



BVES
BUNDESVERBAND
ENERGIESPEICHER



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.
International Solar Energy Society, German Section



StoREgio ZVEH



Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher

Stand: Version 1.0

Ausgabe: 11/2014

Inhalt

Inhalt	2
1. Allgemeine Bemerkungen	3
2. Anwendungsbereich	3
2.1 Details zur Identifikation von Lithium-Ionen-Systemen	4
3. Begriffe, Definitionen	5
3.1 Abschalten	5
3.2 Anode und Kathode	5
3.3 Batterie	5
3.4 Batterie-Management-System (BMS).....	6
3.5 Dendriten.....	6
3.6 Derating	6
3.7 Eigensicheres Batteriespeichersystem	6
3.8 Kurzschluss intern/extern	6
3.9 Plating	7
3.10 Separator	7
3.11 SoC und SoH.....	7
3.12 Tiefentladung.....	7
3.13 Überladung	8
3.14 Überstrom.....	8
3.15 Sicherheitsmechanismen in Zellen	8
3.16 System Batterie, Umrichter und Steuerung incl. Gehäuse	9
3.17 Zelle Lithium-Ionenzelle als einzelne elektrochemische Einheit.	9
4. Zellauswahl, Systemdesign und Betrieb.....	9
4.1 Zellauswahl und Zellverarbeitung.....	9
4.2 Notwendige Informationen des Zellherstellers für den Batteriehersteller	10
4.3 Betriebsfenster	100
4.4 Einzelzellüberwachung	111
4.5 Maßnahmen beim Verlust der Eigensicherheit	111
5. Prüfung der Einhaltung dieser Schutzziele in einem Batteriesystem durch akkreditierte Labore.....	122
6. Schutzzielkatalog.....	133
6.1 Schutzziele für die Zelle	133
6.2 Schutzziele für die Batterie	155
6.3 Schutzziele fürs System.....	177
6.4 Allgemeine Schutzziele	200

1. Allgemeine Bemerkungen

Dieser Sicherheitsleitfaden für Li-Ionen Hausspeichersysteme wurde unter Beteiligung nachfolgender Institutionen erstellt: Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES), Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH), Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS) sowie StoREgio Energiespeichersysteme e.V.. Die Erstellung erfolgte unter fachlicher Begleitung durch TÜV Rheinland, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., CETECOM ICT Services GmbH, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

Die Anforderungen dieses Sicherheitsleitfadens erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Neben den hier aufgeführten Normen und Standards in Abschnitt 6 können auch andere Normen und Standards herangezogen werden, sofern diese mindestens die gleichen oder strengere Kriterien fordern.

Herstellern wird empfohlen, die Schutzziele in Kapitel 6 zu berücksichtigen und im Rahmen einer Risikoanalyse auch allgemeine Gefahrenquellen zu betrachten (siehe Anhang 6.4 Allgemeine Schutzziele).

Über die Anforderungen dieses Sicherheitsleitfadens hinaus, gelten weiter gesetzliche Vorgaben wie z. B. Niederspannungsrichtlinie, Produktsicherheitsgesetz, Batteriegelgesetz, EMV-Richtlinie, UN-Transporttests und andere.

Die Anwendung dieses Sicherheitsleitfadens ist freiwillig. Die Aktualisierung an den zukünftigen Stand der Technik des Leitfadens ist vorgesehen. Anmerkungen können bei den Geschäftsstellen der beteiligten Organisationen eingereicht werden.

2. Anwendungsbereich

Dieser Katalog legt Schutzziele fest für Batteriespeichersysteme mit und ohne Einbeziehung von Umrichtern auf Basis von wiederaufladbaren Lithium-Ionenzellen (Sekundär-Lithium-Ionenzellen) für die Nutzung als stationäre Heimspeicher - z. B. für die Verwendung in Kombination mit Photovoltaik-Anwendungen.

Zum Oberbegriff Lithium-Ionenzelle gehören wiederaufladbare Zellen, die zur Energiespeicherung die Interkalation von Lithium-Ionen in geeignete Wirtsmaterialien (z. B. Graphit oder Titanat) nutzen.

Nicht im Anwendungsbereich dieses Sicherheitsleitfadens sind alle nicht wiederaufladbaren Batterien (sog. Primärbatterien) und wiederaufladbare Batterien auf Basis von Zellen, die nicht mit Interkalation vom Lithium funktionieren. Dazu zählen u. a. Lithium-Metallzellen (kurz oft auch LMP genannt), sog. Konversionssysteme mit Lithium wie z. B. Lithium-Schwefel und Lithium-Luftzellen, Nickel-Cadmium-Zellen und bleibasierte Zellen, Hochtemperaturzellen (z. B. Natrium-Schwefel, kurz NaS) und Redox-Flow-Systeme.

Anmerkung: Lithium-Metallzellen (LMP) sind Lithium-Ionenzellen ähnlich und zeichnen sich zum Teil durch eine deutlich höhere Energiedichte (Kapazität in Wh pro Volumen- oder Gewichtseinheit) aus, aber nutzen metallisches Lithium auf der Anode statt Interkalation. Eine höhere Energiedichte und metallisches Lithium gehen jedoch bei Energiespeichern derzeit mitunter mit kritischerem Verhalten im Fehlerfall einher. Da eine hohe Energiedichte bei stationären Speichern in vielen Fällen nicht das Hauptkriterium ist, sollte die Wahl der Zellentechnologie für zertifizierte stationäre Speicher sorgfältig abgewägt werden. Die Schutzziele bleiben aber in allen Fällen gleich.

2.1 Details zur Identifikation von Lithium-Ionen-Systemen

Lithium-Ionenzellen sind der Oberbegriff für eine Reihe unterschiedlicher Systeme, die sich u. a. durch die Zusammensetzung der Kathode, der Anode und des Elektrolyten unterscheiden.

