

Erkenntnisse zu Batteriespeichieranlagen mit Lithium-Ionen-Batterien

Erstellt von: TWB / Ad-hoc-AG Erfahrungsaustausch@vfdb: Elektroenergiespeicher



Haftungsausschluss: Dieses Dokument wurde sorgfältig von den Experten der vfdb erarbeitet und vom Präsidium der vfdb verabschiedet. Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortung prüfen. Eine Haftung der vfdb und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Vertragsbedingungen: Die vfdb verweist auf die Notwendigkeit, bei Vertragsabschlüssen unter Bezug auf vfdb-Dokumente die konkreten Leistungen gesondert zu vereinbaren. Die vfdb übernimmt keinerlei Regressansprüche, insbesondere auch nicht aus unklarer Vertragsgestaltung.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Merkblattes	4
2 Allgemeines und Geltungsbereich	4
3 Brandprodukte von Lithium-Ionen-Batterien	5
4 Grundlegende Einsatzempfehlungen bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien	5
5 Weitere Schlussfolgerungen aus dem Stand der Wissenschaft.....	8
5.1 Ausgasen von Lithium-Ionen-Batterien.....	8
5.2 Brandereignis, offener Flammenbrand.....	8
5.3 Kühlen von Batteriesystemen.....	9
6 Löschwasserkontamination und -rückhaltung.....	10
6.1 Löschwasserkontamination	10
6.2 Löschwasserrückhaltung.....	11
7 Einsatzstellenübergabe und Einsatznachbereitung	11
8 Literaturhinweise	12

Erkenntnisse zu Batteriespeicheranlagen mit Lithium-Ionen-Batterien

1 Ziel des Merkblattes

Feuerwehreinsätze an Batteriespeicheranlagen mit Lithium-Ionen-Batterien, wie Hausspeichersystemen für Photovoltaikanlagen oder Batteriespeicherkraftwerken, sind im Havarie- oder Brandfall mit besonderen Gefahren und Reaktionen der C-Gefahrstoffe (Inhaltsstoffe) der Lithium-Ionen-Batterien verbunden. In diesem Merkblatt wird das Hauptaugenmerk auf die für Einsatzkräfte relevanten Erkenntnisse gelegt, bei denen Batteriespeicheranlagen mit Lithium-Ionen-Batterien in Brand geraten oder von einem Brandereignis beaufschlagt werden.

2 Allgemeines und Geltungsbereich

Die Bezeichnung Lithium-Ionen-Batterie bezieht sich hier auf sekundäre (wiederaufladbare) Batteriezellen, in denen reaktive Materialien, aus denen die negativen und positiven Elektroden (Anode und Kathode) bestehen, sowie Lithium-Ionen enthalten sind, welche über den Elektrolyten ausgetauscht werden.

Die Funktionsweise, grundsätzliche Gefahren dieser Batterieform und Empfehlungen für den Feuerwehreinsatz sind dem vfdb-Merkblatt „MB10-17“ [1] zu entnehmen und hier zusammengefasst dargestellt. Feuerwehreinsätze beinhalten unter Beteiligung von Lithium-Batterien immer auch Aspekte des C-Einsatzes nach Feuerwehrdienstvorschrift 500 „Einheiten im ABC-Einsatz“ (FwDV 500) [2]. Daher werden in dem Merkblatt „MB10-17“ die Einsatzhinweise aus dem Blickwinkel der FwDV 500 mit dem Schwerpunkt der dabei auftretenden C-Gefahrstoffe aufgezeigt. Dieses Merkblatt dient ebenfalls als Basis-Merkblatt für weitere vfdb-Merkblätter mit anderen Schwerpunkten bzw. Betrachtungsweisen.

Im Allgemeinen werden im vorliegenden Merkblatt zusammengeschlossene Batteriezellen in Modulform (mehrere elektrisch verschaltete und engverbaute Zellen) bis hin zu Batteriesystemen (mehrere elektrisch verschaltetet und engverbaute Batteriemodule in Batteriegehäusen oder Regalen) betrachtet. Es werden lediglich stationäre Systeme betrachtet. D.h. das Merkblatt gilt gleichermaßen für Hausspeicheranlagen (ab 1 kWh) sowie für Batteriespeicherkraftwerke (ab 50 kWh). Dadurch, dass die Batterieanlagen im Regelfall kaskadenartig reagieren (zell- bzw. modulweise), birgt die Gesamtkapazität der Anlage im Brandfall keinen entscheidenden Unterschied in Bezug auf Reaktionsverhalten, Brandrauch, Schadstoffe, Löschmittel usw. Bei einer höheren Gesamtkapazität ist im Wesentlichen lediglich die Wahrscheinlichkeit eines größeren Ausmaßes des Brandereignisses höher.

