

Fachbereich AKTUELL

FBHM-123

Herstellung von Hochvoltspeichern

Sachgebiet Fahrzeugbau, -antriebssysteme, Instandhaltung
 Stand: 04.02.2022 – Entwurf

Die „Fachbereich AKTUELL“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse (abgestimmte Erfahrung des jeweiligen Sachgebiets) für die Verwendung von Arbeitsmitteln wieder. Sie werden vom entsprechenden Fach- und Sachgebiet bei Bedarf erstellt, angepasst und auf der Internetseite der DGUV in der aktuellen Version veröffentlicht.

Diese Fachbereich AKTUELL bezieht sich auf Hochvoltspeicher 60V-1500V DC, entsprechend dem Anwendungsbereich der DGUV Information 209-093 [1]. Die Informationen dieser Schrift können sinngemäß auch auf andere Lithium-Ionen Starter- oder Stützbatterien angewendet werden.

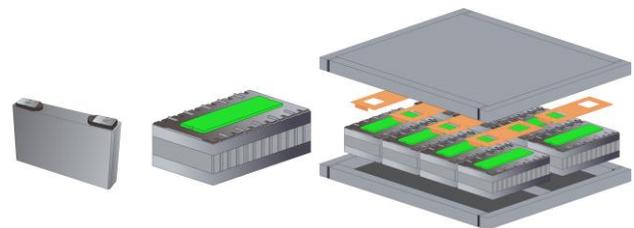


Abbildung 1 – Hochvoltspeicher, bestehend aus Modulen und Zellen

Aufgrund der wachsenden Forderung nach umweltverträglichen Antriebstechnologien für Fahrzeuge werden Hochvoltantriebssysteme in steigender Zahl entwickelt und angewandt.

Betriebe, die Hochvoltspeicher herstellen, weiterverarbeiten und mit ihnen umgehen stehen aufgrund des Anstiegs der Elektromobilität vor neuen Herausforderungen und potenziellen Gefährdungen – und zwar bei allen Prozessschritten, die für den Umgang mit und die Reparatur von Hochvoltspeichern erforderlich sind, sowie bei Lagerung, Transport und Unfallereignissen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
3	Herstellung von Hochvoltspeichern	10
4	Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen	12

1 Einleitung

Der Umgang mit Hochvoltspeichern im Sinne dieser Schrift umfasst die Tätigkeiten, die bei Herstellern von Hochvoltspeichern und Hochvoltfahrzeugen, in Werkstätten, Transport-, Lager- und Recyclingunternehmen vorkommen. Der Produktzyklus wird von der Herstellung bis zum Recycling des Hochvoltspeichers betrachtet.

Weitere Aspekte des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (z. B: Arbeitsplatzergonomie) sind ebenfalls zu beachten, stehen jedoch nicht im Fokus dieser Schrift.

Unternehmer und Unternehmerinnen haben die Pflicht, eine Gefährdungsbeurteilung nach Arbeitsschutzgesetz [2] und Betriebssicherheitsverordnung [3] durchzuführen. Für die Gefährdungsbeurteilung sind die Herstellervorgaben zu beachten. Ein Fahrzeughersteller wird zum Hersteller, wenn er ein Fahrzeug auf dem Markt bereitstellt.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien (LIB)

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) werden im gewerblichen Gebrauch in vielen verschiedenen Produkten und Anlagen eingesetzt. Das Spektrum reicht von Hörgeräten, Mobiltelefonen, Computern und mobilen Werkzeugen/Maschinen über Kraftfahrzeuge und Flurförderzeuge bis hin zu Lithium-Ionen-Großspeichern in Containern oder anderen baulichen Anlagen. Dabei ist der grundsätzliche Aufbau immer vergleichbar:

Je nach benötigter Größe der Batterie oder des Speichers wird eine entsprechende Anzahl von Einzelzellen zusammengefasst.

Auf dem Markt werden drei verschiedene Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen verwendet (siehe Abbildung 2):

- a) zylindrische Zellen
- b) Pouch Zellen
- c) prismatische Zellen

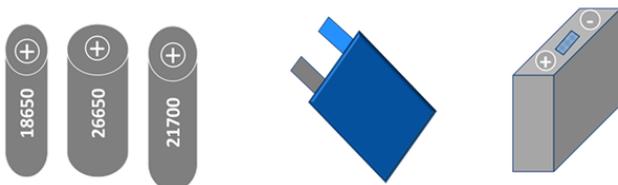


Abbildung 2 – Zylindrische (a), Pouch- (b) und prismatische Zelle (c)

Diese Bauformen gibt es in festgelegten Abmessungen. Die Pouch Zellen werden auch in speziellen Geometrien für die Anwendung hergestellt.

LIB werden außerdem in Primär-Zellen (nicht wieder aufladbar) und Sekundär-Zellen (wieder aufladbar) unterschieden.

In Hochvoltspeichern, die in der E-Mobilität zum Einsatz kommen, werden Sekundär-Zellen verwendet.

In einer Zelle sind jeweils die Anode, die Kathode, der Separator (siehe Abbildung 3) sowie die, in der Regel gelförmigen oder nahezu festen, Elektrolyte enthalten. Diese Materialien werden in zylindrischen Zellen gewickelt, in Pouch-Zellen in Lagen übereinandergelegt und in prismatischen Zellen in Ovalen gewickelt eingebracht.



Abbildung 3 – Anoden-(a), Separator-(b), Kathoden(c)-Material

Die Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle ist in Abbildung 4 grafisch dargestellt. Beim Entladen wandern die Li-Ionen (Li+) vom negativen Pol (Anode) der Zelle durch den Separator zum positiven Pol (Kathode). Beim Ladevorgang verläuft dieser Prozess in umgekehrter Richtung.

