

KAS

**KOMMISSION FÜR
ANLAGENSICHERHEIT**

beim

Bundesministerium für

Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Bericht Batteriezellenherstellung

des Arbeitskreises

Elektrische Energiespeichersysteme

KAS-67

Arbeitskreis Elektrische Energiespeichersysteme

der Kommission für

Anlagensicherheit (KAS)

Bericht Batteriezellenherstellung

(vom AK-ES im Oktober 2025 überarbeitet)

am 29. Oktober 2025 von der KAS verabschiedet

KAS-67

Impressum

Herausgeber:

GFI Umwelt – Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH

Geschäftsstelle der Kommission für Anlagensicherheit
Königswinterer Str. 827
D-53227 Bonn

Telefon 49-(0)228-90 87 34-0
Telefax 49-(0)228-90 87 34-9
E-Mail kas@gfi-umwelt.de
www.kas-bmu.de

Die Kommission für Anlagensicherheit (KAS) ist ein nach § 51a Bundes-Immissionsschutzgesetz beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz gebildetes Gremium.

Ihre Geschäftsstelle ist bei der GFI Umwelt - Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH in Bonn eingerichtet.

Anmerkung:

Dieses Werk wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernimmt die KAS keine Haftung für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können daher keine Ansprüche gegenüber dem Verfasser und/oder dem Auftraggeber geltend gemacht werden.

Dieses Werk darf für nichtkommerzielle Zwecke vervielfältigt werden. Die KAS übernimmt keine Haftung für Schäden im Zusammenhang mit der Vervielfältigung oder mit Reproduktionsexemplaren.

INHALT

1	Einführung und Ausgangslage	1
2	Vorschriften	4
2.1	EU-Recht: Batteriezellenfertigung	4
2.2	Nationales Recht	4
3	Allgemeine Anforderungen aus der Störfall-Verordnung	6
4	Arten von Batteriezellen	11
4.1	Einteilung von Batterien	11
4.2	Kriterien für die Unterscheidung von Lithiumbatterien	11
4.3	Lithiumbatterien	12
4.3.1	Aufbau von Lithiumbatterien	12
4.3.2	Primäre und sekundäre Zellen	13
4.3.3	Zellgeometrie (Bauform, Baugröße, Masse)	13
4.3.4	Einteilung nach der Zellchemie	13
4.3.5	Definition in Regelwerken	15
4.3.6	Einteilung nach Verwendungsart	15
5	Produktionsprozesse von Lithium-Zellen-Typen	16
5.1	Herstellung der Ausgangsstoffe	16
5.1.1	Aktivmaterialien	16
5.1.2	Elektrolyt	17
5.1.3	Separator	17
5.1.4	Zellgehäuse	17
5.2	Herstellungsprozess Lithium-Ionen-Zellen	18
5.2.1	Elektrodenfertigung	18

5.2.2	Zell-Assemblierung	19
5.2.3	Zell-Finishing	19
5.2.4	Sekundär-Anlagen zur Schaffung der Herstellungsbedingungen	20
5.3	Hinweise zu Herstellungsprozessen anderer Batterietechnologien	20
5.3.1	Natrium-Ionen Batterien	20
5.3.2	Feststoffbatterie	21
5.3.3	Knopfzellen	21
6	Gefahrstoffe, Gefahrenquellen und Arbeitsschutz im Produktionsprozess und seinen Nebenanlagen	22
6.1	Gefährliche Stoffe und Gemische nach CLP-Verordnung	22
6.2	Beschreibung der Gefahrenquellen	22
6.2.1	Mischbereich Kathode	23
6.2.2	Prozesslager (Kathodenfertigung)	23
6.2.3	Elektrolyt-Tankfarm	24
6.2.4	Ammoniak-Kälteanlagen	24
6.3	Arbeitsschutz bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen	25
6.3.1	Begriff "Gefahrstoff"	25
6.3.2	Gefährdungsbeurteilung	26
6.3.3	Gefahrstoffverzeichnis	26
6.3.4	Informationsquellen	27
6.3.5	Partikelförmige Gefahrstoffe	27
6.3.6	Krebserzeugende, keimzellmutagene und reproduktionstoxische Gefahrstoffe	28
7	Anwendung der Störfall-Verordnung	29
7.1	Stoffliste Lithiumbatterie-Zellenherstellung	29
7.2	Begriffe und Definitionen der Störfall-Verordnung	30

7.3	Gefährliche Stoffe gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung	31
7.4	Lager für Ausgangsstoffe	32
7.5	Herstellung der Zellen	33
7.5.1	Konditionierung und Formierung	34
7.6	Nebenanlagen	34
7.6.1	Kälteanlagen – Ammoniak	34
7.6.2	Wärmeerzeugung Heizöl	36
7.7	Lager für Fertigprodukte/ Erzeugnisse	36
7.8	Nicht spezifikationsgerechte Zellen	37
7.9	Gefährliche Abfälle	37
8	Havarien - Brandfall (Bildung gefährlicher Stoffe)	38
9	Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen auf Grundlage der BetrSichV	40
9.1	Pflichten für Arbeitgeber	40
9.2	Gefährdungsbeurteilung nach BetrSichV und Prüfungen als Grundlage für das sichere Arbeiten	41
9.3	Gefährdungen und Arbeitsschutzmaßnahmen während des Produktionsprozesses von Batteriezellen	42
9.3.1	Allgemeine Anmerkungen	42
9.3.2	Fertigungsprozessschritte, auftretende Gefährdungen und Arbeitsschutzmaßnahmen	42
10	Grundlegende Anforderungen zur Vermeidung von Störfällen und zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen (Brandfall) während der Batteriezellenproduktion	45
10.1	Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt	45
10.2	Anlagenteile mit besonderer Funktion	46
10.2.1	Grundlegende Anforderungen an Maschinen- und Ausrüstungsteile zur Gewährleistung des sicherheitsrelevanten Massen- und Energieflusses	47

10.2.2	Grundlegende Anforderungen an den Brand- und Explosionsschutz	48
10.2.3	PLT-Einrichtungen	52
	Literatur	53
	Informationsquellen	59
ANHANG		
Anhang 1	Normung / Regelwerke / Stand der Technik	60

1 Einführung und Ausgangslage

Weltweit gewinnen elektrochemische Speicher in den Sektoren Mobilität, Stromnetz, Industrie und im heimischen Bereich eine immer größere Bedeutung. In Deutschland wird durch die vorhandenen und geplanten Produktionskapazitäten, auch von Batteriezellen erkennbar, dass hier eine neue industrielle Branche entsteht. Die zukünftigen Produktionskapazitäten lassen sich aktuell nur grob schätzen. Untersuchungen des Fraunhofer ISI zeigen, dass am Ende des Jahrzehnts in Europa die Produktionskapazitäten auf bis zu 1,5 TWh pro Jahr ansteigen könnten – wobei der mit knapp 400 GWh pro Jahr größte Anteil aus neuen Produktionsstätten in Deutschland stammen könnte /1/.

Die Herstellung der Zellen ist von zentraler Bedeutung. Da hier die Zusammenführung und Lagerung der Ausgangsstoffe und Produkte, darunter auch der gefährlichen Stoffe und Gemische gemäß CLP-Verordnung /2/ erfolgt, sind Anlagensicherheit und Gefahrstoffrecht zu berücksichtigen.

Der von der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) erteilte Auftrag besteht in der „Erarbeitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Phasen des Lebenszyklus von Batteriezellen unter Berücksichtigung der verschiedenen Materialien“.

Es sollen dabei auch technische Maßnahmen für sichere Prozesse in den einzelnen Phasen des Lebenszyklus erarbeitet werden. Der Arbeitskreis Elektrische Energiespeichersysteme (AK-ES) sieht die Betrachtung der Herstellungsprozesse von Batteriezellen als ersten Teil der Bearbeitung des vollständigen Lebenszyklus von Batterien aus Sicht der Anlagen- und Betriebssicherheit.

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Herstellung von Batteriezellen und den damit verbundenen sicherheitstechnischen Fragestellungen. Dabei wird auf die Lithium-Technologie fokussiert. Die berücksichtigten Fragestellungen sind auch auf andere Batterietechnologien, wie Natrium-Ionen Batterien, grundsätzlich anwendbar.

Anwendungshinweise für den vorliegenden Bericht:

Der Bericht wendet sich an alle Beteiligten im Genehmigungsprozess der Anlage und dient als Erkenntnisquelle für die sicherheitstechnischen Anforderungen bei der Zellenfertigung. Im Rahmen dieses Berichts werden einzelne Aspekte aus dem Immissionsschutz und Arbeitsschutz erläutert, die für die Batteriezellenfertigung zur Anwendung kommen. Behandelt werden insbesondere Fragen zur Anwendung der Störfall-Verordnung, der Gefahrstoff-Verordnung, der Betriebssicherheitsverordnung und des Chemikalienrechts.

In der Praxis ist eine vertiefte Befassung mit diesen Regelwerken und deren Umsetzung im jeweiligen Einzelfall notwendig. Bei konkreten Planungen und Vorhaben wird empfohlen, frühzeitig an die zuständigen Behörden heranzutreten.

1. Grundlagen

Die Kapitel 2-5 liefern die benötigten allgemeinen Informationen zu den geltenden rechtlichen Grundlagen (Kap. 2 und Kap. 3), einen Überblick über die verschiedenen Batterietypen - mit Fokus auf Lithiumbatterien (Kap. 4) und die einzelnen Stufen im Herstellungsprozess einer Lithium-Batteriezelle (Kap. 5).

2. Identifizierung und Bewertung der Stoffe und Stoffmengen nach Störfall-Verordnung /2/

Kapitel 4 beschreibt die verschiedenen im Produktionsprozess verwendeten Stoffe. Eine Tabelle mit Zuordnung und Bewertung der Stoffe und Gefahrenkategorien zum Anhang I der Störfall-Verordnung und gemäß der CLP-Verordnung ist, als Tabellenblatt 8 eingefügt in die „Berechnungshilfe zur Bestimmung von Betriebsbereichen gem. § 3 Abs. 5a BImSchG“ der Bezirksregierung Arnsberg, online verfügbar unter <https://tes.bam.de/TES/Content/DE/Standardartikel/Regelwerke/Gefahrgut/batteriezellproduktion.html>. Dort ist die jeweils aktuelle Fassung abgelegt. Das erlaubt eine schnelle Einschätzung hinsichtlich der Kriterien der Störfall-Verordnung. Weitere Anforderungen aus anderen Rechtsbereichen bleiben unberührt (z. B. Arbeitsschutz, Gewässerschutz).

Dabei werden die Mengen für die einzelnen Prozessschritte, die Lagerung der Betriebs- und Hilfsstoffe, die Abfälle und der Havariefall¹ (z. B. Brand) betrachtet. Auch für den Produktionsprozess benötigte Nebenanlagen werden dabei berücksichtigt.

Die Anforderungen aus der Störfall-Verordnung werden in Kapitel 7, Hinweise zur Havarien - Brandfall in Kapitel 8 erörtert.

3. Gefahrenpotentiale und Anforderungen an den Arbeitsschutz

In Kapitel 6 werden die mit den Gefahrstoffen einhergehenden Gefahrenpotentiale für die identifizierten Stoffe erörtert.

Zusätzlich wird im Kapitel 9 die Anlagensicherheit im Blickwinkel der BetrSichV /4/ betrachtet.

¹ Stoffe, die bei außer Kontrolle geratenen Prozessen entstehen gemäß LAI-Vollzugshilfe 2018 in Anlehnung an § 3 Absatz 5a BImSchG

4. Maßnahmen

Im Kapitel 10 werden Anforderungen und Maßnahmen formuliert, die getroffen werden sollten, um die Sicherheit in den einzelnen störfallrechtlich relevanten Prozessschritten sicherzustellen.

2 Vorschriften

2.1 EU-Recht: Batteriezellenfertigung

Die Einsatzstoffe unterliegen der REACH-Verordnung /5/ und der CLP-Verordnung.

Weiterhin wurde am 12.06.2023 die Verordnung (EU) Nr. 2023/1542 über Batterien und Altbatterien (EU BattVO) /6/ verabschiedet, in welcher unter anderem Vorgaben zur Wiederverwendung und zum Rezyklateinsatz eingeführt werden. Sie trat 2024 in Kraft.

Je nach Menge und Art der eingesetzten Stoffe unterliegen diese zudem der Seveso-III-Richtlinie /7/.

Die im Mai 2024 beschlossene Novelle der EU-Industrieemissionsrichtlinie /8/ nimmt die Batterieproduktion, ausgenommen ausschließlich Zellassemblierung, ab einer Produktionskapazität von 15 000 Tonnen Batteriezelle (Kathode, Anode, Elektrolyt, Separator und Umhüllung) pro Jahr unter Nr. 2.7 im Anhang I in den Katalog der genehmigungsbedürftigen Anlagen auf.

2.2 Nationales Recht

Die immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht ist in § 4 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /9/ in Verbindung mit der vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) /10/ näher geregelt. Die Seveso-III-Richtlinie wurde in Deutschland im Bundes-Immissionsschutzgesetz und der 12. BImSchV (sog. Störfall-Verordnung) umgesetzt.

Hierbei stellt sich auch die Frage, wann eine Batteriezellenfertigung unter die Genehmigungspflicht der 4. BImSchV fällt. Nr. 3.21 der 4. BImSchV regelt nur die Genehmigungspflicht hinsichtlich der Herstellung von Bleiakkumulatoren. Andere Batterieerzeugnisse sind in der 4. BImSchV nicht namentlich genannt.

Entscheidend sind daher bei der Frage, ob ein derartiger Betrieb genehmigungspflichtig ist, folgende Aspekte:

- Lagerung der verwendeten Stoffe – ggfs. Genehmigungspflicht nach Nr. 9.3 der 4. BImSchV
- Oberflächenbehandlung (Beschichten) unter Verwendung von organischen Lösemitteln

Weiterhin ist zu prüfen, ob die Mengenschwellen der Störfall-Verordnung erreicht oder überschritten werden (gilt auch für Anlagen, die nach dem BImSchG nicht genehmigungspflichtig sind). Dabei ist insbesondere § 2 Absatz 1 Nr. 5 der Störfall-Verordnung zu berücksichtigen. Es wird auf KAS-43 /11/ verwiesen.

Welche Stoffe maßgeblich für die Entscheidung sind, ob die Mengenschwellen der Störfall-Verordnung überschritten sind, ist den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

Grundlegende nationale Rechtsvorschriften für Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei allen Arbeitstätigkeiten während des Herstellungsprozesses von Energiespeichern sind das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG /11/) sowie die Arbeitsschutzverordnungen zu diesem Gesetz. Betreiber von Anlagen zur Herstellung von Batteriespeichern bzw. ihren Inhaltsstoffen und Komponenten müssen insbesondere arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV /11/) bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV /11/) für alle Arbeitsmittel sowie Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz in Arbeitsstätten gemäß der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV /11/) sowie ggf. weiterer Arbeitsschutzverordnungen einhalten.

Technische Vorschriften

Der Stand der Technik bzw. Sicherheitstechnik wird durch entsprechende Leitlinien und Normen konkretisiert.

Diese finden sich bspw. in den Dokumenten der **KAS**, auf den Seiten der BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) oder Organisationen wie z. B. VDI-Verein Deutscher Ingenieure, VDE-Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. und DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.).

Weitere Rechtsbereiche, wie z. B. das Baurecht, werden hier nicht behandelt.

3 Allgemeine Anforderungen aus der Störfall-Verordnung

Der Betreiber hat gemäß § 3 Störfall-Verordnung die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern. Darüber hinaus sind vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten.

Für alle Anlagen im Anwendungsbereich der Störfall-Verordnung gelten die Grundpflichten der §§ 3 bis 8a Störfall-Verordnung. Zur Anwendung der Störfall-Verordnung und chemikalienrechtlichen Einordnung siehe Kapitel 6.

Die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs müssen dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen (§ 3 Abs. 4 Störfall-Verordnung). Die Störfall-Verordnung definiert den Stand der Sicherheitstechnik als:

„Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind“.

Mit dem Ausbau der Produktionsstätten für Batteriezellen wird mit einer Weiterentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik gerechnet. Diese Entwicklungen sind aktiv zu verfolgen, um damit eine dynamische Anpassung an den fortgeschrittenen Entwicklungsstand zu ermöglichen. Kapitel 2 nennt einige Erkenntnisquellen aus dem Regelwerk, die in Bezug auf die Batteriezellenherstellung relevant für die Sicherheitstechnik und die Umsetzung der entsprechenden Anforderungen der Störfall-Verordnung sind. Allgemeine Erläuterungen zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik enthält der Leitfaden SFK-GS-33 /11/, der über die Website der KAS zu beziehen ist.

Bei der Batteriezellenherstellung besteht im Brandfall ein Störfallpotential aufgrund der Freisetzung der dort vorhandenen Stoffe und entstehenden Brandprodukte (Brandgase, Asche, Löschwasser), siehe Kapitel 8. Die Vorkehrungen und Maßnahmen, die zur Verhinderung von Störfällen und zur Begrenzung der Störfallauswirkungen vorgesehen sind, berücksichtigen im Einzelfall die Anforderungen aufgrund von

- Stoffeigenschaften: Mengen und Eigenschaften der vorhandenen oder im Havariefall entstehenden Stoffe (physikalische, chemische, ökotox. / humantox. Eigenschaften),

- Prozess- und Anlagentechnik: Beschaffenheit und Funktionsweise der Funktionselemente und -einheiten, Verfahrenstechnik,
- Eingriffen bzw. Tätigkeiten der Beschäftigten: Bedienen der Anlagen, Instandhaltungen etc., Qualifikation und Verhalten.