In Bezug auf die hier dargelegten Reaktionen der in der Batterie enthaltenen C-Gefahrstoffe liegt der Schwerpunkt auf Lithium-Ionen-Batterien, welche ein Lithium-Metall-Mischoxid z. B. in Verbindung mit Kobalt, Nickel, Mangan, Eisen als Kathodenmaterial verwenden. Diese Materialien sind in den aktuell verwendeten Batteriespeicheranlagen am häufigsten anzutreffen und werden aufgrund ihres Reaktionsverhaltens im Rahmen der Sicherheitsforschung vermehrt beprobt und die Ergebnisse publiziert. Somit gilt das vorliegende Merkblatt vor allem für Lithium-Ionen-Batterien mit einer positiven Elektrode aus einer Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide-Verbindung (NMC). Bei Vorhandensein von Lithium-Eisenphosphat-Verbindungen (LFP) sind ebenfalls die Gültigkeit und die nachstehenden Empfehlungen gegeben, auch wenn das Reaktionsverhalten im Detail abweichen kann.

3 Brandprodukte von Lithium-Ionen-Batterien

In der vfdb-RL 10/03 „Schadstoffe im Brandrauch“ [3] werden die Grundlagen zur Beurteilung der bei Bränden zu erwartenden Schadstoffe für Feuerwehrangehörige und deren Verantwortliche beschrieben. Die Richtlinie beschreibt Verbrennungs- und Brandfolgeprodukte in Abhängigkeit der verschiedenen Brandphasen und Brandbedingungen, gibt Hinweise zu den gesundheitlichen Auswirkungen sowie Empfehlungen zu Schutzmaßnahmen und ist auch für den Brand von Lithium-Ionen-Batterien anwendbar. Bei einem Brand liefert der Verbrennungsprozess unterschiedlichste Reaktionsprodukte aus der Verbrennung, Verschmelzung und Zersetzung (insbesondere Pyrolyse). Die Palette dieser Reaktionsprodukte umfasst viele gesundheitsgefährdende Stoffe, die in den Rauchgasen, in Ruß, in Aschen und in weiteren Verbrennungsrückständen enthalten sein können. Maßnahmen zum Schutz vor diesen Schadstoffen sind sowohl während der Brandbekämpfung, als auch nach Abschluss der Löscharbeiten zu beachten und betreffen gleichermaßen die Auswahl der Schutzausrüstung, wie auch das Verhalten an der Brandstelle (vfdb-RL 10-03 [3]). Grundsätzlich ist auch hier das vfdb-Merkblatt 10-13 „Einsatzhygiene bei Bränden“ [4] zu beachten.

Beim Brand von Lithium-Ionen-Batterien werden vor dem eigentlichen Brandstadium brennbare Elektrolyt- und Lösemitteldämpfe freigesetzt, die schwerer als Luft sind [5]. Bei der anschließenden Verbrennung entsteht heißer Brandrauch.

Aufgrund der organischen Elektrolytbestandteile und dem an der Kathode gebundenem Sauerstoff, setzen Lithium-Ionen-Batterien im Brandfall eine relativ hohe thermische Energie frei. Der bei der Verbrennung freigesetzte Sauerstoff wird jedoch immer sofort durch chemische Reaktionen mit anderen Zellmaterialien verbraucht. Diese Reaktionen sind chemisch gesehen vollständige Verbrennungsreaktionen, können in einer Li-Ionen-Zelle aber als katalytische Verbrennung ohne offenes Feuer ablaufen, da die anwesenden Stoffe (Metalle) katalytisch wirken können [6].

Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen, erfolgt eine vollständige Verbrennungsreaktion, sofern genügend (Luft-)Sauerstoff verfügbar ist. Diese vollständige Verbrennung ist im Hinblick auf die hauptsächlichen Brandfolgeprodukte (CO₂ und CO) mit anderen, beim Feuerwehreinsatz üblichen Verbrennungsprodukten vergleichbar.

Beim Löschen wird die Verbrennungstemperatur herabgesetzt. Ferner steht weniger Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung. Eine vollständige Verbrennung der Elektrolytdämpfe wird durch die Reduzierung des Sauerstoffgehaltes eingeschränkt. Die Konzentrationen von Stoffen wie Styrol, Formaldehyd, Naphthalin und Acenaphthen nehmen bei reduziertem Sauerstoffgehalt zu [5].

Zusammenfassend weist der Brand von Lithium-Ionen-Batterien im Hinblick auf die Brandfolgeprodukte in Abhängigkeit von Sauerstoffverfügbarkeit und Temperaturverlauf keine für die Feuerwehr untypischen Besonderheiten auf. Im Hinblick auf die zu verwendende persönliche Schutzausrüstung sowie weiterer Einsatzgrundsätze können und sollten die in der vfdb-RL 10-03 beschriebenen Grundsätze, insbesondere im Hinblick auf die zu verwendende persönliche Schutzausrüstung, angewendet werden. Für weitere Informationen sei auch auf [7] verwiesen.