Bei der Typisierung gibt es kein einheitliches Benennungssystem. So können Buchstaben in typischen Kurzbezeichnungen hauptsächlich Anoden oder Kathodenmaterialien bzw. Verbindungen bezeichnen, alternativ Dotierungen oder Elektrolytformen. Auch wenn „L“ oder „Li“ nicht in der Kurzbezeichnung vorkommen, ist in Lithium-Ionenzellen trotzdem Lithium enthalten. Weitere Metalle sind oft als Oxid oder Phosphatverbindung enthalten. Siehe Tabelle 1.

Beispiele:

- Definition über die Kathode:
Eine Zelle mit Graphit-Anode und einer Kathode aus Lithium, Nickel, Mangan und Cobalt kann unter verschiedenen Abkürzungen benannt werden oder mit einer chemischen Formel, die meist die Zusammensetzung des Aktivmaterials der Kathode darstellt: NMC, NCA
- Definition über die Anode:
Eine Zelle mit Titanat-Anode kann die Bezeichnung LTO (Lithium-Titanat-Oxid) haben. Das Kathodenmaterial (z. B. NCA, LFP) wird dabei nicht definiert und ggf. separat angegeben.
- Definition über den Elektrolyten:
Lithium-Polymer, kurz LiPo bezeichnet eine Lithium-Ionenzelle mit polymerisiertem (festem oder gelförmigem) statt flüssigem Elektrolyt. Damit ist weder ein bestimmtes Anoden- noch Kathodenmaterial beschrieben.

Nicht ausschließlich, aber häufig sind Batterien auf Basis dieser Lithium-Ionenzellen aufgebaut:

- LFP bzw. Lithium-Eisenphosphat kurz auch Eisenphosphat-Zellen genannt
- LMO bzw. Lithium-Manganoxid
- LTO bzw. Lithium-Titanatoxid
- NCA bzw. Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid
- NMC bzw. Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxid,
- Ausnahme: LMP wird zum Teil für Lithium-Metall-Polymer-Zellen (nicht im Anwendungsbereich dieses Leitfadens) als auch für Lithium-Manganphosphat genutzt.

Weiterhin enthält eine Lithium-Ionenzelle Komponenten, von denen einige brennbar sind (z. B. Elektrolyt, Graphit). Daher kann per se kein Lithium-Ionenzelltyp als nicht brennbar bezeichnet werden.

Tabelle 1: Häufigste in Lithium-Ionen-Zellen- oder Batteriebezeichnungen vorkommende Buchstaben oder Abkürzungen.

Kurzzeichen in Zelltypen	Element-symbol	Bedeutung	A: Anode K: Kathode E: Elektrolyt
A	Al	Aluminium	K
C	Co	Cobalt	K
F	Fe	Eisen	K
L	Li	Lithium	K, A, E
M	Mn	Mangan	K
N	Ni	Nickel	K
O	O	Oxid eines oder mehrerer Kathodenmetalle	K
P	P	Phosphat eines oder mehrerer Kathodenmetalle	K
P / Po / Polymer		Elektrolyt in polymerisierter statt flüssiger Form	E
S	Si	Siliziumverbindung im Anodengraphit	A
T	Ti	Titan bzw. Titanatverbindung	A
Y	Y	Yttrium	K

Lithium-Ionenbatterien sind bei korrekter Beschriftung ebenfalls an ihrer UN-Klassifizierung (UN3480 oder UN3481) für Gefahrguttransport zu erkennen.

3. Begriffe, Definitionen

3.1 Abschalten

Unter Abschalten wird in dieser Richtlinie verstanden, dass Laden und Entladen sicher unterbunden werden. Das BMS darf für die Überwachung und Diagnose weiter betrieben werden.

3.2 Anode und Kathode

Die Begriffe Anode und Kathode werden in diesem Leitfaden für die Elektroden der einzelnen Lithium-Ionenzellen verwendet, folgen der Definition für elektrochemische Elemente und sind nicht zu verwechseln mit den Anschlussbenennungen von elektronischen Bauteilen (z. B. einer Halbleiterdiode), deren Pol mit dem positiveren Potential als Anode bezeichnet wird. Bei einer Spannungsmessung ist die Kathode einer Lithium-Ionenzelle positiv gegenüber ihrer Anode.

Anmerkung: Bei elektrochemischen Elementen wird die Elektrode als Anode bezeichnet, bei der die Oxidationsreaktion (Elektronenabgabe eines Atoms oder Ions an den Ableiter) beim Entladen der Zelle stattfindet. Siehe auch IEC 60050-482 International Electrotechnical Vocabulary – Part 482: Primary and secondary cells and batteries.

3.3 Batterie

Batteriedefinition in diesem Leitfaden: Vollständige eigensichere Einheit aus miteinander verschalteten Zellen und Schutzeinrichtungen.

Batterie-Submodul: Submodul aus miteinander verschalteten Zellen, das nur für den Gebrauch in einer Batteriebaueinheit vorgesehen ist, aber auch transportsicher sein muss (=> best. Schutzeinrichtungen für UN38.3 T.1-T.5, nicht T.7).

3.4 Batterie-Management-System (BMS)

Das BMS erfüllt neben anderen Funktionen bzgl. Batteriesicherheit drei wichtige Aufgaben:

- Messen und Überwachen der einzelnen Zellspannungen und -temperaturen (siehe auch 4.4 Einzelzellüberwachung)
- Steuern der Schutzeinrichtungen, z. B. Relais
- Kommunikation mit anderen Systemen, z. B. Umrichter und Steuerung

3.5 Dendriten

Dendriten sind metallische Lithium-Abscheidungen, die von der Anode zur Kathode wachsen und so zellinterne Kurzschlüsse verursachen können, die durch äußere Maßnahmen und Schutzbeschaltung nicht unterbunden werden können. Je nach Zellart, -größe und -ladezustand gehören interne Kurzschlüsse somit zu den kritischsten Fehlerzuständen.

