auch zur Folge, dass unterschiedliche maximale Zelltemperaturen erreicht werden. Vergleicht man bspw. Lithiumeisenphosphat-Zellen, welche keinen Sauerstoff freisetzen und als thermisch sehr stabil gelten, mit Lithium- Mangan- Nickel-Zellen, so erreicht erstere eine Zelltemperatur um die 350 °C und letztere von über 750 °C [19].

Ein Grund dafür liegt in der unterschiedlichen elektrischen Energiedichte. Denn je nachdem welcher chemische Zusammensetzung bzw. Aufbau den Zellen (Energiespeichern) zu Grunde liegen, werden unterschiedliche Energiedichten erreicht. Die Tabelle 1 zeigt eine exemplarische Auswahl von Energiedichten ausgewählter Energiespeicher.

Tabelle 1: Energiedichte exemplarischer Energiespeichern [3]

| Aufbau/Stoff/Zusammensetzung | Energiedichte [Wh/kg] | Bemerkung |
|---------------------------------|-----------------------|---|
| Blei-Batterie | ca. 35 | Sekundaratterie |
| NiCd-Batterie | ca. 40 – 60 | Sekundaratterie |
| NiMH-Batterie | ca. 70 – 100 | Sekundaratterie |
| Lithium-Ionen-Batterie | ca. 100 – 200 | Sekundaratterie |
| Lithium-Mangandioxid-Batterie | ca. 200 | Primärbatterie |
| Lithium-Schwefel-Batterie | ca. 350 | Sekundaratterie, in der Entwicklung, bisher ohne praktische Bedeutung |
| Lithium-Thionylchlorid-Batterie | ca. 500 – 650 | Primärbatterie |
| Lithium-Luft-Batterie | ca. 450 – 1.000 | Sekundaratterie, in der Entwicklung, bisher ohne praktische Bedeutung |
| Aluminium-Luft-Batterie | ca. 1.300 | Primärbatterie, hohe Selbstentladung |

Ein weiterer Einfluss auf die äußere Erscheinungsform des Thermal Runaways ist auch die Position der Batterien bzw. Zellen. Es spielt somit eine Rolle, ob die Lagerung bzw. Anordnung horizontal oder vertikal vorliegt. Durch die hohen Austrittsgeschwindigkeiten bei der Reaktionsgasfreisetzung aus Bruchstellen oder Überdruckventilen nimmt die Lagerposition Einfluss darauf, ob der Zellkörper in Bewegung gerät. Beispielsweise konnte auch beobachtet werden, dass bei zylindrischen Lithium-Schwefeldioxid-Zellen ein Thermal Runaway bei horizontaler Lagerung zu einer Explosion der Zelle führte und bei vertikaler Position lediglich eine Funkenfreisetzung mit anschließendem Flammenbild aus dem Überdruckventil am Metalldeckel stattfand [19].

Unterschiedliche Wirkungs- und Verhaltensweisen bei einem Thermal Runaway treten auch bei gleicher chemischen Zusammensetzung und Aufbau auf. Untersucht man Zellen des gleichen Bautyps und Hersteller so treten dennoch unterschiedliche Erscheinungsformen auf. Als Beispiel sei hier Lithium-Mangandioxid-Batterien zu nennen, die einmal mit großen Funkenausstoß und anschließendem Flammenbrand reagieren und an anderer Stelle, regiert die gleiche Batterie im Verhältnis dazu explosionsartig, indem der Zellkörper unter einer Feuerballentwicklung auseinandergerissen wird und ein Trümmerwurf entsteht, deren Teile brennend weiter reagieren [19].

2.3 Reaktionsgasentwicklung beim Thermal Runaway

Durch die thermische Zersetzung des Elektrolyten sowie den Reaktionen mit Anode bzw. durch Oxidation an der Kathode kommt es zur Entstehung von gasförmigen Zersetzungsprodukten. Die typischen Zersetzungsprodukte sind dabei brennbare Gase wie Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH_4) und Ethan (C_2H_6), toxische Verbindungen wie CO, Fluorwasserstoff (HF), Monophosphan (PH_3), sowie gesundheitsgefährdende Stoffe wie Aldehyde und kanzerogene Stäube der Kathoden-Oxide von Kobalt und Nickel. Gleichzeitig wird bei vielen Kathodenmaterialien zusätzlich Sauerstoff freigesetzt.