Verhinderung von Störfällen

Gemäß § 4 „Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen“ Störfall-Verordnung hat der Betreiber *„insbesondere*

1. Maßnahmen zu treffen, damit Brände und Explosionen

a) innerhalb des Betriebsbereichs vermieden werden,

b) nicht in einer die Sicherheit beeinträchtigenden Weise von einer Anlage auf andere Anlagen des Betriebsbereichs einwirken können und

c) nicht in einer die Sicherheit des Betriebsbereichs beeinträchtigenden Weise von außen auf ihn einwirken können,

1a. Maßnahmen zu treffen, damit Freisetzungen gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser oder Boden vermieden werden,

2. den Betriebsbereich mit ausreichenden Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen auszurüsten,

3. die Anlagen des Betriebsbereichs mit zuverlässigen Messeinrichtungen und Steuer- oder Regeleinrichtungen auszustatten, die, soweit dies sicherheitstechnisch geboten ist, jeweils mehrfach vorhanden, verschiedenartig und voneinander unabhängig sind,

4. die sicherheitsrelevanten Teile des Betriebsbereichs vor Eingriffen Unbefugter zu schützen.“

Anforderungen an den Brandschutz gelten grundsätzlich sowohl bezüglich der Störfallvorsorge als auch dem Schutz der in der Anlage tätigen Personen. Kapitel 9 nennt beispielhaft Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten. Die aus Sicht des Arbeitsschutzes genannten Maßnahmen zur Verminderung von Brandlasten, zur Früherkennung und Eindämmung von Entstehungsbränden sowie zur Brandbekämpfung sind auch aus Sicht der Störfallvorsorge geeignet, wenn dadurch einerseits Brandereignisse vermieden werden, die als Auslöser für einen Störfall in Betracht kommen, und andererseits auch im Brandfall die Integrität der

Barrieren und der sichere Einschluss gefährlicher Stoffe und Brandprodukte gewährleistet sind.

Als mögliche Auslöser für einen Brand und für Störfälle allgemein (§ 3 Abs. 2 Störfall-Verordnung) sind zu berücksichtigen:

1. betriebliche Gefahrenquellen

Betriebliche Gefahrenquellen können aus dem Einsatz von Betriebsmitteln, Tätigkeiten sowie den Prozessbedingungen (Druck, Temperatur, Reaktivität) resultieren. Bezüglich der im Fertigungsprozess auftretenden Brandgefährdungen und zu berücksichtigenden Arbeitsschutzmaßnahmen sind in Kapitel 9 enthalten.

Bei der Batteriezellenproduktion besteht die Gefahr des thermischen Durchgehens von assemblierten bzw. geladenen Batteriezellen. Da Entstehungsbrände grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden können, ist eine Ausweitung bis hin zu störfallrelevanten Brandereignissen zu verhindern. Das Übergreifen des Brandes auf andere Anlagen im Betriebsbereich, das den Ereignisablauf verschlechtert oder als Auslöser für einen Störfall in Betracht kommt, ist zu begrenzen. Kapitel 8 nennt beispielhaft dafür geeignete Maßnahmen.

2. umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Umgebungsbedingte Gefahrenquellen wirken von außen auf den Betriebsbereich ein. Als natürliche Einwirkungen sind beispielsweise Naturereignisse wie Erdbeben, Sturm oder Hochwasser zu nennen. Die KAS hat zwei Technische Regeln Anlagensicherheit (TRAS) zu umgebungsbedingten Gefahrenquellen erstellt, die TRAS 310 /11/ bezüglich Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser und die TRAS 320 /11/ bezüglich Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten. Diese Regeln beschreiben u. a. ein allgemeingültiges schematisches Vorgehen zur Berücksichtigung umgebungsbedingter Gefahrenquellen.

3. Eingriffe Unbefugter

Der Leitfaden KAS-51 /11/ beschreibt allgemein Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter.

Begrenzung von Störfallauswirkungen

Gemäß § 5 Absatz 1 Störfall-Verordnung hat der Betreiber zur Begrenzung von Störfallauswirkungen „*insbesondere*

1. Maßnahmen zu treffen, damit durch die Beschaffenheit der Fundamente und der tragenden Gebäudeteile bei Störfällen keine zusätzlichen Gefahren hervorgerufen werden können,

2. die Anlagen des Betriebsbereichs mit den erforderlichen sicherheitstechnischen Einrichtungen auszurüsten sowie die erforderlichen technischen und organisatorischen Schutzvorkehrungen zu treffen.

(2) Der Betreiber hat dafür zu sorgen, dass in einem Störfall die für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden und die Einsatzkräfte unverzüglich, umfassend und sachkundig beraten werden.“

Die Einwirkungen im Brandfall sind bei der Auslegung der Gebäude und tragenden Strukturen sowie der Barrieren zur Rückhaltung und zum Einschluss gefährlicher Stoffe zu berücksichtigen. Die technischen und organisatorischen Schutzvorkehrungen sind im Brandschutzkonzept zu beschreiben und mit der örtlichen Feuerwehr abzustimmen. Angaben zu Einwirkungen im Havariefall sowie Anforderungen an das Brandschutzkonzept sind im Kapitel 8 beispielhaft aufgeführt.

Konzept zur Verhinderung von Störfällen und Sicherheitsmanagementsystem

Gemäß § 8 Störfall-Verordnung hat der Betreiber ein schriftliches Konzept zur Verhinderung von Störfällen auszuarbeiten und regelmäßig und anlassbezogen zu aktualisieren. Die Umsetzung des Konzeptes ist durch angemessene Mittel und Strukturen sowie durch ein Sicherheitsmanagementsystem nach Anhang III Störfall-Verordnung sicherzustellen. Als Hilfestellung für den Betreiber hat die KAS den „Leitfaden zum Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum Sicherheitsmanagementsystem“, KAS-19 /11/, erstellt.

Weitere Grundpflichten der Störfall-Verordnung

Ergänzende Anforderungen, die über die o. g. Anforderungen an die Verhinderung von Störfällen und die Begrenzung der Störfallauswirkungen hinausgehen (z.B. regelmäßige Instandhaltungen, Prüfungen, Schulungen, Bereitstellung von Informationen), enthält § 6 Störfall-Verordnung.

Eine Anzeige an die zuständige Behörde ist vor Beginn der Errichtung oder vor einer störfallrelevanten Änderung eines Betriebsbereichs gemäß § 7 Störfall-Verordnung erforderlich.

Die Öffentlichkeit, die aufgrund der Nähe zu einem Betriebsbereich von Störfällen betroffen sein könnte, muss gemäß § 8a Störfall-Verordnung über die Tätigkeiten, die vorhandenen gefährlichen Stoffe und das Verhalten bei einem Störfall informiert werden.

Erweiterte Pflichten

Für Betreiber eines Betriebsbereichs der oberen Klasse gelten zusätzlich zu den Grundpflichten die erweiterten Pflichten gemäß §§ 9 bis 12 Störfall-Verordnung. Insbesondere ist ein Sicherheitsbericht gemäß § 9 Störfall-Verordnung zu erstellen und regelmäßig zu aktualisieren. Als Hilfestellung für den Betreiber hat die KAS den Leitfaden „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“, KAS-55 /11/, erstellt.

Gemäß § 10 muss der Betreiber einen internen Alarm- und Gefahrenabwehrplan erstellen und der zuständigen Behörde Informationen zur Erstellung eines externen Alarm- und Gefahrenabwehrplan zur Verfügung stellen.

Behördenpflichten

Im dritten Abschnitt der Störfall-Verordnung sind die Behördenpflichten aufgeführt. Die zuständige Behörde muss ein Überwachungssystem einrichten, das eine planmäßige und systematische Prüfung der technischen-, organisatorischen- und managementspezifischen Systeme der Betriebsbereiche ermöglicht (§ 16 Störfall-Verordnung).

4 Arten von Batteriezellen

4.1 Einteilung von Batterien

Eine Batterie kann elektrische Energie durch elektrochemische Vorgänge speichern und abgeben. Die kleinste Einheit ist dabei die einzelne elektrochemische Zelle. Eine Batterie kann aus mehreren Zellen zusammengesetzt sein oder aus einer einzelnen Zelle bestehen.

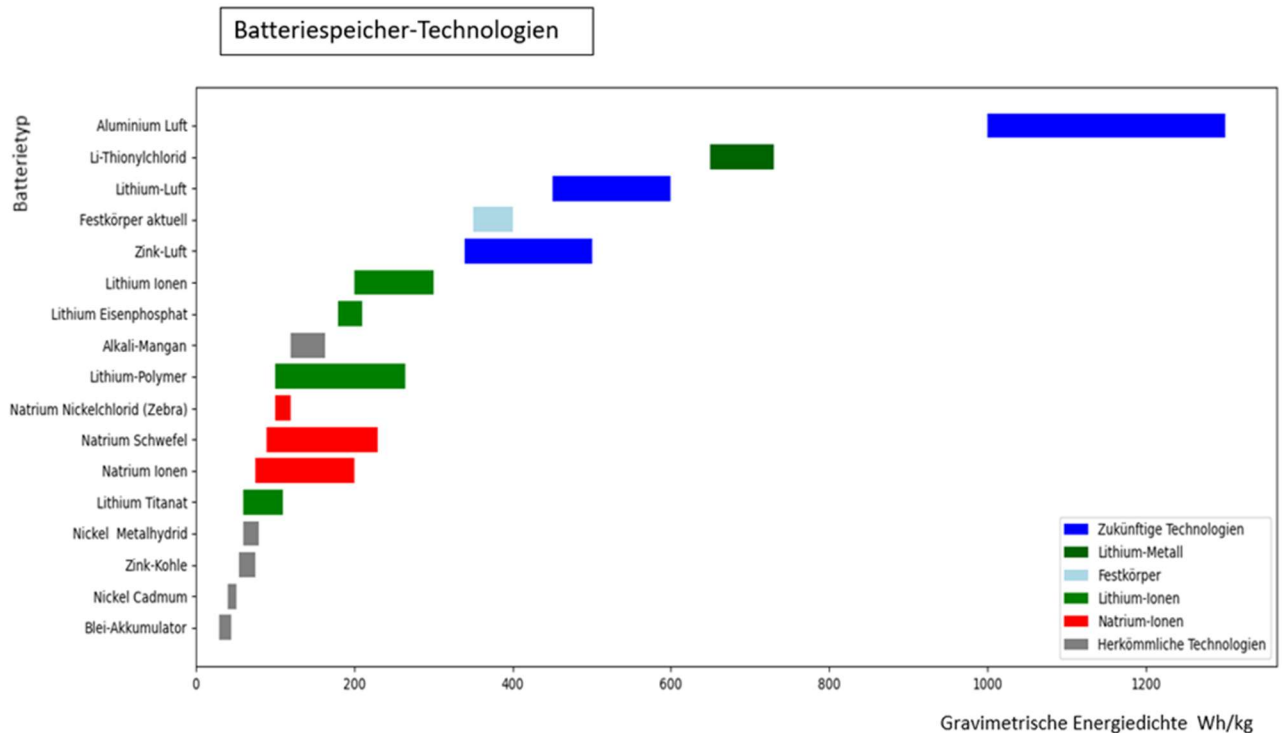


Abbildung 1: Batterietechnologien in Abhängigkeit ihrer Energiedichte (Quelle: BAM)

Es gibt eine große Vielfalt von verschiedenen Batterien, deren Unterscheidung anhand von verschiedenen Kriterien erfolgt. In diesem Bericht wird jedoch nur auf die verschiedenen Arten von Lithiumbatterien eingegangen. Ein Ausblick betrachtet zukünftige Lithiumbatterie-Generationen sowie Natrium-Ionen Batterien.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über verschiedene Batteriespeicher-Technologien und eine grobe Einschätzung der Größenordnung der aktuellen gravimetrischen Energiedichte in Wh/kg der Zelle. Maßgebend ist der Beginn des jeweiligen Batterietextfeldes.

4.2 Kriterien für die Unterscheidung von Lithiumbatterien

Lithiumbatterien lassen sich nach den folgenden Kriterien unterscheiden. Dabei sind einige der Eigenschaften Zellenparameter, andere beziehen sich auf den Batterieaufbau.

- 1) Primär / Sekundär-Zelle (i. d. R. nicht wiederaufladbar / wiederaufladbar)
- 2) Zellchemie (insbesondere Anode / Kathode, aber auch Elektrolyt (flüssig / fest))
- 3) Zellgeometrie (Bauform und -größe)
- 4) Verwendungsart / Einsatzbereich
- 5) elektrische Kenngröße (Nennenergie, Spannung, Kapazität)

Der Begriff Lithiumbatterien wird dabei im Allgemeinen als Oberbegriff verwendet und umfasst sowohl die (meist) nicht wiederaufladbaren Lithium-Metallbatterien als auch die wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterien (Akkumulatoren).

4.3 Lithiumbatterien

4.3.1 Aufbau von Lithiumbatterien

Der prinzipielle Aufbau einer Lithiumbatterie besteht in einer Kathode, die in der Lage ist, Lithium-Ionen aufzunehmen bzw. einzulagern, einer Anode, an der metallisches Lithium ggf. reversibel abgelagert werden kann, einem Separator (i. d. R. eine hochporöse Kunststoffolie) sowie einem wasserfreien Elektrolyten mit zugefügtem Leitsalz (häufig LiPF_6) zur Erhöhung der Li-Ionen Leitfähigkeit.

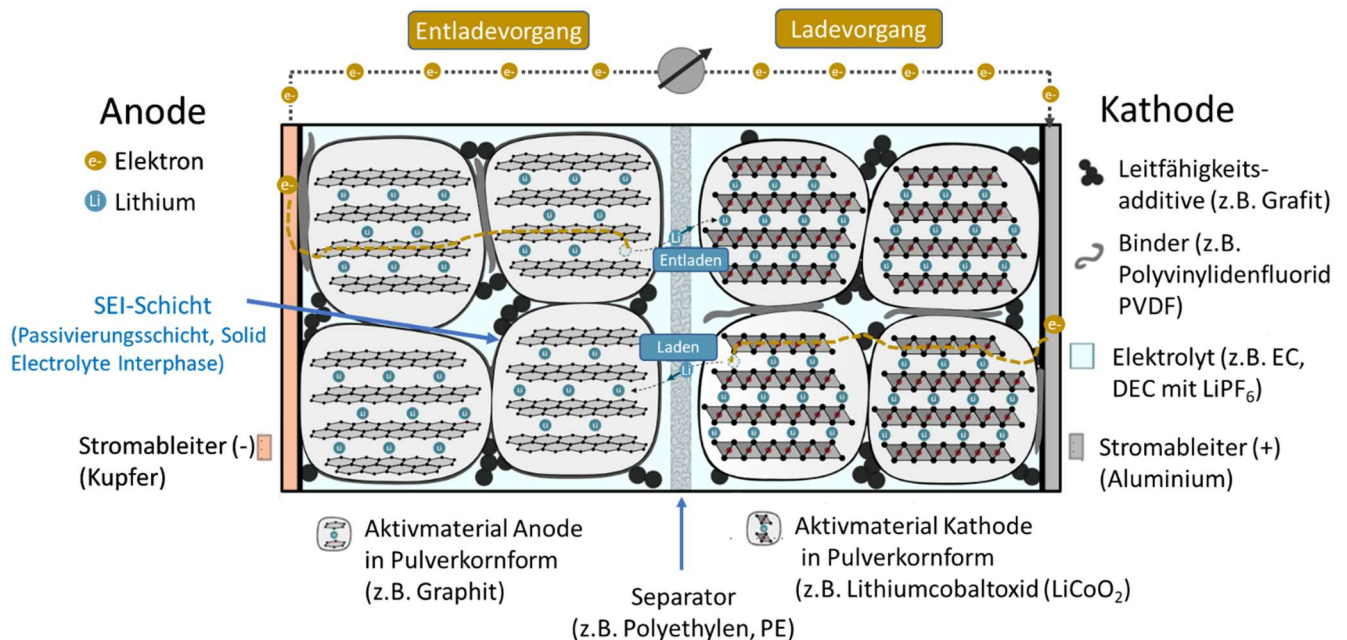


Abbildung 2: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle (Quelle: BAM)

4.3.2 Primäre und sekundäre Zellen

Die Unterscheidung erfolgt dabei in Primärbatterien, die meist nicht wiederaufladbar sind und wiederaufladbare Batterien, Sekundärbatterien, auch Akkumulatoren genannt.

4.3.3 Zellgeometrie (Bauform, Baugröße, Masse)

Für Lithiumbatterien lassen sich folgende 4 Zellformen (Geometrien) unterscheiden:

- Knopfzelle
- Rundzelle (= zylindrische Zelle)
- Pouchzelle
- prismatische Zelle

4.3.4 Einteilung nach der Zellchemie

Häufig wird die Einteilung nach der Zellchemie vorgenommen, da hieraus viele der Eigenschaften resultieren.