Starkes Dendritenwachstum ist die Folge von z. B. Plating (siehe 3.9), Inhomogenitäten zwischen den Elektroden oder Verunreinigungen des Elektrodenmaterials während der Herstellung bzw. anderer Fehler im Herstellungsprozess oder auch von unsachgemäßem Verbau der Lithium-Ionenzellen. Bei starken lokalen Dendritenwachstum, sog. Dendritennestern, können sich Zellen auch mechanisch deutlich verändern. Das zeigt sich z. B. in einer Dickenzunahme oder Ausbuchtungen des Zellgehäuses.

3.6 Derating

Derating (dt. Drosseln oder Lastminderung) bezeichnet bei Batterien die gesteuerte Stromreduktion in Abhängigkeit von anderen Parametern (hauptsächlich der Temperatur), um Zellschädigungen (u. a. Plating oder Überhitzung) zu vermeiden (siehe auch 4.3 Betriebsfenster - Abbildung 1).

3.7 Eigensicheres Batteriespeichersystem

Eigensichere Batteriespeichersysteme, Batterien oder Wechselrichter sind dadurch gekennzeichnet, dass im Einfehlerfall kein unsicherer Zustand auftreten kann. Dies beinhaltet Fehler, die sowohl von außen als auch durch Fehler im System bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung (z. B. interner Kurzschluss, Ausfall einer Elektronikkomponente) verursacht werden können.

Ein unsicherer Zustand ist dann gegeben, wenn Gefahren (z. B. mechanisch, chemisch, thermisch elektrisch) für Personen oder Sachen bestehen können. Situationen, bei denen Gefahren für Personen oder Sachen bestehen können, sollen benannt sowie auch die entsprechenden Gegenmaßnahmen zur Risikominimierung beschrieben sein (z. B. in den Installations- und Betriebsanweisungen). Sind sowohl die Batterie als auch der Wechselrichter/das Ladegerät bestimmungsgemäß eingesetzt und jeweils eigensicher, ist auch das System als eigensicher zu betrachten.

Siehe auch 4.5 Maßnahmen beim Verlust der Eigensicherheit

3.8 Kurzschluss intern/extern

Je nach Abschnitt des Sicherheitsleitfadens bezeichnen interner und externer Kurzschluss unterschiedliche Fehler.

Tabelle 2

	Kurzschluss intern	Kurzschluss extern
Zelle	Ein Kurzschluss innerhalb einer oder mehrerer Zellen, z. B. durch Defekt des Separators, gebildete Dendriten oder Durchbohren mit einem leitenden Objekt.	Eine oder mehrere Zellen werden an ihren Polen kurzgeschlossen.

Batterie	Ein Kurzschluss über eine, mehrere oder alle verschalteten Zellen innerhalb einer Batterie.	Kurzschluss an den äußeren Polen einer Batterie, mehrere miteinander in Reihe verschaltete Batteriemodule oder bei einem der Module.
System	Ein Kurzschluss von Gleich- oder Wechselstromleitungen innerhalb einer Kombination von Batterie und Umrichter – z. B. durch starke Beschädigung eines gemeinsamen Gehäuses oder Anschlussfehler.	Ein Kurzschluss am AC- oder DC-Ausgang des Systems

3.9 Plating

Plating (dt. Metallüberzug oder Plattierung) bezeichnet in diesem Leitfaden den ungewünschten Effekt der Abscheidung von metallischem Lithium auf der Anode statt der Einlagerung der Lithium-Ionen im Anodenmaterial (z. B. Graphit). Es wird hauptsächlich verursacht durch für den jeweiligen Graphittyp zu hohe Ladeströme oftmals im Zusammenspiel mit zu tiefen Temperaturen (siehe auch 4.3 Betriebsfenster - Abbildung 1), reduziert die intrinsische Sicherheit der Lithium-Ionenzellen deutlich und zieht weitere Effekte nach sich (z. B. verstärktes Dendritenwachstum, Innenwiderstandszunahme, Kapazitätsverlust).

3.10 Separator

Der Separator ist eine ionendurchlässige Membran, die Anode und Kathode elektrisch voneinander trennt. Defekte des Separators wie z. B. Schrumpfen bei starker Hitzeentwicklung oder durch den Separator gewachsene Dendriten, führen zu zellinternen Kurzschlüssen.

Sicherheitsvorteile bieten Separatoren, die auch bei hohen Temperaturen oder internen Kurzschlüssen formstabil bleiben und Anode und Kathode sicher trennen.

3.11 SoC und SoH

SoC – State-of-Charge ist der Kennwert für den Ladezustand von Zellen und Batterien. Er wird meist in % von der verfügbaren Kapazität angegeben, die durch Alterung mit der Zeit abnimmt. In stationären Batteriesystemen wird der Prozentwert oft übersetzt in kWh.

SoH – State-of-Health ist die Bezeichnung für den Alterungszustand von Batterien und Zellen. Er wird u. a. dazu genutzt, die Performance der gealterten Zelle im Vergleich zum Neuzustand anzugeben.

Beide Werte können nicht direkt gemessen werden. Die Berechnung erfolgt im Batterie-Management-System aus vorhandenen Messwerten wie z. B. Strom, Spannungsdifferenzen und Temperatur.

3.12 Tiefentladung

Tiefentladung (engl. Deep Discharge) bzw. Tiefentladungsprüfungen werden in verschiedenen Normen unterschiedlich definiert:

Eine Zelle oder Batterie wird mit einer Last bis zu einer Spannung unterhalb ihrer Entladeschlussspannung entladen (siehe auch 4.3 Betriebsfenster - Abbildung 1).

