

LITHIUMBATTERIEN

BRANDGEFAHREN UND SICHERHEITSRISIKEN

VERSION 1 – APRIL / 2016



www.battery
university.eu

RISK **EXPERTS**

Alle Rechte, insbesondere die Rechte der Verbreitung, der Vervielfältigung und der Übersetzung, des Nachdrucks und der Wiedergabe gleich welcher Art sowie der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen oder der Online-Veröffentlichung bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, ausschließlich den Autoren vorbehalten.

Der gesamte oder auszugsweise Nachdruck ist nur mit ausdrücklicher, vorheriger schriftlicher Genehmigung der Autoren gestattet.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Veröffentlichung trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Autoren ausgeschlossen ist.

INHALT

1	Lithiumbatterien: Umwandlung von chemischer in elektrische Energie	6
1.1	Grundlagen	6
1.2	Warum Lithium?	6
1.3	Lithium-Metall-Batterien	8
1.4	Lithium-Ionen-Batterien	9
1.5	Anwendungen	10
2	Sicherheitstechnische Betrachtung: Risiken und Gefahren	11
2.1	Temperaturverhalten	12
2.2	Thermal Runaway (Thermisches Durchgehen)	12
2.3	Inhaltsstoffe und Zersetzungsprodukte im Brandfall	13
2.4	Elektrische Gefahren	15
2.5	Ursachen für Batteriebrände	15
3	Erste Hilfe vor-Ort: Feuerwehreinsatzkräfte und Rettungsorganisationen	17
3.1	Gefährdung durch HV-Energiespeicher nach einem Unfall	17
3.2	Brandgefahren	18
3.3	Chemische Gefahren	19
3.4	Vorgehensweise am Unfallort	19
3.5	Ergänzende Hinweise	19
4	Konventionelle Schadenverhütung: Allgemeine Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen	20
4.1	Bauliche Brandschutzvorkehrungen	20
4.2	Organisatorische Schutzmaßnahmen	21
4.3	Anlagentechnische Sicherheitssysteme	21
5	Anwendungstypische Schadenverhütung: Produktspezifische Sicherheitsregeln und Schutzmaßnahmen	23
5.1	Schutz- und Überwachungseinrichtungen an der Batterie	23
5.2	E-Bikes und Pedelecs: Spezielle Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen	24
5.3	Lagerung und Bereitstellung: Lithiumbatterien und batteriebetriebene Produkte	25
5.4	Transport: Straße, Schiene, Wasser, Luft	26
5.5	Entsorgung: Recycling und Abfallwirtschaft	30
6	Ausblick	32
7	Fazit	33

1 LITHIUMBATTERIEN: 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, Größe und Leistung 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 bezeichnete ursprünglich die Zusammenschaltung mehrerer einzelner Zellen. Jedoch hat sich inzwischen ein Bedeutungswandel des Begriffs vollzogen, so dass mit Batterie auch eine einzelne Zelle (einzellige Batterie) gemeint sein kann.

1.2 Warum Lithium?

Lithiumbatterien 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 haben erfolgreich die konkurrierenden Systeme verdrängt. Verschiedene Marktanalysen zeigen Prognosen, wonach der Bedarf an Lithiumbatterien weiterhin ansteigen wird.

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

Aus diesem Grund halten Lithiumbatterien in allen Bereichen des täglichen Lebens vermehrt Einzug. Sie werden vorzugsweise als netzunabhängige Stromversorgung oder als Pufferbatterien von elektrischen Geräten eingesetzt. Insbesondere der Boom bei mobilen elektronischen Kleinanwendungen (Smartphones, Notebooks, Kameras, etc.) hat zur massenhaften Verbreitung von Lithiumbatterien geführt. Aber auch für den Einsatz in Gartenkleingeräten und sog. Power Tools, Pedelecs, stationäre Energiespeicher zur autarken Versorgung des Haushalts, Gabelstaplern und Elektroautos gewinnen Lithiumbatterien zunehmend an Bedeutung. Eine geradezu explosionsartige Entwicklung erfährt die Anwendung von Lithiumbatterien im Bereich Automotive (z. B. Hybridantriebe, Hoch-Volt-Elektroantriebe etc.). Im Bereich der Elektromobilität sollen beispielsweise in Deutschland bis zum Jahr 2020 ins-

gesamt 1 Millionen Elektrofahrzeuge fahren (6 Millionen bis 2025).

Die Bezeichnung „Lithiumbatterie“ 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-Primärbatterien (Lithium-Metall-Batterien) in der Regel nicht-wiederaufladbar sind und daher für den einmaligen Gebrauch vorgesehen sind, ermöglichen Lithium-Sekundärbatterien (Lithium-Ionen-Batterien respektive Lithium-Ionen-Akkumulatoren) eine mehrfach reversible Umwandlung von chemischer in elektrische Energie, so dass diese Batterien für den wiederholten Gebrauch verwendet werden können.