Tabelle 1: Gängige Lithiumbatterien

Lithiumbatterien (primär, meist nicht wiederaufladbar)	Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Batterien
	Lithium-Mangandioxid-Zellen
	Lithium-Thionylchlorid-Batterien
	Lithium-Eisensulfid-Batterien
	Lithium-Kupferoxid-Zellen
	Lithium-Iod Zellen

Tabelle 2: Gängige Lithium-Ionen Akkumulatoren

Lithium-Ionen Akkumulatoren (sekundär, wiederaufladbar)	Kathode: z. B. LFP, LCO, NMC, LMO, NCA (s. Abb. 2)
	Anode: z. B. Graphit, Lithiumtitanoxid (LTO), Silicium, Lithium-Metall

Dabei spielen in der Praxis als Speicher zumeist nur die sekundären Batterien, im deutschen Sprachgebrauch Akkus, eine Rolle. Während die Anode von aktuellen Lithiumbatterien zumeist aus Graphit oder Silicium besteht, gibt es aktuell eine große Variation bei den Kathoden.

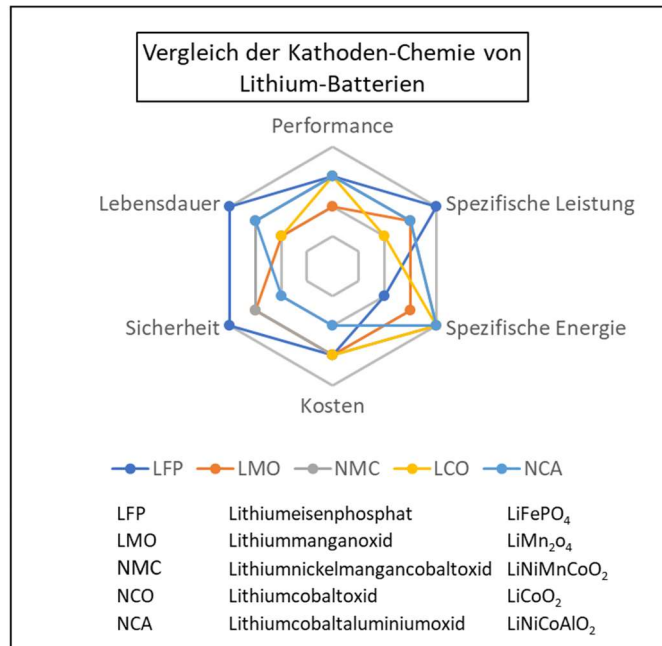


Abbildung 3: Eigenschaften von Lithiumbatterien in Abhängigkeit von der Chemie der Kathoden, dargestellt in Anlehnung an <https://batteryuniversity.com/>

Details zur Zusammensetzung siehe

<https://tes.bam.de/tes/Content/DE/Standardartikel/Regelwerke/Gefahrgut/batteriezellproduktion.html> .

Bei den flüssigen Elektrolyten handelt es sich meist um organische Carbonate mit Leitsalz (z. B. LiPF_6).

Bei Lithiumpolymerbatterien (Lipo) ist der Elektrolyt gelförmig.

Die wichtigste Komponente der Feststoff-Lithium-Batterie ist der Feststoffelektrolyt. Derzeit konzentriert sich die Forschung zu Festelektrolyten in erster Linie auf drei Gruppen von Materialien Polymere, Oxide und Sulfide:

- Polymer-Festelektrolyt (SPE), besteht aus einer Polymermatrix (z. B. Polyester) und einem Leitsalz (z. B. LiPF_6).
- Oxid-Festelektrolyte sind z. B. Perowskit, NASICON, LISICON usw.
- Beim Sulfid-Festelektrolyten wird ein Sauerstoffplatz im Oxidgitter durch Schwefel ersetzt und leitet sich daher vom Oxid-Festelektrolyten ab.

Da in diesem Bericht der Schwerpunkt auf der Bewertung der stofflichen Gefährdung im Rahmen der Zellenfertigung liegt, kommt insbesondere die Betrachtung der Zellchemie zum Tragen.

4.3.5 Definition in Regelwerken

Weitere Definitionen finden sich in den Regelwerken:

- UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods einschließlich UN Manual of Tests and Criteria /22/
- Batteriegesetz (BattG) /23/
- EU-Batterieverordnung (EU BattVO) (2023)
- Definitionen von Lithiumbatterien in Normen und Technischen Regeln

4.3.6 Einteilung nach Verwendungsart

Besonders in den Regelwerken nach Kap, 4.3.5 spielt die Einteilung nach Anwendung eine große Rolle.

In der EU BattVO werden folgende Batteriekategorien unterschieden: Industriebatterien, Autobatterien (Traktionsbatterien) und Batterien für leichte Verkehrsmittel.

Bei gesetzlichen Anforderungen (Störfall-Verordnung, Arbeitsschutz, Umweltschutz etc.) wird häufig die Masse, die Gesamtenergie oder die Leistung als Kriterium benutzt. Im Anhang 1 finden sich dazu Übersichten.

5 Produktionsprozesse von Lithium-Zellen-Typen

Im Folgenden wird ein Überblick über die gängigen Produktionsprozesse gegeben. Dabei erfolgt die Beschreibung nicht mit Fokus auf die technische Methodik der Maschinen, sondern mit Blick auf die allgemeinen Abläufe und eingesetzten Stoffe. Der allgemeine Ablauf ist dabei trotz unterschiedlicher Zellchemie und Zellgeometrie grundlegend ähnlich. Einzelne Unterschiede werden angesprochen.

Grundsätzlich erfolgt eine Einteilung in 4 grobe Schritte:

1. Herstellung der Ausgangsstoffe (Zukaufteile, Aktivmaterialien, Elektrolyt, usw.)
2. Elektrodenfertigung
3. Zell-Assemblierung
4. Zell-Finishing

Anschließend werden die Zellen zu Modulen und Packs zusammengestellt und die jeweilige elektrische Verbindung hergestellt. Diese werden zuletzt mit den weiteren Komponenten wie einem Batteriemanagementsystem (BMS) und ggf. Kühl- oder Heizvorrichtungen zu einer Batterie zusammengebaut.

5.1 Herstellung der Ausgangsstoffe

5.1.1 Aktivmaterialien

Kathode

Die am häufigsten verwendeten Kathodenmaterialien sind Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxid (NMC) mit unterschiedlichen stöchiometrischen Verhältnissen, Lithium-Cobaltoxid (LCO), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid (NCA). Die Herstellung des Kathodenmaterials lässt sich in drei Schritte einteilen und wird im Folgenden am Beispiel der NMC-Kathode erläutert /24/.

1. Präkursorherstellung: Nickel-, Mangan- und Cobaltsulfat (separat in Lösungen) werden gemischt, wobei eine Fällungsreaktion stattfindet. Die Suspension wird auf einen Bandfilter gegeben und gereinigt. Die verbleibende Lauge wird entfernt, indem Waschmittel auf den Filterkuchen gegeben und wieder abgesaugt wird. Zuletzt wird der NMC-Hydroxidpräkursor getrocknet.
2. Festkörpersynthese: Lithium-Hydroxid und Lithium-Carbonat werden in einem Trocken-Mischverfahren zusammengeführt. Dann erfolgt eine Temperaturbehandlung

(Kalzinieren) der Mischung, wobei ein Teil des Lithiums verdampft. Der letzte Prozessschritt ist das Feinstmahlen.

3. Nachbehandlung: In einem nasschemischen (mit anschließender Trocknung) oder chemischen Gasphasenabscheidungs-Verfahren werden die NMC-Partikel mit Keramiken beschichtet.

Anode

Das gängige Anodenmaterial Graphit wird durch die Mischung von Koks und Pech bei hohen Temperaturen und Graphitisieren der Mischung im Acheson-Ofen hergestellt /24/.

5.1.2 Elektrolyt

Der Elektrolyt besteht aus einer im Reaktor zusammengeführten Mischung aus ca. 10-20 % Leitsalz (z. B. Lithiumhexafluorophosphat), 0-10 % Additive (z. B. Vinylencarbonat) und ca. 85 % Lösemittel (z. B. Dimethylcarbonat, Ethylencarbonat, Diethylcarbonat oder Ethylmethylcarbonat) /24/.

5.1.3 Separator

Für die Herstellung des Separators gibt es verschiedene Technologien, häufig wird das im Folgenden beschriebene Nassverfahren auf PE-Basis verwendet /24/. Hierbei werden zunächst Polyethylen (PE), Weichmacher (Wachse oder Mineralöle) und Additive in einem Extruder unter Wärme gemischt, homogenisiert und geschmolzen. Anschließend wird die Schmelze gekühlt und biaxial gestreckt. Mithilfe von Lösemitteln (meist Chlor- und Fluorkohlenwasserstoffe, z. B. Dichlormethan) wird das Mineralöl aus der Folie gewaschen. Zuletzt folgen eine Trocknung, Thermofixierung (Querverstreckung / -relaxierung bei verschiedenen Temperaturen) und das Aufrollen und Zuschneiden.

5.1.4 Zellgehäuse

Die Herstellung des Zellgehäuses unterteilt sich bei Rundzellen und prismatischen Zellen in die Herstellung des Zellgehäuses und des Deckels. Das Gehäuse wird durch wiederholtes Tiefziehen (einem Zugdruckumformverfahren) aus Blechzuschnitten hergestellt. Anschließend wird es gewaschen, getrocknet und geprüft. Der Deckel wird aus metallischen und Kunststoffteilen gefertigt. Die Montage findet teilweise in Reinräumen statt. Es kommen Dichtmittel und Verfahren wie das Laserschweißen oder Nieten zum Einsatz. Zusätzlich zur

optischen und Dichtigkeitsprüfung wird das Gehäuse hinsichtlich des elektrischen Widerstands und Durchschlags geprüft /24/.

Die Pouchzellfolie einer Pouchzelle wird aus einer Kunststoffverbundfolie (Polyamide, Polypropylen mit Aluminium) im Tiefziehen mit anschließendem Waschen und Trocknen hergestellt /24/.

5.2 Herstellungsprozess Lithium-Ionen-Zellen

Den Herstellungsprozess kann man in folgende drei Teilschritte unterteilen:



Abbildung 4: Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Zellen

5.2.1 Elektrodenfertigung

Die Herstellung der Elektroden erfolgt in den in Abbildung 5 dargestellten 6 Schritten: Mischen, Beschichten, Trocknen, Kalandrieren, Slitting, Vakuumtrocknen. Hierfür ist (nach ISO 14644-1) eine Reinraumklasse von 7 bis 8 notwendig. Im letzten Produktionsschritt (Vakuumtrocknen) ist eine Reinraumklasse von ISO 6 erforderlich /25/ /26/ /27/. Ein Rein- oder Reinraum ist ein Raum, in dem die Konzentration luftgetragener Teilchen sehr geringgehalten wird. Die ISO 14644 /11/ teilt Reinnräume in die Klassen 1 – 9 ein. Je kleiner die Zahl, desto weniger Teilchen sind in der Raumluft zulässig.



Abbildung 5: Prozessschritte der Elektrodenfertigung bei der Zell-Herstellung (Quelle: BAM, Fotos: Fraunhofer IWS)

Die pulverförmigen Aktivmaterialien werden mit Hilfe von Lösemitteln zu einer pastösen Mischung (Slurry genannt) verrührt. Eine typische Zusammensetzung des Slurrys der Elektroden ist 90 % Aktivmaterial, 5 % Leitruß (nanomikroskopischer Kohlenstoff), 3 % Binder (z. B. CMC) und 2 % Additive (z. B. SBR), in einem wasserbasierten Lösemittel /26/. Bei der Träger-/Elektrodenfolie handelt es sich um Kupfer- (Anode) und Aluminiumfolien (Aluminiumlegierung) (Kathode).

5.2.2 Zell-Assemblierung

Die Zell-Assemblierung unterscheidet sich je nach Zelltyp (Pouch-, Rund-, prismatische Zelle) und wird in einem Reinraum mit mind. Klasse ISO 7 durchgeführt. Abbildung 6 gibt eine Übersicht über die Prozessschritte /25/ /26/.



Abbildung 6: Prozessschritte der Zell-Assemblierung bei der Herstellung einer Lithium-Ionen-Zelle (Quelle: BAM, Fotos: Fraunhofer IWS)

5.2.3 Zell-Finishing

Für das Zell-Finishing wird in der Regel kein Reinraum benötigt. Die Prozessschritte sind in Abbildung 7 (je nach Zelltyp) näher erläutert /25/ /26/.

Zell-Finishing



Abbildung 7: Prozessschritte des Zell-Finishing bei der Herstellung einer Lithium-Ionen-Zelle; End of Line Testing (EOL-Testing); (Quelle: BAM, Fotos: Fraunhofer IWS/BAM)

5.2.4 Sekundär-Anlagen zur Schaffung der Herstellungsbedingungen

Sekundär-Anlagen (unter Verwendung von Stoffeinsatz) im Herstellungsprozess können sein:

- Rohstofflagerung / Elektrolytlagerung
- Abfalllagerung
- Kälte-, Wärmeerzeugung und Trocknungsprozess
- Lösemittelaufbereitung
- Batterieverpackung und Lagerung
- Batterietrennung (Qualitätsstufen)
- Abwasserbehandlung
- Abluftreinigungsanlagen
- Infrastruktur (z. B. Rohrbrücken, Gashochdruckregel- und Messstation)

Grundsätzlich sind auch alle Sekundäranlagen hinsichtlich der Störfall-Verordnung zu prüfen. In diesem Bericht werden die Punkte Rohstofflagerung / Elektrolytlagerung, Kälte- und Wärmeerzeugung betrachtet.

5.3 Hinweise zu Herstellungsprozessen anderer Batterietechnologien

5.3.1 Natrium-Ionen Batterien

Der Herstellungsprozess von Natrium-Ionen-Zellen ist dem von Lithium-Ionen-Zellen sehr ähnlich, es können größtenteils dieselben Verfahren und Einsatzstoffe genutzt werden /29/.

5.3.2 Feststoffbatterie

Feststoffbatterien (Solid-State Batterien) – siehe auch 4.3.4 – werden in der Regel als Pouchzelle hergestellt, um Risse in den Keramiksichten zu vermeiden. Die Herstellung findet in einem Reinraum statt und kann verschiedene Prozessketten umfassen. Im Folgenden wird ein Beispiel näher beschrieben /30/.

1. Compoundierung: Die Materialkomponenten der Kathode und des Elektrolyten werden mit Additiven und Bindemittel unter Hitze zu einer homogenen Schmelze gerührt.

2. Die Anode (Lithiumfolie) wird mittels Strangpressen und Kalandrieren aus metallischem Lithium hergestellt. Zum Aufrollen werden polymerbeschichtete (z. B. aus Polyacetal) Walzen verwendet.

3. Laminieren: Die Anode wird auf den Kathoden-Elektrolyt-Verbundstoff laminiert. Bei einer Nasslaminiierung werden die Kontaktflächen zuvor mit einem Lösemittel befeuchtet.

5.3.3 Knopfzellen

Die Herstellung der Knopfzelle unterscheidet sich von anderen Zelltypen in der Zell-Assemblierung und dem Zell-Finishing. Die Elektroden und der Separator werden in Form geschnitten, in dem Zellgehäuse gestapelt und im Vakuum-Ofen getrocknet. Anschließend wird der Elektrolyt in die Zelle gefüllt und sie wird mittels Crimpen versiegelt /31/.

6 Gefahrstoffe, Gefahrenquellen und Arbeitsschutz im Produktionsprozess und seinen Nebenanlagen

Der Produktionsprozess von Batterien erfordert eine sichere Gestaltung aller Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. Es ist daher sinnvoll und notwendig, die Anforderungen des Arbeitsschutzes bereits bei der Planung und Gestaltung der Produktionsanlagen zu berücksichtigen.

Aktuell ist davon auszugehen, dass die momentan in Planung befindlichen Zellproduktionsstätten im technischen Großmaßstab auf den etablierten chemischen Zellzusammensetzungen beruhen. Auf die hierbei typischerweise verwendeten Stoffe wird in Kapitel 1 verwiesen.

Auf der Basis der Stoffmengen lässt sich anhand der Tabelle ermitteln, inwieweit eine Anlage / Produktionsstätte zur Zellfertigung der Störfall-Verordnung sowie weiteren Rechtsvorgaben in Deutschland unterfällt. Interessierte Kreise können anhand der bereits eingestufteten Stoffe eine schnelle Einschätzung erhalten.

6.1 Gefährliche Stoffe und Gemische nach CLP-Verordnung

Die CLP-Verordnung verpflichtet Inverkehrbringer zur Identifizierung und Kommunikation von Gefahreigenschaften. Der Verordnung setzt ein global harmonisiertes System (GHS) in der Europäischen Union um, ergänzt durch einige EU-spezifische Festlegungen. Die durch die Einstufung ermittelten inhärenten Gefahreigenschaften ("hazard") umfassen physikalische Gefahren, sowie Gefahren für die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Einstufungen durch verschiedene Inverkehrbringer können voneinander abweichen. Die Mitgliedsstaaten der EU können daher Verfahren für eine harmonisierte, verbindliche Einstufung eines Stoffes einleiten, diese Einstufungen sind im Anhang VI der CLP-Verordnung gelistet. Die Kennzeichnung eines gefährlichen Stoffes oder Gemisches enthält neben den Gefahrenpiktogrammen u. a. auch eine genauere Beschreibung der Gefahreigenschaften in Form der Gefahrenhinweise ("H-Sätze") und Sicherheitshinweise ("P-Sätze").

6.2 Beschreibung der Gefahrenquellen

In den folgenden Tabellen werden typische Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen dargestellt. Die Anwendbarkeit und Vollständigkeit ist für die speziellen Anlagentypen zu prüfen.