Eine Zelle wird mit einer Spannungsquelle einer Umpollung ausgesetzt, z. B. um ihre Fähigkeit zu testen einer Falschpolung standzuhalten (engl. Forced Discharge).

a) oder b) je nach Zellverhalten.

Eine Tiefentladung gemäß a) ist in der Anwendung als Serienprodukt unter bestimmten Umständen denkbar.

Eine forcierte Tiefentladung gegebenenfalls bis zur Umpolung ist innerhalb einer Batterie auch bei richtiger Polung aller Zellen möglich.

Beispiel: Eine oder mehrere Zellen in einer Reihenschaltung haben deutlich weniger Kapazität als die anderen Zellen (z. B. durch ungleichmäßige Alterung) und werden einer Umpolladung ausgesetzt, weil die Batterie entladen wird bis auch die Zellen mit größerer Kapazität leer sind.

In diesem Leitfaden bezeichnet daher Option a) die Tiefentladung als zu vermeidenden Fehler, wobei Tests zum Tiefentladeverhalten nach b) durchgeführt werden können.

Hinweis: Lithium-Ionen-Zellen können auch nach einer kompletten Tiefentladung wieder eine Leerlaufspannung (engl. OCV - Open-circuit voltage) aufbauen, die innerhalb des erlaubten Betriebsfensters liegt. Daher kann allein durch eine Spannungsmessung beim Einschalten des BMS nicht in allen Fällen sicher ausgeschlossen werden, dass eine oder mehrere Zellen vorher tiefentladen waren. Um das Wiederaufladen sicher zu verhindern, kann die Zelle z. B. durch eine kurze Entladung getestet werden.

3.13 Überladung

Überladung (engl. Overcharge) wird in verschiedenen Normen unterschiedlich definiert:

Eine oder mehrere Zellen eines Batteriesystems werden durch eine größere Spannung als die Ladeschlussspannung geladen (siehe auch 4.3 Betriebsfenster - Abbildung 1).

Eine Zelle oder Batterie wird mit höherem Strom geladen als vom Zellhersteller spezifiziert. Mehr als beim Entladen muss die Temperaturabhängigkeit des max. Ladestromes berücksichtigt werden (siehe 3.14 Überstrom).

In diesem Leitfaden wird a) als Überladung (engl. Overcharge) und b) als Überstrom (engl. Overcurrent) bezeichnet.

3.14 Überstrom

In vielen Datenblättern sind die max. Ströme für Puls- und Dauerstrom nur als einzelne Werte über den gesamten Temperatureinsatzbereich angegeben. Folgt man nur diesen Angaben, kann man trotzdem in den Zellen beim Ladevorgang Plating (siehe 3.9 Plating) erzeugen, wenn man im unteren Grenzbereich der Zelltemperatur mit dem lt. Datenblatt erlaubten max. Strom, je nach Zelle und Angaben auch mit geringeren Strömen, lädt. In vielen Fällen müssen also detailliertere Werte der Zellen berücksichtigt werden, als die auf dem Datenblatt angegebenen. Das gilt vor allem für den Ladevorgang.

Überstrom beim Laden bezeichnet einen für die jeweilige Zelltemperatur zu hohen Puls- oder Dauerstrom. Speziell beim Laden im unteren Bereich des Temperaturfensters von Lithium-Ionenzellen müssen bei den meisten Arten die Ladeströme reduziert werden (siehe 3.6 Derating), um Plating (siehe 3.9 Plating) zu vermeiden.

Überstrom beim Entladen ist weniger temperaturkritisch. Er liegt vor, wenn die vom Hersteller festgelegten Maximalwerte für Puls- und Dauerstrom überschritten werden.

3.15 Sicherheitsmechanismen in Zellen

Bei einigen Lithium-Ionenzelltypen sind Sicherheitsmechanismen innerhalb des Zellgehäuses verbaut, die nicht bei allen Technologien zwingend notwendig sind, die auch bei parallel geschalteten Zellen die Sicherheit deutlich erhöhen können. Dies sind z. B.:

- **PTC** (positive temperature coefficient): Bauteil, dessen elektrischer Widerstand bei steigender Temperatur größer wird, um den Lade- oder Entladestrom zu begrenzen.
- **CID** (circuit interrupt device oder current interrupt device): Bei Gasdruck innerhalb der Zelle (z. B. durch begonnene Überladung und steigender Temperatur) wird der elektrische Kontakt zu einem der Pole unterbrochen und dadurch weitere Fehler (z. B. Brand) vermieden.

In nahezu allen Zellen ist zusätzlich als Schutz gegen unkontrolliertes Bersten oder Explodieren der Zelle eine Schutzmaßnahme vorhanden, z. B. eine Berstscheibe, ein Sicherheitsventil oder eine andere Sollbruchstelle. Bei zu hohen Temperaturen und/oder intensiven Zersetzungsvorgängen baut der Elektrolyt soviel Gasdruck in der Lithium-Ionenzelle auf, dass die Zellverpackung bzw. das Zellgehäuse dem nicht mehr standhält. Bei vollständig gekapselten Batteriegehäusen sollten nicht nur die Zellen sondern auch das Gehäuse eine Vorrichtung zur Vermeidung von zu hohem Überdruck aufweisen.

3.16 System

Batterie, Umrichter und Steuerung inkl. Gehäuse

3.17 Zelle

Lithium-Ionenzelle als einzelne elektrochemische Einheit.