Kommen in diesem Zusammenhang flammenunterdrückende Brandschutzmaßnahmen zum Schutz von Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz, so werden die brennbaren Gase nicht zu den

üblichen Rauchgasprodukten, wie CO_2 umgesetzt und treten dadurch in höheren Konzentrationen aus.

Die Genius Group hat bei Untersuchungen mit zylindrischen 18650 – Zellen (NMC), welche durch das Sonderlöschmittel PyroBubbles[®] abgedeckt waren, die austretenden Gase vollständig aufgefangen und mittels FTIR (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer) analysiert. Dabei ergaben sich im Durchschnitt Reaktionsgaszusammensetzung von bis zu 30 Vol% CO und bis zu 40 Vol% Methan. Dahingehend wird deutlich, dass auch mit Unterdrückung bzw. Löschung des Flammenbrandes ein brennbares Gasvolumen ausgestoßen wird, welches zusammen mit der Umgebung oder mit dem eigenen mitgeführten Sauerstoff eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen lässt.

Bestätigt wird dies durch eine Versuchsreihe der Federal Aviation Administration im Jahr 2014 [20]. Hier wurden 5.000 Lithium-Ionen-Zellen (18650 Zellen) in einem feuerbeständigen Luftfrachtcontainer mit Brandunterdrückungsanlage (Inertgas) eingelagert und eine Initialbatterie zum Thermal Runaway gebracht. Der Initialbrand und damit der Flammenbrand im Container wurde am Anfang erfolgreich durch das Inertgas unterdrückt. Die Batterien gasten jedoch weiter aus und durch die weitere vorherrschende thermische Beaufschlagung der übrigen Zellen, wurden diese ebenfalls instabil und gaben das Reaktionsgasgemisch in die Umgebung ab. Im weiteren Verlauf entstand dadurch eine zündfähige Atmosphäre, die durch die heißen Oberflächen der Zellen oder Funkenaustrag gezündet wurde. Am Ende stand eine vollständige Zerstörung des Luftfrachtcontainers.