6.2.1 Mischbereich Kathode

Tabelle 3: Besondere Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen im Mischbereich Kathode

Gefahrenquelle	Ursache	Gegenmaßnahmen
Behälterbersten und Freisetzung von NMC	Zu hoher Druck durch gestörte Druckluftzufuhr oder Verstopfung des Entstaubungsventils	Sicherheitsventile / Überdrucksicherung
	Unterdruck im Behälter, da Ventile im Zustrom des NMC geschlossen oder verstopft sind	Drucküberwachung
Explosionsgefahr	Stoffverwechslung, Aufnahme explosionsgefährlicher Stoffe statt NMC	Unterschiedliche Bigbags mit Barcodes zur Freigabe der Anlage
Versagen der Rohrleitung vom Wiegebehälter zum Mischer und Freisetzung von NMC	Falsche Ventilstellungen des Entleerungsventils des Wiegebehälters oder des Zulaufventils des Mixers während der Befüllung des Mixers	Endlagenüberwachung der Ventile
Aufreißen des Kompensators in der Befüll- oder Entleerungsleitung des Wiegebehälters	Materialversagen oder fehlerhafter Einbau	Inspektion nach Montage und regelmäßig wiederkehrende visuelle Kontrolle, Kontrolle von Ersatzteilen vor der Montage

6.2.2 Prozesslager (Kathodenfertigung)

Tabelle 4: Besondere Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen im Prozesslager

Gefahrenquelle	Ursache	Gegenmaßnahmen
NMC-Freisetzung	Gebinde unbeständig oder beschädigt	Ausschließlich Verwendung von Originalbehältern, Beschädigungen werden durch Wareneingangskontrolle erkannt, Lagerung in geschlossenen Gebäuden, Handhabung geöffneter Gebinde mit Absaugung und/oder PSA
Einstürzende Lagerregale	z. B. Beschädigung nach Kollision, Überbelegung von Lagerregalen	Anfahrerschutz, Vorbeugende Wartung und Instandhaltung, einlagige Lagerung
Brand	z. B. Überlastung oder Schäden an Elektroinstallationen, Regalbediensystemen oder Brandübertragung aus angrenzenden Räumen / Anlagen	Automatische Brandmelde- und Löschanlage, F90-Wände, Maßnahmen gem. Brandschutzkonzept

6.2.3 Elektrolyt-Tankfarm

Tabelle 5: Besondere Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen in der Elektrolyt-Tankfarm

Gefahrenquelle	Ursache	Gegenmaßnahmen
Elektrolyt oder EMC Freisetzung	Tank, Leitungs- oder Pumpenundichtigkeit	Auffangwanne, Tankplatz als Auffangfläche mit Gefälle hin zu der Auffangwanne, Leckagesensoren sowohl an den Tanks als auch in der Auffangwanne
Brand	z. B. EMC- und / oder Elektrolytlache entzündet sich	Löschanlage, Brandmeldeanlage
Explosion	z. B. Freisetzung und Zündung entzündbarer Stoffe	Temperierung des Tankinhaltes, Explosionsschutzkonzept.
Bersten eines Behälters	Überdruck in den Tanks	Sicherheitsventil, Berstscheibe, Überfüllsicherung, Drucküberwachung
Überfüllung	Ausfall der betrieblichen Füllstandsmessung	Überfüllsicherung

6.2.4 Ammoniak-Kälteanlagen

Tabelle 6: Besondere Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen der Ammoniak-Kälteanlagen

Gefahrenquelle	Ursache	Gegenmaßnahmen
Ammoniakfreisetzung	Leckage	Vermeidung von Flanschverbindungen, Verwendung von Formschlüssigen Flanschen oder ausblassicheren Dichtungen. Gaswarnanlage, Notbelüftung, Instandhaltungsmaßnahmen mit Eingriff in den Ammoniak-Kältekreislauf werden nur von fachkundigen Personen durchgeführt, regelmäßige Prüfungen der Anlage,
Brand	Überlastung oder Schäden an Motoren oder Elektroinstallationen, Maschinenölleckage auf heiße Anlagenteile oder Brandübertragung	Automatische Brandmelde- und manuelle Löschanlage, F90-Wände, Maßnahmen gem. Brandschutzkonzept

Tabelle 7: Besondere Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen bei der Formierung und bei der Reifung der Zellen

Gefahrenquelle	Ursache	Gegenmaßnahmen
Vereinzelte Zellbrände und Vermeiden des Übergreifens auf andere Bereiche (Formierung, Reifung, EOL-Tests)	Selbstentzündung beschädigter oder defekter Zellen, z. B. beim Ladevorgang	Separierung einzelner Zellen und Begrenzung der Anzahl der Zellen in einem Arbeitsvorgang. Begrenzung der Zellengröße. Überwachung der Bereiche mit Rauchmeldern / CO-Warnmeldern zur schnellen Erkennung, automatische Feuerlöschanlage, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Ergreifen von Maßnahmen: Feuerlöscher, Sicherheitskit (z. B. Fass mit Wasser / Sand, lange Zange, Schutz-Handschuhe) Mitarbeiterschulungen
Übergreifen des Zellbrandes auf seine Umgebung	Ausbreitung eines Zellbrandes	Raumaufteilung in einzelne Brandabschnitte (z. B. Brandschutztechnisch qualifizierte Türen, Schränke), Löschanlagen /Sprinkler
Ausgasen von undichten Zellen, Freisetzung von Formierungsgasen, Gefahr der Gasexplosion	Mechanische Beschädigung, Überhitzung	Rauchmelder / CO-Warnmelder, Möglichkeiten der Identifizierung defekter Zellen: IR Thermometer, tragbare Gas-Sensoren, aktive Lüftung / hoher Luftwechsel, Vermeidung von Zündquellen

6.3 Arbeitsschutz bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen

Die Produktion und auch der spätere Lebenszyklus, insbesondere das Recycling, von elektrischen Energiespeichern sind mit einer Reihe von Gefahrstoffen verbunden, die zu Gefährdungen von Beschäftigten führen können. Dies sind vor allem staubförmige Gefahrstoffe (z. B. nickel- oder cobalthaltige Präkursorsalze bei der Herstellung der NMC Materialien durch Sprühtrocknen oder andere staubende Trocknungsverfahren), das häufig verwendete Leitsalz Lithiumhexafluoridophosphat(V) LiPF_6 , aber auch organische Lösemittel aus dem Elektrolyten (z. B. Dimethylcarbonat, Ethylencarbonat, Diethylcarbonat oder Ethylmethylcarbonat).

6.3.1 Begriff "Gefahrstoff"

Im Sinne der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) sind Gefahrstoffe

1. gefährliche Stoffe und Gemische gemäß CLP-Verordnung
2. Stoffe, Gemische und Erzeugnisse, die explosionsfähig sind,
3. Stoffe, Gemische und Erzeugnisse, aus denen bei der Herstellung oder Verwendung Stoffe nach Nummer 1 oder Nummer 2 entstehen oder freigesetzt werden,
4. Stoffe und Gemische, die die Kriterien nach den Nummern 1 bis 3 nicht erfüllen, aber auf Grund ihrer physikalisch-chemischen, chemischen oder toxischen Eigenschaften und der Art und Weise, wie sie am Arbeitsplatz vorhanden sind oder verwendet werden, die Gesundheit und die Sicherheit der Beschäftigten gefährden können,
5. alle Stoffe, denen in Deutschland ein Arbeitsplatzgrenzwert zugewiesen worden ist (TRGS 900 /11/).

Der für den Arbeitsschutz definierte Begriff "Gefahrstoff" ist daher wesentlich umfassender als der Begriff "gefährlicher Stoff" in der CLP- oder in der Störfall-Verordnung. Auch Abfälle können in Sinne des Arbeitsschutzes Gefahrstoffe sein.

6.3.2 Gefährdungsbeurteilung

Auf grundsätzliche Pflichten des Arbeitgebers zum Arbeitsschutz wird im später folgenden Kapitel 9.1 ausführlich eingegangen, so dass sich hier auf Tätigkeiten mit Gefahrstoffen beschränkt wird. Vor der erstmaligen Aufnahme einer Tätigkeit mit Gefahrstoffen ist der Arbeitgeber nach Gefahrstoffverordnung zu einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet. Es sind inhalative, dermale und physikalisch-chemische Gefährdungen der Beschäftigten, sowie der Brand- und Explosionsschutz zu berücksichtigen. Sie dient dem Ziel, auf Basis einer vorgegebenen Rangfolge der Schutzmaßnahmen (STOP-Prinzip (Substitution, technische Maßnahmen, organisatorische Maßnahmen, personenbezogenen Maßnahmen)), Verfahren und Arbeitsplätze für die Beschäftigten von vorneherein sicher zu gestalten. Das STOP-Prinzip stellt die Prüfung des Einsatzes von Stoffen und Verfahren mit geringerem Risiko (Substitution) vor technische Schutzmaßnahmen (z. B. geschlossene Verfahren, Absaugeinrichtungen) und organisatorische Maßnahmen. Persönliche Schutzausrüstung ist nur als letzte Möglichkeit anzusehen. Belastende Schutzausrüstung, z. B. filtrierende Atemschutzmaske, ist als dauerhafte Lösung nicht zulässig.

6.3.3 Gefahrstoffverzeichnis

Nach § 6 Abs. 12 der Gefahrstoffverordnung ist der Arbeitgeber verpflichtet, ein Verzeichnis der im Betrieb verwendeten Gefahrstoffe zu führen mit Angaben zur Bezeichnung des

Gefahrstoffs, den gefährlichen Eigenschaften (Einstufung), den verwendeten Mengenbereichen und den Arbeitsbereichen, in den Beschäftigte dem Gefahrstoff ausgesetzt sein können. Hierzu kann die in Kapitel 1 zitierte Stoffliste dieses Berichtes als Unterstützung dienen.

6.3.4 Informationsquellen

Der Arbeitgeber ist verpflichtet, für die Gefährdungsbeurteilung relevante, mit zumutbarem Aufwand zugängliche Informationen zu ermitteln. Dies sind im Regelfall das Gefahrenetikett nach CLP-Verordnung und vor allem das Sicherheitsdatenblatt nach REACH-Verordnung. Ab bestimmten Mengengrenzen ist ein erweitertes Sicherheitsdatenblatt erforderlich, dem auch ein Anhang mit Expositionsszenarien beigelegt ist. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die gesetzliche Verpflichtung der Informationslieferung durch den Lieferanten nur für in Verkehr gebrachte chemische Stoffe und Gemische besteht. Daher greift in etlichen Fällen, z. B. bei Reparaturarbeiten an Energiespeichersystemen (Erzeugnisse), bei Recycling und Entsorgung die Pflicht zur Selbsteinstufung oder zumindest zur Ermittlung der Gefährdungen für Beschäftigte (§6 Abs. 3 GefStoffV).

Am Ende des Berichtes sind Hinweise zu weiteren einschlägigen Informationsquellen

6.3.5 Partikelförmige Gefahrstoffe

Einatembare Staub ist immer ein Gefahrstoff! Hier schreibt die Gefahrstoffverordnung grundsätzlich Schutzmaßnahmen vor, als Mindeststandard ist der Allgemeine Staubgrenzwert (TRGS 900, unterschieden nach einatembaren und alveolengängigem Staubanteil) einzuhalten. Staub emittierende Anlagen, Maschinen und Geräte müssen mit einer wirksamen Absaugung versehen sein, wenn die Staubfreisetzung nicht durch andere Maßnahmen, z. B. emissionsarme Verwendungsformen (TRGS 600 /11/), vermieden wird. Die abgesaugte Luft darf nur in den Arbeitsbereich zurückgeführt werden, wenn sie ausreichend gereinigt wurde. Eine Ausbreitung des Staubs auf unbelastete Arbeitsbereiche ist zu verhindern. Auch Reinigungs- und Wartungsarbeiten müssen bei der Planung berücksichtigt werden. Kehren ohne Staub bindende Maßnahmen oder Abblasen von Staubablagerungen mit Druckluft sind grundsätzlich nicht zulässig. Die technischen Einrichtungen zum Abscheiden, Erfassen und Niederschlagen von Stäuben müssen bei der ersten Inbetriebnahme auf ausreichende Wirksamkeit überprüft werden, dies ist jährlich zu wiederholen und zu dokumentieren. Diese Vorgaben gelten, unabhängig von einer Einstufung nach CLP-Verordnung, auch für

Tätigkeiten mit Nano-Materialien. Weitere Informationen bezüglich Nanomaterialien enthält die TRGS 527 /11/.

6.3.6 Krebserzeugende, keimzellmutagene und reproduktionstoxische Gefahrstoffe

Gefahrstoffe, die nachweislich beim Menschen zu Krebserkrankungen, Schädigung des Erbgutes, der Fortpflanzungsfähigkeit oder des werdenden Lebens führen, unterliegen besonderen Anforderungen des Arbeitsschutzes. Sie sind in der Einstufung nach CLP-Verordnung mit den Kategorien 1A oder 1B ausgewiesen oder in der TRGS 905 /11/ (Stoffe) bzw. TRGS 906 /11/ (Tätigkeiten) gelistet. Die TRGS 910 /11/ beschreibt ein risikobasiertes Maßnahmenkonzept für eine Reihe von krebserzeugenden Gefahrstoffen, für die auf Basis von Expositions-Risikobeziehungen Akzeptanz- und Toleranzkonzentrationen festgelegt wurden. Die Akzeptanzkonzentrationen bieten somit einen Maßstab für die sichere Gestaltung neuer Verfahren und Tätigkeiten.

Von den in der EU BattVO explizit genannten vier Stoffen fallen derzeit drei Stoffe unter diese Bestimmungen: Cobalt, Nickel und Blei. Dies wird aufgrund seiner reproduktionstoxischen Eigenschaften auch für das Leitsalz LiPF_6 diskutiert. Es ist auch zu beachten, dass Tätigkeiten mit Zwischenprodukten (z. B. die "schwarze Masse" aus dem Batterierecycling), Erzeugnisse und Abfälle unter die besonderen Schutzmaßnahmen gemäß § 10 der Gefahrstoffverordnung fallen.

Besondere Aufmerksamkeit bei der Anlagenplanung ist auch biobeständigen, krebserzeugenden Faserstäuben zu widmen, die z. B. bei der Handhabung rigider Formen (Faserdurchmesser über 30 nm) von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhrchen (MWCNT) freigesetzt werden.

7 Anwendung der Störfall-Verordnung

Gefährliche Stoffe im Sinne der Störfall-Verordnung sind Stoffe oder Gemische, die in Anhang I der Störfall-Verordnung aufgeführt sind oder die dort festgelegten Kriterien erfüllen. Sie sind nur eine Teilmenge derjenigen Stoffe und Gemische, die im Sinne der CLP-Verordnung als "gefährlich" bezeichnet werden (s. Kap. 6.1) und für die entsprechende Maßnahmen des Arbeitsschutzes vorzusehen sind.

7.1 Stoffliste Lithiumbatterie-Zellenherstellung

In der „Stoffliste Lithiumbatterie-Zellenherstellung“ (Link s. Kapitel 1) sind die aktuell typischen Stoffe für die Zellenherstellung aufgelistet. Für jeden Stoff wird der Name, Teil der Batterie und Prozessschritt sowie die Einstufung gemäß CLP-Verordnung angegeben.

Auf Grundlage dieser Daten wurde anschließend die Zuordnung nach Anhang I der Störfall-Verordnung vorgenommen. Gefährliche Stoffe, die nicht in den Anwendungsbereich der CLP-Verordnung fallen aber hinsichtlich ihres Störfallpotentials gleichwertige Eigenschaften besitzen, wurden gemäß der Nr. 8 Anhang I der ähnlichsten Gefahrenkategorie nach Nummer 1 der Stoffliste oder dem ähnlichsten unter Nummer 2 der Stoffliste namentlich genannten Stoffe zugeordnet. Zusätzlich finden sich in der Stoffliste Angaben zu Arbeitsschutz (Gefahrstoffverordnung) und wasserrechtlicher Einstufung.

Aus Anhang I der Störfall-Verordnung ergibt sich, ob ein Betriebsbereich gemäß § 2 Störfall-Verordnung vorliegt und ob dieser der unteren oder der oberen Klasse zuzuordnen ist. Werden alle Mengenschwellen für einzelne Stoffe unterschritten, muss über die im Anhang I der Störfall-Verordnung beschriebene Quotientenregel geprüft werden, ob die Störfall-Verordnung anzuwenden ist.

Die bei der BAM verfügbare Berechnungshilfe (Link in Kapitel 1) soll Unterstützung bei der Prüfung der Mengenschwellenerreichung bieten. Wenn ein Stoff im Produktionsprozess verwendet wird, der nicht in der Berechnungshilfe gelistet ist, ist er gemäß CLP-Verordnung einzustufen. Dementsprechend kann diese Stoffliste ergänzt werden. Mit der Verwendung dieser Berechnungshilfe würde er automatisch bei der Ermittlung der Anwendbarkeit der Störfall-Verordnung berücksichtigt werden. Falls ein Betriebsbereich nach Störfall-Verordnung vorliegt, ist anhand der Berechnungshilfe ablesbar, ob dieser der unteren oder unteren Klasse zugehört.