System	Lithium-Metall			Lithium-Ionen		
	Lithium-Mangandioxid	Lithium-Schwefeldioxid	Lithium-Thionylchlorid	Lithium-Cobaltdioxid	Lithium-Polymer	Lithium-Eisenphosphat
Typ	Primär	Primär	Primär	Sekundär	Sekundär	Sekundär
Nutzung	Zelle	Zelle	Zelle	Batterie	Batterie	Batterie
Bestandteile	Li/ organ. Lösungsmittel, LiClO ₄ /MnO ₂	Li/ organ. Lösungsmittel, LiClO ₄ /SO ₂	Li/LiAlCl ₄ in SOCl ₂ / SOCl ₂ (C)	Li(C)/ organ. Lösungsmittel, Leitsalz LiPF ₆ / LiCoO ₂	Li(C)/ polym. Elektrolyt/ LiMOx	Li(C)/organische Lösungsmittel, Leitsalz LiPF ₆ / LiFePO ₄
Spannung	3,0 V	3,0 V	3,7 V	3,7 V	3,6 V/3,7 V	3,2 V
Energiedichte	290 Wh/kg	220 Wh/kg	650 Wh/kg	180 Wh/kg	120-210 Wh/kg	120 Wh/kg
Anwendung	tragbare Kleingeräte	fast nur im militärischen Sektor	sehr hoher Energieinhalt, geringer Selbstentladung und gutes Tieftemperaturverhalten	Mobiltelefone, Notebooks	Mobiltelefone, PDAs und Notebooks, Modellbau	für Hochleistungsanwendungen
Besonderheit	hohe Energiedichte und gutes Tieftemperaturverhalten, kostengünstig	hohe Belastbarkeit und gutes Tieftemperaturverhalten	sehr hohe Energiedichte, wegen der aggressiven Inhaltstoffe weitgehend nur im militärischen Bereich	Hohe Energiedichte	Zellaufbau gestattet die Fertigung von dünnen Folienzellen und damit eine günstige Form-	Sehr eigensicher

Die Vorteile von Lithiumbatterien im Vergleich zu konventionellen chemischen Energiespeichern ergeben sich aus den elektrochemischen Leistungsparametern:

- Die hohe Zellspannung von Lithiumzellen erlaubt die Konstruktion von Batterien mit nur einer einzelnen Zelle. Moderne mobile elektronische Kleinanwendungen (z.B. Mobiltelefone) arbeiten heute ausschließlich mit Lithium-Ionen-Batterien, die mit nur einer Einzelzelle bestückt sind.
- Lithium-Ionen-Batterien kennen im Gegensatz zu konventionellen Akkus keinen Memory-Effekt (Kapazitätsverlust durch nicht vollständiges Laden/Entladen) und erreichen einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 95 % (Verhältnis zwischen Entlademenge zu Lademenge).
- Der weite Temperatureinsatzbereich, in dem Lithiumbatterien fehlerfrei arbeiten (-20 °C bis +70 °C), insbesondere das gute Tieftemperaturverhalten und die geringe Selbstentladung (Lagerfähigkeit) machen Lithiumbatterien für zahlreiche Anwendungsgebiete unersetzlich.

1.3 Lithium-Metall-Batterien

Nichtwiederaufladbare Lithium-Metall-Zellen werden in den handelsüblichen Größen konventioneller Zellen angeboten: Knopfzellen CR2032, Micro (AAA), Mignon (AA), Baby (C), Mono (D), Block 9V. Sie weisen relativ hohe Zellspannungen, hohe spezifische Energien auch bei tiefen Temperaturen 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.

Als Anodenmaterial verwendet man metallisches Lithium. Die gängigen kommerziellen Typen unterscheiden sich vornehmlich im Kathodenmaterial und dem verwendeten Elektrolyten.

Als Kathodenmaterial eignet sich eine Reihe von organischen und anorganischen Materialien (z.B. Schwefeldioxid, Thionylchlorid, Eisensulfid, Kupfersulfid,

Mangandioxid, Silberchlorid, etc.). Das kommerziell am weitesten verbreitete Lithium-Metall-System 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.

Bereits vor über 40 Jahren wurden neben nur einmal verwendbaren Lithium-Metall-Zellen erste Baureihen von wiederaufladbaren Zelltypen mit Lithium-Metall-Elektroden erprobt. Ein großer Nachteil dieser ersten wieder-

aufladbaren Lithium-Metall-Zellen ist jedoch 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 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 wiederaufladbaren Sekundärbatterie 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.

1.4 Lithium-Ionen-Batterien

Wiederaufladbare Lithium-Ionen-Zellen gibt es in unterschiedlichen Bauformen:

Rundzelle: Die einzelnen Schichten der Zellen werden dabei aufeinander geschichtet und anschließend um einen Dorn gewickelt. Der zylindrische Zellwickel (jelly roll) wird anschließend in ein festes Gehäuse gepackt, das üblicherweise auch den Stromableiter für die negative Elektrode darstellt. Die positive 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 be-

sitzt im Gegensatz zu den beiden anderen Zelltypen kein festes Gehäuse, sondern nur eine kunststoffbeschichtete Aluminiumfolie 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.

Wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine hohe spezifische Leistung und Energiedichte und haben keinen oder im Falle von Lithium-Eisenphosphat nur einen äußerst geringen Memory-Effekt.