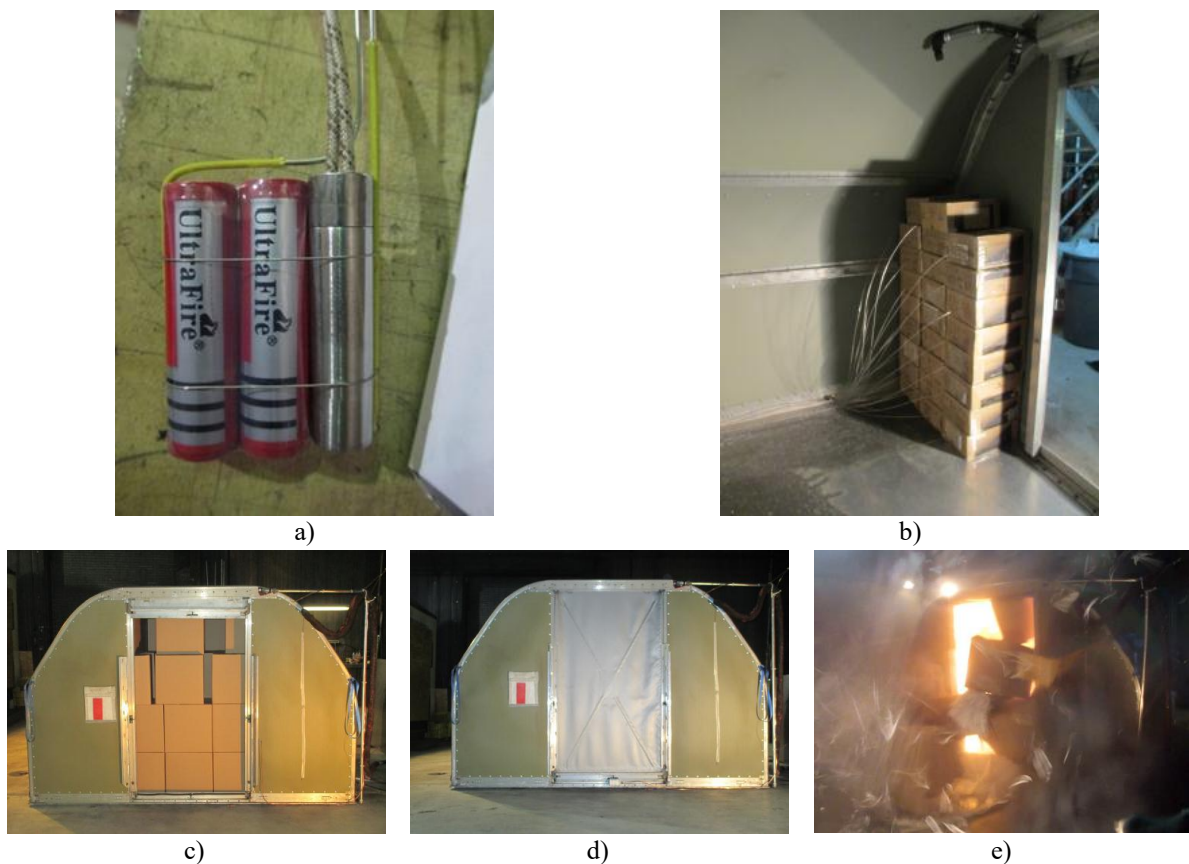


Abbildung 4: Mittels initialer Wärmebeaufschlagung a) in einer Anordnung von 5.000 Lithium-Ionen-Zellen b) wurde ein Brandversuch in einem Luftfrachtcontainer mit Inertgaslöschanlage c), d) durchgeführt. Dabei kam es zur Zündung der brennbaren Atmosphäre und Zerstörung des Containers e). [20].

3 Anwendung des Gefahrenpotential Lithium-Ionen-Batterien auf Batteriespeicherkraftwerke

Auf der Grundlage, der im Vorfeld beschriebenen Wirkungs- und Verhaltensweisen von instabil werdenden Lithium-Batterien, wird deutlich, dass eine Nutzung von derartigen Batterien in großer Anzahl in einem Bauwerk ein erhebliches Gefahrenpotential im Sinne der Brandentstehung, Brandausbreitung und Brandbekämpfung hat.

Demzufolge wäre die logische Schlussfolgerung, dass beim Bau von Batteriespeicherkraftwerken auf Basis von Lithium-Batterien besondere bauliche Anforderungen im Sinne des Brandschutzes bestehen müssten oder wenigstens ein auf diese Gefahren angepasstes Brandschutzkonzept vorliegen sollte.

Betrachtet man die gesetzlichen Grundlagen, so sind aktuell keine bauaufsichtlichen Sondervorschriften oder Richtlinien für die Errichtung von Batteriespeicherkraftwerken bekannt. Damit würde bei einer Errichtung zunächst das allgemein gültige Baurecht mit den Anforderungen nach Gebäudeklassen gelten.

Gemäß der Musterbauordnung (MBO) §3 sind Gebäude so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden. Des Weiteren bestimmt §14 MBO, dass bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten sind, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Diese sehr allgemein formulierten Anforderungen dienen der Erfüllung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele und würden im Grunde ausreichen, um ein angepasstes Brandschutzkonzept für Batteriespeicherkraftwerke mit mehreren zehntausend Lithium-Zellen zu errichten, wenn das Gefahrenpotential ausreichend bekannt und bewusst wäre. Es sollte verständlich sein, dass ohne besondere brandschutztechnische Maßnahmen das Versagen einer Zelle in einem Zellverbund (Batterie) eine Kettenreaktion auslöst, die andere Batterien bei ausreichender thermischen Beaufschlagung gefährdet und die Brandausbreitung vorantreibt. Ein Löschen mit konventionellen Löschmitteln ist weder vollständig effektiv noch effizient, da bekannt ist, dass bei der Bekämpfung des Flammenbrandes weiterhin brennbare Gase austreten, die eine explosionsfähige Atmosphäre bilden und zusätzlich noch ihren eigenen Sauerstoff mitführen. Natürlich von den Gefahren durch elektrischen Strom für die Einsatzkräfte durch den Löschmitteleinsatz (Leitfähigkeit von Wasser und Löschschaum) sowie dadurch gegebenenfalls verursachte weitere Kurzschlüsse, die zum Versagen weiterer Batterien führen würden, mal ganz abgesehen.

