

Lithium Batterien

Brandgefahren und Sicherheitsrisiken

Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung

Dr. Michael Buser

Inhalt

1	Batterien:	
	Umwandlung von chemischer in elektrische Energie.....	3
1.1	Grundlagen	3
1.2	Warum Lithium?.....	3
1.3	Primärbatterien (Lithium-Metall-Batterien).....	5
1.4	Lithium-Sekundärbatterien (Lithium-Ionen-Batterien).....	5
1.5	Anwendungen	7
2	Sicherheitstechnische Betrachtung:	
	Risiken und Gefahren	8
2.1	Temperaturverhalten	8
2.2	Thermal Runaway (Thermisches Durchgehen).....	9
2.3	Inhaltsstoffe und Zersetzungsprodukte im Brandfall.....	9
2.4	Elektrische Gefahren	12
2.5	Ursachen für Batteriebrände.....	12
3	Erste Hilfe vor-Ort:	
	Feuerwehreinsatzkräfte und Rettungsorganisationen.....	14
3.1	Gefährdung durch HV-Energiespeicher nach einem Unfall	14
3.2	Brandgefahren	15
3.3	Chemische Gefahren	17
3.4	Vorgehensweise am Unfallort.....	17
3.5	Ergänzende Hinweise	17
4	Konventionelle Schadenverhütung:	
	Allgemeine Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen	18
4.1	Bauliche Brandschutzvorkehrungen	18
4.2	Organisatorische Schutzmaßnahmen	18
4.3	Anlagentechnische Sicherheitssysteme	19
5	Anwendungs-typische Schadenverhütung:	
	Produkt-spezifische Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen.....	21
5.1	Schutz- und Überwachungseinrichtungen an der Batterie	21
5.2	Lithium-Batterien unterschiedlicher Leistungskategorien	22
5.3	E-Bikes und Pedelecs: Spezielle Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen	24
5.4	Lagerung: Batterien und Batterie-betriebene Produkte	24
5.5	Transport: Straße, Schiene, Wasser, Luft	25
5.6	Entsorgung: Recycling und Abfallwirtschaft.....	29
6	Ausblick.....	31
7	Fazit	32

1 Batterien: Umwandlung von chemischer in elektrische Energie

1.1 Grundlagen

Batterien sind chemische Energiespeicher, die in einer elektrochemischen Reaktion die gespeicherte Ladung in Form von elektrischer Energie abgeben können. Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie beschäftigt die Menschen schon seit über 2000 Jahren. Die ersten elektrochemischen Stromquellen wurden bereits einige Jahrhunderte vor unserer Zeitrechnung zur Vergoldung von Metallgegenständen eingesetzt.

Heute gibt es für die unterschiedlichsten Anwendungen eine nahezu unüberschaubare Vielfalt von Batterietypen, die sich in Kathode, Anode und Elektrolyt sowie in Bauform, Leistung und Größe unterscheiden. Es gibt eine Fülle möglicher Kombinationen der einzelnen Komponenten, deren Beschreibung und Katalogisierung aufgrund der enorm schnellen technischen Weiterentwicklung nur schwer auf dem aktuellen Stand zu halten ist.

Der Begriff Batterie bezeichnet ursprünglich die Zusammenschaltung mehrerer einzelner Batteriezellen. Jedoch hat sich inzwischen ein Bedeutungswandel des Begriffs vollzogen, so dass mit Batterie auch eine einzelne Zelle gemeint sein kann.

1.2 Warum Lithium?

Lithium-Batterien sind verglichen mit den konventionellen Batteriesystemen eine vergleichsweise junge Technologie. Trotz ihrer erst relativ kurz zurückliegenden Markteinführung zeigen sie im Bereich der Gerätebatterien das größte Marktwachstum und beginnen die etablierten Systeme zu verdrängen. Verschiedene Marktanalysen zeigen Prognosen, wonach der Bedarf an Lithium-Batterien weiterhin rasant ansteigen wird.

Lithium ist das leichteste Metall im chemischen Periodensystem (Atommasse 6,941 g/mol; Dichte 0,53 g/cm³) und besitzt das von allen Metallen größte elektrochemische Potenzial (3,04 V vs. Standardwasserstoffelektrode). Die daraus resultierende hohe elektrische Kapazität und die in Kombination mit verschiedenen Kathodenmaterialien realisierbaren hohen Zellspannungen machen es zum idealen Elektrodenmaterial für chemische Energiespeicher.

Aus diesem Grund halten Lithium-Batterien in allen Bereichen des täglichen Lebens vermehrt Einzug. Sie werden vorzugsweise als netzunabhängige Stromversorgung oder als Pufferbatterien von elektronischen Geräten eingesetzt. Insbesondere der Boom bei mobilen elektronischen Kleinanwendungen (Smartphones, Notebooks, Kameras, Werkzeuge, etc.) hat zur massenhaften Verbreitung von Lithium-Batterien geführt. Aber auch für den Einsatz im Segment Kleinfahrzeuge (Antrieb für Fahrräder, Roller, Rasenmäher, Gabelstapler etc.) gewinnen Lithium-Batterien zunehmend an Bedeutung. Eine geradezu explosionsartige Entwicklung erfährt die Anwendung von Lithium-Batterien im Bereich Automotive (z. B. Hybridantriebe, Hoch-Volt-Elektroantriebe etc.). Im Bereich der Elektromobilität sollen beispielsweise in Deutschland bis zum Jahr 2020 insgesamt 1 Millionen Elektrofahrzeuge fahren (6 Millionen bis 2025)

Die Bezeichnung "Lithium-Batterie" ist der Sammelbegriff für eine Vielzahl verschiedener Batteriesysteme, in denen Lithium in reiner oder gebundener Form als Aktivmaterial der Batterieelektrode verwendet wird.

Grundsätzlich differenziert man zwei unterschiedliche Batteriearten. Während Lithium-Primär-Batterien (z.B. Lithium-Knopfzellen) für den einmaligen Gebrauch mit einer irreversiblen Entladung vorgesehen sind, ermöglichen wieder aufladbare Lithium-Sekundär-Batterien (Li-Ionen-Akkus oder Li-Polymer-Akkus) eine mehrfach reversible Umwandlung von chemischer in elektrische Energie, so dass diese Batterien für den wiederholten Gebrauch wieder aufgeladen werden können.

System	Lithium Ion	Lithium Polymer	Lithium/Lithium-cobaltoxid	Lithium-Kohlenstoff-monofluorid	Lithium-Mangan-dioxid (Li/MnO ₂)	Lithium-Schwefel-dioxid-	Lithium-Thionyl-chlorid
Typ	Sekundär	Sekundär	Sekundär	Primär	Primär	Primär	Primär
Nutzung	Akkumulator	Akkumulator	Akkumulator	Zelle	Zelle	Zelle	Zelle
Bestandteile	Li(C)/ organ. Lösungsmittel, Li-Salz/ LiCoO ₂	Li(C)/ polym. Elektrolyt/ LiCoO ₂	Li/LiAlCl ₄ × SO ₂ /LiCoO ₂	Li/ organ. Lösungsmittel, LiBF ₄ /CF _x	Li/ organ. Lösungsmittel, LiClO ₄ /MnO ₂	Li/ organ. Lösungsmittel, LiClO ₄ /MnO ₂	Li/LiAlCl ₄ in SOCl ₂ / SOCl ₂ (C)
Spannung	3,6 V	3,7 V	3,9 V	3,0 V	2,8 V	2,8 V	3,4 V
Anwendung	Mobilfunk, Notebook	Mobiltelefone, PDAs und Notebooks	im Entwicklungsstadium für Hochleistungsanwendungen	Geräte mit geringem Strombedarf und langer Einsatzdauer	tragbare Geräte und Pufferbatterien	brennbar, Schwefeldioxid, metallisches Lithium, darum fast nur im militärischen Sektor	sehr hohem Energieinhalt, geringer Selbstentladung und gutem Tieftemperaturverhalten
Besonderheit	besten Daten im Verhältnis gespeicherte Energiemenge pro Gewicht am Markt	Zellaufbau gestattet die Fertigung von dünnen Folienbatterien und damit eine günstige Formgestaltung	Überladefähig mit anorg. Elektrolytlösung	Hoher Energieinhalt, geringe Selbstentladung	mit hohem Energieinhalt und gutem Tieftemperaturverhalten. Kostengünstig	mit hohem Energieinhalt, hoher Belastbarkeit und gutem Tieftemperaturverhalten	wegen der aggressiven Inhaltsstoffe weitgehend nur im militärischen Bereich

Die Vorteile von Lithium-Batterien im Vergleich zu konventionellen chemischen Energiespeichern ergeben sich aus den elektro-chemischen Leistungsparametern:

- Die hohe Zellspannung bei Lithium-Batteriezellen erlaubt die Konstruktion von Batterien mit nur einer einzelnen Zelle. Moderne mobile elektronische Kleinanwendungen (z.B. Mobiltelefone) arbeiten heute ausschließlich mit Lithium-Akkus, die mit nur einer Einzelzelle bestückt sind.
- Lithium-Sekundärbatterien kennen im Gegensatz zu konventionellen Akkus keinen Memory-Effekt (Kapazitätsverlust durch zyklisches Laden/Entladen) und erreichen einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 95% (Verhältnis zwischen Entlademenge zu Lademenge).
- Der weite Temperatureinsatzbereich, in dem Lithium-Batterien fehlerfrei arbeiten (-40°C bis +70°C), insbesondere das gute Tieftemperaturverhalten und die geringe Selbstentladung (Lagerfähigkeit) machen Lithium-Batterien für zahlreiche Anwendungsgebiete unersetzlich.

1.3 Primärbatterien (Lithium-Metall-Batterien)

Nichtwiederaufladbare Lithium-Metall-Batterien werden in den handelsüblichen Größen konventioneller Batterien angeboten: Mono (D), Baby (C), Mignon (AA), Micro (AAA), Block 9V, Knopfzellen CR2032. Sie weisen eine hohe Zellspannung, hohe spezifische Energie und Energiedichte bei gutem Tieftemperaturverhalten und eine geringe Selbstentladung (bis > 10 Jahre Lagerfähigkeit) auf.

- Privat: Uhren, elektronische Kleinanwendungen
- Industrie: Messstellen
- Sicherheitstechnik: Langzeit-Rauchwarnmelder
- Kraftfahrzeuge: Sicherheitssysteme, Kommunikationssysteme, Motorsteuerung, Telematik, Reifendruckkontrolle, etc.

Für primäre Lithium Systeme verwendet man metallisches Lithium als Anode. Die gängigen kommerziellen Typen unterscheiden sich vornehmlich im Kathodenmaterial und dem verwendeten Elektrolyten.

Als Kathodenmaterial für den Einsatz in Lithium Batterien eignet sich eine Reihe von organischen und anorganischen Materialien (z.B. Schwefeldioxid, Thionylchlorid, Eisensulfid, Kupfersulfid, Mangandioxid, Silberchlorid, etc.). Die kommerziell am weitesten verbreitete Lithium-Primärbatterie ist die Lithium-Braunstein-Zelle (Li-MnO_2), die vielfach in einer flachen runden Bauform als Knopfzelle oder in einer zylindrischen Form als Rundzelle eingesetzt wird. Sie besitzt eine Nennspannung von 3,0 V, und findet ihren Einsatz hauptsächlich in kleinen Elektronikanwendungen (z.B. Armbanduhren, Taschenrechner, etc.).

Als Elektrolyt kommen üblicherweise organische Lösungsmittel (z.B. Propylencarbonat, Ethylencarbonat, Acetonitril, γ -Butyrolacton, etc.) oder anorganische Verbindungen (z.B. Thionylchlorid), sowie Festelektrolyte, Polymerelektrolyte oder Salzschnmelzen zur Anwendung. Zur Erhöhung der Leitfähigkeit werden dem Elektrolyten fluorhaltige Leitsalze, wie LiBF_4 , LiCF_3SO_3 oder $\text{LiN}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$ zugesetzt.

1.4 Lithium-Sekundärbatterien (Lithium-Ionen-Batterien)

Aufladbare Lithium-Ionen-Batterien gibt es unterschiedlichen Zellen-Bauformen:

Rundzelle: Die einzelnen Schichten der Zellen werden dabei aufeinander geschichtet und anschließend um einen Dorn gewickelt. Der zylindrische Zellwickel wird in ein festes Aluminiumgehäuse gepackt, das gleichzeitig auch den Stromableiter für die positive Elektrode darstellt. Die negative Elektrode wird über den vom Gehäuse isolierten Deckel der Zelle gebildet.

Prismatische Zelle: Hierbei handelt es sich meist, wie auch bei den Rundzellen, um gewickelte Zellen. Im Gegensatz zu den Rundzellen werden die Zellwickel hierbei aber nicht um einen Dorn, sondern flach gewickelt. Der dabei entstandene Flachwickel wird anschließend in ein prismatisches Gehäuse gepackt. Die Elektroden werden typischerweise vom Gehäuse isoliert über den Deckel des Gehäuses kontaktiert.

Pouchzelle: Diese wird wegen ihrer äußerlichen Ähnlichkeit mit eingeschweißtem Kaffeepulver auch „Coffee-Bag-Zelle“ genannt. Diese Zellform besitzt im Gegensatz zu den beiden anderen Zelltypen kein festes Gehäuse, sondern nur eine mit Aluminium beschichtete Kunststoffolie als Umhüllung. Um trotzdem eine gewisse Stabilität und gleichmäßige Form zu gewährleisten, muss diese durch den Aufbau des Zellstapels gewährleistet werden. Dies kann durch die Verwendung von geschichteten Zellstapeln anstelle der sonst verwendeten Wickelungen erreicht werden.