Für die Zuordnung der jeweiligen Gefahrenkategorie kann ebenfalls die bei der BAM (s. Kapitel 1) verfügbare Berechnungshilfe verwendet werden. Auch bei einer „händischen“ Berechnung

ist die „Quotientenregel“ aus Anhang I Nr. 5 der Störfall-Verordnung zu beachten. Die Anwendung der Quotientenregel erfolgt getrennt für die Bereiche Gesundheitsgefahren H, physikalische Gefahren P und Umweltgefahren E. Auf Stoffe und Gemische der Kategorien O1, O2 und O3 wird die Quotientenregel nicht angewendet.

Die Stoffmenge der einzelnen vorhandenen Stoffe, oder die Summe der Menge der Stoffe derselben Gefahrenkategorie wird durch die jeweilige Mengenschwelle für die obere beziehungsweise untere Klasse geteilt. Diese Quotienten sind zu addieren. Ist die Summe ≥ 1 , kann der Betriebsbereich entweder der unteren oder oberen Klasse zugeordnet werden. Ist die Summe bei den Quotienten, die mit der Mengenschwelle für die untere Klasse gebildet werden $1 <$ dann fällt der Betrieb nicht unter die Störfall-Verordnung.

Wenn Stoffe im Anhang I unter Nr. 2 fallen, d. h. namentlich genannt sind, dann können sie durchaus auch unter verschiedene Gefahrenkategorien fallen.

Die namentlich genannten Stoffe (unter Nr. 2) haben eigene Mengenschwellen, die sich von den Mengenschwellen der Gefahrenkategorien, denen sie zugeordnet werden könnten, unterscheiden. Liegen diese Stoffe in Mengen unterhalb ihrer Mengenschwellen vor, werden auch sie der Quotientenbildung unterzogen. Wenn die Mengenschwellen nach Spalte 4 der Stoffliste des Anhangs I der Störfall-Verordnung erreicht oder überschritten sind, dann ist die Quotientenregel bzgl. der Mengenschwellen Spalte 5 anzuwenden. Dabei besteht der Nenner aus der individuellen Mengenschwelle des namentlich genannten Stoffes. Der resultierende Quotient wird dann zu den Quotienten der jeweiligen Gefahrenkategorie addiert, unter die der Stoff fällt. Z. B. für Ammoniak (Anhang I, Nr. 2.5) sind das die Gefahrenkategorien H, P und E. Zu jeder ist der Quotient zu addieren.

7.2 Begriffe und Definitionen der Störfall-Verordnung

- Gefährliche Stoffe

Stoffe oder Gemische, die in Anhang I aufgeführt sind oder die dort festgelegten Kriterien erfüllen, einschließlich in Form von Rohstoffen, Endprodukten, Nebenprodukten, Rückständen oder Zwischenprodukten

- Vorhandensein gefährlicher Stoffe

das tatsächliche oder vorgesehene Vorhandensein gefährlicher Stoffe oder ihr Vorhandensein, soweit vernünftigerweise vorhersehbar ist, dass sie bei außer Kontrolle geratenen Prozessen, auch bei Lagerung, anfallen, und zwar in Mengen, die die in Anhang I genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten (s. § 3 Absatz 5a BImSchG).

- Ereignis

Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem Betriebsbereich unter Beteiligung eines oder mehrerer gefährlicher Stoffe

- Störfall

ein Ereignis, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden nach Anhang VI Teil 1 Ziffer I Nummer 4 führt

- Ernste Gefahr

eine Gefahr, bei der

- a) das Leben von Menschen bedroht wird oder schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen von Menschen zu befürchten sind,
- b) die Gesundheit einer großen Zahl von Menschen beeinträchtigt werden kann oder
- c) die Umwelt, insbesondere Tiere und Pflanzen, der Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- oder sonstige Sachgüter geschädigt werden können, falls durch eine Veränderung ihres Bestandes oder ihrer Nutzbarkeit das Gemeinwohl beeinträchtigt würde;

Gemäß Anhang I Nr. 4 der Störfall-Verordnung (Mengenschwellen) sind die Höchstmengen an gefährlichen Stoffen zu berücksichtigen, die vorhanden sind oder vorhanden sein können.

7.3 Gefährliche Stoffe gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung

In diesem Bericht werden Aktivmaterialien weitgehend als Zukaufteile betrachtet, da in der Regel die Synthese der Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien (Precursor Cathode Material (pCAM), Cathode Material (CAM) und Anodenmaterial (AAM)) getrennt von den Zellfabriken erfolgt.

Wichtigster Schritt ist dabei die Wärmebehandlung in entsprechenden Öfen. Die Kathodenmaterialien bestehen aktuell zumeist aus gemischten Lithium-Metalloxiden (Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid (NCA), Lithium-Eisenphosphat (LFP) sowie Nickel-Cobalt-Manganoxid-Verbindungen (NMC)). Die Metallsalze kommen auch als Nitrate oder Carbonate zum Einsatz. Dabei sind insbesondere die Cobaltverbindungen (LiCoO_2 , CoO_2 , CoNO_3 etc.) relevant für die Zuordnung nach Anhang I der Störfall-Verordnung: sie fallen unter die Gefahrenkategorie H2

Akut toxisch. Einige Nickelverbindungen sind namentlich genannte Stoffe und daher bei der Bewertung entsprechend zu beachten.

Als Anodenmaterialien kommen aktuell natürlicher oder künstlicher Graphit oder Silicium zum Einsatz, welche nicht in Anhang I der Störfall-Verordnung eingestuft sind. Leitsalz-Verbindungen, z. B. LiPF_6 fallen unter die Gefahrenkategorie H2 Akut toxisch und werden – wie die o. g. Aktivmaterialien - in der Regel zugekauft. Gleiches gilt für die zur Separatorherstellung eingesetzten Kunststoffe. Daher werden im vorliegenden Bericht deren Herstellungsprozesse nicht betrachtet, sondern lediglich deren direkter Einsatz in der nachfolgenden Zellherstellung. Bindemittelgemische, wie z. B. Polyvinylidenfluorid in N-Methyl-Pyrrolidon und Hilfsstoffe wie Karbon werden ebenso als Zukaufchemikalien behandelt.

Materialien für Batterien der nächsten Generation, wie Festkörperbatterien, metallische Lithiumanoden (entwickelt in Berührung mit Wasser entzündbare Gase (Kategorie 1), untere Mengenschwelle 100.000 kg) und Nanomaterialien sind individuell zu betrachten.

7.4 Lager für Ausgangsstoffe

Die Ausgangsstoffe, wie Aktivmaterialien für Elektroden, aber auch die Ausgangsstoffe für den Elektrolyten, und der Elektrolyt selber, werden sehr wahrscheinlich in größeren Mengen gelagert werden. Bei den störfallrelevanten Aktivmaterialien sind vor allem die Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxide zu erwähnen, welche teilweise, je nach Zusammensetzung, nach Anhang I der Störfall-Verordnung unter die Gefahrenkategorie H2 Akut toxisch fallen.

Es werden wahrscheinlich Lösemittel, wie zum Beispiel Ethanol (Gefahrenkategorie P5c) gelagert.

Zusätzlich wird es ein N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) Tanklager geben. Dieser Stoff wird als Lösemittel in der Kathodenherstellung eingesetzt, fällt aber unter keine der Gefahrenkategorien des Anhang I der Störfall-Verordnung.

Für die Elektrolytherstellung können folgende Stoffe in Tanklagern gelagert sein:

- verschiedene organische Carbonate als Lösemittel
- ggf. Sulfite als Additive (je nach Zellchemie).

Diese Stoffe fallen unter die Gefahrenkategorie P5 Entzündbare Flüssigkeiten. Es handelt sich hier u. a. um: Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC), Propylensulfit (PS), Dimethylsulfit (DMS), Diethylsulfit (DES). Diese Flüssigkeiten werden im

Allgemeinen ebenfalls in einem Tanklager gelagert. Sie könnten daher in größeren Mengen vorhanden sein und somit für die Entscheidung, ob eine Anlage nach Störfall-Verordnung vorliegt, relevant sein.

Der Elektrolyt ist ein Gemisch aus Lösemitteln, Additiven und Leitsalz. Er ist gemäß Anhang I der CLP-Verordnung einzustufen. Je nach Zusammensetzung ist davon auszugehen, dass der Elektrolyt unter die Gefahrenkategorien P5a-c und H2 des Anhangs I der Störfall-Verordnung fällt.

7.5 Herstellung der Zellen

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, ist die Produktion in verschiedene Unterkategorien aufgeteilt. Der Prozess startet mit dem Anmischen des Slurrys. Dabei kommen bei der Herstellung von NMC-Zellen, die bereits oben erwähnten Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxide zum Einsatz, welche teilweise, je nach Zusammensetzung, nach Anhang I der Störfall-Verordnung unter die Gefahrenkategorie H2 Akut toxisch fallen. Die untere Mengenschwelle für die Gefahrenkategorie H2 ist 50.000 kg. Zusätzlich wird Ethanol als Lösemittel eingesetzt, welches entzündbar ist (Gefahrenkategorie P5c). Hier ist die untere Mengenschwelle für die Gefahrenkategorie P5c 5.000.000 kg. Bei der Produktion von Festkörper Lithiumionenbatterien wird Lithiumfolie als Anode eingesetzt (siehe Kapitel 4). Lithium fällt unter die Gefahrenkategorie O2 Stoffe oder Gemische, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln (Kategorie 1), deren untere Mengenschwelle 100.000 kg beträgt. Im letzten Prozessschritt der Zell-Assemblierung werden die fertigen Zellen mit Elektrolyt befüllt. Dieser besteht unter anderem aus verschiedenen organischen Carbonaten als Lösemittel sowie ggf. Sulfiten als Additive (je nach Zellchemie), welche unter die Gefahrenkategorie P5 Entzündbare Flüssigkeiten fallen. Diese Stoffe sind u. a.: Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC), Propylensulfit (PS), Dimethylsulfit (DMS), Diethylsulfit (DES).

Die eingesetzten Leitsalze sind entweder Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6), Lithiumtriflat (LiCF_3SO_3) oder Lithiumbis(trifluormethylsulfonyl)amid ($\text{LiC}_2\text{NO}_4\text{F}_6\text{S}_2$). Lithiumhexafluorophosphat ist akut toxisch und fällt unter die Gefahrenkategorie H2.

Bei der Elektrolytbefüllung können durch die Zersetzung des Elektrolyten und des Leitsalzes störfallrelevante Gase wie Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) entstehen /38/. Kohlenmonoxid fällt unter die Gefahrenkategorien H2 Akut toxisch (inhalative Exposition) und P2 Entzündbare Gase. Wasserstoff ist ein namentlich genannter Stoff in Anhang I der Störfall-Verordnung (2.44). Außerdem können Methan und andere Kohlenwasserstoffverbindungen

wie zum Beispiel Ethan und Ethin entstehen /39/, hier handelt es sich ebenfalls um Entzündbare Gase (P2). Je nach Leitsalz können bei seiner Zersetzung auch Phosphorpentafluorid (PF₅) und Fluorwasserstoff (HF) entstehen. Diese Substanzen sind „Akut toxisch Kategorie 1“ und fallen unter die Gefahrenkategorie H1.

7.5.1 Konditionierung und Formierung

Nach der Elektrolytbefüllung ist das eigentliche Produkt „Batteriezelle“ fertig. Bei den weiteren Produktionsschritten Konditionierung und Formierung sowie im Fertigproduktlager kann es aber in einzelnen schadhaften (n. i. O.) Batteriezellen zu internen Kurzschlüssen, Erwärmung, Reaktionen und ggf. sogar einem Thermal-Runaway (gefährliche Reaktion unter Freisetzung von großer Hitze, entzündbaren und toxischen Gasen, Flamme bis zur Explosion) kommen, der wiederum durch Ausbreitung auf andere Zellen einen Brand verursachen kann. Bei dem Formierungsvorgang zersetzt sich der Elektrolyt. Dabei werden u. a. die bereits in 7.4 genannten störfallrelevanten Stoffe frei: Kohlenstoffmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄) /38/, Ethan (C₂H₆), Ethin (C₂H₂) /39/, weitere kurzkettige Kohlenwasserstoffe und eventuell Phosphorpentafluorid (PF₅). Fluorwasserstoff und Phosphorpentafluorid fallen unter die Gefahrenkategorie H1 im Anhang I der Störfall-Verordnung.

Fazit: Bei der Zellproduktion sind nur wenige Stoffe zu berücksichtigen, die H, P oder E Einstufungen besitzen. Insbesondere die Stoffe für den Elektrolyten sowie die Lösemittel bei der Elektrodenherstellung sind störfallrelevant und können je nach Lagermenge zu einer Einstufung als Betriebsbereich nach Störfall-Verordnung beitragen.

7.6 Nebenanlagen

7.6.1 Kälteanlagen – Ammoniak

Während der Zellproduktion sind die Umgebungsbedingungen in großem Maße für die zukünftigen Eigenschaften der Zelle verantwortlich. So sind gleichbleibende klimatische Bedingungen für die einzelnen Prozessschritte und deren reproduzierbarer Eigenschaften unverzichtbar.

Ammoniak (NH₃) eignet sich aufgrund seiner Eigenschaften, der hohen Verfügbarkeit und der vergleichsweise geringen Preise für den Einsatz als Kältemittel in entsprechenden Anlagen. Große Nachteile sind allerdings die humantoxischen Eigenschaften beim Einatmen und die Gefahren für Wasserorganismen, wodurch Ammoniak als störfallrelevanter Gefahrstoff

klassifiziert ist. Gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung gehört Ammoniak zu den namentlich genannten gefährlichen Stoffen mit folgenden individuellen Mengenschwellen:

Tabelle 8: Einstufung von Ammoniak gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung

Nr.	Name	Gefahrenkategorien ²	Mengenschwellen [kg]	
			untere	obere
2.5	Ammoniak, wasserfrei	H – Gesundheitsgefahren P – Physikalische Gefahren E – Umweltgefahren	50.000	200.000

Je nach Kältebedarf und eingesetzter Technologie schwankt die notwendige Menge an Ammoniak. Gängige Kälteanlagen benötigen 15.000 kg NH₃ für eine Kühlleistung von 40 MW. Dies entspricht einer Kühlleistung von ca. 2,7 kW pro Kilogramm NH₃. Gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung ergibt sich somit beim Vorhandensein einer solchen Anlage für Ammoniak ein Quotient von 0,3 in den Gefahrenkategorie-Gruppen H, P und E. Wenn die Summe der Stoffe einer Gefahrenkategorie die zugehörige Mengenschwelle nicht erreicht, muss mit Hilfe der Quotientenregel geprüft werden, ob der Betrieb der Störfall-Verordnung unterliegt. Dabei wird der Ammoniak-Quotient von 0,3 bei der jeweiligen Gefahrenkategorie einbezogen. Bei hohem Kältebedarf erhöht sich auch der Ammoniak-Quotient. Neuere Kompaktanlagen sind in der Regel kleiner dimensioniert und kommen mit weniger Ammoniak pro kW aus. So werden in diesen Fällen mit 240 kg NH₃ Kühlleistungen von 1650 kW bzw. mit 825 kg NH₃ Kühlleistungen von 5680 kW erzeugt, was einer Kühlleistung von ca. 6,9 kW pro Kilogramm NH₃ entspricht.

Fazit: Die Anzahl der Kälteanlagen und die entsprechende Ammoniak-Menge hängt vom Kühlbedarf sowie der eingesetzten Technik ab. Da die Mengenschwellen für Ammoniak vergleichsweise gering sind und sich eine Störfallrelevanz in drei Gefahrenkategorien ergibt, ist es denkbar, dass ein Betrieb zur Herstellung von Lithiumionenbatterie-Zellen aufgrund der vorhandenen Kälteanlagen in den Geltungsbereich der Störfall-Verordnung fällt.

² Für die Ermittlung, ob ein Betrieb im Anwendungsbereich der Störfall-Verordnung liegt, sind die Gefahrenkategorien relevant, wenn der namentlich genannte Stoff in Mengen unterhalb seiner individuellen Mengenschwelle vorliegt und eine Berechnung nach der Quotientenregel erfolgt.“

7.6.2 Wärmeezeugung Heizöl

Heizöl wird aufgrund der hohen Energieeffizienz in Ölheizungen eingesetzt. Es gibt verschiedene Heizölsorten wie z. B. Extra Leicht (Heizöl EL), Leicht (Heizöl L) oder Schwer (Heizöl S). Störfallrechtlich unterscheiden sich die Heizölsorten aufgrund der unterschiedlichen Entzündbarkeit und Umweltverträglichkeit. Gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung werden Heizöle folgendermaßen in die namentlich genannten gefährlichen Stoffe eingestuft:

Tabelle 9: Einstufung von leichtem und schwerem Heizöl gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung

Nr.	Name	Gefahrenkategorien ³	Mengenschwellen [kg]	
			untere	obere
2.3.3	Gasöle (einschließlich Dieselkraftstoffe, leichtes Heizöl und Gasölmischströme)	P – Physikalische Gefahren E – Umweltgefahren	2.500.000	25.000.000
2.3.4	Schweröle	E – Umweltgefahren	2.500.000	25.000.000

Die Menge an benötigtem Heizöl hängt vom Wärmebedarf bzw. der Größe des Betriebes ab. Bei einer durchschnittlichen Betriebsgröße sind Heizöltanks mit einem Volumen von 25 m³ realistisch, was bei einer Dichte von 0,860 kg/l einer Menge von 21.500 kg und einem Quotienten von 0,0086 pro Tank entspricht.