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

Der kommerzielle Durchbruch der wiederaufladbaren Lithiumbatterie-Technologie 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 (Interkalationen) eingesetzt. In diesem System ist sowohl auf der Kathodenseite wie auch auf Anodenseite 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 Zyklenlebensdauer sowie einer ausreichenden Formstabilität der Elektroden haben sich bisher vornehmlich Batteriesysteme bewährt, die ein Lithium-Übergangsmetalloxid vom Typ LiXO_2 ($X = \text{Co, Ni, Mn}$) als Elektrode verwenden, wobei insbesondere Lithiumdotiertes Cobaltdioxid (LiCoO_2 , LCO) Verbreitung gefunden hat.

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

1.5 Anwendungen

Die Vorteile von wiederaufladbaren Lithiumbatterien im Vergleich zu konventionellen chemischen Energiespeichern (Blei-Säure-Batterien, Nickel-Cadmium-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien) ergeben sich aus den elektrochemischen Leistungsparametern. Die hohe Zellenspannung bei Lithium-Ionen-Zellen von typischerweise 3,6/3,7 V erlaubt die Konstruktion von Batterien mit nur einer einzelnen Zelle. Moderne Mobiltelefone arbeiten heute ausschließlich mit einer Lithium-Ionen-Batterie und sind nur noch mit einer einzelligen Batterie bestückt. Eine Batterie auf Basis von herkömmlichen Nickelelektroden würde für die gleiche Anwendung drei in Serie geschaltete 1,2 V-Zellen benötigen. Zudem zeigen sie im Gegensatz zu konventionellen Akkus keinen oder wenn, dann nur einen äußerst geringen Memory-Effekt (Kapazitätsverlust durch nicht vollständiges Laden/Entladen) und erreichen einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 95 % (Verhältnis zwischen Entlademenge zu Lademenge).

Der weite Temperaturbereich, in dem Lithiumbatterien eingesetzt werden können (-20 °C bis +70 °C), insbesondere das gute Tieftemperaturverhalten und die geringe Selbstentladung (über 10 Jahre Lagerfähigkeit) machen Lithiumbatterien für zahlreiche Anwendungsgebiete unersetzlich.

Grundsätzlich unterscheidet man Lithiumbatterie-Anwendungen bezüglich ihrer Leistung in drei Kategorien:

Batterien kleiner Leistung für mobile elektronische Kleinanwendungen

Die ersten Lithiumbatterien, 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 Lithiumbatterien geführt. Die eingesetzten Lithiumbatterien bieten eine überlegene Einsatzdauer bei gleichzeitig geringerem Gewicht. In Verarbeitungsbetrieben oder Produktionsanlagen werden moderne Lithiumbatterien 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-Ionen-Batterien unverzichtbar.

Batterien mittlerer Leistung für Batterieanwendungen im mittleren Leistungsspektrum

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

Batterien großer Leistung (Hochenergiebatterien) für Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb

Einen rasanten Anstieg in der Verwendung findet die Lithium-Ionen-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-Ionen-Batterien für Kraftfahrzeuge erreichen eine Energiedichte von über 120 Wh/kg (zum Vergleich: konventionelle Blei-Säure-Autobatterien 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. Um bei leistungsstarken Hochenergie-Batteriesystemen die hohen Spannungen von mehreren Hundert Volt zu erreichen, werden Zellen entsprechend den Anforderungen an Strom und Spannung miteinander parallel und seriell zu Batteriemodulen verschaltet, wobei üblicherweise diese Batteriemodule selbst nochmals zu einer Batteriebaueinheit verschaltet werden.

2 SICHERHEITSTECHNISCHE BETRACHTUNG: RISIKEN UND GEFAHREN

Aus der Verwendung bestimmter chemischer Verbindungen im Zusammenhang mit hohen Energiedichten und aus dem für Sekundärbatterien notwendigen Einsatz einer Schaltelektronik (möglicher technischer Defekt) ergeben sich bei Lithiumbatterien spezifische Gefahrenpotenziale, die eine besondere Sicherheitsbetrachtung erfordern.

Aufgrund spektakulärer Ereignisse wurde die mögliche Problematik von Lithium-Ionen-Batterien aber auch von Lithium-Metall-Batterien in der Öffentlichkeit bekannt, was u.a. bei Notebooks und Smartphones in den letzten Jahren zu großen Rückrufaktionen führte.

- 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 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 es auf dem London-Heathrow Airport ebenfalls in einer Boeing 787 zum Brand einer nicht-wiederaufladbaren Lithium-Metall-Batterie in einem ELT (emergency locator transmitter).
- Am 06. November 2013 kam es zum dritten Brand des Elektroautos Tesla Model S.

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“ („Thermisches Durchgehen“) wird die gesamte Energie allerdings nicht kontrolliert als elektrische Energie, sondern unkontrolliert 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. Aufgrund des wärmeproduzierenden Prozesses verstärkt sich die Reaktion selbst und es kommt zu einer kritischen Überhitzung der Batterie.