4 Grundlegende Einsatzempfehlungen bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien

Gemäß vfdb-Merkblatt „MB10-17“ werden bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien die im Folgenden beschriebenen Gefahren für Einsatzkräfte erkannt und folgendes Vorgehen empfohlen.

4.1 Gefahren bei Feuerwehreinsätzen in Anwesenheit von Lithium-Ionen-Batterien

Aufgrund der Zusammensetzung an C-Gefahrstoffen sind bei der Batterie folgende besondere Gefahren zu beachten:

- Ausbreitung
- Atemgifte
- C-Gefahrstoffe
- Explosion
- Elektrizität

4.1.1 Gefahr durch austretende C-Gefahrstoffe

Lithium-Zellen sind gasdicht verschlossen, so dass im regulären Betrieb keine Inhaltsstoffe austreten können. Wird das Gehäuse mechanisch beschädigt so können Inhaltsstoffe gasförmig oder in flüssiger Form austreten.

- In flüssiger Form kann der Elektrolyt austreten.
- Die Lösungsmittel sind brennbar und stark reizend.
- Das Leitsalz bildet in Verbindung mit Feuchtigkeit und Temperatureinwirkung Flusssäure. Diese ist ätzend, hoch giftig und reizt die Atemwege.
- Zudem bildet das Leitsalz Phosphorsäure.
- Gasförmig treten hauptsächlich verdampfter Elektrolyt (Explosionsgefahr) und Zersetzungsprodukte des Elektrolyten aus, die ebenfalls brennbar und giftig sein können.
- Es können Schwermetallstäube entstehen.
- Kontaminiertes Löschwasser (korrosiv, teilweise mit Schwermetallsalzen belastet) kann in die Kanalisation gelangen. Auf Löschwasserrückhaltung achten!

4.1.2 Gefahr durch Feuer und / oder Explosion

- Die in Lithium-Batterien eingesetzten Materialien sind zum Teil brennbar und leicht entzündbar.
- Einige der eingesetzten Kathodenmaterialien zerfallen bei hohen Temperaturen spontan und setzen dabei Wärme und Sauerstoff frei.
- Da diese Reaktion exotherm ist und zudem Sauerstoff abgibt, kann es zu einem sehr schnellen thermischen Durchgehen der Zelle kommen.
- Das thermische Durchgehen wird durch zu hohe Zelltemperaturen ausgelöst, welche unter anderem auf folgende Ursachen zurückzuführen sind:
 - Äußere Erwärmung zu stark (z.B. Feuer, defekter Klimaschrank)
 - Äußerer Kurzschluss
 - Innerer Kurzschluss durch Zellfehler oder mechanische Beschädigung
 - Überladung der Zelle
 - Überentladung der Zelle
- Bei der Aufstellung einer größeren Anzahl von Lithium-Batterien in geschlossenen Räumen kann es zu explosionsartigen Brandverläufen kommen.

4.1.3 Gefahr durch Elektrizität

Es sind die Einsatzgrundsätze beim Vorliegen der Gefahr durch Elektrizität zu beachten.

4.2 Persönliche Schutzausrüstung für den Feuerwehreinsatz

Für den Einsatz an Batteriespeichersystemen ist im Sinne der vfdb-Richtlinie 08-10 [9] mindestens die Schutzausrüstung BBK 2 zu tragen. Diese hat sich auch in Untersuchungen als ausreichende Schutzform erwiesen, um eine Kontamination von Hautoberflächen ausreichend zu verhindern. Dies gilt auch, sofern infolge durchgehender Zellen ein kurzzeitiges Beflammen der Schutzkleidung stattfinden sollte. Das Anlegen von umluftunabhängigem Atemschutz ist dabei obligatorisch.

4.3 Empfehlungen für den Feuerwehreinsatz

Aufgrund der Beteiligung von C-Gefahrstoffen bei Einsätzen der Feuerwehr in Anwesenheit von Lithium-Ionen-Batterien sind die Grundsätze der FwDV 500 [2] zu berücksichtigen.

Die Einsatzgrundsätze, welche von der Betrachtung der Lithium-Ionen-Batterien abgeleitet werden können, können genauso für alle weiteren Batterietypen herangezogen werden.