Aufladbare Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine hohe spezifische Energie und Energiedichte und haben einen sehr geringen Memory-Effekt.

- Privat: Mobiltelefone, Notebooks, Kameras, Spielzeuge
- Industrie: Tragbare Elektrowerkzeuge, Sicherheitsstromversorgungen, Notfallsysteme
- Elektromobilität: PKW, Nutzfahrzeuge, Elektrofahrräder, etc.
- Pufferspeicher: Photovoltaik

Eine negative Elektrode aus Lithium-Metall bietet aus den oben beschriebenen elektrochemischen Gründen grundsätzlich optimale Voraussetzungen für eine Batterieanwendung. Bereits vor über 40 Jahren wurden neben einmal verwendbaren Lithium-Primärbatterien erste Baureihen von wieder aufladbaren Zelltypen mit Lithium-Metall Elektroden erprobt. Ein großer Nachteil dieser ersten Lithium-Sekundärbatterien war die mangelnde Beherrschbarkeit der elektrochemischen Reaktionsabläufe in Form von lokalen Kurzschlüssen und das damit verbundene inhärente Sicherheitsrisiko.

Weiterhin hat die geforderte Reversibilität (Entladen / Wiederaufladen) die Entwicklung von Lithium-Sekundärbatterien vor große Herausforderungen gestellt. Da sich Lithium beim Entladevorgang quasi verbraucht und sich eine Elektrode aus Lithium-Metall praktisch auflöst, besteht dadurch für den umgekehrten Ladevorgang keine Möglichkeit mehr, die Geometrie der Elektrode zu rekonstruieren. Insofern ist eine Elektrode aus Lithium-Metall ungeachtet der elektrochemischen Theorie allein aus anwendungstechnischen Gründen für den Einsatz in einer wieder aufladbaren Sekundärbatterie (Akku) wenig geeignet. Neuere Entwicklungen im Bereich Lithium-Polymerbatterien scheinen Lösungsansätze für dieses Problem der mangelhaften Elektrodenintegrität gefunden zu haben, weshalb seit einiger Zeit auch Sekundärbatterien mit einer Elektrode aus Lithium-Metall zum Einsatz kommen.

Der kommerzielle Durchbruch der wieder aufladbaren Lithium-Batterie wurde mit der Markteinführung einer Zelle erreicht, welche gänzlich auf metallisches Lithium verzichtete, die Lithium-Ionen Batterie. Anstelle des metallischen Lithiums werden sogenannte Lithium-Einlagerungsverbindungen (Intercalation) eingesetzt. In diesem System ist sowohl auf der Kathodenseite wie auch bei der Anode das Aktivmaterial in der Lage, das Lithium reversibel einzulagern. Hierbei enthält die negative Elektrode an Stelle metallischen Lithiums als aktives Material häufig eine Kohlenstoffmodifikation mit Schichtstruktur (z.B. Graphit).

Im Hinblick auf die Anforderungen an Energiedichte, Zellspannung und Lebensdauer (Zyklenzahl) sowie einer ausreichenden Formstabilität der Elektroden haben sich bisher vornehmlich Batteriesysteme bewährt, die ein Lithium-Übergangsmetalloxid vom Typ LiXO_2 ($\text{X} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$) als Elektrode verwenden, wobei insbesondere Lithium-Cobalt-Dioxid (LiCoO_2) Verbreitung gefunden hat.

Als Elektrolyt werden für Lithium-Sekundärbatterien hauptsächlich wasserfreie organische Lösungsmittel (z.B. Ethylencarbonat, Diethylencarbonat, etc.) sowie Polymere aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) oder Polyvinylidenfluorid-Hexafluoropropylen (PVDF-HFP) eingesetzt, in denen Fluor-haltige Leitsalze wie LiPF_6 oder LiBF_4 gelöst sind.

1.5 Anwendungen

Die Vorteile von Lithium-Batterien (z.B. Lithium-Ionen Akkus) im Vergleich zu konventionellen chemischen Energiespeichern (z.B. Nickel-Metallhydrid Akkus) ergeben sich aus den elektrochemischen Leistungsparametern. Die hohe Zellenspannung bei Lithium-Batterien von typischerweise 3,6 V erlaubt die Konstruktion von Batterien mit nur einer einzelnen Zelle. Moderne Mobiltelefone arbeiten heute ausschließlich mit einem Lithium-Akku und sind nur noch mit einer Einzelzelle bestückt. Eine Batterie auf Basis von herkömmlichen Nickelelektroden würde für die gleiche Anwendung drei in Serie geschaltete 1,2 V Zellen benötigen.

Lithium-Sekundärbatterien kennen im Gegensatz zu konventionellen Akkus keinen Memory-Effekt (Kapazitätsverlust durch zyklisches Laden/Entladen) und erreichen einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 95% (Verhältnis zwischen Entlademenge zu Lademenge). Der weite Temperaturbereich, in dem Lithium-Batterien eingesetzt werden können (-40 °C bis +70 °C), insbesondere das gute Tieftemperaturverhalten und die geringe Selbstentladung (über 10 Jahre Lagerfähigkeit) machen Lithium-Batterien für zahlreiche Anwendungsgebiete unersetzlich. Unter den zahlreichen Batteriesystemen besitzen insbesondere Lithium-Batterien anwendungstechnische Vorteile, die die Einsatzmöglichkeiten von Batterien revolutioniert haben. Grundsätzlich unterscheidet man bei Lithium-Batterieanwendungen in Bezug auf die Leistung drei Kategorien:

Mobile elektronische Kleinanwendungen: Die ersten Lithium-Batterien, die in nennenswerten Stückzahlen produziert wurden, kamen vornehmlich in mobilen elektronischen Kleinanwendungen zum Einsatz. Insbesondere der Boom im Segment Mobiltelefone, Digitalkameras und Notebooks hat zur massenhaften Verbreitung von Lithium-Batterien geführt. Andererseits wäre für mobile elektrische Anwendungen sicherlich nicht ein derartiger Markterfolg zu erzielen gewesen, wenn nicht erst der Einsatz von Lithium-Batterien lange Nutzungszeiten bei geringem Gewicht möglich gemacht hätten. In Verarbeitungsbetrieben oder Produktionsanlagen werden moderne Lithium-Batterien für unterschiedlichste Einsatzgebiete verwendet. Insbesondere bei tragbaren Werkzeugmaschinen (Akku-Schrauber, Akku-Bohrmaschinen, etc.) aber auch für mobile Beleuchtungstechnik, für mobile Steuerungsgeräte sowie für mobile Kommunikationstechnik ist der Einsatz von Lithium-Batterien unverzichtbar.

Batterieanwendungen im mittleren Leistungsspektrum: Insbesondere für den Einsatz im Segment Kleinfahrzeuge (Light Electric Vehicles, LEV) als Antrieb für Fahrräder, Roller, Rasenmäher, Gabelstapler, etc. gewinnen Lithium-Batterien zunehmend an Bedeutung.

Hochenergiebatterien für Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb: Eine nahezu explosionsartige Entwicklung erfährt die Lithium-Batterie Industrie im Bereich Automotive (z.B. Hybridantriebe, Hoch-Volt-Elektroantriebe, etc.). Der im Jahr 2009 von der Deutschen Bundesregierung verabschiedete "Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität" strebt eine substantielle Steigerung des Anteils von Kraftfahrzeugen mit Elektroantrieb an. Demnach soll Deutschland weltweit die Nummer eins im Bereich Elektromobilität werden und bis zum Jahr 2020 sollen eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen fahren.

Moderne Lithium-Akkus für Kraftfahrzeuge erreichen eine Energiedichte von über 120 Wh/kg (zum Vergleich: konventionelle Autobatterien auf der Basis von Bleiakkumulatoren erreichen ca. 30 Wh/kg). Immer größer werdende Anwendungen benötigen naturgemäß immer größere Speichersysteme, die einerseits einen wesentlich höheren Energieinhalt haben und andererseits auch in der Lage sind, große Leistungen abzugeben. Lithium-Ionen Batterien haben sich in den letzten Jahren im Bereich mobiler Systeme mit einem Energieinhalt von wenigen 100 mWh bis zu etwa 100 Wh sehr erfolgreich durchgesetzt. Um bei leistungsstarken Hochenergie-Batteriesystemen (z.B. im Bereich Kraftfahrzeuge) die hohen Spannungen von mehreren Hundert Volt zu erreichen, werden die Speichersysteme üblicherweise durch Serien-/Parallelschaltungen von Standard-Einzelzellen aufgebaut.

2 Sicherheitstechnische Betrachtung: Risiken und Gefahren

Aus der Verwendung bestimmter chemischer Verbindungen (z.T. reaktiv, toxisch, feuergefährlich) im Zusammenhang mit hohen Energiedichten (Ladungsfreisetzung verursacht z.T. hohe Temperaturen) und aus dem für Sekundärbatterien notwendigen Einsatz elektronischer Schaltelektronik (mögliche technische Defekte) ergeben sich bei Lithium-Batterien spezifische Gefahrenpotenziale, die eine besondere Sicherheitsbetrachtung erfordern.

Aufgrund spektakulärer Ereignisse wurde die mögliche Problematik von Lithium-Ionen-Batterien in der Öffentlichkeit bekannt. Das Versagen von hauptsächlich Lithium-Ionen-Batterien aber auch von Lithium-Metall-Batterien z.B. in Flugzeugen, Fahrzeugen, Notebooks, Smartphones und anderen elektrischen Geräten führte in den letzten Jahren zu großem Rückrufaktionen.

- Im Jahr 2013 kam es zum dritten Brand des Elektroautos Tesla Model S.
- Am 3. September 2010 stürzte der UPS-Airlines-Flug 6, eine Boeing 747-400 auf dem Weg vom Dubai International Airport zum Flughafen Köln-Bonn in der Nähe des Flughafens Dubai ab, wobei die zwei Besatzungsmitglieder ums Leben kamen. Als Absturzursache wurde ein Feuer in dem Bereich des Laderaums festgestellt, in dem sich Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien befanden.
- Nach dem Flug einer Boeing 787 (Dreamliner) am 7. Januar 2013 von Narita/ Japan nach Boston/ USA entstand im Zielflughafen ein Brand aufgrund einer thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterie (Thermal Runaway).
- Am 12. Juli 2013 kam auf dem London-Heathrow Airport ebenfalls in einer Boeing B787 zum Brand einer nichtwiederaufladbaren Lithium-Metall-Batterie in einem ELT (emergency locator transmitter).

Eine Batterie zeichnet sich dadurch aus, dass sie die chemisch gespeicherte Energie beim Entladevorgang in Form von elektrischer Energie abgibt. Im Fall eines Thermal Runaways wird die gesamte Energie allerdings nicht als elektrische Energie sondern in Form von thermischer Energie abgegeben. Hierbei ist zu beachten, dass eine Lithium-Ionen-Batterie im Falle des Versagens das ca. 7 bis 11 fache der elektrisch gespeicherten Energie in Form von thermischer Energie freisetzen kann. Hinzu kommt, dass einige der eingesetzten Kathodenmaterialien bei hohen Temperaturen spontan zerfallen. Da diese Reaktion exotherm ist und zudem Sauerstoff abgibt, der seinerseits zur Beschleunigung weiterer kritischer Reaktionsabläufe beiträgt, kann es zu einem sehr schnellen und unkontrollierbaren "thermischen Durchgehen" der Zelle kommen.

2.1 Temperaturverhalten

Die optimale Betriebstemperatur von Lithium-Batterien liegt im Bereich 20°C bis 40°C. In diesem Temperaturbereich besitzt die Lithium-Ionen-Batterie die höchste Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig noch tolerierbarem Alterungsverhalten.

Bei Minustemperaturen treten spezielle Alterungsmechanismen auf, die zu einer irreversiblen Schädigung der Zellen führen können (z.B. Abscheiden von reinem Lithium an der Anode, sog. „Lithium-Plating“). Dies führt im schlimmsten Fall zu einem inneren Kurzschluss.

Die meisten Lithium-Ionen-Zellen sind nicht für Betriebs- und Lagertemperaturen über 60°C ausgelegt. Mit steigender Temperatur reagieren Lithium-Batterien unter Druckaufbau in der Zelle, Austritt brennbarer Gase, Zellenbrand, bis hin zum sich selbst verstärkenden explosionsartigen Abbrennen der Batterie (Thermal Runaway). Insofern ist es gefährlich, ein Handy oder Laptop im Sommer auf der heißen Ablage im Auto vollgeladen in der Sonne liegen zu lassen, da hier Temperaturen bis 80°C auftreten können. Noch problematischer ist die sofortige Verwendung bei diesen hohen Temperaturen und führt zu noch weiterer Erwärmung und Beschädigung bzw. Versagen.