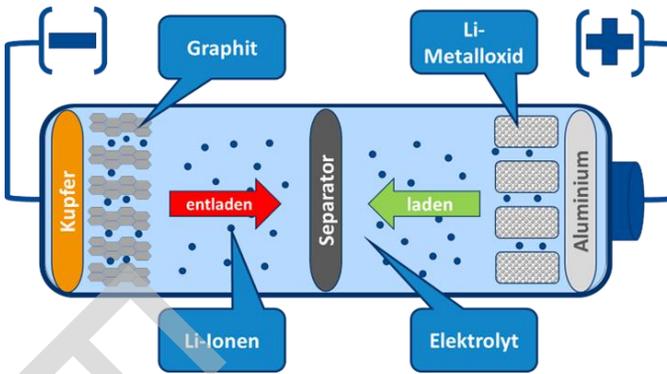


Abbildung 4 – Lithium-Ionen-Zellen Funktionsweise

2.2 Batterie

Durch eine Anordnung mehrerer Zellen, die hinter- oder nebeneinandergeschaltet oder verbunden werden, entstehen Batterien.

Der Ladevorgang wird durch das Batteriemanagementsystem (BMS) gesteuert. Das BMS befindet sich je nach Bauart direkt am Batteriepack oder ist im Ladegerät verbaut. Das BMS steuert, je nach Programmierung durch den Hersteller, den Ladestrom, überwacht die Temperatur der LIB und kann auch die Ladung verhindern oder unterbrechen, wenn die programmierten Parameter nicht eingehalten werden.

2.3 Spezifische Gefährdungen, die von LIB ausgehen

LIB bergen – wie viele andere Technologien – gewisse Risiken, besonders bei nicht fachgerechter Handhabung oder anderen äußeren Einflüssen.

Bei fachgerecht gefertigten LIB und sachgerechtem Umgang (Laden, Verwendung, etc.) kann von sicheren Produkten ausgegangen werden.

Es ist daher wichtig, die in einer Ausnahme-situation im Zusammenhang mit einer LIB auftretenden Gefahren zu kennen und richtig einschätzen zu können.

Charakteristisch für die LIB-Speichersysteme ist der hohe Energieinhalt pro Volumen. Unter äußeren Einfluss (z. B Beschädigungen, unsachgemäßes Aufladen etc.) können Lithium-Ionen-Zellen in einen unkontrollierten Reaktionszustand (Thermal Runaway) übergehen, ohne dass das im Voraus erkennbar ist.

2.4 Thermal Runaway/ Thermische Propagation

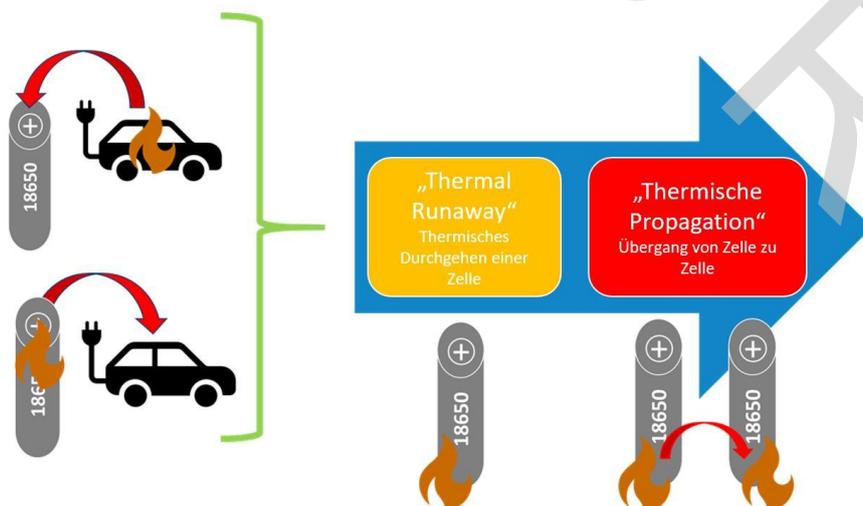


Abbildung 5 – Thermal Runaway – Thermische Propagation

Von einem „Thermal Runaway“ wird gesprochen, wenn die gespeicherte Energie einer Lithium-Ionen-Zelle in kurzer Zeit unkontrolliert in einer thermischen Reaktion freigesetzt wird. Wenn eine Zelle durch die thermische Reaktion weitere, benachbarte Zellen zur thermischen Reaktion bringt, wird das als „Thermische Propagation“ bezeichnet (siehe Abbildung 5).

Es ist zu unterscheiden, ob die LIB aus sich heraus kritische thermische Reaktionen zeigt oder ob die thermische Reaktion der Batterie durch thermische Last von außen (z B: Fahrzeugbrand) hervorgerufen wird.

Durch thermische, elektrische oder mechanische Beanspruchungen kann es bei LIB zu einer thermischen Reaktion der Batteriezellen kommen. Dabei handelt es sich um einen stark exothermen Prozess, bei dem toxische, und/oder brennbare oder explosionsfähige Inhaltsstoffe sowie brennendes Material aus den Zellen austreten können (siehe Abbildung 6).

Mit folgenden Gefährdungen muss bei einem Fehlerfall mit LIB gerechnet werden (z. B. bei unsachgemäßem Umgang, Überhitzung, mechanischer Beschädigung, internem Fehler, etc.):

- Mechanische Gefährdungen, z. B. wenn durch Kurzschlüsse glühende Metallteile und andere (unter Umständen brennende) Teile aus der Batterie ausgestoßen werden (Projektilbildung)
- Elektrische Gefährdungen durch elektrische Körperdurchströmung oder Lichtbögen
- Gefährdungen durch Gefahrstoffe, z. B. durch Batteriebestandteile oder deren Reaktions- oder Zersetzungsprodukte. Beim Brand von Li-Batterien werden, ebenso wie bei anderen Bränden, toxische Gase, krebserzeugende und gesundheitsschädliche Verbrennungsprodukte und -rückstände in erheblichem Maße freigesetzt.
- Brand- und Explosionsgefährdungen, z. B. durch elektrisches Aufheizen/ Entzünden durch Kurzschluss