Allgemeine Einsatzgrundsätze nach FwDV 500:

- Windrichtung beachten (Anfahrt, Einsatzverlauf)
- Abstand halten - Flusssäure (Fluorwasserstoffsäure)
- Eigenschutz beachten (Atemgifte, Ex-Gefahr, C-Gefahren)
- Gefahrenbereich sofort absperren
- Umluftunabhängiger Atemschutz (PA), Körperschutzform (KSF) 1
- Zündquellen vermeiden
- Unbedingt weitere Ausbreitung beobachten

Allgemeine taktische Hinweise zur Einsatzdurchführung:

- Fahrzeugaufstellung außerhalb des Gefahrenbereichs, Änderung der Windrichtung beachten.
- Menschenrettung und Brandbekämpfung unter Atemschutz und Körperschutzform 1.
- Nur unbedingt notwendiges Personal im Gefahrenbereich einsetzen, wenn möglich Abstand halten.
- Grundsätzlich unter geeignetem umluftunabhängigem Atemschutz vorgehen.
- Unmittelbaren Gefahrenbereich im Freien räumen.
- Ex-Gefahr beachten, Lüftungsmaßnahmen einhalten
- Bei notwendigen Tätigkeiten an der Batterie selber bzw. im direkten Nahbereich muss die persönliche Schutzausrüstung ggf. erweitert werden.
- Bei Verdacht auf Hautkontakt mit Flusssäure ist ein Arzt zu konsultieren.
- Temperaturüberwachung sofern möglich mittels Wärmebildkamera, sofern rascher Temperaturanstieg beobachtet wird, ist mit einer Zerfallsreaktion zu rechnen (ab größer 100° C). Ebenfalls wird eine Nachkontrolle mittels Wärmebildkamera empfohlen.
- Das primäre Löschmittel ist Wasser, da damit nicht nur der Brand gelöscht wird, sondern die Batterie gekühlt wird, um der weiteren Zersetzung entgegenzuwirken. Auch wird ein Teil der Zersetzungsprodukte gelöst und verdünnt. Dabei ist zu bedenken, dass durch die bauliche Anordnung der Li-Batterien in Modulen eine vollständige Durchdringung mit Löschwasser häufig nicht gegeben ist. Somit kann eine vollständige Kühlung meist nicht erreicht werden kann. Einsatz von Schaum und Löschzusätzen ist grundsätzlich möglich.
- Lachen ggf. mit Chemikalienbinder abbinden.
- Z.T. werden Speichercontainer aus baulichen Gründen aufgeständert aufgestellt. Beim Einbringen von Löschwasser ist darauf zu achten, dass dies aus dem Container abfließen kann und es nicht zu einer größeren Ansammlung im Container kommt, was die Statik des Tragwerkes beeinträchtigen könnte.

Ein Temperaturanstieg der Batterieoberfläche (respektive dem Gehäuse) von etwa einem Kelvin je Minute und einer Oberflächentemperatur von mehr als 60 °C erfordern umgehende Maßnahmen, z.B. Kühlungsmaßnahmen, um ein Durchgehen der Batterie ausreichend zu verhindern, siehe hierzu auch vfdb-Merkblatt 6-10 [10] sowie vfdb-Merkblatt 6-13 [11].

Für Batteriespeicheranlagen gilt: Es wird empfohlen das Batteriegehäuse oder anderweitige Anlagenteile von Batteriespeicheranlagen **nicht** weiter zu beschädigen, aufzuschneiden oder anderweitig zu manipulieren. Sollte dies aus einsatztaktischer Sicht zwingend notwendig sein, so sollte Rücksprache mit einer Elektrofachkraft oder dem Hersteller gehalten werden. Für Heimspeicheranlagen (Wohngebäude) ist zu prüfen, ob diese ggf. aus dem Gebäude gefahrlos ins Freie gebracht werden und dort entsprechend kontrolliert gekühlt werden.

5 Weitere Schlussfolgerungen aus dem Stand der Wissenschaft

Im Folgenden werden Erkenntnisse aus der Forschung zusammengestellt, die zu großen Teilen auf die Forschungsprojekte „SEE-2L - Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher in Second Life Anwendungen“ und „KeM - Kompetenzzentrum eMobility“ zurückgehen. Für weiterführende Informationen sei z.B. auf [12], [13], [14], [15], [16] verwiesen.

5.1 Ausgasen von Lithium-Ionen-Batterien

Versuche bestätigen, dass schon vor dem thermischen Durchgehen signifikante Mengen an Gasen gebildet und beim Versagen der Zelloberfläche freigesetzt werden. Erfolgt nach der ersten Gasfreisetzung eine weitere Beanspruchung, werden bereits bei nur einer betroffenen Zelle signifikante Mengen C-Gefahrstoffe freigesetzt. Zudem können explosionsfähige Atmosphären entstehen. Die Versuche bestätigen ferner, dass oftmals vor dem Brand ein relevantes Ausgasen der Zelle geschieht. Wenn Zersetzungsprodukte in gasförmiger Form innerhalb der Batterie entstehen, kann im frühen Stadium in Abhängigkeit von der Menge des Gasvolumens eine Wölbung des Gehäuses beobachtet werden bevor Ausgasungen erfolgen. Hierbei sind die Art und Größe des Gehäuses der jeweiligen Batterie zu berücksichtigen. Batterien mit niedrigen Ladezuständen gasen meistens weniger heftig aus als vollständig geladene Batterien.