Hinzu kommt, dass einige der eingesetzten Kathodenmaterialien bei hohen Temperaturen zerfallen. Diese Reaktion ist ebenfalls wärmeproduzierend (exotherm) und setzt zudem den gebundenen Sauerstoff frei, der im Falle einer Feuerentwicklung, einen Brand nur sehr schwer beherrschbar macht. Mit konventionellen Löschmethoden kann ein solcher Brand nicht gelöscht werden.

2.1 Temperaturverhalten

Die optimale Betriebstemperatur von Lithiumbatterien 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 kann es zu einer irreversiblen Schädigung der Zellen durch z.B. Abscheiden von reinem Lithium an der Anode, sog. „Lithium-Plating“, kommen. 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 Lithiumbatterien 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 zu verdampfen und führen zum Druckaufbau, der die Zelle bersten lassen kann.
- 130 °C: Separator aus PE, PP oder PE/PP verschließt die Poren („Shutdown“). Separator schmilzt, zusätzliche Erwärmung aufgrund von Kurzschluss. Autokatalytischer Anstieg der Temperatur.

- 150-250 °C: Einige Kathodenmaterialien zerfallen bereits bei diesen Temperaturen und geben in einer exothermen Reaktion Wärme und Sauerstoff ab, wodurch es zu einem Thermal Runaway kommen kann. 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).
- 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 er-

reicht werden können, die selbst chemisch eingelagertes Lithium zur Zündung bringen kann (Metallbrand).

2.3 Inhaltsstoffe und Zersetzungsprodukte im Brandfall

Lithiumzellen sind in der Regel hermetisch gekapselt, d.h. gasdicht verschlossen, so dass im regulären Normalbetrieb keine Inhaltsstoffe 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.

Wasserstoff (Gefahr 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 sogenannte Knallgasexplosion auszulösen.

Auch wenn Lithium bei Sekundärbatterien nicht als reines Metall, sondern als

chemische Verbindung (im geladenen Zustand z.B. Lithium-Interkalationsverbindung, bzw. im entladenen Zustand als Lithium-Cobaltdioxid) 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 Batteripolen. Auch wenn bei einer intakten und vollständig gekapselten Zelle die Wahrscheinlichkeit, dass der innere Elektrodenkörper (Lithium) mit Wasser in Kontakt kommt, sehr gering ist, kann allein die Elektrodenspannung zwischen den beiden Zellpolen 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 Zellen in einem Behälter mit Salzwasser untergetaucht wurden 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 Zellen oder Batterien vollständig mit Löschwasser überdeckt oder mit dem abfließenden Löschwasser in Auffangbecken gespült werden, die Gefahr, dass es wegen der Gleichspannung zwischen den Batteripolen zur Bildung von Wasserstoffgas und dadurch zu einer Knallgasexplosion kommen kann.

Graphit: Beim thermischen Durchgehen großer Zelltypen 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 und elektronischen 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-, Magenerkrankungen, 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 Lithiumbatterien eingesetzten Materialien bzw. einzelne Batteriekomponenten sind zum Teil brennbar und leicht entzündbar. Allein im Hinblick auf die brandschutztechnischen Parameter, wie Flammpunkt, Zündtemperatur und Brennwerte 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 Lithiumbatterien verwendeten organischen Lösungsmittel sind in der Regel leicht entzündlich und können mit Luft explosive Gemische bilden.

Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat ($LiPF_6$): Bedingt durch die Verwendung von fluorhaltigen und/oder phosphorhaltigen Verbindungen (z.B. das überwiegend eingesetzte Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat ($LiPF_6$)) 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 Zellkörper) zu einer chemischen Reaktion wobei Fluorwasserstoff (HF) und Phosphorsäure (H_3PO_4) entstehen.

Phosphorsäure (H_3PO_4) 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 gängigen Größen (z.B. Laptop) zu einer kritischen Gefährdung durch HF kommen. Allerdings kann nur eine HF-Messung vor Ort die Gefahrenlage konkret klären. Nach Bränden, in denen Lithium-Batterien involviert sind, können hohe HF-Konzentrationen im Brandrauch auftreten und insofern sind HF-Kontaminationen auf Gebäudeteilen und Anlagen (auch wenn diese nicht direkt vom Brandgeschehen betroffen sind) nicht auszuschließen.

Weitere giftige Verbindungen: Aus den phosphorhaltigen Bestandteilen können 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: Durch beschädigte Lithiumbatterien können sowohl vor dem Brandstadium als auch bei Brandentstehung giftige Stoffe freigesetzt werden, 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.

2.4 Elektrische Gefahren

Elektrische Spannung: Zwischen den Polen einer Batterie liegt eine elektrische Gleichspannung an. Daher kann von Batterien mit hohen Spannungen für Personen eine Gefahr ausgehen. Gerade die für Elektrofahrzeuge erforderlichen hohen Nennspannungen von bis zu 800 Volt 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 sich Hochvoltbatteriespeicher nicht einfach durch einen Notausschalter abstellen lassen, stellt die hohe Spannung für Wartungspersonal und insbesonde-

re 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 dem unkontrollierbaren 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 Dominoeffekts können die entstehenden hohen Temperaturen zum Schmelzen einzelner Zellkomponenten (z.B. Separatoren, Elektroden) führen, was wiederum Kurzschlüssen und daraus folgend eine Feuerentwicklung verursachen kann.