- 70°C: Selbsterhitzung der Graphit-Anode und des Elektrolyten. Tiefsiedende Bestandteile im Elektrolyten beginnen ab 80°C zu verdampfen und führen zum Druckaufbau, der die Zelle bersten lassen kann.
- 130°C: Separator aus PE, PP oder PE/PP verschließt die Poren (Shut-down). Separator schmilzt, zusätzliche Erwärmung aufgrund von Kurzschluss. Autokatalytischer Anstieg der Temperatur.
- 250°C: Kathodenmaterial reagiert exotherm mit dem Elektrolyten (Zersetzung). Druckanstieg in der Zelle durch Verdampfung und Zersetzungsgase. Aufblähen des Zellengehäuses und evtl. Öffnung (austretende Zersetzungsgase sind zündfähig). Einige Kathodenmaterialien zerfallen bereits bei Temperaturen unter 200°C spontan und geben in einer exothermen Reaktion Wärme und Sauerstoff ab, wodurch es zum Thermal Runaway kommen kann.
- 600°C: Kathodenmaterialien zersetzen sich und ändern ihre Kristallstruktur. Freisetzung von Sauerstoff. Zellenbrand innerhalb kurzer Zeit. Thermal Runaway.
- 660°C: Schmelzen des Aluminium Stromableiters (Kathode). Freisetzung von Graphit mit möglicher Gefährdung durch Staubexplosion. Weiterer Anstieg der Temperaturen, bei denen die Aluminiumfolie der positiven Elektrode zu brennen beginnt (Metallbrand).

2.2 Thermal Runaway (Thermisches Durchgehen)

Das thermische Durchgehen ist eine sich selbst verstärkende, exotherme chemische Reaktion, wobei sehr schnell sehr hohe Temperaturen erreicht werden können, die selbst chemisch eingelagertes Lithium zur Zündung bringen kann (Metallbrand).

2.3 Inhaltsstoffe und Zersetzungsprodukte im Brandfall

Lithiumzellen sind in der Regel gasdicht verschlossen, so dass im regulären Normalbetrieb keine Inhaltstoffe austreten können. Wird allerdings das Gehäuse mechanisch beschädigt oder kommt es infolge eines Brandereignisses zu einer thermischen Belastung, können unterschiedliche ätzende, giftige und kanzerogene Stoffe aber auch brennbare Inhaltsstoffe (staubförmig, gasförmig oder in flüssiger Form) austreten.

Lithium-Metall: Lithium-Primärbatterien besitzen ein Gefahrenpotenzial, das sich grundsätzlich aus der Verwendung von Lithium-Metall ableitet. Lithium ist hochreaktiv und neigt zu heftigen autokatalytischen Reaktionen. Weiterhin besitzt Lithium eine vergleichsweise niedrige Schmelztemperatur (181 °C), wobei es durch geschmolzenes Lithium zu unkontrollierbaren Zuständen im Batteriekörper kommen kann. Übersteigt beispielsweise infolge eines technischen Defekts die lokale Temperatur den Schmelzpunkt des Lithiums kann es zu explosionsartigen Reaktionen des Metalls mit dem Elektrolyten kommen. Beim sog. Thermal Runaway kann es sehr schnell zu sehr hohen Temperaturen kommen, wobei aufgrund der enormen Energiefreisetzung selbst chemisch eingelagertes Lithium zur Zündung gebracht werden kann (Metallbrand).

Wasserstoff (Knallgas): Eine weitere Gefahr von Lithium-Metall ergibt sich insbesondere bei Kontakt mit Wasser (z.B. Löschwasser). Hierbei wird das Wassermolekül (H_2O) durch die hohe Reaktivität des Alkalimetalls augenblicklich in seine Bestandteile zerlegt, wodurch es zur Bildung von Wasserstoffgas (H_2) kommen kann. Da Wasserstoff-/Luft-Gemische in einem sehr weiten Mischungsverhältnis zündfähig sind (4 bis 75 Vol.% H_2 in Luft) und sie zudem eine nur sehr geringe Zündenergie benötigen, reichen bereits geringe elektrostatische Entladungen oder elektrische Zündfunken (z.B. Lichtschalter) als Zündquelle aus, um eine sog. Knallgasexplosion auszulösen.

Auch wenn Lithium bei Sekundärbatterien nicht als reines Metall, sondern als chemische Verbindung (im geladenen Zustand z.B. Lithium-Cobalt-Dioxid, LiCoO_2 , bzw. im entladenen Zustand als Lithium-Intercalationsverbindung) vorliegt, kann es auch bei diesen Lithium-Modifikationen bei Kontakt mit Wasser zur Bildung von Wasserstoffgas kommen.

Eine weitere Gefahr ergibt sich in Zusammenhang mit Wasser aus dem Elektrodenpotenzial, bzw. der Gleichspannung zwischen den beiden Batteriepolen. Auch wenn bei einer intakten und vollständig gekapselten Batterie die Wahrscheinlichkeit, dass der innere Elektrodenkörper (Lithium) mit Wasser in Kontakt kommt, sehr gering ist, kann allein die Elektrodenspannung zwischen den beiden Batteriepolen ausreichen, um Wasser in seine Bestandteile zu zersetzen (Hoffmann'sche Zersetzungsreaktion). Jeder erinnert sich an den Chemieunterricht in der Schule, wo in einem einfachen Laborversuch handelsübliche Batterien in einem Behälter mit Salzwasser untergetaucht und anschließend die Bildung von Wasserstoffgas durch die sog. Knallgasprobe nachgewiesen wurde. Überträgt man die Erkenntnisse aus dem Laborversuch in die Praxis, besteht im Fall, dass geladene Batterien vollständig mit Löschwasser überdeckt oder mit dem abfließenden Löschwasser in Auffangbecken gespült werden, die Gefahr, dass es wegen der Gleichspannung zwischen den Batteriepolen zur Bildung von Wasserstoffgas und dadurch zu einer Knallgasexplosion kommen kann.

Graphit: Beim thermischen Durchgehen großer Batterietypen kommt es zum Teil zu einer beträchtlichen Graphit-Freisetzung. Zum einen besteht hier insbesondere in Räumen die Möglichkeit einer Gefährdung durch eine Graphit-Staub-Explosion, zum anderen eine Kontamination des Raumes mit leitfähigen Graphit-Staub und Beschädigung von elektrischen Geräten aufgrund von Kurzschlüssen.

Schwermetalle: Dadurch, dass in Sekundärbatterien häufig Oxide aus der Reihe der sog. Übergangsmetalle zum Einsatz kommen (Cobalt, Nickel, Mangan), sind im Brandfall staubförmige Reaktionsprodukte oder Rückstände dieser z.T. gesundheitsschädlichen (Cobalt) oder giftigen (Nickel) Stoffe in der Asche und im Brandrauch zu erwarten. Bei Cobalt-Verbindungen kann bereits eine Exposition von nur 25 Milligramm beim Menschen zu Haut-, Lungen-, Magenkrankungen, Leber-, Herz-, Nierenschäden und Krebsgeschwüren führen. Das Einatmen von Nickel-Verbindungen ist mit einem erhöhten Krebsrisiko für Karzinome der Lunge und der oberen Luftwege verbunden.

Brennbare Komponenten: Die in Lithium-Batterien eingesetzten Materialien bzw. einzelne Batteriekomponenten sind zum Teil brennbar und leicht entzündbar. Allein im Hinblick auf die brandschutztechnischen Parameter, wie Flammpunkt, Zündtemperatur, Explosionsgrenzen und Heizwerte weisen die eingesetzten Elektrolytmaterialien auf eine hohe Brandlast hin.

Die Elektrolytflüssigkeit besteht zumeist aus einer Mischung von brennbaren organischen Lösungsmitteln und einem Leitsalz. Die in Lithium-Batterien verwendeten organischen Lösungsmittel sind in der Regel leicht entzündlich und können mit Luft explosive Gemische bilden.

Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆): Bedingt durch die Verwendung von fluor-haltigen und/oder phosphorhaltigen Verbindungen (z.B. das überwiegend eingesetzte Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆)) können im Brandfall unspezifisch gasförmige Stoffe freigesetzt werden, die als giftige Fracht im Brandrauch ein erhebliches Risiko für Personen und Umwelt darstellen. Da diese Verbindung stark hygroskopisch ist, kommt es bereits bei Spuren von Wasser (Eintritt von Luftfeuchte bei geborstenem Zellenkörper) zu einer chemischen Reaktion zu Fluorwasserstoff (HF) und Phosphorsäure (H₃PO₄).

Phosphorsäure (H₃PO₄) ist stark hygroskopisch und besitzt reizende bis ätzende Wirkung auf Augen, Atemwege und Haut, bei oraler Aufnahme kommt es zu Schädigungen im Magen-Darm-Trakt.

Fluorwasserstoff / Flusssäure (HF) ist ein farbloses Gas (stechender Geruch, sehr giftig, ätzend, stark hygroskopisch) und führt bereits bei geringsten Konzentrationen zu gesundheitlichen Beschwerden (1,4 ppm), bzw. zu schweren oder bleibenden gesundheitlichen Schäden (IDLH-Wert: 30 ppm). Durch Reaktion mit Wasser (z.B. Löschwasser) bildet sich Flusssäure (ätzende und Reizwirkung auf Schleimhäute und Haut, Gefahr schwerer Augen- und Lungenschädigung, Störungen von Stoffwechsel, Herz-Kreislauf- und Nervensystem, Schädigung der Knochen). Flusssäure ist ein starkes Kontaktgift, dessen Gefährlichkeit besonders kritisch einzustufen ist, weil es sofort von der Haut resorbiert wird. Dadurch sind Verätzungen tieferer Gewebeschichten und sogar der Knochen möglich, ohne dass die Haut äußerlich sichtbar verletzt ist.

Bei Bränden von Lithium-Ionen-Batterien kann es bereits bei gängige Größen (z.B. Laptop) zu einer kritischen Gefährdung durch HF kommen. Bereits 100 g Akkumasse können ca. 5000 m³ Raumluft derart belasten, dass behördliche Grenzwerte überschritten sind (ein handelsüblicher Laptop-Akku wiegt üblicherweise über 300 g). Als Richtwert kann man die Fluorwasserstoff-Freisetzung mit folgendem theoretischen Daumenwert abschätzen: ca. 150 l gasförmiger Fluorwasserstoff pro kW/h Batterieenergie. Allerdings kann nur eine HF-Messung vor Ort die Gefahrenlage konkret klären.

Nach Bränden, bei denen Lithium-Batterien involviert sind, finden sich hohe HF-Konzentrationen im Brandrauch und folglich auch starke HF-Kontaminationen auf Gebäudeteilen und Anlagen (auch wenn diese nicht direkt vom Brandgeschehen betroffen sind).

Weitere giftige Verbindungen: Aus den phosphorhaltigen Bestandteilen können bei ungünstigen Bedingungen Phosphorwasserstoff Verbindungen (z.B. Phosphin) entstehen, die als giftig und wassergefährdend eingestuft sind. Phosphin kann inhalativ aufgenommen werden und reizt die Atemwege stark. Als schlimmste inhalatorische Folge kann ein toxisches Lungenödem auftreten.

Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder: Bei versagenden lithiumhaltigen Batterien sowohl vor dem Brandstadium als auch bei Brandentstehung werden giftige Stoffe freigesetzt, die schwerer als Luft sind (z.B. Elektrolyt- und Lösemitteldämpfe, Chlorwasserstoff aus PVC-Leitungen, Kohlendioxid) oder Brandrauch- und Zersetzungskomponenten. Die schweren Bestandteile können sich im Bodenbereich sammeln und werden von optischen Rauchmeldern an der Decke nicht detektiert. Hieraus ergibt sich eine besondere Gefährdung von schlafenden Personen. Das Aufladen von z.B. Smartphones oder Laptops im Schlafzimmer (z.B. auch im Hotel) über Nacht ist daher aus Sicherheitsgründen nicht zu empfehlen.

2.4 Elektrische Gefahren

Elektrische Spannung: Zwischen den Polen einer Batterie liegt eine elektrische Gleichspannung an. Neben den üblichen Brandgefahren, welche typischerweise von elektrischen Geräten und elektronischen Bauteilen ausgehen, können Batterien mit hohen Spannungen vor allem für Personen eine erhebliche Gefahr darstellen. Die für Elektrofahrzeuge erforderlichen hohen Energie- und Leistungsdaten werden durch eine serielle und parallele Verschaltung von einzelnen Batteriezellen erzielt. Damit haben die Batteriesysteme je nach Anwendung Nennspannungen von bis zu 800 Volt und können beim Berühren zu einem elektrischen Schlag führen (Hinweis: Bereits Gleichspannungen von 120 V sind lebensgefährlich).

Bei einem verunglückten Elektrofahrzeug ist für die Rettungskräfte häufig unklar wo die Elektrik ausgeschaltet wird oder wo welche Kabel verlaufen. Da Hochvolt-Energiespeicher wie kleine Kraftwerke zu verstehen sind und sich nicht einfach durch einen Notausschalter abstellen lassen, stellt die hohe Spannung für Wartungspersonal und insbesondere für Rettungskräfte eine besondere Gefahr dar.

Elektrischer Strom: Für die Anwendung in Elektrofahrzeugen müssen Batteriesysteme kurzzeitig hohe Ströme in der Größenordnung von mehreren Hundert Ampere liefern. Die Gefahr durch den elektrischen Strom besteht in der Bildung von Lichtbögen (z.B. bei Leitungsunterbrechung) und in der Überlastung, bzw. in Kurzschlüssen. Hierbei kann es bei einem Kurzschluss im HV-System bei heutigen Lithium-Ionen-Batterien innerhalb weniger Millisekunden Ströme von 6.000 A und mehr aufbauen (Hinweis: Bereits Stromstärken von 50 mA sind lebensgefährlich).