Fazit: Da die Mengenschwellen sehr hoch sind, ist es unwahrscheinlich, dass ein Betrieb zur Herstellung von Lithiumbatterie-Zellen aufgrund der Heizanlage in den Geltungsbereich der Störfall-Verordnung fällt.

7.7 Lager für Fertigprodukte/ Erzeugnisse

Für die Anwendung der Störfall-Verordnung ist zu beachten, dass es sich bei den Batterien im „End-of-line-conditioning“, bei der Lagerung nach der Produktion und nach der Nutzung um Erzeugnisse nach REACH (Artikel 3 Nr. 3 der REACH-Verordnung ((EG) Nr. 1907/2006)) handelt. Diese werden nicht nach Anhang I der Störfall-Verordnung zugeordnet, so dass die Summe der gefährlichen Stoffe in den Batterien nicht zur Einstufung einer Anlage bzw. eines Lagers als Betriebsbereich führt.

³ Die Gefahrenkategorien werden nur relevant, wenn der namentlich genannte Stoff in Mengen unterhalb seiner individuellen Mengenschwelle vorliegt und eine Berechnung nach der Quotientenregel erfolgt.

7.8 Nicht spezifikationsgerechte Zellen

Nicht spezifikationsgerechte Zellen werden in den verschiedenen Prozessschritten bei Auffälligkeiten aussortiert, spätestens jedoch bei der Diagnose vor/während/nach der Formierung. Je nach Qualität des Herstellungsprozesses werden Zahlen von bis zu 10 % Ausschuss-Zellen /40/ /41/ genannt. Diese Zellen stellen relevante Mengen an Rohstoffen dar und werden meist gezielt dem Recycling zugeführt. Es ergeben sich jedoch bei deren Lagerung zwei Gefahren: Das Erwärmen bis zum thermischen Durchgehen sowie das Auslaufen und somit Freisetzen der Chemikalien.

Während die spezifikationsgerechten Zellen wie unter 7.7 beschrieben als Erzeugnisse der Produktionslinie gelten und entsprechende Mengen bei der Lagerung nicht berücksichtigt werden müssen, sind die nichtspezifikationsgerechten Zellen keine Erzeugnisse, sondern in der Regel Abfall. Damit sind gefährliche Stoffe vorhanden und bei der Summierung der Stoffmengen nach Störfall-Verordnung zu berücksichtigen.

7.9 Gefährliche Abfälle

Die Einstufung von Stoffen und Gemischen, die unter die Stoffliste des Anhangs I der Störfall-Verordnung fallen, erfolgt nach den Regeln der CLP-Verordnung. Gefährliche Abfälle fallen nicht in den Anwendungsbereich der CLP-Verordnung. Trotzdem werden sie bei der Ermittlung der Anwendbarkeit der Störfall-Verordnung berücksichtigt. Sie können gleichwertige Eigenschaften besitzen wie gefährliche Stoffe oder Gemische und werden deshalb der ähnlichsten Gefahrenkategorie nach Anhang I der Störfall-Verordnung zugeordnet (siehe Anhang I Mengenschwellen Nr. 8). Liegen Detailkenntnisse über die Inhaltsstoffe des Abfalls vor, kann dieser nach der in der CLP-Verordnung beschriebenen Vorgehensweise eingestuft werden. Wenn nur die Abfallschlüsselnummern nach der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (AVV) bekannt sind, bietet der Leitfaden „Einstufung von Abfällen gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung“ (KAS-61) /42/ der Kommission für Anlagensicherheit (KAS), der im März 2023 verabschiedet wurde, Hilfestellung zur Zuordnung der Abfallschlüssel gefährlicher Abfälle zu den Gefahrenkategorien des Anhangs I der Störfall-Verordnung. Eine weitere Hilfe findet sich in dem Excel-Tool der Bezirksregierung Köln⁴.

⁴ <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/themen/umwelt-und-natur/abfallwirtschaft/stoerfallrelevanz-abfaelle>

8 **Havarien - Brandfall** **(Bildung gefährlicher Stoffe)**

Die größte abzuschätzende Gefahr im Zellproduktionsprozess stellt die Fähigkeit einer defekten Zelle zur Selbstauslösung eines Brands dar. Dabei kann die Zelle durch innere Erwärmungsprozesse eine gefährliche exotherme Reaktion eingehen. Dabei entstehen typischerweise (kurzzeitig) Temperaturen um 700 °C (NMC). Problematisch ist diese Reaktion dann, wenn sie als Zündquelle wirkt und weitere Lithiumzellen oder aber andere entzündbare Stoffe, wie z. B. vorgehaltene Lösemittel im Prozess oder weitere Lithiumzellen entzündet. Die hohe im Prozess vorhandene Brandlast kann zu einer Freisetzung großer Mengen von Brandgasen im Falle eines Brandes führen. Diese Brandgase sind i. d. R. durch eine unvollständige Verbrennung so zusammengesetzt, dass sie ebenfalls entzündbar sind, gefährliche explosionsfähige Atmosphären entstehen und sie aufgrund der vorhandenen Zündquellen reagieren können. Neben dem entstehenden Wasserstoff hat insbesondere Kohlenmonoxid (CO) mit Luftgemischen einen sehr weiten Explosionsbereich (laut GESTIS /43/ ca. 11 Vol-% bis 76 Vol-%).

Das Thermische Durchgehen von Lithium-Ionen Zellen kann in Abhängigkeit von der Zellchemie unterschiedliche Verläufe annehmen (von Gasentwicklung über Flammentwicklung bis zur Explosion). Entsprechend unterscheiden sich jeweils gefährliche Brandzersetzungsprodukte. Brandprodukte sind

- Brandgase / Rauchgase: sie enthalten insbesondere als störfallrelevante Stoffe: Fluorwasserstoff, Kohlenmonoxid, fluorierte Kohlenwasserstoffe, kurzkettige Kohlenwasserstoffe wie Acetylen, ggf. Cyanide und Polyhalogenierte Dibenzodioxine und -furane (bei Kunststoffummantelung o. ä.) etc.
- Asche (Schwer)-Metalloxide, teilweise noch LiPF_6 , fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) oder perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFAs)

Während der Brandbekämpfung entsteht mit Verunreinigungen belastetes Löschwasser.

Typische Zusammensetzung von Brandgasen und freigesetzte Mengen lassen sich aus der Metastudie /43/ ableiten.

Während der Brandbekämpfung können mit Phosphorsäure, Lithiumfluorid, Cobaltoxid und Lithiumcobaltoxid sowie unverbranntem Lithiumphosphorfluorid gewässergefährdende Stoffe

im Löschwasser anfallen. Es ist ein Brandschutzkonzept zu erarbeiten, in dem die Löschwasserrückhaltung nach dem Stand der Sicherheitstechnik berücksichtigt wird und das Gegenstand der Anlagengenehmigung ist.

Mögliche Erkenntnisquellen sind daher:

- Löschwasser-Rückhalte-Richtlinie (LÖRÜRl, Fassung August 1992) /45/
- Referentenentwurf zur Änderungsverordnung der AwSV /46/
- TRwS 779 (2023) Abschnitt 5.4 /47/
- VdS 2557 (Leitlinien zur Schadenverhütung der deutschen Versicherer) /48/
- VCI-Leitfaden „Löschwasserrückhaltung“ /49/

Die Eckdaten aus den genannten Regelungen berücksichtigen noch keinen zusätzlichen Wasserbedarf für Kühlzwecke, wie er im Brandfall bei Anlagen mit Lithium-Akkus besteht.

Die Bestimmung des erforderlichen Löschwasser-Rückhaltevolumens bedarf einer engen Abstimmung zwischen und mit den zuständigen Behörden (i. d. R. Baubehörde, Brandschutzdienststelle, örtlichen Feuerwehren, Wasserbehörde).

9 Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen auf Grundlage der BetrSichV

Für den Herstellungsprozess von Batteriezellen ist ein ganzheitliches Schutzkonzept unter Berücksichtigung aller relevanter Rechtsbereiche erforderlich. In diesem Kapitel wird auf Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten während des Produktionsprozesses von Batteriezellen eingegangen. Für Gefahrstoffe wird auf Kapitel 6 verwiesen.

9.1 Pflichten für Arbeitgeber

Der Arbeitgeber trägt gemäß Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) die Verantwortung für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei sämtlichen Arbeitstätigkeiten. Er ist verpflichtet, die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Umstände zu treffen, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit beeinflussen.

Hinsichtlich des Herstellungsprozesses von Batteriezellen sind über die im vorangegangenen Kapitel 6.3.2 bereits angesprochene GefStoffV **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** hinaus weitere Arbeitsschutzverordnungen relevant, insbesondere die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) /15/ und ggf. weitere Arbeitsschutzverordnungen wie die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) /50/ und die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) /51/. In diesem Kapitel wird insbesondere auf Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen bei der Fertigung von Batteriezellen auf Grundlage der BetrSichV eingegangen.

Die BetrSichV konkretisiert die Anforderungen des ArbSchG bezogen auf die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln sowie Anforderungen an den Schutz anderer Personen im Gefahrenbereich überwachungsbedürftiger Anlagen. Im Sinne der BetrSichV sind dabei alle Werkzeuge, Geräte, Maschinen oder Anlagen, die für die Arbeit verwendet werden, sowie überwachungsbedürftige Anlagen zu betrachten. Hierzu definiert die BetrSichV Pflichten für den Arbeitgeber sowie für den Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen ohne Beschäftigte.

Der Arbeitgeber muss gemäß BetrSichV sicherstellen, dass vor der erstmaligen Verwendung von Arbeitsmitteln, die bei der Fertigung von elektrischen Energiespeichern verwendet werden, alle Anforderungen zum Schutz der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der

Beschäftigten umgesetzt und im Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung dokumentiert sind. Weiterhin muss er Prüfungen gemäß §§ 14-16 BetrSichV veranlassen und deren Ergebnisse dokumentieren.

9.2 Gefährdungsbeurteilung nach BetrSichV und Prüfungen als Grundlage für das sichere Arbeiten

Grundpflicht gemäß BetrSichV § 3 ist die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung bezogen auf die sichere Verwendung von Arbeitsmitteln durch Beschäftigte während des Herstellungsprozesses von Batteriezellen. Die Anforderungen an die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung werden durch die Technische Regel TRBS 1111 /52/ konkretisiert. Bezüglich der Gefährdungsbeurteilung für Arbeiten mit Gefahrstoffen wird auf Kapitel 6.3.2 verwiesen.

Bei der Gefährdungsbeurteilung sind Gefährdungen durch die verwendeten Arbeitsmittel, durch Arbeitsgegenstände und durch die Arbeitsumgebung zu beachten.

Neben dem bestimmungsgemäßen Betrieb sind auch vorhersehbare Betriebsstörungen und ggf. damit verbundene zusätzliche Gefährdungen der Beschäftigten zu berücksichtigen.

Der Arbeitgeber hat sich die Informationen zu beschaffen, die für die Gefährdungsbeurteilung notwendig sind. Dies sind insbesondere die Technische Regeln und Empfehlungen des Ausschusses für Betriebssicherheit aber auch vorliegende Vorschriften, Regeln und Informationen der Unfallversicherungsträger. Gebrauchs- und Betriebsanleitungen, die von Herstellern von Arbeitsmitteln bereitzustellen sind, enthalten Angaben zu vorgesehener Betriebsweise und vorhersehbaren Fehlanwendungen sowie ggf. Angaben zu erforderlichen Arbeitsschutzmaßnahmen in Bezug auf herstellerseitig nicht vermeidbare Restgefährdungen, z. B. Tragen von PSA und ggf. besondere Qualifikationsanforderungen. Des Weiteren kann der Arbeitgeber ihm zugängliche Erkenntnisse aus der arbeitsmedizinischen Vorsorge nutzen.

Aus der Gefährdungsbeurteilung sind notwendige und geeignete Schutzmaßnahmen analog dem in Kapitel 6.3.2 für die Arbeiten mit Gefahrstoffen geltenden STOP-Prinzip abzuleiten.

Arbeitsmittel, die Schäden verursachenden Einflüssen ausgesetzt sind, die zu Gefährdungen der Beschäftigten führen können, hat der Arbeitgeber wiederkehrend von einer zur Prüfung befähigten Person prüfen zu lassen. Der Arbeitgeber hat hierzu Art und Umfang erforderlicher Prüfungen von Arbeitsmitteln sowie die Fristen von wiederkehrenden Prüfungen zu ermitteln und festzulegen. Für überwachungsbedürftige Anlagen sind zusätzliche Anforderungen gemäß § 18 und Anhang 2 BetrSichV zu beachten.

9.3 Gefährdungen und Arbeitsschutzmaßnahmen während des Produktionsprozesses von Batteriezellen

9.3.1 Allgemeine Anmerkungen

Ausgehend von den in Kapitel 4 dargestellten Bauformen von Batteriezellen gibt es unterschiedliche fertigungstechnische Prozessketten für die Herstellung von Batteriezellen. Gefährdungen und erforderliche Schutzmaßnahmen sind abhängig von den angewendeten Technologien und vom Automatisierungsgrad der Fertigungsprozesse, der bezogen auf den Produktionsprozess von Batteriezellen unterschiedlich ist und derzeit sowohl automatisierte als auch manuelle Fertigungsschritte umfasst.

9.3.2 Fertigungsprozessschritte, auftretende Gefährdungen und Arbeitsschutzmaßnahmen

Die Herstellung der Batteriezelle umfasst die drei Hauptprozessschritte Elektrodenfertigung, Zellausbauelemente und Zellausbauelemente, die in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 näher erläutert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Prozessanforderungen und angewendeter Technologien sowie möglicher Technologiealternativen enthält /53/ .

Die betriebliche Gefährdungsbeurteilung ist bezogen auf die Arbeitstätigkeiten der Beschäftigten durchzuführen. Dabei sind Gefährdungen durch die verwendeten Arbeitsmittel und Arbeitsstoffe, durch Arbeitsgegenstände und durch die Arbeitsumgebung zu beachten.

Auf Grund der unterschiedlichen Technologien, die zur Anwendung kommen können und des unterschiedlichen Automatisierungsgrades können die Gefährdungen für die Beschäftigten unterschiedlich sein, so dass Einzelfallbetrachtungen erforderlich sind.

Hilfestellung für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung und sowie eine Übersicht möglicher Gefährdungsfaktoren und gefährdungsbezogene Arbeitsschutzmaßnahmen bietet das BAuA-Handbuch Gefährdungsbeurteilung /54/. Als weitere Handlungshilfen wird auf die DGUV-Schriften FB AKTUELL Herstellung von Hochvoltspeichern (FBHM-123) /55/ sowie FB AKTUELL Umgang mit Hochvoltspeichern (FBHM-124) /56/ hingewiesen.

Wesentliche Gefährdungen, die während des Herstellungsprozesses von Batteriezellen in verschiedenen Prozessschritten auftreten können, sind:

- Gefährdungen durch toxische Stoffe / Gefahrstoffe
- Gefährdung durch Brände / Explosionen

- Gefährdungen durch elektrische Gefährdungen in Form von Körperdurchströmung und Störlichtbögen
- Mechanische Gefährdungen, insbesondere durch unsachgemäßes Handling oder durch scharfe Kanten bei der manuellen Handhabung
- Ggf. Gefährdungen durch Strahlung, z. B. bei Schweißarbeiten, Laserschnitt beim Vereinzeln bzw. Heraustrennen von Elektrodenblättern im Prozessschritt Zellaussortierung.

Die Festlegung erforderlicher Arbeitsschutzmaßnahmen muss auf der Grundlage des STOP-Prinzips erfolgen.

Als technische Schutzmaßnahme ist eine weitestmögliche Automatisierung der Produktionsprozesse anzustreben, durch die die genannten Gefährdungen für Beschäftigte vermieden oder minimiert werden. Allerdings ist zu beachten, dass diese Schutzmaßnahmen bei Störungen im Produktionsprozess in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt sein können und insbesondere bei Instandhaltungsarbeiten oder auch bei Nacharbeiten Gefährdungen von Beschäftigten auftreten können.

Zur Reduzierung der Gefährdungen bei der Arbeit können durch den Betreiber von Anlagen beispielsweise die folgenden technischen Schutzmaßnahmen ergriffen werden:

- Einsatz von Industrierobotern
- Einsatz von trennenden Schutzeinrichtungen, Schutzeinrichtungen mit Annäherungsreaktion
- Arbeiten mit geschlossenen Systemen, Absaugungen, Raumbelüftungen mit entsprechenden Filtersystemen

Zur Vermeidung von mechanischen Gefährdungen durch scharfe Kanten bei der manuellen Handhabung von Batteriezellen sind geeignete Schutzhandschuhe zu tragen.

Darüber hinaus sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Es ist eine ausreichende Qualifikation und Befähigung der Beschäftigten für die jeweiligen Arbeitstätigkeiten sicherzustellen.
- Der Arbeitgeber muss Unterweisungen der Beschäftigten über vorhandene Gefährdungen, erforderliche Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln sowie zu

Maßnahmen bei Betriebsstörungen, Unfällen und zur Ersten Hilfe bei Notfällen durchführen und Betriebsanweisungen bereitstellen.

- Der Arbeitgeber muss für die Arbeitstätigkeiten geeignete und sichere Arbeitsmittel bereitstellen.
- Auf Grundlage der Gefährdungsbeurteilung sind Art und Umfang wiederkehrender Prüfungen von Arbeitsmitteln sowie Anforderungen an das Prüfpersonal festzulegen. Konkrete Prüfanforderungen für überwachungsbedürftige Anlagen enthält Anhang 2 BetrSichV.