2.5 Ursachen für Batteriebrände

Fehlerhafte Handhabung: Gefährliche 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, Überladung, etc.) oder thermischen Einwirkungen (z.B. Wärmeeinstrahlung von außen, etc.) kann es zum Austreten des Elektrolyten, zu Überdruckreaktionen mit Abblasen gasförmiger Reaktionsprodukte, zu Feuererscheinungen oder zu einem gewaltsamen Bersten kommen.

Bei einer Überladung einer Lithium-Ionen-Batterie 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-Ionen-Zelle der Thermal runaway verursacht werden, wobei sich beim „Durchgehen der Batterie“ heiße Gasen entwickeln, die zum Öffnen der

Zelle und zum Herausschleudern von gegebenenfalls brennenden Zellkomponenten 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 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 Lithiumbatterien 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 Lithiumzellen. Wenn beispielsweise während des Herstellungsprozesses metallische Partikel oder sonstige leitfähige Verunreinigungen zwischen Separator und Elektrode 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 über die vom Hersteller spezifizierte Ladeschlussspannung hinaus geladen. Die vollständig geladene Zelle kann die aus der Steckdose immer weiter zugeführte Energie nicht mehr speichern, folglich führt die Überladung zu einer Erhitzung der Zelle oder Batterie. Im Zellinneren kann es zu einer Verdampfung der organischen Elektrolytflüssigkeit und auch zu einem Zerfall der kristallinen Schichtstruktur kommen, was in Verbindung mit einer stark exothermen Reaktion zum Freisetzen von elementarem Sauerstoff (brandfördernd!) führt. Bei diesem Vorgang kann es aufgrund einer starken lokalen Temperaturerhöhung zu einem Brand und unter bestimmten Umständen auch zu einer „explosionsartigen“ Entlastungsreaktion kommen. Außerdem kann es zu einer Ablagerung von metallischem Lithium an der Anode kommen (sog. „Lithium plating“). Als Folge können

sich feine Lithium-Nädelchen, die sog. „Dendrite“ bilden“, die leicht den Kunststoffseparator durchstechen und einen internen Kurzschluss verursachen können.

Überentladung bzw. Tiefentladung: Bei einer Überentladung bzw. Tiefentladung wird die Zelle oder Batterie weiter entladen, obwohl die vom Hersteller spezifizierte Entladeschlussspannung erreicht worden ist. Hierbei zersetzt sich irreversibel die Elektrolytflüssigkeit. 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 Internetseiten Warnhinweise zu gefälschten Lithium-Ionen-Batterien und Ladegeräten auf. Hierbei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Produkte nicht mit den entsprechenden Sicherheitselementen ausgerüstet sind und es beim Gebrauch bzw. Laden zu verschiedenen Problemen kommen kann: Ungewöhnlich starkes Erhitzen, Bersten und Auslaufen des Elektrolyten, Feuer, Verletzungen des Benutzers, z.B. Verbrennungen. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass für Fehlfunktionen oder Unfälle keine Haftung übernommen wird, die durch den Gebrauch von nicht originalen Lithium-Ionen-Batterien und 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 von Lithiumbatterien 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 verunglück-

ten 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

Lithiumzellen neigen bei thermischer Belastung zur „explosionsartigen“ Zündung mit der Neigung zum sog. „rocketing effect“ (ähnlich Spraydosen). Zur Vermeidung von Sekundärbränden und Kollateralschäden sind geeignete Maßnahmen zum Schutz von Nachbarbereichen 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 Lithiumbatterie-Bränden als Löschmittel neben dem konventionellen Löschmittel Wasser unter anderem auch Metallbrandpulver, sauerstoffverdrängende Löschmittel oder Tensid-Gemische empfohlen.

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

erwehreinsatz 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 Lithiumbatterie-Bränden ist mit einem deutlich größeren Löschwasserbedarf als zur Bekämpfung 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 Metallbrandpulver oder Sand 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. Angesichts 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 Metallbrandpulver oder Sand lediglich auf kleinere Entstehungsbrände. Für größere Schadensszenarien erscheint Metallbrandpulver oder Sand 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 Lithiumbatterie-Bränden maßgeblich den Löscherfolg (oder Misserfolg). Auch der sauerstoffverdrängende Effekt ist bei Lithiumbatterien zu relativieren. Der im Brandfall aus dem Zerfall des Kathodenaktivmaterials aus der Zelle selbst freiwerdende Sauerstoff, ermöglicht auch ohne äußeren Luftsauerstoff eine Teiloxidation (=Weiterbrennen). 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 Lithiumbatterien 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 Löscherfolge 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 Lösversuchen 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 zei-

gen 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 Bran-

drauch 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 Säureschutz, 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) Zellen 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 Hochvoltbatterien bzw. Teile davon gelten bei der Beförderung als Gefahrgut und dürfen daher nur von Fachkundigen verladen, auf offenen Fahrzeugen transportiert und im Freien gelagert werden.
- Fahrzeug aus Gewässern bergen: Im Wasser besteht durch das HV-System grundsätzlich kein erhöhtes Stromschlagrisiko. Die Vorgehensweise beim Bergen ist identisch zu konventionellen Fahrzeugen. Gegenüber konventionellen Fahrzeu-

gen besteht in der Regel keine zusätzliche Gefahr für das Trinkwasser.