Derartige Stromstärken führen augenblicklich zu einer lokalen Temperaturerhöhung, wodurch sich eine Brandgefahr ergibt. Die hohen elektrischen Leistungen verursachen Überhitzungen, die zu einem unkontrollierbaren sog. "thermischen Durchgehen" führen können. Besonders kritisch ist, dass der Übergangswiderstand durch die Erwärmung weiter zunimmt. Das wiederum führt zu einer zusätzlichen Temperaturerhöhung, wodurch wiederum der Übergangswiderstand steigt, und so weiter. In Folge dieses sich selbst verstärkenden Dominoeffekts kann es infolge der hohen Temperaturen zum Schmelzen einzelner Batteriekomponenten (z.B. Separatoren, Elektroden) zu Kurzschlüssen und zum Brand kommen.

2.5 Ursachen für Batteriebrände

Fehlerhafte Handhabung: Gefährlichen Situationen resultieren insbesondere aus fehlerhafter Handhabung und unsachgemäßem Umgang. Als Folge von mechanischen Beschädigungen (z.B. durch Schlag, Sturz, Quetschen, etc.), elektrischen Fehlern (z.B. durch Kurzschluss, Tiefentladung, Überladung, Umpolung, etc.) oder thermischen Einwirkungen (z.B. durch innere Überhitzungen, sekundäre Wärmestrahlung von außen, etc.) kann es zum Austreten des Elektrolyten, zu Überdruckreaktionen mit Abblasen gasförmiger Reaktionsprodukte, zu Feuererscheinungen oder zu einer Explosion kommen.

Bei einer Überladung eines Lithium-Akkus kann es beispielsweise zu einer Kathodenzersetzung unter Freisetzung von starken Oxidationsmitteln mit einer daraus folgenden stark exothermen Reaktion des Elektrolyten kommen. Hierdurch kann innerhalb der Lithium-Zelle eine sich selbstverstärkende Reaktion verursacht werden (sogenannter "Thermal Runaway"), wobei sich beim "Durchgehen der Batterie" heiße Gasen entwickeln, die zum Öffnen der Zelle und zum Heraus-schleudern von gegebenenfalls brennenden Batteriekomponenten führen.

Mechanische Beschädigung: Bei mechanischen Beschädigungen von Batterien besteht die Gefahr, dass es zu inneren Kurzschlüssen und damit zu einem Brand kommt. Eine Beschädigung des Gehäuses kann durch Fertigungsfehler (z.B. unsachgemäßer Zusammenbau einzelner Batteriekomponenten), durch mechanische Belastung (z.B. Schlag, Sturz, Quetschen, etc.) oder durch Überdruck in der Zelle erfolgen. Überdruck entsteht in der Regel durch Überhitzung der Zelle, was die Folge einer Überlastung, eines Kurzschlusses oder einer Überladung sein kann.

Sekundäre thermische Belastung: Bei thermischer Belastung von außen (z.B. durch Wärmestrahlung im Brandfall) kann es bei Lithium-Batterien zum Schmelzen einzelner Batteriekomponenten (z.B. Separatoren) und damit zu einem Kurzschluss kommen, was leicht zu einem Brand führen kann.

Äußerer Kurzschluss: Hierzu kann es kommen, wenn es (z.B. durch einen metallischen Gegenstand) zu einem beidseitigen Polkontakt kommt.

Innerer Kurzschluss durch Zellfehler oder Crash: Eine der Hauptursachen für interne Kurzschlüsse sind Fertigungsfehler bei der Herstellung von Lithium-Zellen. Wenn beispielsweise während des Herstellungsprozesses metallische Partikel oder sonstige leitfähige Verunreinigungen zwischen Separator und Batterieelektrode eingeschlossen werden, kann es im späteren Betrieb zu einer lokalen Beschädigung der Separatorfolie und damit zu einem internen Kurzschluss kommen. Durch den sog. „Laufmascheneffekt“ können sich zunächst mikroskopisch kleine Separatorschäden im Laufe von Tagen oder Wochen zu weitläufigen Rissen im Folienmaterial ausweiten, wodurch sich die zunächst unbedeutende (weil lokal begrenzte) kurzschlussbedingte Temperaturerhöhung dann quasi exponentiell zu einem Durchgehen der Zelle entwickeln kann. Insofern bleiben innere Kurzschlüsse im praktischen Alltagsgebrauch zumeist erst unbemerkt und führen erst nach längerem Gebrauch zu plötzlichen Brandereignissen.

Überladung: Eine Zelle oder Batterie wird mit höherem Strom geladen als vom Hersteller spezifiziert. Hierbei kann es zu einer Verdampfung der organischen Elektrolytflüssigkeit und auch zur Schädigung der kristallinen Schichtstruktur kommen, was in Verbindung mit einer stark exothermen Reaktion zum Freisetzen von elementarem Sauerstoff führt. Außerdem kann es zu einer Ablagerung von metallischem Lithium an der Anode kommen. Das Kathodenmaterial wird zum oxidierenden Element und verliert seine Stabilität. Bei diesem exothermen Vorgang kann es aufgrund einer starken lokalen Temperaturerhöhung zu einem Brand und unter bestimmten Umständen auch zu einer explosionsartigen Entlastungsreaktion kommen.

Tiefentladung der Zelle: Bei Tiefentladung wird die Entladeschlussspannung unterschritten, wobei sich irreversibel die Elektrolytflüssigkeit zersetzt. Wird solch eine tiefentladene Lithium-Ionen-Zelle geladen, kann die zugeführte Energiemenge durch das Fehlen von Elektrolytflüssigkeit nicht mehr in chemische Energie gespeichert werden und die Ladeenergie wird in Wärme umgesetzt.

Defekt im Kühlkreislauf (bei Großbatterien): Erfolgt (wie bei Großbatterien und Fahrzeugbatterien üblich) die interne Kühlung der Batterie mit einem Kühlmittel auf der Basis eines Glykol/Wasser-Gemisches besteht bei einem Defekt des Kühlkreislaufes und Leckage von Kühlmittel die Gefahr, dass aufgrund der Kapillarwirkung das Kühlmittel zwischen den Zellen aufsteigt und auch noch nach mehreren Tagen zu internen Kurzschlüssen und letztendlich zum thermischen Durchgehen der Batterie führen kann.

Gefälschte Lithium-Ionen-Batterien und Ladegeräte: Einige Unternehmen (insbesondere aus dem Segment Unterhaltungselektronik) führen auf ihren Internet-Seiten Warnhinweise zu gefälschten Lithium-Ionen-Batterien und Ladegeräten auf. Hierbei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Produkte nicht mit den entsprechen Sicherheitselementen ausgerüstet sind und es beim Gebrauch bzw. Laden zu verschiedenen Problemen kommen kann: Ungewöhnlich starkes Erhitzen, Bersten und Auslaufen der Batteriefülligkeit, Explosion oder Feuer, Verletzungen des Benutzers, z. B. Verbrennungen oder Erblinden. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass für Fehlfunktionen oder Unfälle keine Haftung übernommen wird, die durch den Gebrauch von nicht originalen Lithium-Ionen-Akkus und Akku-Ladegeräten (einschließlich gefälschter Produkte) entstehen.

3 Erste Hilfe vor-Ort: Feuerwehreinsatzkräfte und Rettungsorganisationen

Feuerwehreinsatzkräfte müssen sich im Brandfall zum einen gegen das Brandereignis selbst und im Fall vor lithiumhaltigen Batterien gegen chemische Substanzen (C-Einsatz) schützen. Bei der Personenrettung aus und der Bergung von verunfallten Elektro- und Hybridfahrzeugen sind die Einsatzkräfte der Feuerwehr aufgrund der hohen Spannungen besonderen Gefahren ausgesetzt.

Von großer Bedeutung sind daher die besonderen Anforderungen an die persönliche Schutzausrüstung der Einsatzkräfte.

3.1 Gefährdung durch HV-Energiespeicher nach einem Unfall

Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen sind grundsätzlich isoliert von Karosserieteilen eingebaut. Bei Beschädigung der Isolation (z.B. Crash) kann die Isolation allerdings durchbrochen werden und Fahrzeugteile unter Spannung stehen. Bei Beschädigung der Batterie bzw. der stromführenden Kabel und Bauteile besteht die Gefahr von Lichtbögen. Hierdurch kann es zum Brand der Batterie oder des Fahrzeugs kommen.

Obwohl in den Fahrzeugen z.B. beim Crash in der Regel eine allpolige Abschaltung der Batterie und damit eine Freischaltung des Fahrzeuges und der Kabel von elektrischer Spannung erfolgt, kann man bei einem verunglückten Elektrofahrzeug nie sicher sein, ob die Elektronik die Batterie tatsächlich sicher allpolig abgeschaltet hat. Deshalb könnten die Kabel und Bauteile der Leistungselektronik noch unter Spannung stehen. Die spannungsführenden Kabel sind orangefarben gekennzeichnet, jedoch ist deren genaue Verlegung im Fahrzeug nicht bekannt. Insofern ergibt sich bei HV-Systemen mit Lithium-Ionen-Batterien eine zusätzliche Gefährdung durch elektrischen Schlag, Kurzschlüsse und Störlichtbögen. Hier ist daher zusätzlich eine PSA wie z.B. Elektriker-Schutzhandschuhe, isolierende Schutzhelme mit Störlichtbogen-Visier, isolierende Werkzeuge, Abdecktuch zum Abdecken spannungsführender Teile erforderlich.

- Die Hochvoltkabel sind oft in den Holmen und Trägern des Unterbodens des Fahrzeuges verlegt. Beim Arbeiten mit hydraulischen Rettungsgeräten ist besondere Vorsicht geboten.
- Ein elektrisches Entladen der HV-Energiespeicher an der Unfallstelle ist nicht praktikabel.
- Der Zustand des HV-Energiespeichers ist kontinuierlich zu beobachten (Rauchentwicklung).
- Der HV-Energiespeicher darf nicht berührt werden.
- Es wird empfohlen, eine für Hochvolt-Systeme qualifizierte Elektrofachkraft über die zuständige Leitstelle anzufordern, um die konkrete Gefährdung zu beurteilen und das weitere Vorgehen festzulegen.

3.2 Brandgefahren

Brandszenarien

Batteriezellen neigen bei thermischer Belastung zur explosionsartigen Zündung mit der Neigung zum sog. "rocketing effekt" (ähnlich Spraydosen). Zur Vermeidung von Sekundärbränden und Kollateralschäden sind geeignete Maßnahmen zum Schutz von Nachbargebieten zu treffen.

Beim Brand von Elektro-/Hybrid-Fahrzeugen entsteht, wie bei konventionellen Fahrzeugen auch, aufgrund von brennenden Materialien, z.B. Kunststoffen, gesundheitsschädlicher Brandrauch. Die HV-Energiespeicher als auch deren einzelne Zellen verfügen über mechanische Sicherungseinrichtungen, die z.B. bei einem brandbedingten Temperatur- und Druckanstieg öffnen und somit zu einer gezielten Ausgasung und Druckentlastung führen.

Wie auch bei verunfallten konventionellen Fahrzeugen ist das Restrisiko einer verzögerten Brandentstehung zu einem späteren Zeitpunkt nach einem Unfall nicht auszuschließen, dies gilt insbesondere bei beschädigten HV-Energiespeichern.

Löschmittel

Für den abwehrenden Brandschutz wird bei Lithium-Batterie-Bränden als Löschmittel neben dem konventionellen Löschmittel Wasser unter anderem auch Metallbrandpulver, sauerstoffverdrängende Löschmittel oder Tensid-Gemische empfohlen.

Wasser: Bei Brandereignissen mit Lithium-Batterien werden wegen des enormen Energieinhalts extreme Wärmemengen freigesetzt. Unter Berücksichtigung der hohen Brandlast von Lithium-Batterien und der damit im Brandfall frei werdenden thermischen Energie liefert das exzellente Wärmebindungsvermögen von Wasser einen wirksamen Beitrag zur Brandbekämpfung. Insofern kommt bei einem Feuerwehreinsatz grundsätzlich das klassische Löschmittel Wasser zum Einsatz.

Der möglichst frühzeitige Einsatz von Wasser und Verwendung großer Mengen bewirkt insbesondere durch den Kühleffekt einer deutlich verlangsamten Reaktion und damit auch der Brandentwicklung. Außerdem werden giftige Rauchgase niedergeschlagen. Das Löschen mit Wasser bewirkt zudem, dass alle geschädigten Zellen, deren Gehäuse offen ist, endgültig durch den Kontakt mit Wasser langsam entladen werden.

Bei Lithium-Batterie-Bränden ist mit einem deutlich größeren Löschwasserbedarf als zur Bekämpfung brennender konventioneller Brände zu rechnen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der festen Batterieummantelungen eine direkte Kühlung der Zellen nicht möglich ist. Dies führt zu einer weiteren Erhöhung des Wasserbedarfs.

Die Entstehung von Wasserstoff ist zu beachten. Wasserstoff kann unter Umständen mit der Umgebungsluft zündfähige Gemische bilden und schlagartig abbrennen. Wasserstoff/Luft-Mischungen sind in einem sehr weiten Mischungsverhältnis zündfähig (4 bis 77 Vol. % H₂ in Luft und benötigen eine sehr niedrige Zündenergie, so dass bereits geringe elektrostatische Entladungen als Zündquelle ausreichen).