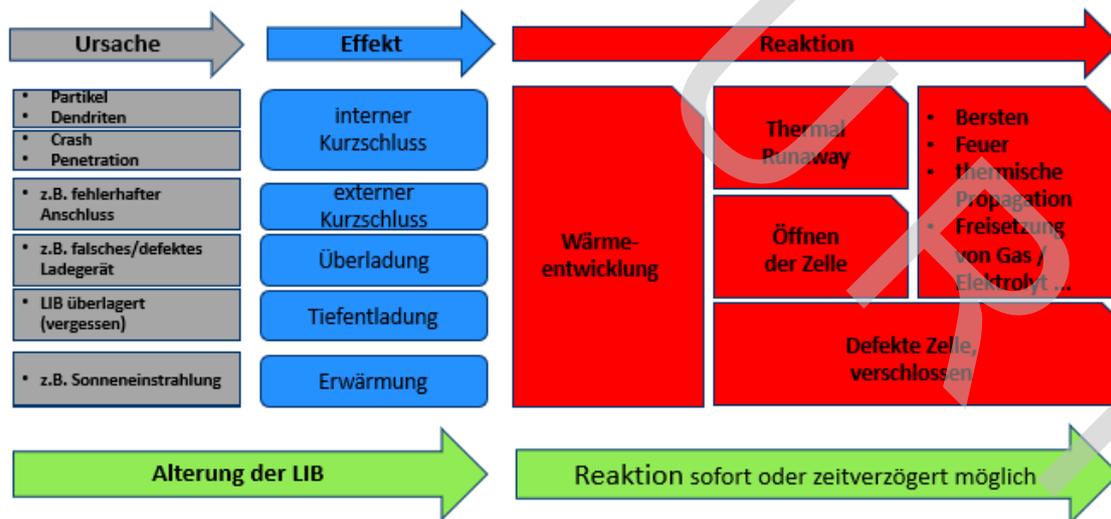


Abbildung 6 – Ursache – Effekt – Reaktion

Insbesondere beim Ladevorgang von LIB können kritischen Reaktionen auftreten.

Die Tatsache, dass LIB bereits seit 1993 als Gefahrgut eingestuft sind, weist darauf hin,

dass bei LIB stets mit kritischen Reaktionen gerechnet werden muss.

Nach dem Gesamtverband der Sachversicherer (VdS) ist eine LIB wie ein Gefahrstoff zu behandeln (VDS 3103) [4].

2.5 Brandverhalten (Brandgefahr) von Lithium-Ionen-Akkus

Für die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit von Bränden durch LIB liegen bisher noch keine ausreichenden statistischen Erkenntnisse in der Sachversicherung vor. Bisher sind nur wenige vergleichbare Untersuchungen über das Abbrandverhalten publiziert worden. Eine abschließende Beurteilung der Risiken und wirksamen Maßnahmen ist derzeit kaum möglich [5].

Beim Brand von LIB entstehen hohe Temperaturen und erhebliche Mengen toxischer und korrosiver Brandgase, die auch die Umwelt schädigen und die Umgebung kontaminieren können.

Da in der Batterie beim Brand durch chemische Reaktion verschiedene entzündbare oder brandfördernde Gase entstehen und freigesetzt

werden, sind LIB Brände schwer zu löschen. Es handelt sich um eine exotherme Reaktion. Somit kann es zu einer Selbsterhaltung oder sogar Selbstbeschleunigung der Reaktion kommen. Brandlöschverfahren, die den Brand durch Sauerstoffentzug beenden, funktionieren bei LIB aufgrund der Zellchemie nicht.

2.6 Wieso kann eine LIB thermisch reagieren/brennen?

LIB und die sich darin befindenden Zellen werden durch mehrere normativ (UN Test Criteria 38.3 [6] und ECE 100.2 [7]) geforderten Sicherheitseinrichtungen geschützt. Sollte sich eine Zelle zum Beispiel durch Hitze, Überladung oder mechanische Beschädigung zersetzen oder thermisch durchgehen, entstehen Temperaturen bis zu 1400 °C. Die Zelle platzt und bläst ihren Inhalt unter Überdruck nach außen ab (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7 – Reaktion

Um Brandschutzmaßnahmen für LIB-Brände festzulegen, sind Kenntnisse über die LIB und die möglichen Brandursachen essenziell.

In Abbildung 8 ist anhand des bekannten Branddreiecks dargestellt, wie es zu einem LIB-Brand kommt.

Die LIB kann bedingt durch ihre chemische Zusammensetzung ohne Fremdeinwirkungen thermisch reagieren. Als „interne“ Reaktion zählt unter anderem auch ein durch Dendriten-Bildung zerstörter Separator, der zu einem internen Kurzschluss führt.

Der Reaktionsverlauf und Reaktionszeit bei thermisch reagierenden LIB ist sehr stark abhängig vom Ladezustand und Energieinhalt. Es können Temperaturen bis 1400 °C auf Zellebene entstehen mit einem starken Druckanstieg in geschlossenen Behältnissen/ Räumen ohne Druckausgleich.

Der Temperaturverlauf sowie die Reaktionen in der Lithium-Ionen-Zelle sind der Abbildung 9 dargestellt.