- Achtung Spannungen bis 1.000 V! 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 Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien.

Im Sinne einer effektiven Schadenverhütung bieten sich im Bereich Lithiumbatterien 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 Exposition 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 Lithiumbatterien ausschließlich in feuerbeständig abgetrennten Bereichen oder unter Sicherstellung eines angemessenen Sicherheitsabstandes zuzulassen. Hier hat sich auf der Basis von Schadenerfahrungen 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 organisa-

torischen und technischen Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

Neben der brandschutztechnischen Abtrennung von Bereichen, in denen Lithiumbatterien 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 spezifischer 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 Zellkomponenten 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 sicherzustellen 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 Lithiumbatterien an Produktionsplätzen bereitgestellt werden müssen, ist zu beachten, dass die Anzahl der Batterien auf das notwendige Minimum begrenzt wird („Tagesbedarf“). Im Bereich der Bereitstellungsflächen und Verarbeitungsplätze sind zusätzliche 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 Lager-schränken/Containern. Sind in den betroffenen Bereichen Löschanlagen vorhanden, ist zu prüfen, ob die betreffende Löschanlage (inkl. das verwendete Löschmittel) auf die Gefahrerhöhung durch Lithiumbatterien ausgelegt ist und einen Brand mit Lithiumbatterien wirksam bekämpfen kann.

4.3 Anlagentechnische Sicherheitssysteme

In Bezug auf anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen (Löschanlagen) für den Umgang oder die Lagerung von Lithiumbatterien 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 bei sog. „chaotischer Lagerhaltung“ neben herkömmlichen Lagergütern auch Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien 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, in denen Lithiumbatterien gelagert oder verwendet werden, ist eine flächendeckende Brandfrüherkennung ein absolutes Muss. Als Mindestanforderung ist sicherzustellen, dass alle Bereiche, in denen mit Lithiumbatterien hantiert wird, flächendeckend durch eine Brandmeldeanlage mit automatischer Alarmweiterleitung zu einer ständig besetzten Stelle überwacht werden.

Für eine zielgenaue Vorort-Brandbekämpfung 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 durch 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. Kohlenmonoxid, Fluorwasserstoff).

Hierdurch ergeben sich spezielle Anforderungen an die Brandmeldetechnik. Es muss so-wohl 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 abgesaugt werden, mit Zuluft von oben, und bei spezifisch leichten Gasen muss im Dachbereich abgesaugt werden, mit Zuluft von unten. 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 Lithiumbatterie-Bränden zu begrenzen und den Brand kontrollierbar zu machen. 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 Lithiumbatterien 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 grund-

sätzlich positiv aus. Mit den üblicherweise eingesetzten Spülmengen lässt sich allerdings nur eine geringe Menge an thermischer Energie abführen.

Im Hinblick auf die enorme Wärme-freisetzung, die bei einem Brand von Lithiumbatterien 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. So-mit 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 ANWENDUNGSTYPISCHE SCHADENVERHÜTUNG: PRODUKTSPEZIFISCHE SICHERHEITS- REGELN UND SCHUTZMASSNAHMEN

Das Gefährdungspotential von Lithiumbatterien 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, deren 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.
- Einsatz von Shut down-Separatoren: dreilagige Separatoren, die bei Temperaturentwicklung durch Teilaufschmelzen einer Lage ihre Porosität verlieren und damit den Stromfluss unterbinden.

- Einsatz von Safety Vent: Sollbruchstelle, die bei entsprechendem innerem Gasdruck aktiviert wird und ein kontrolliertes Abgasen ermöglicht. Ein gewaltsames Bersten wird somit verhindert.

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 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 („Cell Balancing“). 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 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 Batterie-Management-System (BMS) sichergestellt ist.

- 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 o-der 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.
- Beim Kauf immer auf das GS-Zeichen achten. Das Prüfzeichen gewährleistet, dass der Hersteller alle Sicherheitsvorschriften eingehalten hat.
- Das EBike 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
- Gerät darf sich nicht in Reichweite von brennbaren Materialien befinden (Parken, Ladevorgang, etc.). Ladevorgang sollte möglichst in einer brandlastfreien Umgebung durchgeführt werden

5.3 Lagerung und Bereitstellung: Lithiumbatterien und batteriebetriebene Produkte

Das Gefährdungspotenzial von Lithiumbatterien 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:

Lithiumbatterien 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 sicherheitszertifizierenden 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.

Lithiumbatterien 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 auch als Module 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. Gefahstofflager, -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 Lithiumbatterien hoher Leistung.

Lithiumbatterien hoher Leistung

Batterien der Kategorie sind durch eine besonders hohe Leistung gekennzeichnet. Derzeit bekannte Einsatzbereiche sind vornehmlich Elektromobilität (Automotive) sowie netzunabhängige Großgeräte.

- Für Batterien hoher Leistung gelten als Mindestanforderung die Maßnahmen für Lithiumbatterien 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.