Bei Ausgasungen treten brennbare Gase wie Methan (CH₄), Ethen (C₂H₄) und Kohlenstoffmonoxid (CO) mit am häufigsten auf. Ebenso ist die Anwesenheit von Wasserstoff (H₂) möglich, auch wenn die vorgenannten C-Gefahrstoffe in höheren Konzentrationen vorkommen. Die Zusammensetzung dieser Gasgemische kann zur Herabsetzung der unteren Explosionsgrenze (UEG) bzw. Selbstentzündungstemperatur des einzelnen C-Gefahrstoffes im Vergleich zu den UEG der Einzelgase führen. Um die Explosionsgefahr abzuschätzen, ist der C-Gefahrstoff mit dem niedrigsten UEG zu messen.

Vor dem thermischen Durchgehen freigesetzte Dekompositionsprodukte zeigen oftmals Ansammlungen in Bodennähe. Somit sind Messungen in Bodennähe sinnvoll. Um eine Zündung der Reaktionsgase zu verhindern, ist eine ausreichende Belüftung durch Anlagentechnik in dem Raum sinnvoll und in der Regel im Rahmen der Genehmigung der Nutzungseinheit gefordert. Räume mit Explosionsgefahr sind nach TRGS zu kennzeichnen und im Feuerwehrplan einzuzeichnen.

5.2 Brandereignis, offener Flammenbrand

Explosionen von Batterien im Sinne eines schnellen Druckanstiegs und der Ausbreitung einer Flammenfront sind auch bei Bränden von Batteriespeichern möglich, wenn sich ausreichend Reaktionsgase in einem Luftgemisch gebildet haben und kein ausreichender Luftwechsel

vorhanden ist. Kommt es zur Freisetzung des Elektrolyten, kann sich dieser an anderen Zündquellen oder im Rahmen des thermischen Durchgehens entzünden, da leicht entflammbare Reaktionsgase wie Methan, Ethen und Kohlenstoffmonoxid sowie in geringen Mengen Wasserstoff vorhanden sind. Hierbei sind auch Stichflammen möglich, sowie im Rahmen des thermischen Durchgehens Funkenflug und der Auswurf von festem Material aus dem Inneren der Batterien.

Dies gilt vor allem für ein Batteriesystem mit NMC-Zellen. LFP-Zellen können ein anderes Abbrandverhalten zeigen. Auch wenn die betroffenen Zellen oder Module aus Batteriesystemen mit LFP-Zellen meist zunächst ohne Zündung ausgasen, sind die Gasfreisetzungen genauso entzündlich. Dies gilt auch für unterschiedliche Ladezustände.

Bei den exothermen Reaktionen beim Durchgehen der einzelnen Zellen (ggf. kaskadenartig) muss immer wieder mit Spitzenwerten der toxischen Gase gerechnet werden. Diese nehmen bei ausreichender Belüftung wieder ab, sobald das Abblasen einer Zelle bzw. eines Moduls beendet ist.

Versuche zeigen, dass ein Ablöschen und Kühlen von Batteriespeicheranlagen einem kontrollierten Ausbrennen vorzuziehen ist. Bei anderen Anwendungsbereichen der Lithium-Ionen-Batterien, wie im Automobilbereich, kann in einigen Fällen wiederum ein Ausbrennen den Einsatzerfolg begünstigen (siehe Brandschutzforschung der Bundesländer Bericht 210 [17]).

Findet keine adäquate Wärmeabfuhr oder Kühlung statt, so ist die Reaktion weiterer Zellen im Batteriesystem wahrscheinlich, so dass es selbst nach dem optischen Löscherfolg eines Flammenbrandes erneut zum Gasaustritt und dem Durchgehen weiterer Zellen kommen kann. Daher werden im oben aufgeführten Dokument des BVES e.V. in bestimmten Fällen Löschanlagen empfohlen [7]. Wurde eine automatische Gas-Löschanlage ausgelöst, sollte zur Sicherstellung des Löscherfolges und Verhinderung des thermischen Durchgehens weiterer Batterien eine Einwirkzeit von mindestens 30 Minuten eingehalten werden, bevor die Zugangstüren geöffnet werden.

Es sind hier entsprechende Abstände für das Löschen an elektrischen Anlagen zu beachten (DIN VDE 0132 [18]). Meist ist nach dem thermischen Durchgehen die Zelle spannungsfrei. Es besteht aber die Gefahr, dass benachbarte Zellen und Module noch Spannung führen.