4. Zellauswahl, Systemdesign und Betrieb

In bestehenden Normen und Betriebsanleitungen der jeweiligen Systeme sind viele, überwiegend elektrotechnische Sicherheitsanforderungen abgedeckt und müssen berücksichtigt werden. Ein möglichst sicheres System muss ebenfalls die elektrochemischen Charakteristika und Gefährdungspotentiale der verbauten Zellen (u. a. mögliche Schädigungen und deren Folgen) berücksichtigen. Dazu zählt u. a. die richtige Betriebsweise, angemessene Absicherung und die entsprechende Komponentenauswahl.

4.1 Zellauswahl und Zellverarbeitung

Die Auswahl der Lithium-Ionenzellen, die zu Batteriesystemen verbaut werden, gehört zu den wichtigsten Entscheidungen bei der Komponentenwahl des Herstellers.

Zellbeschädigungen und Brände, die durch äußere Einflüsse auf die Zelle (z. B. Fehlbetrieb) entstehen, können durch gute Batteriekonstruktion, entsprechende Betriebsweise und Schutzelemente vermieden werden. Aber Probleme innerhalb von Zellen, die durch mangelnde Herstellungs- und/oder Materialqualität, ggf. zusätzlich bauartbedingt verursacht werden, können durch Sicherheitsmechanismen außerhalb der Zellen kaum bis gar nicht eingedämmt werden.

Neben hochwertigen und gut aufeinander abgestimmten Elektrodenmaterialien mit hohem Reinheitsgrad sind auch die Herstellungsmethode und Gehäuseart entscheidend, um möglichst sichere Lithium-Ionenzellen zu fertigen.

Herstellung

Qualitativ hochwertige Zellen werden heute nahezu ausnahmslos vollautomatisch und in streng kontrollierten Umgebungsbedingungen (u. a. sehr geringe Luftfeuchtigkeit) hergestellt. Die Gründe dafür sind u. a.:

- Halbzeuge (u. a. durch Beschichtungen und Foliendicken der Elektroden des Separators im Mikrometerbereich), die außerhalb der Zellverpackung/das Zellgehäuse leicht beschädigt werden, können und müssen entsprechend mit hoher Sorgfalt verbaut werden.

- Homogenität, Präzision (z. B. genaue Ausrichtung zwischen Anode und Kathode) und Vermeidung von Verunreinigungen (z. B. durch Hautfett bei Berührung) sind wichtige Voraussetzungen für möglichst sichere Zellen.

Insbesondere bei teilautomatisierten Herstellungsverfahren ist eine höhere Sorgfalt anzuwenden, da z. B. kleine Defekte im Separator oder andere sich nicht unbedingt immer bei der Qualitätskontrolle zeigen, aber im Betrieb sicherheitskritisch werden können. In jedem Fall sind ein geeignetes Qualitätsmanagement sowie eindeutige Kennzeichnungen der einzelnen Zellen (z. B. Chargen-Nr. etc.) notwendig, um sicherheitskritischen Vorkommnissen vorzubeugen und negative Auswirkungen im Falle eines Fehlers einzugrenzen und zu vermeiden.

Hinweis: Mit steigender Zellkapazität und oder der Energiedichte steigt die Auswirkung eines internen Kurzschlusses.

Gehäuseart

In Lithium-Ionenzellen muss die Feuchtigkeit so gering wie möglich gehalten werden, weil sie neben starker Alterung auch sicherheitskritische Effekte (z. B. frühere Gasbildung) hat. Die Zelle inkl. aller Gehäusebestandteile muss eine sehr hohe Beständigkeit gegen das Eindringen von Feuchtigkeit haben, z. B. ein Gehäuse aus Metall, eine Außenfolie mit Aluminiumschicht oder eine entsprechende Wandstärke. Generell ist bei jeder Gehäuseart und der Ausführung des Designs eine spezifische Betrachtung der Wärmeableitung zu berücksichtigen, um unter anderem im Fall eines internen und externen Kurzschlusses den Hitzestau und seine Auswirkungen zu vermeiden.

4.2 Notwendige Informationen des Zellherstellers für den Batteriehersteller

Lithium-Ionenzellen unterscheiden sich u. a. durch die eingesetzten Anoden- und Kathodenzusammensetzungen (siehe Tabelle 1), die Bauart (siehe 4.1 Zellauswahl), die Additive im Elektrolyt und andere Bestandteile. Somit sind die für die Einhaltung der Betriebsfenster (siehe auch 4.3 Betriebsfenster - Abbildung 1) notwendigen Angaben zu Spannungsbereichen und Temperaturfenstern zum Laden und Entladen inkl. den maximalen Strömen überwiegend zell- bzw. herstellerspezifisch. Die Zellspezifikation und Verarbeitungshinweise des Herstellers, die für Assemblierung zu Batterien und den sicheren Betrieb in allen für die Zellen spezifizierten Temperaturbereichen notwendig sind, gehen meist weit über die häufig vereinfachten oder zusammengefassten Werte auf den Zelldatenblättern hinaus.

Notwendige sicherheitsrelevante Informationen sind vom Zellhersteller an den Batteriehersteller bereit zu stellen. Diese können sein:

- Lade- und Entladeschlussspannung
- Zu erwartende mechanische Veränderungen der Zellen während der Alterung beim Betrieb mit den zu erwartenden Lade- und Lastprofilen und dem vorgegebenen Temperaturbereich im Batteriemodul. Dazu zählen z. B. lokale Dickenzunahme an bestimmten Stellen des Zellgehäuses bzw. der Zellverpackung, die beim Design des Batteriemodules berücksichtigt werden müssen.
- Parameter bzw. Verlaufs- oder Abhängigkeitskurven für eingebaute Sicherheitsmechanismen wie z. B. PTC oder CID
- Empfohlene und maximale Lade- und Entladeströme bei unterschiedlichen Zelltemperaturen (engl. Derating table)

4.3 Betriebsfenster

Lithium-Ionenzellen haben Vorgaben des Herstellers zum Betriebsfenster (Spannung, Temperatur, Strom) und Lagerbedingungen (vor allem Temperatur und SoC), die eingehalten werden müssen. Andernfalls werden sie irreversibel geschädigt, verändern sich selbst nach Rückkehr in ihr Betriebsfenster weiter und werden in Folge

unsicherer. Sie verhalten sich dann nicht mehr so sicher wie bei vorher bestandenen Tests und können bei weiterem Betrieb auch selbst zur Fehlerquelle (z. B. interne Kurzschlüsse, Freisetzung von Gas, Brand) werden. Zum Schutz muss daher eine Lithium-Ionenbatterie im Hausbereich nach einer Zellschädigung abgeschaltet werden und darf sich bis zu einer fachlichen Überprüfung und Instandsetzung (durch vom System-Hersteller autorisierte Fachkraft) nicht wieder einschalten lassen.