Einige Arbeiten wie Mischen, Beschichten, Trocknen oder Kalandern finden in Reinräumen statt, in denen persönliche Schutzausrüstung (PSA) getragen werden muss. Die Auswirkung des Tragens von PSA auf die Beschäftigten ist bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen und entsprechende Maßnahmen zu treffen (z. B. Pausengestaltung).

Durch einen hohen Automatisierungsgrad des Fertigungsprozesses können einerseits Gefährdungen vermieden werden, andererseits sind damit erhöhte Anforderungen an die funktionale Sicherheit der verwendeten Arbeitsmittel und Anlagen verbunden. Das betrifft insbesondere die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von sicherheitsrelevanten Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen (MSR-Einrichtungen), die als technische Schutzmaßnahme für die sichere Verwendung eines Arbeitsmittels inklusive einer überwachungsbedürftigen Anlage eingesetzt werden. Anforderungen dazu enthält die Technische Regel TRBS 1115 /57/.

10 Grundlegende Anforderungen zur Vermeidung von Störfällen und zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen (Brandfall) während der Batteriezellenproduktion

Der Bericht KAS-1 /58/ definiert den Begriff „Sicherheitsrelevante Anlagenteile“:

„Als sicherheitsrelevante Anlagenteile sind alle Apparate, Maschinen, Systeme, Ausrüstungsteile und Einrichtungen anzusehen, von deren Auslegung, Beschaffenheit und Funktionsweise in besonderer Weise die Sicherheit der Anlage und die Begrenzung der Störfallauswirkungen abhängen und bei deren Versagen ein Störfall nicht ausgeschlossen werden kann.“

Aus § 6 Abs. 1 Störfall-Verordnung ergeben sich folgende Verpflichtungen:

„(1) Der Betreiber hat zur Erfüllung der sich aus § 3 Absatz 1 oder 3 ergebenden Pflichten über die in den §§ 4 und 5 genannten Anforderungen hinaus

1. die Errichtung und den Betrieb der sicherheitsrelevanten Anlagenteile zu prüfen sowie die Anlagen des Betriebsbereichs in sicherheitstechnischer Hinsicht ständig zu überwachen und regelmäßig zu warten,
2. die Wartungs- und Reparaturarbeiten nach dem Stand der Technik durchzuführen,
3. die erforderlichen sicherheitstechnischen Vorkehrungen zur Vermeidung von Fehlbedienungen zu treffen,
4. durch geeignete Bedienungs- und Sicherheitsanweisungen und durch Schulung des Personals Fehlverhalten vorzubeugen.“

Sicherheitsrelevante Anlagenteile können sein:

- Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt
- Anlagenteile mit besonderer Funktion

10.1 Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt

„Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt sind solche Anlagenteile, in denen ein Stoff, der in Anhang I der Störfall-Verordnung genannt ist, in einer Menge vorhanden

sein oder entstehen kann, die geeignet ist, einen Störfall zu erzeugen.“ (s. KAS-1). Erläuterungen zur Ermittlung der sicherheitsrelevanten Stoffmenge sind in KAS-1 dargestellt.

In den Produktionsanlagen zur Herstellung von Batteriezellen können gefährliche Stoffe in störfallrelevanten Mengen vorhanden sein oder dort entstehen. Gefahrstoffe in Haupt- und Nebenanlagen der Batteriezellenherstellung werden in Kapitel 6 betrachtet. Die Anwendung der Störfall-Verordnung und der chemikalienrechtlichen Einordnung erfolgt in Kapitel 7.

10.2 Anlagenteile mit besonderer Funktion

Zu den sicherheitsrelevanten Anlagenteilen mit besonderer Funktion zählen:

- Maschinen- und Ausrüstungsteile zur Gewährleistung des sicherheitsrelevanten Massen- und Energieflusses,
- Brand- und Explosionsschutzeinrichtungen,
- PLT-Sicherheitseinrichtungen sowie
- Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen, die dazu bestimmt sind, den Eintritt einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs zu verhindern oder Auswirkungen eines Störfalls zu begrenzen.

Tabelle 10 gibt beispielhaft einen Überblick über Sicherheitsmaßnahmen in sicherheitstechnisch relevanten Bereichen zur Herstellung von Batteriezellen. Die im Einzelfall sicherheitsrelevanten Maschinen- und Anlagenteile sind im Rahmen der systematischen Gefahrenanalyse zu ermitteln.

Tabelle 10: Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen in sicherheitstechnisch relevanten Bereichen

BE	Bezeichnung	Betriebliche Einrichtungen, Sicherheitsmaßnahmen
01	Elektrodenfertigung (Mischbereich Kathode)	<ul style="list-style-type: none"> - Drucküberwachungseinrichtungen - Differenzdruckmessung über Filter - Sicherheitsventile - Endlagenüberwachung der Ventile - Not-Aus-System
04	Prozesslager	<ul style="list-style-type: none"> - Rückhalteeinrichtung - Automatische Löschanlage und Brandmeldeanlage
06	Elektrolyt-Tankfarm	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenlaufschutz und Druckmessung mit Abschaltung der Pumpen zur Be- bzw. Abfüllung von Elektrolyt/EMC/Abfallgemisch - Stickstoff-Inertisierung - Strömungswächter - ANA-Sicherung - Rückhalteeinrichtung - Auffangfläche im Be- und Entladebereich mit Gefälle in den Auffangraum der Elektrolyttankfarm - Berstscheiben - Sicherheitsventile - Drucküberwachung (PIC)
		<ul style="list-style-type: none"> - Überfüllsicherung (LZA++) - Füllstandsüberwachung (LISA+-) - Temperaturüberwachung für die Lagertankbehälter (TICA) und das Temperiergerät - Automatische Löschanlage und Brandmeldeanlage - Doppelmantel der Lagertankbehälter mit Leckageüberwachung - Leckagesonden im Auffangraum
09	Ammoniak-Kälteanlage	<ul style="list-style-type: none"> - Löschanlage und Brandmeldeanlage - Brandschutzklappen - Gaswarnanlage - Notstromversorgung - Sicherheitsventile - Absperrklappen - Not-Aus-System

10.2.1 Grundlegende Anforderungen an Maschinen- und Ausrüstungsteile zur Gewährleistung des sicherheitsrelevanten Massen- und Energieflusses

Pumpen

Alle Pumpen, die toxische Stoffe fördern, sind als gekapselte Maschinen mit Magnetkupplungen auszuführen.

Ferner können Pumpen mit doppelwirkender Gleitringdichtung verwendet werden, die ein Austreten umweltgefährdender und entzündbarer Stoffe wirksam verhindern.

Rohrleitungen und Armaturen

Leitungen, in denen Produkte gefördert werden, die bei geringen Außentemperaturen (z. B. Frost) stocken oder einfrieren können und hierdurch Betriebsstörungen oder Verunreinigungen verursachen können, sind durch Begleitheizung und Isolierung gegen Einfrieren zu schützen.

Flanschverbindungen von Rohrleitungen für gefährliche, insbesondere entzündbare Stoffe werden, soweit es sich nicht um Instrumentenleitungen handelt, ausschließlich an verfahrenstechnisch, sicherheitstechnisch oder für die Instandhaltung notwendigen Positionen eingesetzt. Alle anderen Rohrleitungsverbindungen sind als Schweißverbindung ausgeführt.

Rohrleitungen sind durch Anstrich, Spritzüberzug oder durch gleichwertige Maßnahmen gegen äußere Korrosion zu schützen.

Gehäuse von Pumpen und Absperrrichtungen sind ausschließlich aus zugelassenen Materialien, die dem aktuellen Stand der Sicherheitstechnik entsprechen, auszuführen.

10.2.2 Grundlegende Anforderungen an den Brand- und Explosionsschutz

Allgemeine Anforderungen

Brandlasten und potenzielle Zündquellen sowie Explosionsgefahren werden erfasst und in der Gefahrenanalyse berücksichtigt. Eine Entzündung entzündbare Stoffe ist grundsätzlich zu unterstellen.

Der bauliche Brandschutz ist durch

- Brandwände,
- Brandabschnitte,
- Feuerschutzabschlüsse,
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

zu gewährleisten.

Es sind nichtbrennbare oder ausreichend feuerwiderstandsfähige Bau- und Werkstoffe zu verwenden. Die Verwendung brennbarer Bau- und Werkstoffe ist zulässig, wenn es konstruktiv unvermeidbar ist. Potenzielle Zündquellen sind soweit möglich zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Es sind Vorkehrungen zu treffen, die verhindern, dass durch anlageninterne Brände ein Störfall ausgelöst wird und dass Maßnahmen und Einrichtungen zur Verhinderung Begrenzung von Störfallauswirkungen beeinträchtigt werden. Darüber hinaus sind Vorkehrungen zu treffen, die die Ausbreitung eines nicht gelöschten oder nicht selbst verlöschenden Brandes verhindern.

Brandlasten sind durch Ausbildung von Brandabschnitten aus ausreichend feuerwiderstandsfähigen Bauteilen einzuschließen oder durch ausreichende Abstände voneinander zu trennen. Bei notwendigen Öffnungen in den Brandabschnitten ist eine Übertragung des Brandes auf einen anderen Brandabschnitt zu verhindern. Insbesondere ist zu verhindern, dass der Brand auf Rettungswege sowie auf Anlagenbereiche, die als Auslöser für einen Störfall in Frage kommen, übergreift.

Innerhalb der Gebäude sind Rettungswege angeordnet. Diese sind vor Brandeinwirkungen so zu schützen, dass ausreichend lange zur Verfügung stehen, um die Selbstrettung, die Fremdrettung von Personen, die Brandbekämpfung sowie sicherheitstechnisch erforderliche Personalhandlungen zu ermöglichen.

Der organisatorische Brandschutz ist durch:

- Alarm- und Gefahrenabwehrplan
- Flucht- und Rettungspläne
- Brandschutzordnung
- Brandschutzbegehungen
- Feuererlaubnisschein für Heißenarbeiten
- Brandschutzbeauftragte
- Brandschutz Helfer / Evakuierungshelfer

zu gewährleisten.

Für alle Anlagen und Gebäude existieren Feuerwehreinsatzpläne gemäß DIN 14095 /59/.

Im Brandschutzkonzept sind alle erforderlichen baulichen, technischen und organisatorischen Maßnahmen zu beschreiben, die die Entstehung eines Brandes und seine Ausbreitung verhindern. Im Rahmen des Brandschutzkonzeptes ist auch die Löschwasserrückhaltung zu betrachten. Bezüglich der Anforderungen an die Löschwasserrückhaltung siehe Kapitel 8. Das Brandschutzkonzept wird durch einen Sachverständigen nach Bauordnung erstellt.

Falls die Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre nicht vermieden werden kann, sind die explosionsgefährdeten Bereiche in Zonen einzuteilen und die erforderlichen Schutzmaßnahmen festzulegen. Das Explosionsschutzkonzept soll insbesondere folgende Maßnahmen umfassen:

- Ermittlung der Bereiche, in denen eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann,
- Beurteilung der Explosionsgefahr in den ermittelten Bereichen,
- Einteilung der Bereiche in Ex-Zonen,
- Festlegung und Durchführung von Schutzmaßnahmen.

Das Explosionsschutzkonzept wird durch eine fachkundige Person gemäß § 2 Abs. 16 und § 6 Abs. 11 Gefahrstoff-Verordnung erarbeitet.

Elektrische und nicht-elektrische Geräte sind in der jeweiligen Gerätekategorie nach ATEX gemäß Explosionsschutzkonzept auszuführen.

Explosionsschutzeinrichtungen und Brandschutzeinrichtungen müssen regelmäßig wiederkehrenden Prüfungen zum Nachweis der Funktionsfähigkeit unterzogen werden. Die Prüffristen sind entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung der zu schützenden Einrichtung festzulegen.

Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen in Anlagen zur Batteriezellenherstellung

Beispiele für Maßnahmen zur Vermeidung und Begrenzung von Bränden:

- Verwendung von nichtbrennbaren oder ausreichend feuerwiderstandsfähigen Bau- und Werkstoffen für Maschinen und Anlagenteile sowie für Beschichtungen, Wärme- und Kabelisolierungen.
- Vollflächige Ausstattung der Produktionsgebäude mit Brandmeldeanlagen und automatischen Löschanlagen (z. B. Löschschaumanlagen bzw. Sprinkleranlagen) sowie Rauch- und Wärmeabzugsanlagen.
- Bildung kleiner Lager- bzw. Brandabschnitte, die Anzahl der Zellen ist je Brandabschnitt möglichst klein zu halten.
- Einhaltung ausreichender Abstände zwischen potenziellen Zündquellen und Brandlasten. Die elektrische Beladung der Batteriezellen sollte räumlich getrennt von den Lagerbereichen für Batteriezellen durchgeführt werden.

- Begrenzung der Lagerguthöhe in den Lagerbereichen für Batteriezellen.
- Überwachung mittels Wärmebildkameras, Rauchmelder.
- Kontrollen beim Wareneingang und in den Produktionsschritten mit denen Abweichungen, die zu Störungen führen können, erkannt werden. Insbesondere ist sicherzustellen, dass nur Batteriezellen in einwandfreiem Zustand in die Lager und zur Auslieferung gelangen.
- Vorhaltung von Quarantäne-Bereichen für auffällige Transportgebilde aus Batterien und einzelne Batterien. Zur Lagerung beschädigter Batteriezellen kommen beispielsweise ausreichend feuerwiderstandsfähige Quarantäne-Container mit Auffangräumen für Löschmittel infrage.
- Flüssigkeitsundurchlässige Rückhalteflächen für Löschwasser und Schaffung von Auffangräumen für Löschwasser.
- Sicherstellung einer ausreichenden Löschwasserversorgung unter Beachtung des höheren Wasserbedarfs zu Kühlzwecken.

In explosionsgefährdeten Bereichen, die in Zonen eingeteilt sind, sind folgende Kategorien von Geräten im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU (ATEX) /60/ zu verwenden:

- in Zone 0 oder Zone 20: Geräte der Kategorie 1,
- in Zone 1 oder Zone 21: Geräte der Kategorie 1 oder der Kategorie 2,
- in Zone 2 oder Zone 22: Geräte der Kategorie 1, der Kategorie 2 oder der Kategorie 3.

Die Kategorien der Geräte beziehen sich dabei sowohl auf elektrische als auch auf nichtelektrische ATEX-Geräte.

Gemäß Gefahrstoffverordnung (Anhang 1 Nummer 1.8) dürfen Geräte, welche nicht den oben genannten Kategorien entsprechen, nur dann verwendet werden, wenn deren sichere Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen aus der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung hervorgeht.

10.2.3 PLT-Einrichtungen

Die Klassifizierung von PLT-Einrichtungen in Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen und in daraus resultierenden Anforderungen wie Redundanz und Verfügbarkeit hängt von dem abzusichernden Risiko ab.

Zur Verhinderung unzulässiger Betriebszustände kann die Messung und Begrenzung folgender Prozessparameter sicherheitsrelevant sein:

- Druck,
- Temperatur,
- Mengenstrom bzw. Zulauf.

Als schadensbegrenzende Einrichtungen sind weiterhin Gasetektoren in Betracht zu ziehen.

Automatische Ausschleusung und sicheres Abklingen von durchgehenden Batteriezellen

Wenn sich im Bereich Formation/Reifelagerung eine Batteriezelle erwärmt, durchgeht oder in Brand gerät, wird das betroffene Zell-Tray mittels automatischem Greifsystem komplett ausgeschleust und zu einem Wassertank befördert. Das Manipulationssystem transportiert das Zell-Tray vertikal über einen Wassertank, senkt dieses darin ab und verschließt den Behälter, bis die Reaktion überwacht abgeklungen ist.

Der Tank wird während der Abklingphase ausgetauscht und in einen Überwachungsbereich verbracht. Das entstehende Abwasser wird abgeleitet, entsorgt und der Tank gereinigt. Anschließend ist der Tank wieder einsetzbar.