5.3 Kühlen von Batteriesystemen

Das Kühlen der Batteriesysteme, unter der Beachtung weiterer Kurzschlüsse zu vermeiden, wird voraussichtlich mehr Zeit in Anspruch nehmen als vergleichbare Einsätze in bisher gängigen Versorgungsräumen ohne Li-Ionen-Batterien. Hintergrund ist die Tatsache, dass eingehauste und / oder engverbaute Batteriemodule und -systeme nach einer thermischen Reaktion noch eine hohe Temperatur im Inneren aufweisen, auch wenn der Flammenbrand bereits bekämpft wurde. Temperaturunterschiede von mehreren Hundert Kelvin von innen nach außen sind hier möglich. Diese Wärmeenergie muss erst nach außen abtransportiert werden, um eine weitere Reaktion von noch nicht betroffenen Batteriezellen ausreichend ausschließen zu können. Das Kühlen der Batteriesysteme ist dann erfolgreich, wenn die Temperaturen ohne Kühlung dauerhaft unter 60°C verbleiben. Sollte die Kühlung nicht ausreichend sein, wird die Restwärme meist innerhalb von 10 Minuten weitere Reaktionen von Zellen hervorrufen. Allerdings sind auch noch weitere Reaktionen nach Stunden, Tagen und Wochen möglich.

Für die Dokumentation des Kühlens bzw. der Temperaturüberwachung wird das Messprotokoll und Verfahren des MB 06-13 „Temperaturmessprotokoll für Energiespeicher“ empfohlen.

Ein Kühlen mit Wasser ohne Zusätze hat sich als ausreichend erwiesen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die folgenden Durchflussmengen einen adäquaten Wärmeabtransport aus

konservativen Betrachtungsweisen sicherstellen. Größere Wassermengen fließen meist ohne einen wesentlichen Beitrag ungenutzt ab und vergrößern lediglich die anfallende Löschwassermenge.

Tabelle 1: Löschwasservolumenströme zur Kühlung von Lithium-Ionen-Batterien skalierbar für Systeme auf der Grundlage von Masse und Energiegehalt nach [16]

	25. Perzentil	Mittelwert	75. Perzentil
massenspezifische Durchflussmenge [(l/min)/kg], gerundet	0,28	0,4	0,84
energiespezifische Durchflussmenge [(l/min)/kWh], gerundet	2,8	4,0	8,4

Tabelle 2: Löschwasservolumenströme zur Kühlung von Lithium-Ionen-Batterien Batterien extrapoliert auf Kapazitätsgrößen nach [16]

Kapazität [kWh]	geschätzte Masse Batterie [kg]	Mittlerer Volumenstrom [l/min]
20	133 kg	50 - 80
100	666 kg	266 - 400
1000	6.666 kg	2666 - 4000

Bis die Wärmeenergie ausreichend aus der Batterie abgeleitet ist, werden weiterhin brennbare C-Gefahrstoffe freigesetzt; Kohlenstoffmonoxid (CO) ist eine der Hauptkomponenten.

Sollten sich bei den Batterien im Brandraum noch spannungsführende Zellen oder Module befinden, so ist die Bildung von Wasserstoff (Knallgas) nicht auszuschließen und nach Möglichkeit zu überwachen. Dies gilt auch für Anlagen, welche sich aufgrund von Überschwemmungen o.ä. unter Wasser befinden.

Sollten zuständige Einsatzkräfte über Hochdrucklöschgeräte verfügen, so zeigen Untersuchungen, dass derartige Geräte sich besonders für das Kühlen von Modulen in Gestellen oder offenen Regalreihen eignen, da sie eine besonders gute Kühlleistung besitzen und gleichzeitig die Kurzschlussgefahr bzw. Folgeschäden minimieren.

6 Löschwasserkontamination und -rückhaltung

6.1 Löschwasserkontamination

Im Löschwasser sind wasserlösliche Sulfate, Fluoride, Chloride und Nitrate sowie Li-Ionen und Schwermetalle enthalten, auch typische Brandfolgeprodukte gemäß vfdb-Richtlinie 10/03 (siehe oben) [19]. Wird sich aus einsatztaktischen Gründen dafür entschieden, Batteriesysteme in Wasserbädern oder ähnlichem über einen längeren Zeitraum einzubringen, können die Konzentration der Schadstoffe im verwendeten Wasser höher liegen. Der Grund dafür ist in der längeren Verweildauer und dem damit verbundenen Lösen der havarierten Batteriezelleninhalte mit dem Wasser zu erklären. Auffällig ist hierbei ein hoher pH-Wert im basischen (alkalischen Bereich, $\text{pH} > 10$) [13]. In dem Kühlwasser sind in Abhängigkeit der Verweildauer der Batterie im Wasserbad entsprechend hohe Schwermetallkonzentrationen aufzufinden. Konzentrationen in einem derartigen Kühlwasser sind um ein Vielfaches über dem Grenzwert für Trinkwasser erwartbar [17]. Dahingehend ist dieses Kühlwasser wie die Batterie durch den Betreiber

fachgerecht zu entsorgen; darauf ist bei der Übergabe der Einsatzstelle an den Betreiber hinzuweisen.