Hinweis: Im Qualitätsmanagement des System-, Batterie- und Zellherstellers sollte sichergestellt werden, dass die Lithium-Ionenzellen auch beim Transport nicht außerhalb des erlaubten Lagertemperaturbereichs transportiert oder gelagert werden.

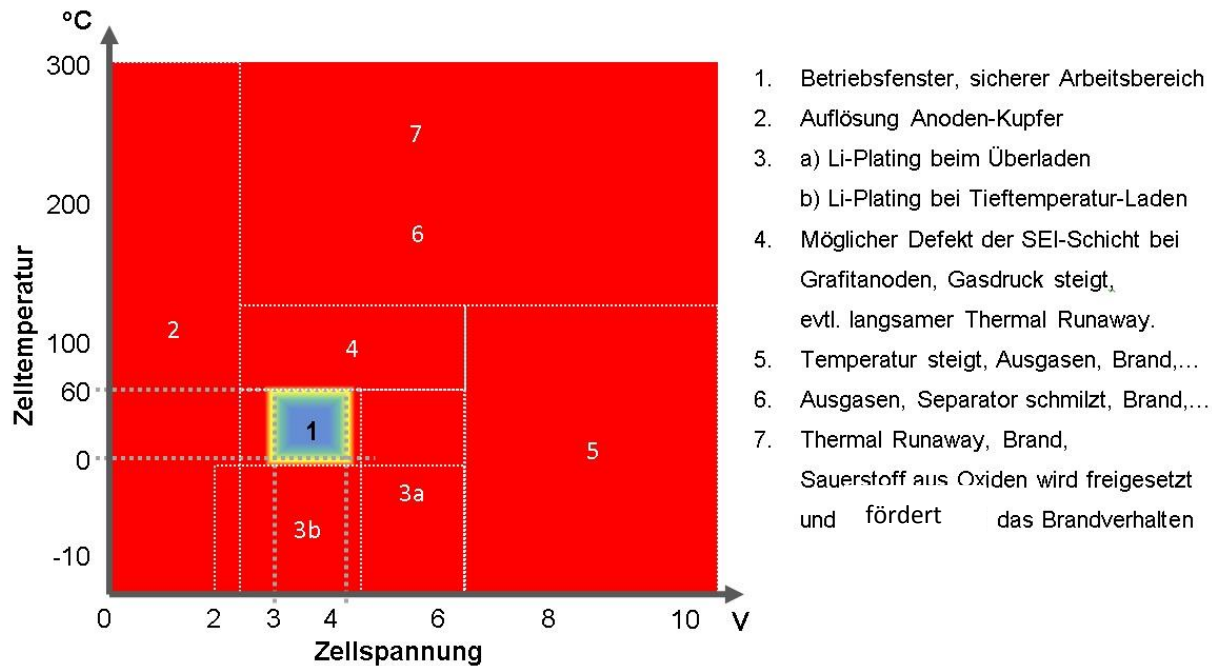


Abbildung 1: Schematisches Betriebsfenster für ein Beispiel einer Lithium-Ionenzelle (NMC) mit Graphit-Anode. (Reale Werte können hiervon abweichen)

Die nummerierten Fehlerbereiche 2-7 sind nur zur besseren Übersicht unterteilt. In der Praxis sind sie nicht abgegrenzt, sondern gehen ineinander über oder überlappen.

4.4 Einzelzellüberwachung

Probleme in Batterien beginnen oft in einer einzelnen Lithium-Ionenzelle, deren Versagen sich dann innerhalb der Batterie ausbreiten kann. Zur sicheren Einhaltung der Betriebsfenster (siehe 4.3 Betriebsfenster) kann es daher erforderlich sein, dass Temperatur und Spannung jeder einzelnen Zelle in einer Batterie überwacht werden.

Je nach Bauart und Aufstellungsort ist es nicht gegeben, dass alle Zellen innerhalb einer Batterie die gleiche Temperatur haben. Die Zellspannungen in einer Reihenschaltung können aus verschiedenen Gründen (z. B. unterschiedliche Alterung) voneinander abweichen.

4.5 Maßnahmen beim Verlust der Eigensicherheit

Bei jedem Fehler, der zum Verlust der Eigensicherheit führt, darf das System nicht mehr weiter betrieben werden. Ein Fehler besteht auch dann, wenn eine oder mehrere Zellen die vom Hersteller vorgegebenen sicheren Betriebsfenster verlassen haben und nicht deaktiviert werden können.

5. Dokumentation der Einhaltung dieser Schutzziele in einem Batteriesystem durch akkreditierte Labore

Wenn die Konformität mit diesem Sicherheitsleitfaden erklärt und beworben wird, ist diese mit entsprechenden Prüfberichten von akkreditieren Laboren zu belegen.

Bereits absolvierte Tests bei dafür akkreditierten Prüflaboren im Rahmen anderer Batterieprüfungen (z. B. Transporttests nach UN38.3, EMV-Prüfungen des Batterie-Management-Systems) werden bei den entsprechenden Schutzzielen berücksichtigt und müssen nicht erneut validiert werden.