In einem Lager mit Lithium-Ionen-Batterien ist im Brandfall zunächst von einem Schwelbrand mit geringer Energiefreisetzung und Thermik auszugehen.

Bei Brand einer Lithium-Ionen-Batterie (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 Wasser (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.

Klassifizierung	Lithium-Metall-Batterie (UN 3090)	Lithium-Ionen-Batterie (UN 3480)
Leistung		
gering	≤ 2 g Gesamtgehalt Lithium	≤ 100 Wh je Batterie
mittel	> 2 g Lithium je Batterie und ≤ 12 kg brutto je Batterie	> 100 Wh je Batterie und ≤ 12 kg brutto je Batterie
hoch	> 2 g Lithium je Batterie und > 12 kg brutto je Batterie	> 100 Wh Nennenergie und/oder > 12 kg brutto je Batterie

5.4 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).

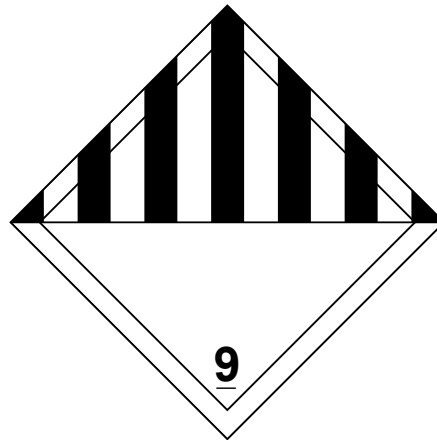
Verkehrsträger	Organisation / Übereinkommen	Regelwerk
Straßenverkehr	UN Economic Commission for Europe (UNECE)	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR)
Schieneverkehr	Intergovernmental Organization for International Carriage by Rail (OTIF)	Regulations 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 Goods 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-Metall-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien als Gefahrgut der Klasse 9 (Gefährliche Stoffe und Gegenstände) eingestuft.

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

UN-Nummer	Benennung und Beschreibung
3480	LITHIUM-IONEN-BATTERIEN (einschließlich Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)
3481	LITHIUM-IONEN-BATTERIEN IN AUSRÜSTUNGEN oder LITHIUM-IONEN-BATTERIEN, MIT AUSRÜSTUNGEN VERPACKT (einschließlich Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)
3090	LITHIUM-METALL-BATTERIEN (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierung)
3091	LITHIUM-METALL-BATTERIEN IN AUSRÜSTUNGEN oder LITHIUM-METALL-BATTERIEN, MIT AUSRÜSTUNGEN VERPACKT (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierung)

Weisen Lithium-Metall-Zellen einen Lithiumgehalt von mehr als 1 g auf bzw. Lithium-Metall-Batterien von mehr als 2 g und besitzen Lithium-Ionen-Zellen einen Nennenergiegehalt von mehr als 20 Wh bzw. Lithium-Ionen-Batterien von mehr als 100 Wh, dann muss das Versandstück mit dem Symbol der Gefahrgutklasse 9 (10 x 10 cm, sieben schwarze Streifen auf kontrastierendem Grund) gekennzeichnet sein:



Werden diese Grenzwerte nicht überschritten, dann kann die Batterie nach ADR Sondervorschrift 188 freigestellt befördert werden bzw. IATA-DGR Packing Instruction 965, Sektion II, das Versandstück muss allerdings mit dem Lithiumbatterie-Abfertigungskennzeichen gekennzeichnet sein:



Eine Voraussetzung für die Zulassung zum Transport von Lithiumbatterien ist der Nachweis gemäß UN Manual Tests and Criteria, Part III, Section 38.3.:

- Test 1: Höhensimulation (simuliert Druckabfall während des Lufttransports)
- Test 2: Thermische Prüfung (schnelle und extreme Temperaturänderungen)
- Test 3: Schwingung (Schwingungen während der Beförderung)
- Test 4: Schlag (simuliert mögliche Stöße während der Beförderung)
- Test 5: Äußerer Kurzschluss
- Test 6: Aufprall / Quetschung (mechanische Beschädigung)
- Test 7: Überladung
- Test 8: Erzwungene Entladung (Tiefentladung)

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-Metall-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien im Gepäck findet man beispielweise in den IATA-DGR folgende Angaben:

	Erlaubt im oder als Handgepäck	Erlaubt im oder als aufgegebenes Gepäck	Erlaubt wenn am eigenen Körper, zum persönlichen gebrauch mitgeführt	Dier Erlaubnis der Luftverkehrsgesellschaft ist erforderlich	Der Flugkapitän muss über die Ladeposition informiert werden
Rollstühle oder andere batteriebetriebene Fortbewegungsmittel mit Nassbatterien oder mit Lithium-Batterien (für Einzelheiten siehe 2.3.2.3 und 2.3.2.4).	NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN
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	NEIN	NEIN	JA	JA
Mit Lithium-Ionen-Batterien betriebene Ausrüstung, die Batterien mit mehr als 100Wh aber höchstens 160Wh enthält.	JA	JA	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	JA	NEIN	JA	JA	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.	JA	NEIN	JA	NEIN	NEIN

Transport von beschädigten Lithiumbatterien: Es gilt der Grundsatz, dass Lithium-Ionen-Batterien, die unter Verdacht stehen, defekt oder beschädigt zu sein, speziell transportiert werden müssen. 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?