6.2 Löschwasserrückhaltung

Für die Löschwasserrückhaltung in Betrieben ist der Betreiber und nicht die Feuerwehr zuständig; im Kontext von Heimspeicheranlagen in Wohngebäuden wird in der Regel keine Löschwasserrückhaltung vorhanden sein. Ob eine Löschwasserrückhaltung im Brandfall notwendig ist, ist vorher im Genehmigungsverfahren festgelegt worden. Die Festlegung der Löschwasserrückhaltung ist Aufgabe der zuständigen Umweltbehörde in den Genehmigungsverfahren. Seit 2017 hat der Betreiber die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) zu beachten. Die Bund-Länder-Arbeitsgruppe - Umgang mit wassergefährdenden Stoffen hat am 29.04.2024 die Ergebnisse in Bezug auf Li-Ionen-Batterien in einem Merkblatt zusammengestellt [20].

Danach kann der Inhalt einer Batteriezelle wie ein Gemisch betrachtet werden, das im Regelfall aus festen und aus flüssigen wassergefährdenden Stoffen sowie nicht wassergefährdenden Stoffen wie Aluminium, Kupfer, Graphit, Kunststoffen usw. besteht. Batteriezellen mit Kobalt- und Nickelverbindungen in der Kathode werden von diesem Arbeitskreis in die Wassergefährdungsklasse WGK 3 eingestuft. Eine Einstufung des Inhalts der Zelle als allgemein wassergefährdend ist bei anderen als Lithium-Polymer-Zellen aufgrund des Flüssigkeitsanteils nicht möglich. Die Ermittlung der Einstufung, die komplex ist, hat durch den Hersteller zu erfolgen; für Feuerwehreinsatzkräfte ist allein das Ergebnis relevant.

Andere Faktoren sind vom Betreiber bei von defekten Li-Ionen-Batterien zu beachten, da dort eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Versagen der Batterie und damit der Austritt flüssiger Elektrolyte gegeben ist. Soweit Li-Ionen-Batterien nicht bekannter Zellchemie umgeschlagen, gelagert und behandelt werden, ist gemäß § 3 Abs. 4 AwSV von WGK 3 auszugehen. Die Anlagen unterliegen in der Regel der behördlichen Überwachung. In der Folge ist das Ergebnis der Festlegung für eine notwendige Löschwasserrückhaltung - oder nicht - im Genehmigungsverfahren erfolgt und vom Betreiber im Feuerwehrplan einzutragen.

Wichtig für den Feuerwehreinsatz ist, dass Li-Ionen-Batterien als Gefahrgut der Gefahrgutklasse 9 eingestuft werden; der Gefahrzettel ist mit 9a gekennzeichnet.

Zum Verständnis für Feuerwehreinsatzkräfte ist relevant, dass als Rückhalteeinrichtungen für austretende flüssige Stoffe und Löschwasser nicht nur spezielle Auffangwannen, sondern bspw. auch Montage- und Produktionshallen oder Container in Betracht kommen können, soweit diese über eine flüssigkeitsundurchlässige Bodenfläche verfügen.

7 Einsatzstellenübergabe und Einsatznachbereitung

Als grundlegende Bewertungshilfe sei hier auf die vfdb-Richtlinie 10-03 verwiesen, die, neben den Hygienemaßnahmen bei Bränden, auch Hinweise zur Übergabe der Brandstellen inkl. Gefährdungen und Schutzmaßnahmen für kalte Brandstellen liefert. Ferner bietet die Dokumentation nach MB 06-13 „Temperaturmessprotokoll für beschädigte Energiespeicher“ einen fachgerechten Nachweis für die Übergabe und ggf. Fortsetzung der Maßnahme durch den Betreibenden.

In diesem Zusammenhang wird empfohlen, dass bei Brandereignissen mit starker Rauchentwicklung die Hygienemaßnahmen zur Vermeidung der Kontaminationsverschleppung (vfdb-Richtlinie 10-13 [3], DGUV Information 205-035 [21]) sichergestellt werden. Dies gilt auch für das kontaminierte Löschwasser (siehe Abschnitt 6.), welches durch seine meist alkalischen

oder basischen Eigenschaften, Schwermetalle etc. nicht ohne persönliche Schutzausrüstung weiter behandelt werden sollte. Folgerung: Die zuständige Umweltbehörde ist hinzuzuziehen und der Betreiber der Anlage auch für die Entsorgung des anfallenden Löschwassers zuständig.

Aufgrund der Tatsache, dass im Havarie- und Brandfall einer Batteriespeicheranlage wesentliche Mengen an CO freigesetzt werden, sind im Hinblick auf die Permeation von CO durch Bauteile auch angrenzende Bereiche auf erhöhte CO-Konzentration zu prüfen und ggf. Belüftungsmaßnahmen einzuleiten. Der Betreiber ist bei der Übergabe auf diesen Sachverhalt hinzuweisen, so dass dieser ggf. eine Freimessung mittels gesonderter Technik und Fachpersonal im Rahmen seiner Führorsorgepflicht betrachtet.