6. Schutzzielkatalog

6.1 Schutzziele für die Zelle

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen	Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene notwendig?	Sind Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene verpflichtend?
6.1.1	Kurzschluss Extern	Bei externem Kurzschluss darf kein Feuer usw. auftreten (beschrieben durch: Hazard Level 4 nach EUCAR darf nicht überschritten werden)	UN38.3	Auswahl der Technologie/Zelle mit entsprechenden Zertifikaten, CID, beschichtete Separatoren ...	Additive im Elektrolyten als Flammenschutz, Begrenzung des Wirkungsradius chemisch aggressiver Substanzen, Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Auffangen des Elektrolyten Gehäuse muss Ventile für Gasbehandlung haben Maßnahmen zur Verhinderung eines externen Kurzschlusses sind notwendig	Ja
6.1.2	Kurzschluss Intern	Negative Auswirkungen eines internen Kurzschlusses vermeiden. (Interner Kurzschluss kann auf Zellebene nicht vermieden und auch nicht sicher präventiv detektiert werden)		Auswahl der Materialien, Qualitätsmanagementsystem des Zellherstellers (vollautomatische Herstellung), mechanischer Aufbau der Zellen, beschichtete Separatoren, Dicke und Art der Separatoren	Additive im Elektrolyten als Flammenschutz, Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Schutzmaßnahmen auf nächster Ebene zwingend (z. B. Gehäuse) Betriebsweise muss so gestaltet werden, dass interne Kurzschlüsse soweit wie möglich vermieden werden	Ja
6.1.3	Überladung	Negative Auswirkungen einer Überladung vermeiden (dies kann allein auf Zellebene nicht gelöst werden)		Auslösung „Sollbruchstelle“ bei Druckaufbau, ggf. mit CID Überladefähigkeit der Zelle muss im Sicherheitskonzept aufgeführt werden.	Additive im Elektrolyten als Flammschutz Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Überladeschutz auf Pack- oder Systemebene	Ja
6.1.4	Tiefentladung	Negative Auswirkungen einer Tiefentladung vermeiden. (dies kann allein auf Zellebene nicht gelöst werden)	Forced Discharge nach UN38.3		Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Tiefentladeschutz auf Pack- oder Systemebene	Ja

Nr.	Gefahren- quellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen	Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene notwendig?	Sind Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene verpflichtend?
6.1.5	Überstrom	Bei Überstrom darf kein Feuer usw. auftreten (beschrieben durch: Hazard Level 4 nach EUCAR darf nicht überschritten werden)		Auswahl von entsprechend qualitativ hochwertigen und typgeprüften Technologie/Zelle, CID, beschichtete Separatoren Derating Kurven des Zellherstellers müssen im Sicherheitskonzept angegeben werden.	Additive im Elektrolyten als Flammenschutz, Begrenzung des Wirkungsradius chemisch aggressiver Substanzen Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Die Deratingkurve muss entsprechend berücksichtigt werden	Ja
6.1.6	Übertemperatur	Zelle darf niemals Temperaturen über den vom Hersteller erlaubten Werten ausgesetzt werden.	UN38.3 DIN EN 62619 5.5/6.1 (Herstellerangaben können von den UN-Tests abweichen)	Auslösung „Sollkontaktunterbrechung“ bei Übertemperatur z. B. PTC, CID Temperaturgeführte Transportkette	Additive im Elektrolyten als Flammenschutz Notentlüftung, Berstscheibe etc. Ausgleich der internen Druckverhältnisse	Übertemperatur auf Pack-ebene überwachen, ggf. Maßnahmen (Stilllegung, Erholung nach Herstellerangaben) einleiten	Ja
6.1.7	Zu tiefe Temperatur	Zelle darf niemals Temperaturen unterhalb der vom Hersteller erlaubten Werte ausgesetzt werden.	UN38.3 DIN EN 62619 6.1.4.4 (Herstellerangaben können von den UN-Tests abweichen)	Lagerung, Heizung etc.		Untertemperatur auf Packebene überwachen, ggf. Maßnahmen (Stilllegung, Erholung nach Herstellerangaben) einleiten.	Ja
6.1.8	Mechanische Schäden	Mechanisch beschädigte Zellen dürfen nicht im System verbaut werden. Umgang mit gebrauchten Zellen wird im Leitfaden nicht abgedeckt	UN38.3 definiert Impact/Crush-Test (Handling der Zellen ist entscheidend)	Sachgerechte Handhabung, Transport, Lagerung, Montage	QM-System zur Erkennung von beschädigten Zellen	Mechanischer Schutz muss vorgesehen werden	Ja
6.1.9	Produktions- und Designfehler	Vermeidung von sicherheitsrelevanten Produktions- und Designfehlern	E DIN EN 62619 Kap. 5.6 (Qualitätssicherungsplan)	Prozeduren und Prozess für die Inspektion der Materialien und Komponenten. Auch die Anforderungen an die qualitative Handhabung (Montage) einschließlich der Qualifikation (der fertigenden Personen) sind festzulegen. Regelmäßige Qualitätsaudits sind notwendig	Regelmäßige wiederholte Qualitätsaudits	Es sind die gleichen Maßnahmen notwendig	Ja