- Gibt es geschmolzene oder verformte Kunststoffteile?
- Sind geschmolzene Anschlussleitungen zu erkennen?
- Identifiziert Batterie-Management-System (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 Her-

steller des Batteriesystems.

Kann der fachkundige Experte nicht ausschließen, dass die Zellen oder Batterien unter normalen Beförderungsbedingungen zu einer schnellen Zerlegung, gefährlichen Reaktion, Flammenbildung oder einem gefährlichen Ausstoß giftiger, ätzender oder entzündbarer Gase oder Dämpfe neigen, dürfen nur unter den von der zuständigen Behörde (Bundanstalt für Materialforschung und -prüfung) festgelegten Bedingungen befördert werden.

5.5 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 Blei-Säure-Batterien liegt in Deutschland bei über 95 %, der Rücklauf von Lithiumbatterien ist dagegen ungenügend.

Gebrauchte, nicht beschädigte Lithium-Ionen-Batterien (UN 3480) und Lithium-Metall-Batterien (UN 3090) werden in Sammelboxen zurückgenommen (vollständig entladen und Pole abgeklebt). 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 Lithiumbatterien „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:

- 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 Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien). Ursache: Kurzschluss durch unsachgemäße Behandlung.
- Brand im Haufwerk. Ursache: „Selbstentzündung“ nach Beschädigung (Zerquetschen) von Elektrobauteilen (mit Lithiumbatterien) durch Radlader
- Brand im Schredder. Ursache: „Selbstentzündung“ nach mechanischer Zerkleinerung von Elektrobauteilen (mit Lithiumbatterien)
- 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 Gefahrenpotenzial von Lithiumbatterien für Beteiligte 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 Batterien durch die Hersteller.
- Verbraucherinformation: Hinweis auf die Gefahren und auf die notwendige Sorgfalt bei der Entsorgung betreffender Geräte und Batterien.
- Entsorgungskette: Der Letztbesitzer soll grundsätzlich die Batterien vom Elektroaltgerät trennen (wenn möglich) und diese getrennt der Erfassung zuführen.
- Versicherungswirtschaft: Die Risikoträger fokussieren sich zunehmend auf risikoadäquate Prämiengestaltung (Schadenbedarfsprämie) mit betriebsartspezifischen 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 risikoadäquaten Schutzkonzepten eine gefahrenspezifische Bewertung in Verbindung mit effektiv wirksamen Maßnahmen anzustreben. In diesem Sinne müssen Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien 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 Voraus-

setzungen, damit ein Schutzkonzept überhaupt funktionieren kann. Ungeachtet dessen ist sicherzustellen, dass unter Berücksichtigung der enormen Brandlast bei den Sammelstellen eine ausreichend 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 4,8 Milliarden Euro 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 sicherheit-

stechnischen Anforderungen an Batterieladestationen 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 Batterieladestationen 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 Lithiumbatterien und auch die entsprechenden Ladetechnologien bei ordnungsgemäßem 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 chemisch gespeicherten Energie, geschieht das in der Regel nicht als elektrische, sondern als thermische (!) Energie: Feuererscheinung (Sachschäden, Personenschäden, Umweltschä-

den). Insofern stellen die Risiken bei der Handhabung und Bereitstellung von Lithiumbatterien 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, Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien 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 Lithiumbatterien verlangt insofern maßgeschneiderte Lösungen, die gezielt auf ein bestimmtes Anwendungsszenario abgestimmt sind.



Dr. Michael Buser ist Geschäftsführer bei Risk Experts – Risiko Engineering GmbH, einem international aufgestellten Risikoberatungsunternehmen mit Hauptsitz in Wien. Nach mehrjähriger Forschungstätigkeit im Bereich Lithium-Batterien war er Leiter F&E und Laborleiter Anwendungstechnik in einem Unternehmen, das „Batterieelektroden aus Kohlenstoff“ produziert. Als Mitglied des GDV-Gremiums „Kommission Sachrisiken-Schadenverhütung“ (KSSV) sowie der GDV-Arbeitsgruppe „Branderkennung und Brandbekämpfung (BEB)“ hat er viele Jahre die Versicherungswirtschaft im Bereich Schadenverhütung fachlich unterstützt. Heute führt er neben seiner Beratungstätigkeit für die Themenbereiche Feuerrisiken und Betriebsgefahren Europa-weit Seminarveranstaltungen und Ausbildungsprogramme durch.

Kontakt:

m.buser@riskexperts.at



Dr. Jochen Mähliß ist Leiter der Batteryuniversity GmbH, einem akkreditierten Prüfinstitut, das sich u.a. auch eingehend mit dem Gefährdungspotenzial und den Sicherheitsrisiken von Lithiumbatterien beschäftigt. Er ist aktives Mitglied in vielen Lithiumbatterie-Arbeitsgruppen und normengebenden Gremien. Als Gefahrgutbeauftragter ist er kompetenter Ansprechpartner für alle Belange rund um die Beförderung von Lithiumbatterien.

Kontakt:

jochen.maehliss@batteryuniversity.eu