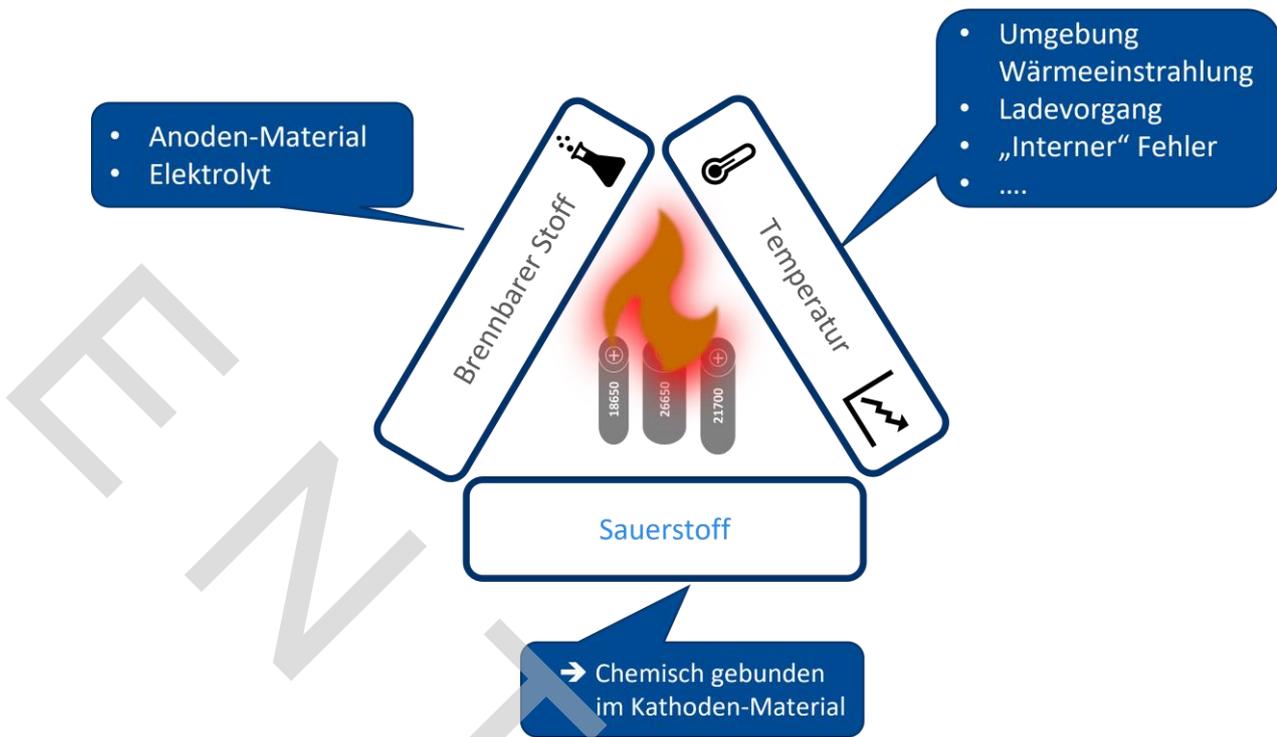


Abbildung 8 – Branddreieck

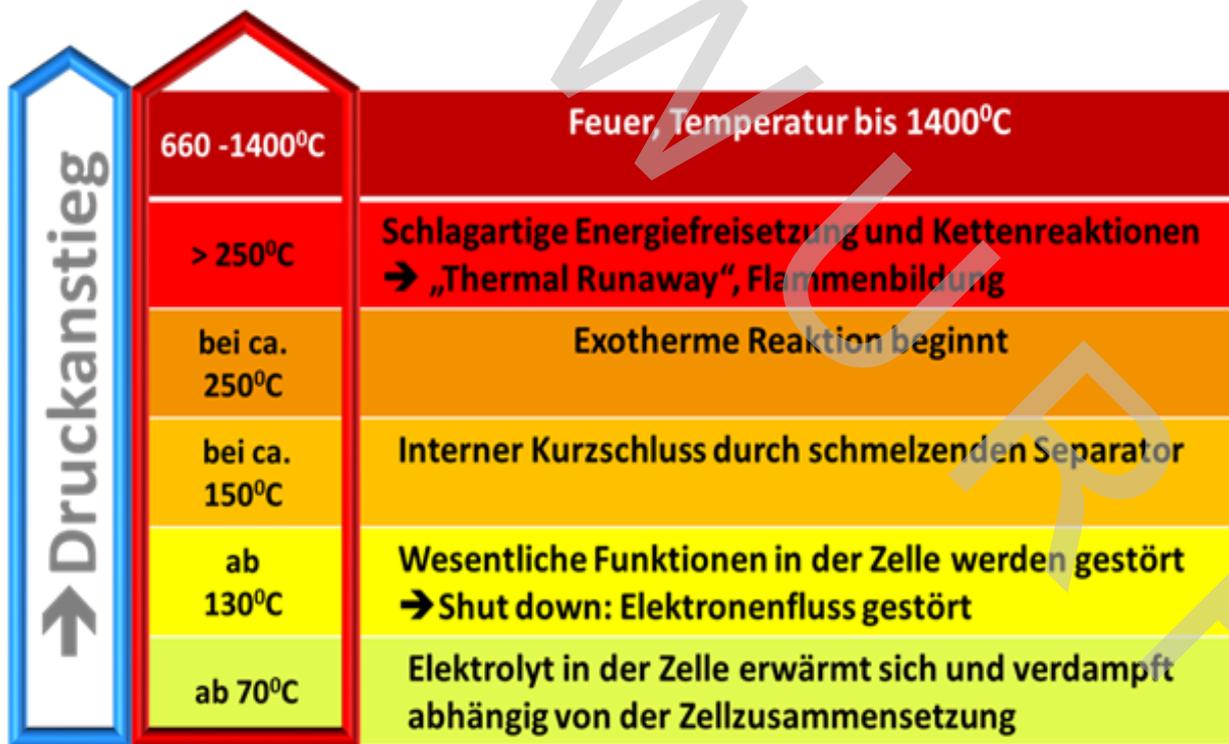


Abbildung 9 – Temperaturverlauf (Temperaturwerte sind ca.-Werte, abhängig von der Zellchemie/Bauart. Die Herstellervorgaben sind unabhängig davon zu beachten.)

Gründe im Produktlebenszyklus einer LIB, die zu einem Brand oder zu einer ungewünschten Reaktion führen können.