Literatur

- /1/ Europäische Batteriezellfertigung: Verzehnfachung der Produktionskapazitäten bis 2030 - Fraunhofer ISI
<https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-17-Batteriezellfertigung-Verzehnfachung-2030.html>.
- /2/ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP), zuletzt geändert durch Delegierte Verordnung (EU) 2024/197 der Kommission vom 18. Oktober 2023 (ABl. L 2024/197 vom 05. Januar 2024)
- /3/ Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung - 12. BImSchV)
in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. März 2017 (BGBl. I S. 483),
zuletzt geändert durch
Artikel 107 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).
- /4/ Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV)
in der Fassung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49)
zuletzt geändert durch
Artikel 7 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146)
- /5/ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission
- /6/ Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. 12. Juli 2023
- /7/ Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen

- /8/ Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen
- /9/ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz) (BImSchG); letzte Änderung durch Art. 1 G vom 12. August 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 189)
- /10/ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4.BImSchV); letzte Änderung durch Art. 1 VO vom 12. Oktober 2022 ([BGBl. I S. 1799](#))
- /11/ Kommission für Anlagensicherheit
KAS-43 „Empfehlungen zur Ermittlung der Menge gefährlicher Stoffe bei außer Kontrolle geratenen Prozessen“
geänderte Fassung (gemäß Beschluss der KAS vom 29.11.2018)
- /12/ Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (ArbSchG); letzte Änderung durch Art. 32 des G vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236)
- /13/ Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (GefStoffV); letzte Änderung durch Art. 1 VO vom 2. Dezember 2024 (BGBl. I Nr. 384)
- /14/ Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (BetrSichV); letzte Änderung durch Art. 7 G vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146, 3170)
- /15/ Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV); letzte Änderung durch Art. 10 G vom 27. März 2024 (BGBl. I Nr. 109 vom 27. März 2024)
- /16/ Störfall-Kommission, SFK-GS-33, Leitfaden „Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik“, verabschiedet auf der 39. SFK-Sitzung am 16. Januar 2002
- /17/ Technische Regel für Anlagensicherheit TRAS 310 Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser Neufassung September 2022
- /18/ Technische Regel für Anlagensicherheit TRAS 320 Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten, Fassung 06/2022

- /19/ Kommission für Anlagensicherheit, KAS-51 „Leitfaden Maßnahmen gegen den Eingriff Unbefugter“, am 14. November 2019 von der KAS verabschiedet
- /20/ Kommission für Anlagensicherheit, KAS-19 „Leitfaden zum Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum Sicherheitsmanagementsystem“ 3. Überarbeitete Fassung, 2018
- /21/ Kommission für Anlagensicherheit, KAS-55 „Leitfaden Mindestangaben im Sicherheitsbericht“, am 15.04.2021 von der KAS verabschiedet
- /22/ UN. Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual of tests and criteria. 2019. Verfügbar unter: <https://digitallibrary.un.org/record/3846833>
- /23/ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegelgesetz - BattG) in der Fassung vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582) zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2280)
- /24/ PEM, RWTH Aachen und VDMA. Komponentenherstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle [online]. Eigendruck 1. Auflage, 2019. Verfügbar unter: https://battery-news.de/wp-content/uploads/2020/03/Komponentenherstellung_einer_Lithium-Ionen-Batteriezelle_online.pdf
- /25/ UNITY CONSULTING & INNOVATION. Produktion einer Lithium-Ionen-Batterie [online]. Verfügbar unter: <https://www.unity.de/de/leistungen/batterieproduktion-fuer-die-e-mobilitaet/produktion-einer-lithium-ionen-batterie/> (17.03.2023)
- /26/ PEM, RWTH Aachen und VDMA. Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle [online]. Eigendruck 2. überarbeitete Auflage, 2015. Verfügbar unter: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaaqixv
- /27/ Fraunhofer ISIT. Fraunhofer ISIT entwickelt energieeffizienten und umweltfreundlichen Herstellungsprozess für Elektrodenfolien in Lithium-Polymer Akkus [online]. Pressemeldung, 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.isit.fraunhofer.de/de/newsroom/aktuelles/fraunhofer-isit-entwickelt-energieeffizienten-und-umweltfreundli.html>
- /28/ Europäische Norm EN ISO 14644

- /29/ INGENIEUR.de. Natrium-Ionen-Batterie: CATL mixt Zell-Chemie und löst weltweites Problem [online]. 06.08.2021. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/natrium-ionen-batterie-catl-mixt-neue-zell-chemie/> (17.03.2023)
- /30/ MICROTEx. Was ist eine Festkörperbatterie? [online]. 18.01.2023. Verfügbar unter: <https://microtexindia.com/de/festkoerperbatterie/> (17.03.2023)
- /31/ TARGRAY. Coin cell manufacturing process [online]. Verfügbar unter: <https://www.targray.com/li-ion-battery/equipment/coin-cell-manufacturing#:~:text=Process%20of%20Manufacturing%20Coin%20Cell&text=Mill%20battery%20materials%20into%20smaller,created%20electrodes%20using%20a%20heater> (17.03.2023)
- /32/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe: Januar 2006, BArBl. Heft 1/2006 S. 41-55, Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2025, S. 155 [Nr. 8] (vom 20.03.2025), Berichtigt: GMBL 2025 S. 234 [Nr. 10-11] (vom 06.05.2025)
- /33/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 600 Substitution, Ausgabe: Juli 2020, GMBI 2020 S. 405-418 Nr. 21] (vom 24.07.2020)
- /34/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 527 Tätigkeiten mit Nanomaterialien, Ausgabe: Januar 2020, GMBI 2020 S. 102-118 [Nr. 6] (vom 19.02.2020)
- /35/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 905 Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, Ausgabe: März 2016, GMBI 2016 S. 378-390 [Nr. 19] vom 03.05.2016, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2021, S. 899 [Nr. 41] vom 13.07.2021
- /36/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 906 Verzeichnis krebserzeugender oder keimzellmutagener Tätigkeiten oder Verfahren nach § 2 Absatz 3 Nummer 4 GefStoffV, Ausgabe: April 2023, GMBI 2023, S. 634-635 [Nr. 30] (vom 20.04.2023), Geändert und ergänzt: GMBI 2025, S. 403 [Nr. 20] (vom 18.07.2025)
- /37/ Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 910 Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen Ausgabe: Februar 2014, GMBI 2014 S. 258-270 vom 02.04.2014 [Nr. 12], Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2025, S. 156 [Nr. 8] (vom 20.03.2025)

- /38/ Gustavo M. Hobold, Aliza Khurram Betar M. Gallant, Chem. Mater. 2020, 32, 2341–2352,
https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.chemmater.9b04550?ref=article_openPDF
- /39/ Nowak et.al., Batteries & Supercaps 2021, 4, 1731–1738
<https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/toc/25666223/2021/4/4>
- /40/ Kehrer, Mario & Locke, Marc & Offermanns, Christian & Heimes, Heiner & Kampker, Achim. (2021). Analysis of Possible Reductions of Rejects in Battery Cell Production during Switch-On and Operating Processes. Energy Technology. 9. 10.1002/ente.202001113
- /41/ "Unlocking the value of recycling scrap from Li-ion battery manufacturing: Challenges and outlook": <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775323013319>
- /42/ Kommission für Anlagensicherheit
 KAS-61 „Einstufung von Abfällen gemäß Anhang I der Störfall-Verordnung“
 09.03.2023
- /43/ GESTIS (Gefahrstoffinformationssystem) <https://gestis.dguv.de/>
- /44/ Rappsilber, T.; Yusfi, N.; Krüger, S.; Hahn, S.-K.; Fellingner, T.-P.; Krug von Nidda, J.; Tschirschwitz, R., Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries. Journal of Energy Storage 2023, 60, 106579,
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106579>.
- /45/ Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe (Löschwasser-Rückhalte-Richtlinie - LÖRÜRL)
- /46/ Referentenentwurf zur ersten Verordnung zur Änderung der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/awsv_novelle/Entwurf/awsv_novelle_refe_bf.pdf
- /47/ TRwS 779 „Technische Regel wassergefährdender Stoffe – Allgemeine technische Regelungen“
- /48/ Leitlinien zur Schadenverhütung der deutschen Versicherer „Planung und Einbau von Löschwasser-Rückhalteeinrichtungen“ (VdS 2557)
https://vds.de/fileadmin/Website_Content/Images/VdS_Publikationen/vds_2557_web.pdf

- /49/ VCI-Leitfaden Löschwasserrückhaltung
<https://www.vci.de/langfassungen-pdf/2014-12-18-leitfaden-loeschwasserrueckhaltung.pdf>
- /50/ Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV); letzte Änderung durch Art. 5 Abs. 6 V v. 18.10.2017 I 3584
- /51/ Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV); letzte Änderung durch Art. 3 V v. 21.7.2021 I 3115
- /52/ Technische Regel für Betriebssicherheit TRBS 1111 Gefährdungsbeurteilung; zuletzt geändert durch GMBI 2024 S. 874 [Nr. 41/42] (04.11.2024)
- /53/ Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle, Frankfurt am Main, Januar 2023
Eigendruck PEM der RWTH Aachen & VDMA, 4. Auflage ISBN: 978-3-947920-26-6
- /54/ M. Kittelmann, L. Adolph, A. Michel, R. Packroff, M. Schütte, Sabine Sommer (Hrsg.):
Handbuch Gefährdungsbeurteilung. aktualisierte Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2023, DOI: 10.21934/baua:fachbuch20230531
- /55/ Fachbereich AKTUELL FBHM-123 Herstellung von Hochvoltspeichern
<https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4517>
- /56/ Fachbereich AKTUELL FBHM-124 Umgang mit Hochvoltspeichern
<https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4518>
- /57/ Technische Regel TRBS 1115 "Cybersicherheit für sicherheitsrelevante Mess-, Steuer- und Regelungseinrichtungen"
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBS/TRBS-1115-Teil-1.html>
- /58/ Kommission für Anlagensicherheit
KAS-1 „Sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches und Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile“ 02.06.2015
- /59/ DIN 14095 Feuerwehrpläne für bauliche Anlagen
- /60/ Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung) Text von Bedeutung für den EWR

Informationsquellen

- o Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)

<https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/TRGS.html>

- o Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis der Europäische Chemikalienagentur (EU-harmonisierte Einstufungen, Selbsteinstufungen der Herstellenden)

<https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/cl-inventory-database>

- o Verzeichnis der gemäß EU-Chemikalienverordnung REACH registrierten Stoffe

<https://echa.europa.eu/de/information-on-chemicals/registered-substances>

- o Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG) mit Werkzeugen zur Beurteilung der Gefährdung durch Einatmen, Hautkontakt, Brand- und Explosion, Schutzleitfäden für häufige Tätigkeiten mit Gefahrstoffen

<https://www.baua.de/DE/EMKG>

- o Handbuch "Gefährdungsbeurteilung" der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

<https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fachbuecher/Gefaehrdungsbeurteilung.html>

- o Informationen zu Gefahrstoffen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)

<https://www.dguv.de/de/praevention/themen-a-z/gefahrstoffe/index.jsp>

- o Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)

<https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/>

- o Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_4_2013/

Anhang 1 Normung / Regelwerke / Stand der Technik

Normung

Das Ergebnis der durchgeführten Normenrecherche ist im Anhang 1 aufgelistet. Wie man erkennen kann, sind aktuell zahlreiche Normungsaktivitäten in der Bearbeitung bzw. wurden jüngst abgeschlossen. Man kann also hier vom Stand der Technik ausgehen. Es handelt sich dabei um jeweils um Produktnormen.

Hinweis: Normen sind nur dann verbindlich einzuhalten, wenn sie zwischen Vertragspartnern für verbindlich festgestellt wurden (Bestellspezifikation).

Nationale Technische Regelwerke

Im Bereich der Regelwerkssetzung (d. h. konkretisierende Vorschriften zu bestehenden Gesetzen/Verordnungen mit einer "Vermutungswirkung" hinsichtlich der Konformität zu den Anforderungen in diesen Gesetzen/Verordnungen) findet man aktuell folgende Technische Regeln in Deutschland:

Tabelle 1: Elektrochemische Batterie-Speicher in Regelwerken

Rechtsbereich	Aspekt	Regelwerksgeber	Technische Regeln
Arbeitsschutz	Verwendung von Arbeitsmitteln	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)	FBHM-123 "Herstellung von Hochvoltspeichern"
			FBHM-124 "Umgang mit Hochvoltspeichern"
			FBFHB-018 "Hinweise zum betrieblichen Brandschutz bei der Lagerung und Verwendung von Lithium-Ionen-Akkus"
	Betriebsorganisation	DGUV Information 209-093 "Batteriefachkundige"	
	Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)	Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A2.2 "Maßnahmen gegen Brände"
Allgemeines Privatrecht	Sachversicherung	Verband der Sachversicherer	VdS 3103 "Lithium-Batterien"
			VdS 3885 "Elektrofahrzeuge in geschlossenen Garagen – Sicherheitshinweise für die Wohnungswirtschaft"
			VdS 3856 "Sprinkler-Schutz von Lithium Batterien"
Energiewirtschaftsrecht (EnWG)	Energieanlagen; VDE-Anwendungsregel im Sinne von VDE 0022	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE)	VDE-AR-E 2510-2 "Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz"
			VDE-AR-E 2510-50 "Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien – Sicherheitsanforderungen"

Baurecht	Betriebsräume für elektrische Anlagen (<i>hier</i> : Zusätzliche Anforderungen an Batterieräume)	Bundesland	§7 EltBauV <i>Anforderungen werden direkt in der VO aufgeführt</i>
----------	---	------------	---

Im Gefahrstoffrecht existieren folgende Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) mit Bezug zu Einsatzstoffen (bzw. Abfallstoffe) für / von BES:

- TRGS 520 (2024) "Errichtung und Betrieb von Sammelstellen und Zwischenlagern für Kleinmengen gefährlicher Abfälle"
- TRGS 561 (2017) „Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen“
- TRGS 800 "Brandschutzmaßnahmen"

Im Immissionsschutzrecht (BImSchG / BImSchV) ist in Bezug auf eingesetzte / anfallende Stoffe (Art und Menge) auf die Störfall-Verordnung abzustellen. Konkretisierende Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) gibt es derzeit nicht.

Tabelle 2: Elektrochemische Speicher in Normen

Norm/Regelwerk*	Merkmale		
	Merkmal 1	Merkmal 2	Merkmal 3
VdS 3103	Zellchemie: ausschließlich LIB Lagerung und Bereitstellung von Lithium-Batterien in Produktions- und Lagerbereichen	Einstufung nach Energieinhalt / Masse Lithium-Ionen-Batterien mit b) geringer Leistung ≤ 100 Wh je Batterie c) mittlerer Leistung > 100 Wh je Batterie und ≤ 12 kg brutto je Batterie d) hoher Leistung > 100 Wh je Batterie und/oder > 12 kg brutto je Batterie	Einstufung nach Energieinhalt / Masse Lithium-Metall-Batterien mit a) geringer Leistung ≤ 2 g Li je Batterie b) mittlerer Leistung > 2 g Li je Batterie und ≤ 12 kg brutto je Batterie c) hoher Leistung > 2 g Li je Batterie und > 12 kg brutto je Batterie
VdS 3856	Zellchemie: ausschließlich LIB	Einteilung nach Energieinhalt je Lagereinheit	-
§7 EltBauV	Beschaffenheitsanforderungen an den Aufstellraum	-	-
VDE-AR-E 2510-2	komplette Energiespeichersysteme eines Herstellers	Systeme aus Einzelkomponenten verschiedener Hersteller	-
VDE-AR-E 2510-50	stationäre Batteriespeicher	Zellchemie: ausschließlich LIB	private und kleingewerbliche Anwendungen (ohne medizinische Produkte)
VDE-AR-E 2510-60	modulare Batteriesysteme	Spannung von max. 60 V DC während der Energiebereitstellung oder des Ladevorgang	Parallelschaltung der Module
KTA 3703	geschlossene Bauweise	ortsfest	Zellchemie: Blei
FBHM-123**	Hochvoltspeicher 60V-1500V DC	Zellchemie: ausschließlich LIB	-
FBHM-124			

* - hier nur diejenigen, die auch Abgrenzungskriterien enthalten und die sich ausschließlich auf EES beziehen

** - DGUV Information 209-093: Hochvolt (HV) umfasst gemäß UNECE R100 Spannungen > 60 V und ≤ 1500 V Gleichspannung (DC) oder > 30 V und ≤ 1000 V Wechselspannung (AC)

Tabelle 3: Existierende Definitionen von Arten von LiBs

Normung	Titel	Begriff / Merkmale
DIN EN IEC 62485-5 (VDE 0510-485-5)	<i>Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Teil 5: Lithium-Ionen-Batterien für stationäre Anwendungen</i>	stationäre Sekundärbatterien und Batterieanlagen mit einer Höchstspannung von 1 500 V Gleichstrom für Eigenheim/Wohngebäude (HESS) oder industrielle Umgebungen Netzgebunden oder netzunabhängig
VDE-AR-E 2510-50	„Stationäre Energiespeichersysteme mit Lithium-Batterien – Sicherheitsanforderungen“	<ul style="list-style-type: none"> - tragbar oder ortsfest - private und kleingewerbliche Anwendungen
DIN EN IEC 63056 (VDE 0510-56)	„Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nichtsäurehaltigen Elektrolyten – Sicherheitsanforderungen für Lithium-Sekundärzellen und -batterien für die Verwendung in elektrischen Energiespeichersystemen“	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht für tragbare Zellen - Die Zelle enthält gewöhnlich einen Elektrolyten, der aus einem Lithiumsalz und einer organischen Lösemittelverbindung in flüssiger, gelförmiger oder fester Form besteht, und besitzt ein Metall- oder ein Laminatgehäuse. Sie ist nicht für die Verwendung in einem Gerät bereit, da sie noch nicht mit ihrem endgültigen Gehäuse, ihrer Anschlussanordnung und ihrer elektronischen Regeleinrichtung ausgestattet ist.
DIN VDE V 0510-100 (VDE V 0510-100)	„Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Fahrzeugbereich für den Einsatz in ortsfesten Anwendungen“	<ul style="list-style-type: none"> - Traktionsbatterien für Straßenfahrzeuge zugelassen sind, die der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) unterliegen - Es kann sich dabei sowohl um gebrauchte als auch um neue Batterien handeln. - Diese Vornorm ist anwendbar für Traktionsbatterien, mindestens bestehend aus mehreren Batteriezellen, einer oder mehreren Sicherheitseinrichtungen, einem Batteriemanagementsystem (BMS), einem Gehäuse und externen Schnittstellen.

GFI Umwelt – Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH

Geschäftsstelle der
Kommission für Anlagensicherheit

Königswinterer Str. 827
D-53227 Bonn

Telefon 49-(0)228-90 87 34-0
Telefax 49-(0)228-90 87 34-9
E-Mail kas@gfi-umwelt.de
www.kas-bmu.de