Auch wenn man sich für derartige bauliche Anlagen auf erleichternde brandschutztechnische Anforderungen auf der Grundlage der Muster-Industriebau-Richtlinie (MIndBauR) bedienen würde, bleiben auch hier die Anforderungen, dass bei Industriebauten, die lediglich der Aufstellung technischer Anlagen dienen und die nur vorübergehend zu Wartungs- und Kontrollzwecken begangen werden, (Einhausungen, z.B. aus Gründen des Witterungs- oder Immissionsschutzes), Erleichterungen gestattet werden können, wenn die bauordnungsrechtlichen Schutzziele erfüllt sind. Vor allem der letzte Halbsatz ist dabei die entscheidende Komponente, dass weiterführende brandschutztechnische Maßnahmen theoretisch erforderlich wären, wenn man der Gefährdungseinschätzung der hier eingebauten Anlagen bzw. Energiespeicher folgen würde.

Für eine Umsetzung einer solchen baulichen Anlage sei hier kurz auf das 5 MW-Batteriespeicherkraftwerk in Schwerin (WEMAG AG), Stadtteil Lankow, eingegangen. Hier wurden 25.600 Lithium-Batterien auf zwei Ebenen angeordnet. Die Batterien befinden sich in mehreren offenen Batterieschränken, welche durch schmale Wartungsgänge erreichbar sind (siehe Abbildung 5). Augenscheinlich wurde im Aufstellungsraum eine Inertgas-Löschanlage verwendet.

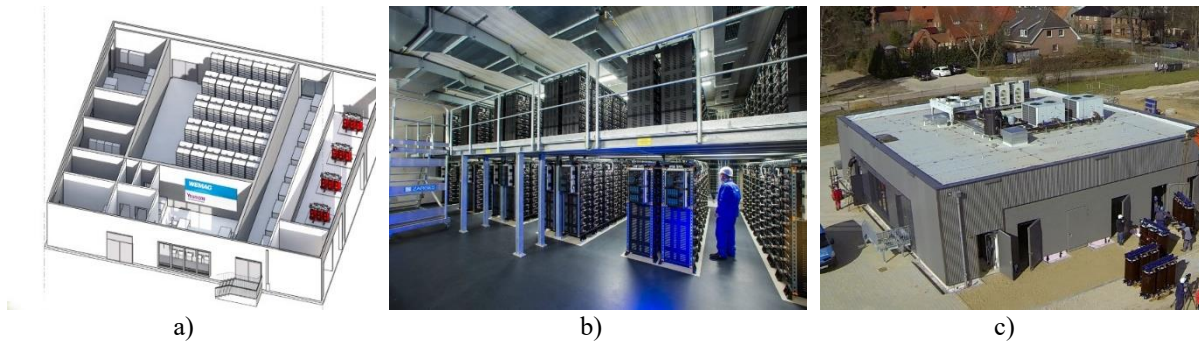


Abbildung 5: 5 MW-Batteriespeicherkraftwerk in Schwein vom Stromversorger WEMAG [21]; a) schematischer Aufbau der baulichen Anlage; b) Aufbau und Anordnung der 26 650 Lithium-Manganoxid-Zellen; c) Das Speicherkraftwerk wurde im Stadtteil Lankow errichtet.

Eine derartige Anlage ist meist konzipiert für die automatische Brandbekämpfung der großen Menge an Kabel- und Leitungsanlagen. D.h. das Szenario Kabelbrand und die Verhinderung einer weiteren Ausbreitung durch Einsatz von inertisierendem Löschgas ist berücksichtigt. Aber das Gefahrenspektrum bei einem Brandereignis ausgehend von den Lithium-Batterien bleibt unberücksichtigt.

Die vorhandene Löschanlage hätte keine kühlende Löschwirkung auf die kompakten Batteriemodule, da die exotherme Thermal Runaway unabhängig von der Umgebungsluft abläuft. Es wird nicht verhindert, dass Elektrolyt aus den beschädigten Zellen austritt und unter Umständen benachbarte oder darunterliegende Module beschädigt und damit einen instabilen Zustand auslöst.