Tabelle 1 – Mögliche Schadensursachen

Lebenszyklus LIB	Ursache für möglichen Schaden
Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler bei der manuellen Nacharbeit an einer Zelle/Modul • Unsachgemäßer Umgang • Systematischer Fehler bei automatisierter Fertigung • Fehlerhaftes Anoden-, Kathoden- und Separator-Material
Transport	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Beanspruchungen beim Transport vom Hersteller zu den Verwendenden
Montage	<ul style="list-style-type: none"> • Sturz/Fall beim Installieren, vom Montagetisch • Beschädigungen durch Transporteinrichtungen (Penetration, Sturz...)
Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Ungeeignetes Ladegerät • Hohe mechanische Belastung, zum Beispiel Verkehrsunfall, etc. • Zu hohe Erwärmung der LIB bei der Verwendung auf Baustellen • Laden einer zu kalten LI-Batterie • Verwendung tiefentladener LIB
Service/Wartung	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Beanspruchung • Umgang mit nicht definierten Batterien (kritische Batterie) • Unbekannte Schädigung (BMS defekt) • Unsachgemäßer Umgang
Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • LIB nicht entladen (Restladung) • Mechanische Beanspruchung bei der Demontage • Unbekannte Vorschädigung

2.7 Gefahrstoffe

Lithiumbatterien sind Produkte (Erzeugnisse), aus denen unter normalen Verwendungsbedingungen keine Gefahrstoffe freigesetzt werden. Im Schadensfall können jedoch Inhaltsstoffe bzw. Reaktionsprodukte austreten.

Da im Schadensfall jedoch Inhaltsstoffe bzw. Reaktionsprodukte austreten können, die Gefahrstoffe sind, wird in der VdS 3103 „Lithium-Batterien“ als Erkenntnis aus Brandversuchen jedoch folgende Aussage getroffen:

„Lithium-Ionen-Batterien sind grundsätzlich wie ein Gefahrstoff zu behandeln“.

Das ist darauf zurückzuführen, dass bei einer möglichen Havarie der Lithium-Ionen-Batterien von einer Gefährdung durch Gefahrstoffe auszugehen ist.

Das ist bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen.

In zahlreichen Untersuchungen wurde ermittelt, dass eine Vielzahl von (auch krebserzeugenden) Gefahrstoffen, insbesondere im Zusammenhang mit Brandereignissen, mit LIB in Verbindung gebracht werden können. So ist zum Beispiel das häufig im Elektrolyt enthaltene Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) sehr wasserempfindlich und reagiert mit der Luftfeuchtigkeit unter Bildung von Fluorwasserstoff (HF, Flusssäure) und Phosphorsäure (H₃PO₄). Der Nebel ist daher als entzündbar, giftig und ätzend anzusehen. Er kann auf der Hautoberfläche zu Verätzungen führen.

Beim Brand von LIB können unter anderem folgende Stoffe/Gefahrstoffe freigesetzt werden:

- Graphit
- Kohlenmonoxid
- Wasserstoff
- Ethylen-, Methylencarbonat
- Lithiumhexafluorophosphat
- Cobalt
- Nickel
- Mangan
- Phosphorwasserstoffverbindungen
- Fluorwasserstoff

Die genannten Stoffe oder Zersetzungsprodukte können je nach Zellchemie jedoch sehr stark differieren.

Informationen zu spezifischen Gefährdungen und dem Umgang mit den im LIB verbauten Gefahrstoffen findet man im Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (GESTIS-Stoffdatenbank) [8].

2.8 Betriebliche Notfallvorbereitung

Im Rahmen der betrieblichen Gefährdungsbeurteilung sind die geeignete Notfallmaßnahmen festzulegen.

Grundsätzliche Vorgehensweise:

- Detektieren (Erwärmung, Rauch, mechanische Verformung, BMS)
- Reparieren
- Analysieren

Das betriebliche Notfallmanagement ist entsprechend dem Zustand der LIB festzulegen.

Dazu ist zu ermitteln, welches Ereignis eingetreten ist und es ist festzulegen, wie dieses Ereignis zu bewerten ist.

Als Beispiel ist in der Tabelle 2 das Herunterfallen einer LIB dargestellt.

Tabelle 2 – Ereignisse und Maßnahmen

Detektieren der erkennbaren Reaktionen an einer sicheren Abstellfläche	Sofortmaßnahmen/Analysieren Bewertungskriterien	Mögliche Folgemaßnahmen
<ul style="list-style-type: none"> • Erwärmung • Austritt von Rauch • Aufblähen • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Sofortmaßnahme • HV-Speicher separieren • Bereich evakuieren • Feuerwehr rufen • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesicherte Ruhefläche • Sicherheitsbehälter • Sicherheitsschrank • LIB-Tasche • Behälter mit Wasservorlage • Reparieren • Verschrotten • ...
<ul style="list-style-type: none"> • Keine • visuell erkennbare Deformationen oder Beschädigungen • ... • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Analysieren • Bewertungskriterien • Wer kann bewerten? → Qualifikation • Äußerliche mechanische Beschädigung? • Austritt von Elektrolyt? • Fallhöhe? • Batterie-Typ 	

Auch „entladene“ Batterien stellen eine Gefahrenquelle dar, da sie noch einen sehr hohen Kurzschlussstrom verursachen können. Selbst wenn Lithium-Ionen-Batterien den

Anschein erwecken, dass sie sich im entladenen Zustand befinden, sind sie deshalb genauso zu behandeln, als wären sie nicht entladen.

Für die Umsetzung des betrieblichen Notfallmanagements ist festzulegen, wer welche Beurteilung und Maßnahme durchführen darf. Das kann in einer Qualifizierungsmatrix dokumentiert werden.

Defekte oder auffällige LIB dürfen nur mit den im Notfallmanagement festgelegten Transportmitteln innerbetrieblich transportiert werden.

Möglichkeiten, um ein Ereignis zu detektieren:

- Wärmebild
- Rauchmelder/Brandmelder
- Störmeldung des BMS
- Visuelle Kontrolle
- Überwachung einer möglichen Tiefenentladung
- Fahrzeugparameter, z. B. Daten aus Steuergeräten usw.
- Sensor Schlag, Schock, Überdruck

Bewertungskriterien/Analysieren:

Sicherheitskritische Batteriesysteme sind umgehend durch Batteriefachkundige (gemäß DGUV Information 209-093 Stufe 3E/3S) technisch zu bewerten, erst nach deren Freigabe zu bewegen und auf gesicherte Ruheflächen zu stellen.