Metallbrandpulver / Sand: Der Löscheffekt bei Sand oder Metallbrandpulver basiert vordergründig auf dem Prinzip der Abtrennung der Sauerstoffzufuhr durch Abdeckung des Brandgutes. Diese Löschmittel bewirken allerdings keinerlei Kühleffekt, so dass im Brandfall die freiwerdende thermische Energie nicht wirksam bekämpft werden kann. Weiterhin besteht beim Entfernen der Löschmittelabdeckung die Gefahr, dass es durch den wieder verfügbaren Sauerstoff zu einer heftigen Verpuffungsreaktion kommen kann.

Ansichts der enormen thermischen Energie, die bei Bränden von Lithium-Batterien zu erwarten ist, und im Hinblick auf die Probleme der praktischen Anwendung bei fortgeschrittenem Brandszenario (wie verteilt man das Löschmittel flächendeckend über die Brandstelle?), beschränkt sich der Einsatz von Sand oder Metallbrandpulver lediglich auf kleinere Entstehungsbrände. Für größere Schadensszenarien erscheint Sand oder Metallbrandpulver als Löschmittel wenig geeignet. Analoges gilt auch für ABC-Löschpulver.

Sauerstoffverdrängende Löschmittel: Der Einsatz von gasförmigen, sauerstoffverdrängenden Löschmitteln (z.B. CO₂-Löschgas) unterdrückt zwar den Brand und die freigesetzte Energie wird reduziert, allerdings bewirken sie ebenfalls keinen wirksamen Kühleffekt. Dieser bestimmt allerdings insbesondere bei Lithium-Batterie-Bränden maßgeblich den Löscherfolg (oder Misserfolg). Auch der Sauerstoffverdrängende Effekt ist bei Lithium-Batterien zu relativieren. Der im Brandfall freiwerdende atomare Sauerstoff aus der Zelle ermöglicht auch ohne äußeren Luftsauerstoff eine Teiloxidation. Insofern ist der Einsatz von Löschgasen aus brandschutztechnischer Sicht wenig zweckmäßig.

Löschmittel-Additive: Durch Verwendung verschiedener Additive (z.B. Calciumsalze, Gelbildner, Quellmittel, Tensidverbindungen, etc.) zum Löschwasser versuchen einige Löschmittelhersteller, den Herausforderungen an einen effektiven Löschangriff bei Lithium-Batterien zu begegnen. Fakt ist, dass Löschmittelzusätze den Wärmeübergang an das Löschmittel erhöhen können und insofern der Einsatz geeigneter Additive helfen kann, den Wasserbedarf zu reduzieren und den Löscherfolg zu beschleunigen.

Neuere Untersuchungen mit speziellen Additiven haben zwar im Einzelversuch gute Löscherfolge ergeben. Die gegenüberstellenden Löschversuche wurden allerdings mit unterschiedlichen Strahlrohrtypen und unterschiedlicher Durchflussraten durchgeführt und sind insofern nur bedingt vergleichbar. Außerdem zeigen konventionelle Mehrbereichsschaummittel vergleichbare Ergebnisse. Mehrbereichsschaummittel wurden allerdings bei den gegenüberstellenden Löschversuchen nicht eingesetzt.

Insofern ist ein Löscherfolg mit bestimmten Additiven zwar durchaus möglich (insofern sind diese grundsätzlich geeignet, bzw. nicht schädlich), eine objektive Bewertung dieser Löschmittelzusätze gegenüber konventionelle Mehrbereichsschaummittel ist aus oben beschriebenen Gründen allerdings kaum möglich. Insofern zeigen die Produktpräsentationen dieser „neuartigen“ Löschmittel gegenüber konventionellen (deutlich kostengünstigeren) Mehrbereichsschaummitteln keine objektiv belastbaren (und seriös vertretbaren) Vorteile.

3.3 Chemische Gefahren

- Es besteht bei Bränden insbesondere moderner Fahrzeuge grundsätzlich das Problem, dass aufgrund der inzwischen verbauten Materialien erheblich erhöhte Rauch- und Energiemengen freigesetzt werden.
- Säuren und Schwermetalle, welche bei Fahrzeugbränden auftreten können, werden durch das Löschwasser verdünnt, können aber im Brandrauch in hohen Konzentrationen enthalten sein. Aus dem HV-Energiespeicher austretende Elektrolyte sind in der Regel reizend oder ätzend. Hautkontakt und Einatmen der Dämpfe sind unbedingt zu vermeiden.
- Daher ist stets umluftunabhängiger Atemschutz zu tragen. Schutzkleidung nach EN 469 bietet neben einem Wärmeschutz zudem auch einen gewissen Säure-schutz um eine Kontamination der Haut zu verhindern.
- Zur Aufnahme von Leckagen sind konventionelle Bindemittel zu verwenden.

3.4 Vorgehensweise am Unfallort

- Spannungsfreiheit herstellen: Alle spannungsführenden Leitungen müssen abgeschaltet werden. Die Zündung ist auszuschalten (auch 12-Volt Batterie abklemmen).
- Interlock- und Service-Trennstecker an der Hochvoltbatterie ziehen.
- Gegen Wiedereinschalten sichern: Zündschlüssel, Interlock- und Servicetrennstecker an einem sicheren Ort aufbewahren.
- Spannungsfreiheit feststellen: Die Spannungsfreiheit ist mit einem zugelassenen Spannungsprüfer festzustellen.
- Erden und Kurzschließen.
- Benachbarte unter Spannung stehende Teile abdecken.

3.5 Ergänzende Hinweise

- Elektro- und Hybridfahrzeug geben im eingeschalteten Zustand keine Geräusche ab. Elektrofahrzeuge können sich daher jederzeit „unbemerkt“ still bewegen: Fahrzeuge gegen Wegrollen absichern.
- Geschädigte (auch thermisch belastete) Batteriezellen neigen zur verspäteten Selbstentzündung (auch nach erfolgreichem Löschangriff). Daher dürfen Elektro- oder Hybridfahrzeug nach einem Einsatz NIEMALS unbeaufsichtigt oder in geschlossenen Hallen abgestellt werden.
- Beschädigte Hochvolt-Batterien bzw. Teile davon gelten als Gefahrgut und dürfen daher nur von Fachkundigen verladen, auf offenen Fahrzeugen transportiert und im Freien gelagert werden.
- Fahrzeug aus Gewässer bergen: Im Wasser besteht durch das HV-System grundsätzlich kein erhöhtes Stromschlagrisiko. Die Vorgehensweise beim Bergen ist identisch zu konventionellen Fahrzeugen. Gegenüber konventionellen Fahrzeugen besteht in der Regel keine zusätzliche Gefahr für das Trinkwasser.
- Achtung Spannungen bis 1000V! Aufgrund der elektrischen Gefahren sind die Grundsätze der Brandbekämpfung in elektrischen Anlagen und die Einhaltung der Strahlrohrabstände nach VDE 0132 einzuhalten.

4 Konventionelle Schadenverhütung: Allgemeine Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen

Hinsichtlich des Umgangs mit und der Lagerung von Lithium-Batterien im betrieblichen Umfeld gilt grundsätzlich: Der Betreiber ist nach dem Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) verpflichtet, in einer Gefährdungsbeurteilung die Gefahren, die von den technischen Einrichtungen und Geräten ausgehen können, einzuschätzen bzw. zu beurteilen und daraus abzuleitende notwendige Schutzmaßnahmen umzusetzen. Das gilt sinngemäß grundsätzlich auch für Lithium-Batterien.

Im Sinne einer effektiven Schadenverhütung bieten sich im Bereich Lithium-Batterien allerdings durchaus konventionelle Schutzkonzepte mit klassischen Maßnahmen an, welche sich bei der Herstellung, beim Umgang und bei der Lagerung von feuergefährlichen Stoffen bewährt haben:

4.1 Bauliche Brandschutzvorkehrungen

Um Produktionsanlagen und Lagerbereiche vor der Exponierung durch feuergefährliche Stoffe zu schützen, hat sich als wirksame Schadenverhütungsmaßnahme die räumliche und bauliche Trennung bewährt. Insofern ist grundsätzlich zu empfehlen, die Lagerung und Handhabung von Lithium-Batterien ausschließlich in feuerbeständig abgetrennten Bereichen oder unter Sicherstellung eines angemessenen Sicherheitsabstandes zuzulassen. Hier hat sich auf der Basis von Schadenerfahrung international ein Standard von 90 Minuten Feuerwiderstand (Brandwand) oder ein Sicherheitsabstand von mindestens 20 Meter durchgesetzt.

Sofern betriebstechnische Gründe eine räumliche oder bauliche Abtrennung einzelner Bereiche nicht zulassen, sind als Minimalanforderung an den betrieblichen Brandschutz ausreichend dimensionierte Freistreifen und Sicherheitsabstände von mindestens 2,5 m innerhalb eines Brandabschnitts in Verbindung mit zusätzlichen organisatorischen und technischen Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

Neben der brandschutztechnischen Abtrennung von Bereichen, in denen Lithium-Batterien hergestellt oder gelagert werden, kann das Gefahrenpotenzial weiterhin durch Kapselung einzelner Batterien oder einzelner Fertigungschargen (Kassetten oder Container aus nicht-brennbaren Materialien) verringert werden. Diese Lösung ist allerdings in der Praxis häufig nur schwer umsetzbar.

4.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen

Da die Gefahr eines Brandes vordergründig auf falsche Handhabung oder Fehlbedienung und nur selten auf technische Fehler zurückzuführen ist, kommt der organisatorischen Schadenverhütung eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere die Schulung der Mitarbeiter in Bezug auf den fachgerechten Umgang (analog Gefahrstoff) und die Bereitstellung spezifische Betriebsanweisungen stellen eine grundlegende Anforderung dar.

Einfache Vorsorgemaßnahmen, wie beispielsweise die wirksame Verhinderung eines Kurzschlusses an den Batteriepolen durch Verwendung von Polkappen, die Vermeidung von Wärmestrahlung durch Heizungen und Sonneneinstrahlung durch geeignete Auswahl von Lagerorten sowie das Freihalten von Sicherheitsentlüftungen und das Anbringen von Hinweistafeln zur korrekten Ausrichtung der Batteriezellen im Lager sind einfach durchzuführende und zugleich wirksame Schadenverhütungsmaßnahmen.

Um einen inneren Kurzschluss durch Beschädigung von Elektrodenflächen oder Separatormaterialien zu verhindern, ist darauf zu achten, dass eine mechanische Beschädigung der Zellenkomponenten durch Stoß, Schlag oder Quetschen ausgeschlossen werden kann. Beschädigte Produkte (auch bei geringsten Beschädigungen) sind umgehend fachgerecht zu entsorgen.

Im Sinne einer Minimierung von Gefahrenschwerpunkten ist die separate Lagerung sicherstellen, bzw. Mischlagerung mit anderen Produkten und Stoffen zu unterbinden.

Zur schnellen Reaktion auf kleine Entstehungsbrände haben sich Handfeuerlöscher mit Spezial-Löschpulver (Klasse D) bewährt. Diese sind allerdings nur in der ersten Phase von kleineren Entstehungsbränden unter Beteiligung von nur wenigen Zellen wirksam. Handfeuerlöscher mit Kohlendioxid (CO₂) oder mit konventionellem chemischem Trockenpulver sind nur begrenzt wirksam und dadurch weniger geeignet.

Sofern Lithium-Batterien an Produktionsplätzen bereitgestellt werden müssen, ist zu beachten, dass die Anzahl der Batteriezellen auf das notwendige Minimum begrenzt wird ("Tagesbedarf"). Im Bereich der Bereitstellungsflächen und Verarbeitungsplätze sind zusätzlicher Feuerlöscher bereitzustellen (auf geeignete Löschmittel achten). Freistreifen von 2,5 m um die Bereitstellungsflächen bilden einen wirksamen Schutz gegen Brandausbreitung. Optimal ist die Verwendung von feuerbeständig ausgeführten Lagerschränken / Containern. Sind in den betroffenen Bereichen Löschanlagen vorhanden, ist zu prüfen, ob die betreffende Löschanlage (inkl. das verwendete Löschmittel) auf die Gefahrerhöhung durch Lithium-Batterien ausgelegt ist und einen Brand mit Lithium-Batterien wirksam bekämpfen kann.

4.3 Anlagentechnische Sicherheitssysteme

In Bezug auf anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen (Löschanlagen) für den Umgang oder die Lagerung von Lithium-haltigen Energiespeicher liegen hinsichtlich der Wirksamkeit von technischen Schutzkonzepten und in Bezug auf die Effektivität von anlagentechnischen Lösungen aktuell nur wenig gesicherte Erkenntnisse und keine standardisierten Konzepte vor. Trotz des offenkundigen Gefahrenpotenzials konnte sich bisher kein Löschanlagenkonzept als etablierter Standard durchsetzen. Insofern ist es nicht möglich, in seriöser Weise ein bestimmtes Löschanlagenkonzept exklusiv zu empfehlen.