Je nach verwendeter Zellchemie wird in den meisten Fällen auch Sauerstoff frei, die zusammen mit den weiterhin austretenden toxischen und brennbaren Gasen eine explosionsfähige Atmosphäre bildet, deren Zündung auch durch das Inertgas nicht ausreichend verhindert werden würde (siehe Abschnitt 2.3).

Ebenfalls besteht weiterhin die Gefährdung noch nicht direkt betroffener Module durch herumgeschleuderte ggf. stark erhitze Bruchstück beim Bersten von Zellen, die wiederum Kurzschlüsse auslösen können.

Ferner ist die Frage zu stellen, ob somit auch wirksame Löscharbeiten möglich sind. Die Feuerwehr hat kaum eine Möglichkeit die brandschutztechnisch nicht voneinander getrennten Batterieschränke in ausreichender Form zu kühlen (Gefahr von Kurzschlüssen etc.), so dass die noch nicht betroffenen Batterien stabil bleiben. Der Einsatz von konventionellen Löschmitteln würde unter Umständen weitere Kurzschlüsse verursachen, die wiederum weitere Zellen instabil werden lassen. Zudem kann die Feuerwehr nicht einschätzen, ob kritische Temperaturen bereits auf Batteriemodule eingewirkt haben, um einschätzen zu können, ob eine weitere Gefahr davon ausgeht oder nicht.

Dieser Zusammenhang lässt die wesentliche Frage entstehen, ob ein derartiges brandschutztechnisches Konzept oder das nicht Vorhandensein von allgemeingültigen Anforderungen oder Richtlinien für derartige bauliche Anlagen einen adäquaten und

angemessenen Schutz von Batteriespeicherkraftwerken darstellt, die zudem zum Bereich der kritischen Infrastrukturen gehören.

4 Zusammenfassung und Fazit

Lithium-Batterien haben nur ein sehr begrenztes Betriebsfenster, welches eine sichere Funktionsweise ermöglicht. Wird dieses Betriebsfenster verlassen, auch nur kurzzeitig, sind interne chemische Prozesse dafür verantwortlich, dass innere Zersetzungsprozesse entstehen, die Zellen instabil machen. Die dabei entstehende Wärme löst einen inneren thermischen Dominoeffekt (Thermal Runaway) aus, an deren Ende das Bersten der Zelle und ein Zellbrand steht. Dieser Prozess ist bspw. bereits ab Zelltemperaturen von 80 °C möglich [4].

Das Erscheinungsbild bzw. die Auswirkung des Thermal Runaways sind kaum vorhersagbar. Auch baulich gleiche Zellen reagieren unterschiedlich, verursacht durch marginale Fertigungstoleranzen oder Nutzungshistorie. Daher reagiert jede Zelle anders.

Selbst ein Löschen des Flammenbrandes unterbindet nicht die Freisetzung von toxischen und brennbaren Gasen. Zusammen mit dem freigesetzten Sauerstoff entsteht die Gefahr einer Explosion. Der innere Zersetzungsprozess ist exotherm und kann von außen nicht unterbrochen werden. Erst wenn das chemische Gleichgewicht einer Zelle wiederhergestellt ist, hat die Batterie ausgereagert und es wird keine weitere Wärmeenergie mehr zusätzlich freigesetzt.

Konventionelle Löschmittel oder Löschanlagen (anlagentechnischer Brandschutz) sind im Regelfall kaum erfolgsversprechend, da sie die Ursachen nicht bekämpfen können und ggf. weitere Schäden durch Kurzschlüsse verursachen.

Dadurch entstehen für bauliche Anlagen, welche Lithium-Batterien in größerer Zahl beinhalten (Batteriespeicherkraftwerke) ein großes Gefahrenpotential für Feuerwehr, Bevölkerung und Umwelt, wenn sich nur auf konventionelle Schutzkonzepte berufen wird. Die Umsetzung der Einhaltung der Schutzziele aus dem Baurecht müsste für derartige Objekte gesondert beschrieben und festgelegt werden, da den meisten Verantwortlichen im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren das Gefahrenpotential nicht bewusst ist.