Die durch die Batteriefachkundigen festgelegte Zeit auf den gesicherten Ruheflächen ist abhängig von dem Schaden. Bei mechanisch beschädigten Modulen sind Herstellerangaben zu Ruhezeiten von den Batteriefachkundigen zu berücksichtigen. Nach dem Ablauf der Ruhezeit muss das System erneut von den Batteriefachkundigen beurteilt werden.

Dieses Vorgehen ist in der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen.

Maßnahmen:

Der Zustand der kritischen Batterien ist zu dokumentieren und Maßnahmen sind schriftlich zu fixieren; dazu werden geschulte Batteriefachkundige mit den Qualifikationsstufen 3E/3S gemäß DGUV Information 209-093 benötigt.

Kritische Batteriesysteme sollten im Freien auf einer gesicherten Ruhefläche gelagert werden. Bei der Einrichtung von gesicherten Ruheflächen ist auf die Exposition der Umgebung zu achten. Eine Exposition kann durch austretende Medien, Rauchgase oder kontaminiertes Löschwasser und herumfliegende Bauteile möglich sein. Gesicherte Ruheflächen können insbesondere durch folgende Maßnahmen gesichert werden, um Arbeitsschutz- und Umweltschutzvorgaben zu erfüllen (siehe Abbildung 10):

- Sicherheitsbehälter
- Witterungsschutz
- Auffangwanne für auslaufende Gefahrstoffe
- Kein Zutritt für Unbefugte
- Gasmanagementsystem, Überdruckausgleich
- Mindestabstände zu Bebauungen sind entsprechend der Musterbauordnung, umgesetzt in der entsprechenden Landesbauordnung oder Muster-Industriebau-Richtlinie, mit der Baugenehmigungsbehörde abzustimmen. Orientierungswerte zu Abständen bietet die FAQ Quarantäneflächen Unfallfahrzeuge der Berliner Feuerwehr [9]

Die Fachkundigen prüfen nach dem selbst festgelegten Zeitraum erneut die Batterie und geben im Anschluss weitere Schritte vor.

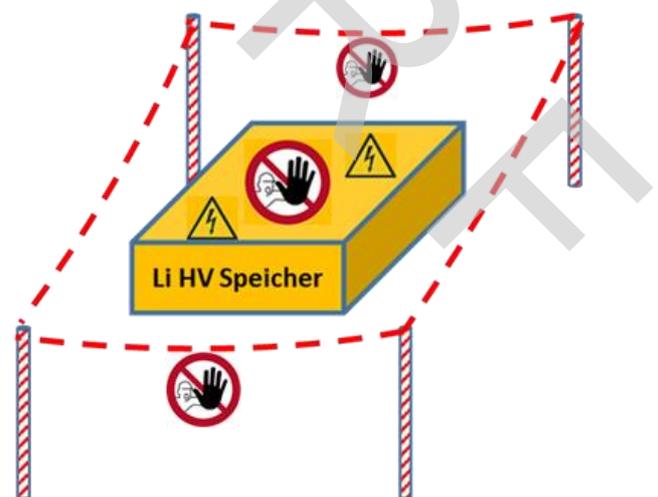


Abbildung 10 – Sicherheitsbehälter, gesicherte Ruhefläche

2.9 Lagerung von kritischen LIB

Auf dem Markt werden unterschiedlichste Produkte (Lagerschränke, Lagerbehälter etc.) für Notfallmaßnahmen, Brandbekämpfung und Havarien angeboten und stetig weiterentwickelt.

Allgemeingültige anerkannte Prüfkriterien sind in den seltensten Fällen vorhanden. Die angebotenen Lösungen sind meist auch nur für einen speziellen LIB-Typ geeignet/geprüft. Es ist daher eine individuelle Betrachtung der jeweiligen Verhältnisse/Gegebenheiten notwendig (Gefährdungsbeurteilung). Die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung können zum Beispiel in das betriebliche Brandschutzkonzept oder die Brandschutzordnung einfließen.

Dieses Manko gilt auch bei zugelassenen Transportboxen, die den Brandrauch über ein „Gasmanagement“ ableiten und dadurch einen Druckaufbau im Inneren der Transportbox verhindern. Durch den Austritt von Brandgasen und Verbrennungsrückständen wird der Aufstellbereich kontaminiert. Damit sind sie auch nicht für die Verwendung in Räumen mit Beschäftigten geeignet.

2.10 Transport kritischer LIB

Der vorschriftenkonforme Transport kritischer LIB ist in den ADR-Regeln [10] beschrieben.

Es gibt Vorgaben für kritische, unkritische, eingebaute, etc. LIB.

Für den Transport benötigte Verpackungen benötigen eine ADR Zertifizierung.

3 Herstellung von Hochvoltspeichern

Im folgenden Abschnitt werden die für die Herstellung von HV-Speichern wesentlichen Prozessschritte und die dabei auftretenden Gefährdungen dargestellt und mögliche

Maßnahmen abgeleitet. Weitere Prozessschritte müssen im Rahmen der individuellen Gefährdungsbeurteilung betrachtet und das Risiko muss mit geeigneten Maßnahmen minimiert werden.

Bei der Herstellung von HV-Speichern lassen sich die Prozesse der Modulfertigung und der Speicherfertigung unterscheiden. Gegebenenfalls kann der Zwischenschritt der Modulfertigung auch entfallen. Dann werden einzelne Zellen direkt zu einem HV-Speicher zusammengefügt. Der spezielle Prozess zur Zellfertigung wird in diesem Kapitel nicht weiter betrachtet.

In allen Prozessschritten müssen die jeweiligen Herstellervorgaben für die Zellen oder Module sowie die spezifische Unterweisung beziehungsweise die notwendige Qualifizierung des eingesetzten Personals in Abhängigkeit von den Tätigkeiten berücksichtigt werden. Das Schutzkonzept bei manuellen/automatisierten Anlagen muss auf Basis der Gefährdungsbeurteilung dem (S)TOP Prinzip folgen. Manuelle Arbeitsplätze müssen unter ergonomischen Gesichtspunkten eingerichtet werden.