Erfahrungen mit Batteriebränden unter Einsatz konventioneller Löschtechnik (Sprinkleranlagen, Gaslöschanlagen, etc.) haben gezeigt, dass bei Brandereignissen insbesondere wegen des enormen Energieinhalts extreme Wärmemengen freigesetzt werden. Der anlagentechnische Brandschutz steht insbesondere dort vor großen Herausforderungen, wo bereits konventionelle Wasserlöschtechnik (z.B. Sprinkleranlagen) installiert ist. Hierbei stehen insbesondere Mischlager (z.B. Speditionslager, Zentrallager, etc.) im Fokus, wo neben "herkömmlichen Lagergütern" unkontrolliert auch Lithium-Batterien eingelagert werden können. Konventionelle Löschtechnik ist häufig überfordert und kann einen Batteriebrand nicht wirksam bekämpfen. Auch die Gefahr der Rückzündung stellt an den anlagentechnischen Brandschutz hohe Anforderungen.

Jeder Anwendungsbereich von Lithium-Batterien hat seine spezifischen Anforderungen. Somit bleibt bei der Suche nach geeigneten Schutzkonzepten die einzelfallbezogene Gefahrenanalyse bis auf weiteres unausweichlich. Der Umgang oder die Lagerung von Lithium-Batterien verlangt insofern maßgeschneiderte Lösungen, die gezielt auf ein bestimmtes Anwendungsszenario abgestimmt sind.

Neben automatischen Löschanlagen müssen immer bauliche und organisatorische Randbedingungen ganzheitlich betrachtet werden. Für wirksame Schutzkonzepte mit Sprinkleranlagen ist eine Einzelbetrachtung notwendig.

Branddetektion

In Bereichen wo Lithium-Batterien gelagert oder verwendet werden ist eine flächendeckende Brandfrüherkennung ein absolutes Muss. Als Mindestanforderung ist sicherzustellen, dass alle Bereiche, in denen mit Lithium-Batterien hantiert wird, flächendeckend durch eine Brandmeldeanlage mit automatischer Alarmweiterleitung zu einer ständig besetzten Stelle überwacht werden.

Um eine zielgenaue Vorortbrandbekämpfung z.B. durch eine Feuerwehr ist eine genaue örtliche Detektion des Brandes im Lager erforderlich. Die zielgenaue Branddetektion wird durch die Ventilationsbedingungen im Lager, z.B. auch das Fahren von Regalbediengeräten erschwert.

Zur Beurteilung der Branddetektion sind zum einen die Zersetzungsprodukte bei verschiedenen Schadensszenarien zu analysieren und die Detektion in Abhängigkeit von den Lüftungsbedingungen im Lager entsprechend anzupassen. Im Schadenfall sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Es entstehen bei angenommen langsamer Entwicklung des Schadensszenarios Kaltrauch und Zersetzungsgase, die schwerer als Luft sind (z.B. Elektrolyt- und Lösemitteldämpfe, Chlorwasserstoff aus PVC-Leitungen, Kohlendioxid).
- Es entsteht Brandrauch mit Komponenten, die leichter als Luft sind (z.B. Kohlen-monoxid, Fluorwasserstoff).

Hierdurch ergeben sich zum einen spezielle Anforderungen an die Brandmeldetechnik. Es muss sowohl im oberen Bereich als auch im unteren Bereich des Lagers detektiert werden. Zur sicheren Branddetektion ist eine Detektion über der Höhe und Fläche des Lagers erforderlich. Ggf. sind zusätzlich RAS oder Kanalmelder in den Lüftungskanälen für die Abluft vorzusehen.

Weiterhin ergeben sich, durch die gegenüber Luft unterschiedlich spezifisch schweren Bestandteile besondere Anforderungen an die Lüftungstechnik: Bei spezifisch schweren Gasen muss im Bodenbereich des Lagers, mit Zuluft von oben, und bei spezifisch leichten Gasen muss im Dachbereich, mit Zuluft von unten, abgesaugt werden. Die Abluft/Zuluft muss umschaltbar sein. Problematisch ist, dass nicht am Entstehungsort direkt abgesaugt werden kann sondern ggf. nur im Boden- oder im Dachbereich. Hierdurch werden die Schadstoffe ungünstigsten Falls durch das gesamte Lager mit entsprechenden Ablagerungen und Kontaminationen gesaugt. Durch eine entsprechende Bildung von Brandabschnitten kann dieses Risiko verringert werden.

Wasser-Löschanlagen

Wasser hilft die Auswirkungen von Bränden mit Lithium Batterien zu begrenzen. Die Beaufschlagung mit Wasser bewirkt durch den Kühleffekt eine Reduzierung der Brandausbreitung und eine Reduzierung der Brandintensität. Eine möglichst frühzeitige Auslösung, vollständige Benetzung und Kühlung des Brandgutes führt zu einer deutlich verlangsamten Reaktion der Akkus und damit auch der Brandentwicklung.

Schnell auslösende Sprinkler- oder Sprühwasserlöschanlagen mit hoher Wasserbeaufschlagung stellen einen wirksamen Schutz dar. Dort, wo konventionelle Wasserlöschanlagen (z.B. Sprinkler) zu träge bzw. dessen Löschleistung unter Umständen nicht ausreichend ist, stellt die Wassernebeltechnologie eine Lösungsmöglichkeit dar. Durch den Einsatz von Wassernebel wird ein zuverlässiger Lösch- und Kühleffekt gewährleistet und zudem auch eine Rückzündung verhindert.

Gas-Löschanlagen

Bei einem Einsatz von Gaslöschtechnik mit verflüssigten Gasen (N_2 , CO_2) wirkt sich die Inertisierungswirkung grundsätzlich positiv aus. Mit den üblicherweise eingesetzten Spülmengen lässt sich allerdings nur eine geringe Menge an thermischer Energie abführen.

Im Hinblick auf die enorme Wärmefreisetzung, die bei einem Brand von Lithium-Batterien zu erwarten ist, erscheint ein solches Konzept aufgrund der begrenzten Wärmebindung als Löscheinrichtung wenig geeignet.

Permanent-Inertisierung

Wenn Löschanlagen aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Betracht kommen oder andere Gründe gegen den Einsatz einer Wasserlöschanlage sprechen, müssen sich Schadenverhütungskonzepte auf die Vermeidung der Brandentstehung konzentrieren. In diesem Zusammenhang bietet die Technologie der Sauerstoffreduzierung vielversprechende Lösungsansätze.

Grundsätzlich bietet das Konzept einer Permanent-Inertisierung durch die Flutung mit Stickstoff eine Möglichkeit, das Risiko einer Brandentstehung einzuschränken. Durch das kontrollierte Einleiten von Stickstoff in einen Schutzbereich wird der Sauerstoffgehalt abgesenkt und so die Brandentstehung durch externe Brandursachen im Umfeld der Batterien verhindert.

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich bei Sekundärbatterien das eingesetzte Kathodenmaterial zumeist aus Metalloxiden zusammensetzt, die im Brandfall den chemisch gebundenen Sauerstoff freisetzen können. Diese zusätzliche Sauerstoffbildung stellt das Konzept einer Permanent-Inertisierung vor große Herausforderungen. Weiterhin sind bei einem Schutzkonzept auf der Basis einer Permanent-Inertisierung grundsätzlich die erhöhten Anforderungen an die Integrität der Gebäudestruktur zu berücksichtigen. Somit ist im Einzelfall zu prüfen, ob das Konzept einer Permanent-Inertisierung für den betreffenden Anwendungsfall geeignet ist und das Schutzziel mit dieser Technologie erreicht werden kann.

5 Anwendungs-typische Schadenverhütung: Produkt-spezifische Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen

Das Gefährdungspotential von Lithium-Batterien wird einerseits durch das Produkt selbst und zudem durch seine Leistung bestimmt. Entsprechend müssen sich an diesen Parametern auch Schutzmaßnahmen und Sicherheitsregeln orientieren.

5.1 Schutz- und Überwachungseinrichtungen an der Batterie

Ein wichtiges Sicherheitskriterium ist der Einsatz von Schutz- und Überwachungseinrichtungen, bzw. die Überwachung des Batteriezustands durch Sensoren:

- Einsatz von PTC-Widerständen oder PTC-Thermistoren (Positive Temperature Coefficient): Bauteile, dessen elektrischer Widerstand bei steigender Temperatur größer wird, um den Lade- oder Entladestrom zu begrenzen
- Einsatz von CID (Circuit Interrupt Device oder Current Interrupt Device): Bei Gasdruck innerhalb der Zelle (z.B. durch begonnene Überladung und steigende Temperatur) wird der elektrische Kontakt zu einem der Pole unterbrochen.

Die Überwachung der Zellzustände und der Lade- bzw. Entladevorgänge durch Messung der Zellspannung, Temperatur, Batteriestrom, Ladezustand ermöglicht das Abschalten des Batteriesystems oder Trennen von einzelnen Zellen bei Auftreten von sicherheitsrelevanten Störungen der bei Anwenderfehlern. Das Batterie-Management-System stellt sicher, dass bei alternden Zellen und auseinander driftender Zellkapazitäten und Innenwiderständen der Speicher in Summe immer noch optimal genutzt werden kann. Beim Laden einer großen Anzahl von Zellen gilt es beispielsweise das Risiko einer Überladung einzelner Zellen zu vermeiden. Die einzelnen Zellen weisen eine prinzipbedingte Streuung auf und können unterschiedlich viel Restladung enthalten. Das kann dazu führen, dass einzelne Zellen während des Ladevorganges die maximale Spannung früher erreichen als andere. An bestimmten Zellen kann es zu einer Überspannung oder zu einem frühen Abbruch des Ladevorganges kommen. Die schwächste Zelle bestimmt das Verhalten des gesamten Batteriesystems. Daher ist ggf. eine Überwachung bis auf Zellebene erforderlich:

Die Vermeidung von elektrischen und elektronischen Fehlern ist insbesondere mit der Funktion von „intelligenten“ Systemen für die Überwachung und Steuerung der Batterieparameter verknüpft.

5.2 Lithium-Batterien unterschiedlicher Leistungskategorien

Das Gefährdungspotenzial von Lithium-Batterien wird, neben dem Produktdesign, maßgeblich durch die Leistung der Module bzw. des Systems selbst bestimmt. Bei den derzeit bekannten Typen bietet sich zur Differenzierung eine Unterteilung in drei Kategorien an:

Leistung	Lithiummetallbatterie (UN 3090)	Lithiumionenbatterie (UN 3480)
gering	$\leq 2 \text{ g Li je Batterie}$	$\leq 100 \text{ Wh je Batterie}$
mittel	$> 2 \text{ g Li je Batterie}$ und $\leq 10 \text{ kg brutto je Batterie}$	$> 100 \text{ Wh je Batterie}$ und $\leq 10 \text{ kg brutto je Batterie}$
hoch	$> 2 \text{ g Li je Batterie}$ und $> 10 \text{ kg brutto je Batterie}$	$> 60 \text{ V}$ und/oder $> 100 \text{ Wh je Batterie}$ und/oder $> 10 \text{ kg brutto je Batterie}$

Lithium-Batterien geringer Leistung

Hierzu zählen alle einzelligen Batterien und Kleinbatterien, welche vornehmlich für den Bereich Computer, Multimedia, Kleinelektrogeräte und Kleinwerkzeuge etc. verwendet werden.

- Für Batterien dieser Kategorie werden keine speziellen Sicherheitsvorschriften geltend gemacht, sofern alle Vorgaben des Herstellers und Sicherheits-zertifizierenden Stellen eingehalten werden.
- Bei größeren zusammenhängenden Lagermengen (Volumina über 7 m³ bzw. mehr als 6 Euro-Paletten) gelten die Hinweise für Lithium-Batterien mittlerer Leistung.

Lithium-Batterien mittlerer Leistung

Batterien dieser Kategorie werden z. B. für Fahrräder mit elektrischem Hilfsantrieb (Pedelec, E-Bike), E-Scooter, Light Electric Vehicle (LEV), größere Gartengeräte, diverse Kleinfahrzeuge und dgl. aber als Zellen auch für die Fertigung von Batterien hoher Leistung verwendet.

- Batterien mittlerer Leistung sind in feuerbeständig abgetrennten Räumen oder in mit ausreichendem räumlichen Abstand abgetrennten Bereichen zu lagern (z. B. Gefahrstofflager, -container).
- Mischlagerungen mit anderen Produkten sind nicht zulässig.
- Der Lagerbereich ist durch eine geeignete Brandmeldeanlage mit Aufschaltung auf eine ständig besetzte Stelle zu überwachen.
- Bei größeren Lagermengen (belegte Fläche > 60 m² und/oder Lagerhöhen > 3 m) gelten die Hinweise für Lithium-Batterien hoher Leistung.

Lithium-Batterien hoher Leistung

Batterien der Kategorie sind durch eine besonders hohe Leistung gekennzeichnet, welche sich durch die Kombination und Verknüpfung von Zellen mittlerer Leistung zu einem System ergibt. Derzeit bekannte Einsatzbereiche sind vornehmlich Elektromobilität (Automotive) sowie netzunabhängige Großgeräte.

- Für Batterien hoher Leistung gelten als Mindestanforderung die Maßnahmen für Lithium-Batterien mittlerer Leistung
- Zusätzlich ist eine einzelfallbezogene Gefahrenanalyse zu erstellen.
- Schutzmaßnahmen und Brandschutzkonzepte sind daher einzelfallbezogen und mit individuellen (maßgeschneiderten) Lösungsansätzen gezielt auf das Anwendungsszenario abzustimmen.