Die einfachste Form der Gefahrenminimierung im Bereich der Batteriespeicherkraftwerke ist die brandschutztechnische Trennung der Module oder Batterieschränke untereinander. Hier kann mit thermisch isolierenden und elektrisch nichtleitfähigen Baustoffen der Brand auf ein Modul oder einen Batterieschrank begrenzt werden und so sicher die Brandausbreitung verhindert werden. Die unverbrannten Reaktionsgase werden über eigene Leitungen kontrolliert ins Freie abgeben, wodurch die Explosionsgefahr minimiert wird. Ebenfalls ist eine Filterung denkbar.

Mit dieser einfachen Lösungsmethode werden umliegende oder direkt angrenzende Batterieschränke sicher geschützt und können ohne großen Zeitverlust wieder betrieben werden. Damit entstünde bei einem Brandereignis nicht der Kompletterlust der gesamten Anlage, sondern nur eine kleine austauschbarere Komponente.

5 Literaturverzeichnis

[1]. **Doughty, Daniel H., et al.** Batteries for Large-Scale Stationary Electrical Energy Storage, The Electrochemical Society Interface, 2010.

[2]. **Sterner, Michael und Stadler, Ingo.** Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer Vieweg, Berlin, 2014.

- [3]. **Kunkelmann, Jürgen.** Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- [4]. **Korthauer, Reiner.** Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [5]. **Mikolajczak, Celina, et al.** Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment, Quincy : Fire Protection Research Foundation, 2011.
- [6]. **GRS - Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien.** Jahresbericht 2010 Erfolgskontrolle nach Batteriegesetz. Hamburg, 2010.
- [7]. **GRS - Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien.** Jahresbericht 2015 Erfolgskontrolle nach Batteriegesetz. Hamburg, 2015.
- [8]. **Fahlbusch, Eckard.** Batterie als Energiespeicher, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [9]. **Sussenburger, Jürgen.** Stromspeicher beschleunigen die Energiewende, Kölner Stadt-Anzeiger, . Köln, 2015.
- [10]. **Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW)** . Ergebnispapier Nr. 18: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen, Deutsches Dialog Institut GmbH, Frankfurt am Main, 2016.
- [11]. **Schade, Maik.** Mysteriöser Tesla-Brand in Frankreich, Auto Bild, Hamburg, 2016.
- [12]. **Spiegel Online.** Todesfall durch Laptop-Brand, SPIEGELnet GmbH, Hamburg, 2009.
- [13]. **rbb | 24.** Hoverboard setzt beim Aufladen Wohnung in Brand, Rundfunk Berlin-Brandenburg, Berlin, 2016.
- [14]. **Morchner, Tobias und Beyeler, Tamy.** Explodierter Akku löst Brand in Parkhaus aus, Hannoversche Allgemeine Zeitung, Hannover, 2017.
- [15]. **Kaiser, J., et al.** Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher in Verbindung mit Photovoltaikanlagen. Hinweise für Feuerwehren im Einsatz. Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitung. Vol. 8/2014, S. 588-592.
- [16]. **Bundesverband Solarwirtschaft et.al.** Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher, Berlin, 2014.
- [17]. **Karola Keutel et.al.** Verhalten von Li-Ionen-Akkumulatoren bei verschiedenen Brandszenarien, vfdb-Jahresfachtagung 2014, Dortmund, 2014.
- [18]. **Saupe, Alexander et.al.** Realbrandversuche zum sicheren Transport von Lithium-Ionen-Module. vfdb - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz. Vol. 01/2015, S. 14-21.
- [19]. **Summer, Steve.** Aircraft Installed Lithium Battery Hazard Analysis, Federal Aviation Administration, Dresden, 2015.
- [20]. **Dhaval Dadia.** Fire Suppression in a Class E Cargo Compartment. International Aircraft Systems Fire Protection Working Group, Federal Aviation Administration, Bremen, 2014.

[21]. **WEMAG AG**. Europaweit erstes kommerzielles Batteriekraftwerk eröffnet, WEMAG AG
www.wemag.com, Schwerin, 2014.