Zum Serienprozess gehört auch die Erstellung eines Konzepts, das das korrekte Vorgehen und Verhalten bei einer möglichen Havarie von Zellen, Modulen oder HV-Speichern beschreibt.

3.1 Montageprozess Modulfertigung

Die Fertigung von Modulen aus einzelnen Zellen benötigt im Regelbetrieb fünf Prozessschritte. In Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad der Fertigung ist zusätzlich zu den im Folgenden aufgeführten Gefährdungen die Ergonomie der Arbeitsschritte zu betrachten.

Bei allen Prozessschritten muss eine Brandgefahr durch Kurzschlüsse aufgrund von internen Verunreinigungen oder unsach-

gemäßem Handling der Zellen betrachtet werden. Ebenso besteht in allen Schritten die chemische Gefährdung durch austretenden Elektrolyten (vgl. Abschnitt 2.5 und 2.7 Brandgefahr, chemische Gefährdungen).

Aufgrund von scharfen Kanten beim manuellen Handling der Zellen kann Persönliche Schutzausrüstung in Form von schnittfesten Handschuhen notwendig sein.

Zellenvorbereitung

Bei der Zellenvorbereitung werden die einzelnen Zellen einem vom Anwender oder von der Anwenderin festzulegenden Eingangstest unterzogen und zur Weiterverarbeitung vorbereitet.

Als technische Maßnahmen bieten sich die automatisierte Entnahme und ein Eingangstest der Zellen an.

Elektrische Gefährdungen in Form von Körperdurchströmung oder Störlichtbögen sind aufgrund der Zellspannung und -kapazität nicht vorhanden.

Zellenstacking

Die Gefährdungen beim Zellenstacking (Siehe Abbildung 1) sind mit denen der Vorbereitung identisch; auch hier bietet sich eine Automation an.

Elektrische Gefährdungen in Form von Körperdurchströmung sind aufgrund der Zellspannung und -kapazität nicht vorhanden. Ein Kurzschluss kann zu einer Zerstörung der Zellen führen, mit den daraus folgenden chemischen und thermischen Gefährdungen. Der Arbeitsprozess des Stacking sollte so gestaltet werden, dass kein Kurzschluss auftreten kann, zum Beispiel durch Automation.

Schweißen Wärmeleitblech

Neben den für die Vorbereitung und das Stacking genannten Gefährdungen sind beim Schweißen der Wärmeleitbleche Gefähr-

dungen durch Schweißrauch zu betrachten. Bei Nickellegierungen oder Edelstählen kann es sich dabei auch um krebserzeugende Gefahrstoffe handeln. (s. TRGS 528 Schweißtechnische Arbeiten [11]).

Montage Kontaktiersystem

Je nach Ausführung des Kontaktiersystems (Steckverbindungen, Schraubverbindungen, verpolungssicher, berührungsgeschützt...) können neben den Gefährdungen analog zu Vorbereitung und Stacking elektrische Gefährdungen in Form von Störlichtbögen auftreten. Eine automatisierte Kontaktierung der Zellen bietet sich an. Ist eine Gefährdung durch Störlichtbögen gegeben, sind die Vorgaben der DGUV Information 203-077 „Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen“ [12] und der DGUV Regel 103-011 „Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln“ [13] zu beachten.

End-of-Line-Test

Der End-of-Line-Test kann ebenfalls automatisiert oder manuell durchgeführt werden. Besonders im manuellen Test muss die elektrische Gefährdung in Form von Körperdurchströmung (bei Spannungen über 60 Volt DC) und Störlichtbögen, zum Beispiel bedingt durch falsches Handling oder beschädigte Messmittel, berücksichtigt werden.

3.2 Montageprozess Speicherfertigung

Die Fertigung von Hochvoltspeichern aus einzelnen Modulen benötigt im Regelbetrieb fünf Prozessschritte. In Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad der Fertigung ist zusätzlich zu den im Folgenden aufgeführten Gefährdungen die Ergonomie der Arbeitsschritte zu betrachten.

Bei allen Prozessschritten muss eine Brandgefahr durch Kurzschlüsse aufgrund von internen Verunreinigungen oder unsachgemäßes Handling der Zellen betrachtet werden. (vgl. Abschnitt 2.5 Brandgefahr). Die

frühzeitige Erkennung vor Brand/Rauchentstehung und die Separation aus der Fertigung (Trennung von Material und Personen) sind dabei zu beachten.

Speichervorbereitung

Bei der Speichervorbereitung wird das Gehäuse des Speichers für den Moduleinbau vorbereitet, Anschlussleitungen werden verlegt, Steuergeräte eingebaut. Die Module stehen am Arbeitsplatz für den Einbau bereit, die Brand- und chemische Gefährdung durch unsachgemäßes Handling oder unsachgemäße Lagerung vor Ort ist gegeben.

Moduleinbau

Beim Einbau der Module können durch unsachgemäßes Handling (z. B. Herunterfallen) die Module oder sich darin befindende Zellen beschädigt werden, was zu internen Kurzschlüssen oder austretendem Elektrolyten führen kann, daher müssen diese Gefährdungen berücksichtigt werden.

Modulkontaktierung

Neben den Brand- und chemischen Gefährdungen aus den vorherigen Schritten ist beim Verbinden der Module, bedingt durch die hohe Spannung, die elektrische Gefährdung in Form von Körperdurchströmung und Störlichtbogen gegeben. Wenn dieser Prozess nicht automatisiert durchgeführt wird, sind eine entsprechende Qualifikation des Personals nach DGUV Information 209-093 Stufe 3 und PSA gegen Störlichtbögen nach DGUV Information 203-077 sowie isolierte Werkzeuge notwendig.

Speichergehäuse schließen

Das Schließen des Speichergehäuses kann Gefährdungen durch die Verwendung von gesundheitsschädlichen Dichtmitteln beinhalten. Die Herstellerhinweise dieser Gefahrstoffe in Bezug auf Verwendung und Gefährdung sind zu beachten und einzuhalten.