5.3 E-Bikes und Pedelecs: Spezielle Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen

Im Gegensatz zu Ladestationen für Elektro-PKW sind Ladegeräte für E-Bikes und Pedelecs nicht für den Einsatz bei allen Umgebungsbedingungen geeignet. So kann der Betrieb der Ladegeräte bei extremen Umgebungstemperaturen oder feuchten Umgebungen zu gefährlichen Betriebszuständen und zum Brand führen. Auch das Laden von Batterien mit Ladegeräten, die nicht vom Hersteller zugelassen wurden kann zu gefährlichen Betriebszuständen führen. Befinden sich brennbare Materialien in der Nähe von Batterien oder Ladegeräten kann sich schnell ein größeres Feuer entwickeln, wenn diese sich entzündet oder stark erhitzt haben.

Schadenbeispiele, bei denen E-Bikes oder Pedelecs ursächlich beteiligt waren, zeigen, dass insbesondere bei Elektrofahrrädern in der unteren Preisklasse zum Teil keine Überwachung der Batterien durch ein Batteriemanagementsystem (BMS) sichergestellt ist.

- Gerät darf sich nicht in Reichweite von brennbaren Materialien befinden (Parken, Ladevorgang, etc.). Ladevorgang sollte möglichst in einer brandlastfreien Umgebung durchgeführt werden
- Batterien nicht unbeaufsichtigt, z.B. in der Nacht, laden (vorzugsweise überwacht von einem Brandmelder).
- Batterien sind vor Frost zu schützen.
- Ladegeräte dürfen im Allgemeinen nur im Trockenen verwendet werden, z.B. Keller oder Garage, eine Verwendung im Freien ist nur gestattet, wenn die Ladegeräte gegen Feuchtigkeit durch wasserdichte Boxen, Fächer o.ä. geschützt sind oder es der Hersteller ausdrücklich zugelassen hat. (allerdings ist ein Wärmestau durch das Laden von Batterien in zu kleinen Boxen bzw. Fächern oder durch abgedeckte Batterien oder Ladegeräte zu vermeiden).
- Beim Laden innerhalb geschlossener Räume ist insbesondere beim unmittelbaren Ladevorgang nach Nutzung bei kalten Außentemperaturen zu beachten, dass der Akku mindestens zehn Minuten braucht, um sich an die Raumtemperatur anzupassen. Bei Temperaturschock beim Ladevorgang besteht Brandgefahr.
- Um den Akku zu schonen, sollten Radfahrer ihn nie über 90 % auf und nicht unter 10 % entladen. Werden Pedelecs für einen längeren Zeitraum nicht benutzt, z.B. im Winter, ist zur Vermeidung einer Tiefentladung für eine Erhaltungsladung bzw. Stützladung der Batterie zu sorgen. Oft genügen schon zehn Wochen ohne Nutzung und der Akku ist durch Tiefentladung beschädigt. Dadurch steigt die Gefahr, dass der Akku in Brand geraten kann.
- Beim Kauf immer auf das GS-Zeichen achten. Das Prüfzeichen gewährleistet, dass der Hersteller alle Sicherheitsvorschriften eingehalten hat.
- Das E-Bike nur mit dem Originalgerät laden und qualitativ hochwertige Akkus und Ladegeräte verwenden.
- Keine technischen Änderungen vornehmen, insbesondere nicht die Sicherheitseinrichtungen manipulieren.
- Nach einem Sturz oder Unfall den Akku unbedingt überprüfen lassen. Beschädigungen im Inneren können einen Brand auslösen – auch zu einem späteren Zeitpunkt

5.4 Lagerung: Batterien und Batterie-betriebene Produkte

In einem Lager mit Lithium-Ionen-Batterien ist im Brandfall bei Lithium-Ionen-Batterien zunächst mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem Schmelbrand mit geringer Energiefreisetzung und Thermik auszugehen.

Beim Versagen von Lithium-Ionen-Batterien (z.B. Kurzschluss) entstehen u. a. krebserregende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Fluorwasserstoff sowie Schwermetallablagerungen. Im Hinblick auf die gesundheitlich unbedenkliche Weiterverwendung eines durch Brandgeschehen kontaminierten Lagergebäudes ist daher besonderes Augenmerk zu legen.

Großbrandversuche der Versicherungswirtschaft (FM Global und VdS Schadenverhütung) haben gezeigt, dass der Einsatz des Löschmittels Wassers (ggf. unter Verwendung von Zusätzen) grundsätzlich geeignet ist (wenngleich innerhalb enger Rahmenbedingungen)

Zum Schutz eines Lagers ist ein Schutz durch Deckensprühdüsen oder Deckensprinkler aufgrund der vorgesehenen Ladungsträger mit relativ dichter Anordnung nur bedingt möglich, da diese keine ausreichende Wasserbeaufschlagung in den verdeckten Bereichen im Lager gewährleisten. Bei einer Löschanlage müssen möglichst kleine Löschsektionen gebildet werden, die eine zielgenaue Brandbekämpfung zur Verringerung von Wasserschäden ermöglichen.

5.5 Transport: Straße, Schiene, Wasser, Luft

Für jeden Verkehrsträger sind in der Regel gesonderte gefahrgutrechtliche Bestimmungen einzuhalten. Die Grundlagen der Gefahrgutvorschriften werden in den „UN – Model Regulations“ von einer internationalen Kommission (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)) erarbeitet und festgelegt. Auf dieser Basis erfolgt die Umsetzung in die spezifischen Belange der Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser, Luft) und in nationales Recht. Die zuständige Behörde für den Transport in Deutschland ist die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM).

Verkehrsträger	Organisation / Übereinkommen	Regelwerk
Straßenverkehr	UN Economic Commission for Europe (UNECE)	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR)
Schienenverkehr	Intergovernmental Organization for International Carriage by Rail (OTIF)	Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)
Luftverkehr	International Civil Aviation Organisation (ICAO) International Air Transport Organisation (IATA)	ICAO Technical Instructions (TI) IATA Dangerous Good Regulations (DGR)
Seeverkehr	International Maritime Organization (IMO)	International Maritime Dangerous Goods (IMDG)
Binnenschifffahrt	UN Economic Commission for Europe (UNECE)	Accord européen relative transport international des marchandises Dangereuses par voies de Navigation interieures (ADN)

Gemäß den UN Transportvorschriften für gefährliche Güter werden alle Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien als Gefahrgut der Klasse 9 (gefährliche Stoffe und Gegenstände) eingestuft.



Der kommerzielle Transport von Lithiumbatterien unterliegt in jedem Fall dem Gefahrgutrecht. Lithium-Metall- sowie Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien werden wie folgt klassifiziert:

UN 3480	Lithium-Ionen-Batterien (inkl. Lithium Polymer)	Sekundäre Lithium-Batterien (wieder aufladbar)
UN 3481	Lithium-Ionen-Batterien MIT Ausrüstung verpackt	
UN 3481	Lithium-Ionen-Batterien IN Ausrüstungen	
UN 3090	Lithium-Metall-Batterien (inkl. Batterien aus Lithium Legierungen)	Primäre Lithium-Batterien (nicht wieder aufladbar)
UN 3091	Lithium-Metall-Batterien MIT Ausrüstung verpackt	
UN 3091	Lithium-Metall-Batterien IN Ausrüstungen	

Eine Voraussetzung für die Zulassung zum Transport von lithiumhaltigen Batterien ist eine Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Nachweis gemäß UN-Anforderungen (Tests and Criteria, Teil III, Abschnitt 38.3.):

- Test 1: Höhensimulation (Lufttransport unter Unterdruckbedingungen)
- Test 2: Thermische Prüfung (schnelle und extreme Temperaturänderungen)
- Test 3: Schwingung (Schwingungen während der Beförderung)
- Test 4: Schlag (Schläge während der Beförderung)
- Test 5: Äußerer Kurzschluss
- Test 6: Aufprall / Quetschung (mechanische Beschädigung)
- Test 7: Überladung
- Test 8: Erzwungene Entladung (Tiefentladung)

Zur quantitativen Klassifizierung des Gefährdungspotenzials wurden so genannte Gefahrenstufen definiert. Nach EUCAR (European Council for Automotive R & D) gibt es sieben Gefährdungsklassen (Hazard level). Hiervon ausgehend erfolgen die Gefährdungsbeurteilung und die Auswahl geeigneter Sicherheitstechnik und persönlicher Schutzausrüstung. Die Gefährdungsklassen berücksichtigen nur Fehler der Zellen / Batterien und nicht die elektrische Sicherheit.

Gefahren- klasse	Mögliche Gefährdung
0	Kein Effekt: keine Funktionsbeeinträchtigung
1	Passive Sicherungsvorrichtung löst aus: Zelle noch einsetzbar, Sicherungsvorrichtungen müssen repariert werden
2	Defekt, Beschädigung: Zelle ist irreversibel geschädigt und muss ausgetauscht werden
3	Leck, geringer Masseverlust: <50 % Gewichtsverlust
4	Abblasen, hoher Masseverlust: >50 % Gewichtsverlust
5	Flammenbildung: Offener Feuererscheinung
6	Bersten: Umherfliegende Teile der aktiven Elektrodenmassen
7	Explosion: Zertrümmerung der Zelle

In Gefahrenklasse 0 bis 4 gilt der UN 38.3 Test als bestanden. Produkte der Einstufung in Gefahrenklasse 5 bis 7 dürfen nicht im Luftverkehr und nicht als Schiffsfracht transportiert werden.

Für den Transport im Luftverkehr gelten die Transport- und Verpackungsbestimmungen der IATA („Dangerous Goods Regulations“. Im Unterschied z.B. zu den ADR-Richtlinien für die Straße gibt es hier z.B. komplizierte Zusatzbestimmungen bzw. Abweichungen nicht nur bei den einzelnen Staaten sondern auch bei den verschiedenen Luftfahrtunternehmen.

Für den Transport von Lithium-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien im Gepäck findet man beispielsweise bei IATA folgende Angaben:

Erlaubt im oder als Handgepäck					
Erlaubt im oder als aufgegebenes Gepäck					
Erlaubt wenn am eigenen Körper, zum persönlichen Gebrauch mitgeführt					
Die Erlaubnis der Luftverkehrsgesellschaft ist erforderlich					
Der Flugkapitän muss über die Ladeposition informiert werden					
NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN	Rollstühle oder andere batteriebetriebene Fortbewegungsmittel mit Nassbatterien oder mit Lithium-Batterien (für Einzelheiten siehe 2.3.2.3 und 2.3.2.4).
JA	NEIN	NEIN	JA	JA	Batteriebetriebene Fortbewegungsmittel mit Lithium-Ionen-Batterien (faltbar). Die Lithium-Ionen-Batterie muss entfernt und in der Kabine mitgeführt werden (für Einzelheiten siehe 2.3.2.4(d)).
JA	JA	JA	JA	NEIN	Mit Lithium-Ionen-Batterien betriebene Ausrüstung, die Batterien mit mehr als 100Wh aber höchstens 160Wh enthält.
JA	NEIN	JA	JA	NEIN	Ersatz-Lithium-Ionen-Batterien mit einer Nennenergie in Wattstunden von mehr als 100Wh, aber höchstens 160Wh für Geräte der Unterhaltungselektronik. Höchstens zwei Ersatz-Batterien dürfen, ausschließlich im Handgepäck, mitgeführt werden. Diese Batterien müssen einzeln gegen Kurzschluss gesichert sein.
JA	NEIN	JA	NEIN	NEIN	Alle Ersatz-Batterien, einschließlich Lithium-Metall- oder Lithium-Ionen-Zellen oder -Batterien, für solche tragbaren, elektronischen Geräte dürfen nur im Handgepäck mitgeführt werden. Diese Batterien müssen einzeln gegen Kurzschluss gesichert sein.

Transport von beschädigten Lithium-Batterien: Es gilt der Grundsatz, dass Lithium-Ionen-Batteriesysteme, die unter Verdacht stehen, defekt oder beschädigt zu sein, auf keinen Fall transportiert werden. Wenn eine der folgenden Fragen mit Ja beantwortet wird, gelten die Verpackungs- und Transportvorschriften für defekte Batterien:

- Weisen Batteriezellen ein beschädigtes oder stark verformtes Gehäuse auf?
- Läuft Flüssigkeit aus?
- Tritt sonderbarer Gasgeruch auf?
- Ergibt sich eine messbare Temperaturerhöhung im ausgeschalteten Zustand?
- Geschmolzene oder verformte Kunststoffteile?
- Geschmolzene Anschlussleitungen?
- Identifiziert Batteriemanagementsystem (falls vorhanden) defekte Zellen?

Gefährdungen, wie beispielsweise Gasbildung innerhalb des Batteriegehäuses, sind von außen oft nicht zu erkennen. Nach Möglichkeit sollte ein beschädigtes Batteriesystem von einem fachkundigen Experten langsam entladen und für mehrere Tage stehen gelassen und beobachtet werden. Am besten wendet man sich an den Hersteller des Batteriesystems.

Der Transport teildefekter Batteriesysteme gestaltet sich schwierig und muss verschiedenen Aspekten des Gefahrgutrechts Rechnung tragen. Insofern muss der Transport beschädigter Lithium-Ionen-Batterien (UN 3480) und Lithium-Metall-Batterien (UN 3090) ausdrücklich und ausschließlich in Transportbehälter der Verpackungsgruppe I (hohe Gefahr) erfolgen (z.B. Stahlbehälter mit Vermiculit als Füllmaterial).