Unbeschädigte und ggf. auch beschädigte Module oder Einzelzellen stehen meist noch unter Spannung. Bei größeren Batteriespeicheranlagen kann dies auch auf die gesamten Stromschienen und Regalsysteme zutreffen. Die sich daraus ergebenden elektrischen Gefahren sind bei der Einsatzstellenübergabe dem Verantwortlichen aufzuzeigen und nach Möglichkeit auch durch eine Elektrofachkraft beurteilen zu lassen, um weitergehende Gefährdungen zu verhindern bzw. diesen sachgerecht zu begegnen.

8 Literaturhinweise

1. vfdb-Merkblatt 10-17
Empfehlung für den Feuerwehreinsatz bei Gefahr durch Lithium-Zellen, Batterien und Akkumulatoren
VdS-Verlag, Köln 2020
2. FwDV 500
Einheiten im ABC-Einsatz
AFKzV, 2022
3. vfdb-Richtlinie 10-13
Schadstoffe bei Bränden
VdS-Verlag, Köln 2020
4. vfdb-Merkblatt 10-13
Empfehlung für den Feuerwehreinsatz zur Einsatzhygiene bei Bränden
VdS-Verlag, Köln 2020
5. Kunkelmann, J.
Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien
Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht Nr. 192, 2017
6. Meißner, D.
Brandverhalten von Li-Ionen-Batterien - Arbeitspapier
Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V., 2021
7. Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen-Großspeichersystemen
BVES e.V.
2. Auflage, 2021
8. FwDV 7
Atemschutz
AFKzV, 2002 mit Änderungen 2005

9. vfdb-Richtlinie 08-10
Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) auf der Basis einer Gefährdungsbeurteilung für Einsätze bei deutschen Feuerwehren
VdS-Verlag, Köln 2022
10. vfdb-Merkblatt 06-10
Technische Quarantäneflächen für beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien
VdS-Verlag, Köln 2022
11. vfdb-Merkblatt 06-13
Merkblatt Temperaturmessprotokoll für beschädigte Energiespeicher
VdS-Verlag, Köln 2023
12. Hahn, S.-K., Keutel, K., Vorwerk, P., Krause, U.
Gasfreisetzungen bei Lithium-Ionen-Batterien
Tagungsband der 67. Jahresfachtagung der vfdb
VdS-Verlag, Köln 2021
13. Tschirschwitz, R., Bernardy, C., Wagner, P., Rappsilber, T., Liebner, C., Hahn, S.-K., Krause, U.
Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway - scale-up tests from cell to second life modules
RSC Advances, Issue 30, 2023
14. Tschirschwitz, R., Hahn, S.-K., Krause, U.
BMBF-Vorhaben SEE-2L - Auswirkungen des thermischen Durchgehens von Second-Life-Lithium-Ionen-Batterien auf Modulebene
vfdb Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, Heft 3, 2024
15. Hahn, S.-K., Saupe, A., Tschirschwitz, R., Bernardy, C., Janßen, M., Amano, K., Krause, U.
Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher - Ergebnisse aus dem Projekt SEE-2L
Tagungsband der 70. Jahresfachtagung der vfdb
VdS-Verlag, Köln 2024
16. Considerations for ESS Fire Safety
Final Report
DET NORSE VERITAS (U.S.A.), INC. (DNV GL), 2017
17. Neske, M., Kaufmann, J., Butscher, D., Vogel, C.
Evaluierung von technischen Verfahren zur Löschmitteleinbringung in Hochvoltspeicher
Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht Nr. 210, Heyrothsberge, 2022
18. DIN VDE 0132
Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung im Bereich elektrischer Anlagen
VDE Verlag GmbH, Berlin - Offenbach, 2018
19. Welte, U. u.a.
Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen
Forschungsprojekt AGT 2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), 2020
20. Merkblatt

Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien (LIB) nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)
Bund-Länder-Arbeitskreis Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, 2024

21. DGUV Information 205-035
Hygiene und Kontaminationsvermeidung bei der Feuerwehr
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2020
22. Heidel, M. u. a.
Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility
Renewable and Sustainable Energy Reviews 165, 2022
23. FBFHB-018
Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2020
24. FBFHB-024
Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2020
25. Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression
Report No.: 2019-1025
Maritime Battery Safety Joint Development project
DNV GL AS Maritime, 2019
26. Kunkelmann, J.
Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen
Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht Nr. 175, 2015
27. VdS 3103
Lithium-Batterien
VdS-Verlag, 2019
28. VdS 3400
Vermeidung von Schäden durch Rauch und Brandfolgeprodukte - Gefahren, Risiken, Schutzmaßnahmen
VdS-Verlag, 2017
29. Held, M., Tuchschild, M., Zennegg, M., Figi, R., Schreiner, C., Mellert, L. D., Welte, U., Kompatscher, M., Hermann, M., Nachev, L.
Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility,
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 165, 2022
30. Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes
Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen-Großspeichersystemen
2021