End-of-Line-Test

Der End-of-Line-Test wird mit einem automatisierten Testprogramm durchgeführt. Bei Bedarf ist manuelles Anschließen des Testadapters notwendig. Aufgrund der berührungsgeschützten Ausführung der Anschlüsse und Steckvorrichtungen ist nicht von elektrischen Gefährdungen auszugehen.

3.3 Nacharbeit

Der Prozessschritt Nacharbeit kann an beliebiger Stelle in der Prozesskette notwendig werden, wenn Störungen oder Unregelmäßigkeiten auftreten.

Neben den elektrischen Gefährdungen durch Körperdurchströmung und Störlichtbogen ist, je nachdem, an welchem Prozessschritt die Nacharbeit durchgeführt wird, von den bereits genannten Gefährdungen auszugehen.

Die Qualifikation des hierfür eingesetzten Personals muss den Anforderungen der DGUV Information 209-093 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen“, Stufe 3 (Arbeiten an unter Spannung stehenden Hochvolt-Systemen) entsprechen.

Isolierte Werkzeuge und Messmittel und auf die Gefährdungen abgestimmte PSA gegen die elektrischen Gefährdungen (DGUV Information 203-077) sind zusätzlich notwendig.

4 Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen

Diese „Fachbereich AKTUELL“ beruht auf dem durch den Fachbereich Holz und Metall (FBHM), Sachgebiet Fahrzeugbau, -antriebssysteme, Instandhaltung (SG FAI) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zusammengeführten Erfahrungswissen im Umgang mit und bei der Herstellung von Hochvolt-Speichern.

Gefährdungen, die bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen auftreten, werden in dieser „Fachbereich AKTUELL“ nicht betrachtet.

Die Bestimmungen nach einzelnen Gesetzen und Verordnungen bleiben durch diese „Fachbereich AKTUELL“ unberührt. Die Anforderungen der gesetzlichen Vorschriften gelten uneingeschränkt.

Um vollständige Informationen zu erhalten, ist es erforderlich, die in Frage kommenden Vorschriftentexte einzusehen.

Diese „Fachbereich AKTUELL“ befindet sich in der Entwurfsfassung. Kommentare sind bis 31.03.2022, unter Verwendung der Kennung „FBHM-123, Entwurf 02/2022“ oder des Titels, erbeten an die [Kommentaradresse](#).

Der Fachbereich Holz und Metall setzt sich unter anderem zusammen aus Vertretern und Vertreterinnen der Unfallversicherungsträger, staatlichen Stellen, Sozialpartnern, herstellenden und betreibenden Firmen.

Weitere „Fachbereich AKTUELL“ oder Informationsblätter des Fachbereichs Holz und Metall stehen im Internet zum Download bereit [14].

Literaturverzeichnis

[1] DGUV Information 209-093 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-systemen, August 2021, DGUV Berlin

[2] Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) – Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3334) geändert worden ist

[3] Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) – Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), geändert 13. Juli 2015 (BGBl. I S. 1187).

[4] VdS 3103:2019-06 „Lithium-Batterien“, Beuth-Verlag Berlin

[5] VdS 3885:2020-12 „Elektrofahrzeuge in geschlossenen Garagen – Sicherheitshinweise für die Wohnungswirtschaft“, Beuth-Verlag Berlin

[6] United Nations, Recommendations on the Transport of dangerous goods, Manual of Test and Criteria, 2015, Part III 38.3 “Lithium Battery Service”

[7] Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb [2015/505] – Publications Office of the EU

[8] <https://dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>

[9] FAQ „Quarantäneflächen“ für Unfallfahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieb, Berliner Feuerwehr, Stand Oktober 2020

[10] Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), Stand November 2021

[11] Technische Regel für Gefahrstoffe TRGS 528 „Schweißtechnische Arbeiten“, Stand August 2020

[12] DGUV Information 203-077 „Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen“, September 2020, DGUV Berlin

[13] DGUV Regel 103-011 „Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln“, Oktober 2006, DGUV Berlin

[14] Internet: www.dguv.de/fb-holzundmetall Publikationen oder www.bghm.de Webcode: <626>

Hilfestellungen zur Bewertung und Festlegung von geeigneten, betrieblichen Brandschutzmaßnahmen geben die folgenden Schriften:

FBFHB-018 „Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus“, Stand Juni 2020

FBFHB-024 „Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden“, DGUV, Berlin 2020

DGUV Information 205-001 „Betrieblicher Brandschutz in der Praxis“, Stand Dezember 2020

Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A2.2 „Maßnahmen gegen Brände“, Stand Mai 2018

Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes (AGBF Bund) „Risikoeinschätzung Lithium-Ionen Speichermedien, AGBF Bund, DFV, Stand Januar 2018

Brandschutz-Forschung der Bundesländer, Berichte „Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen“ Nr. 175, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Stand 2016

Bildnachweis

Die gezeigten Bilder wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt von:

Abbildung 1:

BGHW

Abbildungen 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

BG ETEM

Tabellennachweis

Tabelle 1 – Mögliche Schadensursachen.....7
Tabelle 2 – Ereignisse und Maßnahmen.....8

Kommentaradresse

Fachbereich Holz und Metall der DGUV
Sachgebiet Fahrzeugbau, -antriebssysteme,
Instandhaltung
c/o Berufsgenossenschaft Holz und Metall
Wiener Platz 6
01069 Dresden

Email: fb-holzundmetall@bghm.de

An der Erarbeitung dieser Fachbereich AKTUELL haben mitgewirkt:

- DGUV Fachbereich Holz und Metall
- DGUV Fachbereich Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
- DGUV Fachbereich Verkehr und Landschaft
- DGUV Fachbereich Rohstoffe und chemische Industrie
- DGUV Fachbereich Feuerwehren, Hilfeleistungen, Brandschutz
- DGUV Fachbereich Handel und Logistik
- VBA Verband der Bergungs- und Abschleppunternehmen e.V.
- IG Metall
- Daimler Buses
- Daimler AG
- BMW Group
- Ford-Werke GmbH
- Volkswagen Aktiengesellschaft