5.6 Entsorgung: Recycling und Abfallwirtschaft

Verbraucher sind verpflichtet, Batterien zu einer geeigneten Sammelstelle bei Handel oder Kommune zu bringen. Eine Entsorgung über den Hausmüll ist verboten. Diese Vorgabe gilt für alle Batterien, unabhängig von Typ, Größe oder Anwendung. Die Rücklaufquote von Bleibatterien liegt in Deutschland bei über 95%, der Rücklauf von lithiumhaltigen Batterien ist dagegen ungenügend.

Gebrauchte, nicht beschädigte Lithium-Ionen-Batterien (UN 3480) und Lithium-Metall-Batterien (UN 3090) werden in Sammelboxen zurückgenommen. Große gebrauchte Lithiumbatterien (Hochenergiebatterien: z.B. E-Bikes, Laptops, Akkuschauber) mit einem Stückgewicht größer als 500 g sind separat in speziell gekennzeichneten gelben Sammelboxen zu erfassen. Für beschädigte Hochenergiebatterien gelten besondere Transportvorschriften.

Für die Entsorgungsunternehmen ergibt sich im Hinblick auf Sammlung, Rückführung und Recycling eine Reihe von Herausforderungen. So werden bei der Sichtkontrolle in der Anlieferung Lithium-Batterien „gefunden“ (Identifikation und Erkennung nicht immer einfach). Die Lagerung erfolgt z.T. auch in den Behandlungsbetrieben. Besonders problematisch ist das Umschichten von Schüttgut. Eine mögliche Brandgefahr ergibt sich beim Sammeln, bei der Lagerung und beim Recycling von gebrauchten oder beschädigten Batterien:

- Unterschiedlichste Batterietypen
 - Primärbatterien / Akkus
 - Knopfzellen / Rundzellen / Akkupacks
 - Mobile Elektrogeräte (Laptop, Mobiltelefon, etc.)
 - Kleinfahrzeuge (Elektrofahrräder, Rasenmäher, etc.)
- Ungeschützte Kontakte, Restladung, Mangelhafte Verpackung
- Umladen mit Radlader und Greifer, Zerkleinern im Schredder

Auch wenn sich für Batterien, die nicht in Geräten eingebaut sind, Sammelsysteme und Rückführungskonzepte vergleichsweise einfach umsetzen lassen stellen Elektroaltgeräte mit eingebauten Batterien die Abfallwirtschaft vor große Herausforderungen. Elektro- und Elektronikgeräte sind vermehrt mit leistungsstarken lithiumhaltigen Hochenergiebatterien als primäre Energiequelle oder Stützbatterie ausgestattet. Deren Verwendung erfordert höhere Sicherheitsanforderungen bei der Rücknahme von Altgeräten. Die Batterien sind hierbei oft in den Geräten fest eingebaut. Lithiumhaltige Batterien in Elektroaltgeräten haben – vor allem wenn sie beschädigt sind – ein hohes Brandrisiko.

In diesem Zusammenhang gibt es bei Entsorgungsbetrieben inzwischen zahlreiche Beispiele von Bränden, die durch Lithium-Batterien ausgelöst wurden. Die meisten schweren Zwischenfälle ereignen sich beim Umschlag und bei der Lagerung. Die Brandursachen sind vielfältig:

- Selbstentzündung beim Auspacken von neuen, überlagerten Bauteilen (mit Lithium-Batterien). Ursache: Kurzschluss durch unsachgemäße Behandlung.
- Brand im Haufwerk. Ursache: Selbstentzündung nach Beschädigung (Zerquetschen) von Elektrobauteilen (mit Lithium-Batterien) durch Radlader
- Brand im Schredder. Ursache: Selbstentzündung nach mechanischer Zerkleinerung von Elektrobauteilen (mit Lithium-Batterien)
- Brand in einem Sammelbehälter. Ursache: Selbstentzündung, keine Fremdeinwirkung

Hieraus ergibt sich an verschiedene Adressaten eine Reihe von Forderungen:

- **Qualifizierung:** Sensibilisierung und Schulung im Hinblick auf das besondere Gefahrenpotential von Lithium-Batterien für Beteiligten auf der gesamten Entsorgungsstrecke (Verbraucher, Transport, Entsorgung, etc.).
- **Genehmigungsbehörden:** In Ergänzung zum Personenschutz und Umweltschutz ist auch der Sachwertschutz als gleichwertiges Schutzziel festzulegen.
- **Sammellogistik:** Reformierung der Sammellogistik ohne Umschüttung.
- **Identifizierung:** Klare und einheitliche Kennzeichnung von Geräten mit hochenergetischen Akkus durch die Hersteller.
- **Verbraucherinformation:** Hinweis auf die Gefahren und auf die notwendige Sorgfalt bei der Entsorgung betreffender Geräte und Akkus.
- **Entsorgungskette:** Der Letztbesitzer soll grundsätzlich die Akkus vom Elektroaltgerät trennen (wenn möglich) und diese getrennt der Erfassung zuführen.
- **Versicherungswirtschaft:** Die Risikoträger fokussieren sich zunehmend auf Risiko-adäquate Prämiengestaltung (Schadenbedarfsprämie) mit betriebsart-spezifischen Deckungskonzepten und fordern mehr Eigenverantwortung der Entsorgungswirtschaft (höhere Selbstbehalte).
- **Transport:** Die „Duldung“ von Transporten, die eigentlich Gefahrgut wären, und tatsächlich Umwelt und Leben gefährden, darf es nicht geben. Kosten oder zusätzlicher Aufwand sind keine stichhaltigen Argumente bei Gefahr für Umwelt und Leben.
- **Adäquate Schutzkonzepte mit wirksamen Maßnahmen**

Bei der Suche nach erfolgreichen Lösungskonzepten bei Sammelstellen und Recyclingbetrieben ist im Sinne von Risiko-adäquate Schutzkonzepten eine Gefahren-spezifische Bewertung in Verbindung mit effektiv wirksamen Maßnahmen anzustreben. In diesem Sinne müssen Lithium-Batterien bestenfalls bereits bei der Anlieferung identifiziert und aussortiert werden. Insofern sind strenge Eingangskontrollen bei der Anlieferung sowie eine kontinuierliche Sichtung auf Sortierband vor Zerkleinerung zu organisieren. Da Lithium-Batterien gleichermaßen Brandlast und Zündquelle sind, ist die Brandlast zu begrenzen. Dies erfolgt vorzugsweise durch räumliche Trennung, durch modulare Anordnung von Anlagen und durch Vereinzelung von Lagerplätzen. Wichtig sind Maßnahmen zum Auseinanderziehen von brennendem Schüttgut.

Im Sinne eines wirksamen Brandschutzes sind die flächendeckende Brandfrüherkennung sowie automatische Löscheinrichtungen zwingende Voraussetzungen, dass ein Schutzkonzept überhaupt funktionieren kann. Ungeachtet dessen ist sicherzustellen, dass unter Berücksichtigung der enormen Brandlast bei den Sammelstellen entsprechend großzügig bemessene Löschwasserquelle (Bevorratungsmenge und Pumpenleistung) zur Verfügung steht.

6 Ausblick

Von der Deutschen Bundesregierung wurde der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität verabschiedet, der Deutschland als Leitmarkt der Elektromobilität vorsieht. Demnach sollen bis zum Jahr 2020 auf deutschen Straßen 1 Millionen Elektrofahrzeuge fahren (6 Millionen bis 2025).

Insofern wird sich der Bedarf für Batteriekapazität langfristig weiterhin steigern, nach einer Studie von Roland Berger von heute 6,5 Millionen kWh auf ca. 130 Millionen kWh (2020). Entsprechend groß wird auch der Bedarf für Produktionsanlagen sein. Um diese Produktionskapazität bereitzustellen, gehen seriöse Schätzungen davon aus, dass allein für den Bau neuer Produktionsanlagen ein Investitionsbedarf von EUR 4,8 Milliarden pro Jahr erforderlich sein wird. Diese Prognosen belegen die enormen finanziellen und technologischen Anstrengungen, die notwendig sind, um die optimistischen Ziele im Bereich Elektromobilität zu erreichen.

Neue Speichertechnologien erfordern neue Ladetechnologien: Analog zum Bedarf nach modernen Energiespeichern wird auch der Bedarf nach Ladestationen entsprechend stark ansteigen. Insofern haben sich die technologischen Rahmenbedingungen für und folglich auch die sicherheitstechnischen Anforderungen an Batterieladeanlagen grundlegend verändert. Dabei werden im Sinne von Risikobegrenzung (und Schadenverhütung) folgende Fragen zu beantworten sein:

- Wo werden Ladestationen installiert (aufgestellt)?
- Wer wird diese Ladestationen installieren (betreiben)?
- Wer wird diese Ladestationen benutzen (bedienen)?

Weiterhin werden neuartige Formen der Batterieladetechnologie neue Anforderungen an die Betriebssicherheit stellen:

- **Kabelgebunden (konduktiv):** Beim (kabelgebundenen) Wechselstromladen sitzt die Ladeeinheit, die den im Netz verfügbaren Wechselstrom in den zum Laden benötigten Gleichstrom wandelt, im Fahrzeug. Beim (kabelgebundenen) Gleichstromladen befindet sich die Ladeeinheit außerhalb des Fahrzeuges. Das Fahrzeug wird direkt von einer DC-Ladestation mit einem vom Fahrzeug angeforderten Gleichstrom versorgt.
- **Kabellos (induktiv):** Beim induktiven Laden erfolgt die Energieübertragung kabellos durch ein elektromagnetisches Feld ähnlich wie bei einem Induktionskochfeld oder einer elektrischen Zahnbürste.
- **Batteriewechsel:** Bei einem Batteriewechsel wird das gesamte Batteriesystem aus dem Auto entfernt und durch ein geladenes Batteriesystem ersetzt. Diese Methode der Energiezufuhr ermöglicht das Ersetzen einer entladenen Batterie durch eine vollgeladene innerhalb weniger Minuten.

Eine sichere Ladeinfrastruktur hat maßgeblichen Einfluss auf den sicheren Ladebetrieb, da die Lademöglichkeit für die Batterien entweder direkt an das Versorgungsnetz anknüpft oder an die elektrische Anlage des Anschlussnehmers eines solchen Versorgungsnetzes. Für beide Fälle hat die Gewährleistung höchster Betriebssicherheit erste Priorität.

Durch das Errichten von Ladestationen im privaten wie auch im öffentlichen Bereich, sowie durch den Ausbau einer Ladeinfrastruktur werden sich neue Anwendergruppen mit dem Thema Sicherheit von Batterieladeanlagen auseinandersetzen müssen:

- Elektroinstallateure
- Eigenheim- und Immobilienbesitzer
- Immobilienverwalter und Parkhausbetreiber
- Mitarbeiter der öffentlichen Verwaltung
- Architekten und Städteplaner
- Netzbetreiber und Energielieferanten

7 Fazit

Grundsätzlich darf man davon ausgehen, dass Lithium-Batterien und auch die entsprechenden Ladetechnologien bei ordnungsgemäßigem Umgang und sachgerechter Handhabung als vergleichsweise sicher anzusehen sind. Die ausgereifte Fertigungstechnologie sowie in die Batterie eingebaute Schutzmechanismen erlauben für den Anwender einen grundsätzlich gefahrlosen Umgang mit den chemischen Energiespeichern.

Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass sich aus der Verwendung bestimmter chemischer Verbindungen im Zusammenhang mit hohen Energiedichten sowie durch mögliche technische Defekte spezifische Gefahrenpotenziale ergeben, die eine besondere Sicherheitsbetrachtung erfordern.

Batterien sind grundsätzlich dafür bestimmt, große Energiemengen zu speichern und diese chemisch gespeicherte Energie im Laufe eines Entladevorgangs in Form von elektrischer Energie wieder abzugeben. Kommt es aufgrund von technischen Defekten oder unsachgemäßer Handhabung zu einer unkontrollierten und beschleunigten Abgabe der elektrischen Ladung, wird die gespeicherte chemische Energie in der Regel nicht als elektrische sondern als thermische (!) Energie freigesetzt: Feuererscheinung (Sachschäden, Personenschäden, Umweltschäden). Insofern stellen die Risiken bei der Handhabung und Bereitstellung von Lithium-Batterien in der Produktion sowie bei der Lagerung eine besondere Herausforderung für den Brandschutz und Personensicherheit dar.

Diese Herausforderungen verlangen angesichts des raschen Wachstums und der rapiden Verbreitung moderner Batteriesysteme und entsprechender Ladetechnologien ebenso rasche Lösungen.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, Lithium-Batterien bei Herstellung, Fertigung, Lagerung und Transport als Gefahrstoff zu behandeln. Im Sinne von wirksamer Schadenverhütung ist besonderes Augenmerk auf effektive bauliche Brandschutzvorkehrungen und insbesondere auf die Umsetzung umfassender organisatorischer Schutzmaßnahmen zu legen.

Jeder Anwendungsbereich von Lithium-Batterien hat seine spezifischen Anforderungen. Somit bleibt bei der Suche nach geeigneten Schutzkonzepten die einzelfallbezogene Gefahrenanalyse bis auf weiteres unausweichlich. Der Umgang oder die Lagerung von Lithium-Batterien verlangt insofern maßgeschneiderte Lösungen, die gezielt auf ein bestimmtes Anwendungsszenario abgestimmt sind.