6.2 Schutzziele für die Batterie

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen	Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene notwendig?	Sind Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene verpflichtend?
6.2.1	Kurzschluss Extern	Sichere, schnelle Abschaltung der Batterie Kein Wiedereinschalten ohne Überprüfung durch Schutzbeschaltung und/oder geschulte Fachkraft	DIN EN 61427-2 ADR für den Transport DIN EN 62109-1 Abs.14.8	Konstruktive Maßnahmen um externe Kurzschlüsse zu vermeiden, z. B. Pack ist außen spannungsfrei, Transportkappen	Sicherungskonzept unter Berücksichtigung der Zelleigenschaften	Maßnahmen sind sinnvoll und je nach Konstruktion auch notwendig. Einfehlersicherheit entweder auf Packebene oder zusammen im System ist notwendig.	Nein
6.2.2	Kurzschluss Intern	Konstruktive Vermeidung sichere, schnelle Abschaltung der Batterie und kein Wiedereinschalten		Konstruktive Maßnahmen um interne Kurzschlüsse zu vermeiden, Isolationskoordination und IP-Schutzklassen	Sicherungskonzept unter Berücksichtigung der Zelleigenschaften; Sicherheitskonzept für parallelgeschaltete Zellen	Nein	Nein
6.2.3	Überladung Überspannung	Sichere, schnelle Abschaltung der Batterie Kein Wiedereinschalten ohne Überprüfung der Zellspannungen	DIN EN 62619 Abs. 5.5.2	Einzelzellenüberwachung ist notwendig (unter Berücksichtigung der auftretenden Ripple-Ströme) parallelgeschaltete Zellen können über eine Spannungsmessung überwacht werden	Abschaltung bei Überspannung Kommunikation mit dem Ladegerät, um dies zu verhindern	Ladegerät sollte dies verhindern	Nein
6.2.4	Tiefentladung	Extern: sichere, schnelle Abschaltung der Batterie nach dem Erreichen der Entladeschlussspannung (Einzelzellspannungen). Kein Wiedereinschalten nach Tiefentladung und ohne Überprüfung der Zellspannungen unter Berücksichtigung, dass die OCV u. U. trotz vorheriger Zell-Tiefentladung im erlaubten Bereich ist (siehe 3.12, letzter Absatz) Intern: erkennen, verhindern, kommunizieren, kein Wiedereinschalten	DIN EN 61427-2 Abs. 8.3	Herstellerangaben beim Wiedereinschalten müssen berücksichtigt werden BMS (z. B. redundant, mit BMS-Überwachung) und System sollten Tiefentladungen verhindern	Gegen Wiedereinschalten sichern gemäß den Herstellerangaben.	Abschalten und nicht wieder zuschalten bei Kommunikationsausfall	Nein

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen	Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene notwendig?	Sind Maßnahmen auf der nächst höheren Ebene verpflichtend?
6.2.5	Überstrom	Sichere Abschaltung der Batterie nach den Derating-Vorgaben des Herstellers	DIN EN 62619 Abs. 6.1.4.2	Temperaturabhängige Stromüberwachung und Trennen bei Überstrom	Abschalten bei Überstrom	Lade- und Entladestromreduzierung	Nein
6.2.6	Übertemperatur	Sichere Abschaltung der Batterie im Betrieb beim Überschreiten der maximal zulässigen Herstellerangaben, die einen Schaden in der Zelle verursachen. Kein Wiedereinschalten, wenn maximale Temperatur überschritten wurde.		Die Umweltbedingungen müssen benannt und beachtet werden.	Abschalten bei Übertemperatur	Abschalten des Lade-Entladebetriebs	Nein
6.2.7	Zu tiefe Temperatur	Sichere Abschaltung der Batterie bzw. kein Wiedereinschalten der Batterie sobald die minimal zulässigen Herstellerangaben, die zu einem Schaden der Zelle führt, unterschritten werden.	DIN EN 61427 (Lagerung)	Die Umweltbedingungen müssen benannt und beachtet werden.	Abschalten bei Untertemperatur	Abschalten des Lade-Entladebetriebs	Nein
6.2.8	Mechanische Schäden	Keine Inbetriebnahme von sichtbar/zu vermutend beschädigten Module/Packs		Verpackungsvorschrift, Handling, mechanische Konstruktion	Qualitätsmanagement System muss die Erkennung defekter Module ermöglichen		Nein
6.2.9	Defekte Zelle Im Pack	Eine defekte Zelle im Pack darf keinen sich ausbreitenden Fehler zur Folge haben.	DIN EN 62619 8.3.3	Erkennen einer defekten Zelle und Abschalten (Bei einem internen Kurzschluss und hohem SOC kann auch die Zwangsentladung sinnvoll sein) Parallelgeschaltete Zellen können wie eine Einzelzelle behandelt werden.	Eindämmung möglicher Ausbreitung auf die Systemebene	Weitere Ausbreitung durch Konstruktion eindämmen	Nein
6.2.10	Produktions- und Designfehler	Vermeidung von sicherheitsrelevanten Produktions- und Designfehlern	E DIN EN 62619 Kap. 5.6 (Qualitätssicherungsplan)	Prozeduren und Prozess für die Inspektion der Materialien und Komponenten insbesondere der Zelle siehe 6.1.9.	Regelmäßige wiederholte Qualitätsaudits		

6.3 Schutzziele fürs System

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen
6.3.1	Kurzschluss Extern (Batterieseitig)	Vermeidung von externen Kurzschlüssen und im Kurzschlussfall einen sicheren Zustand erhalten.	UN38.3, EN 50272-2, IEC 62619, DIN EN 62109-1	Abdeckung der Kontaktpole und Abschaltung und gegen Wiedereinschalten gesichert im Transport, isoliertes Werkzeug, Körperschmuck entfernen (Hinweis in Installationsanleitung), Gehäuse mit entsprechendem IP-Schutz, Abschottung der stromführenden Systembauteile mit Berührungsschutz (IPXXB intern)	Überstromsicherungen
6.3.2	Überladung / Überspannung (Batterieseitig)	Überspannung und Überladung muss im System redundant (1 Fehlersicher) verhindert werden	UN38.3, EN 50272-2, IEC 62619, DIN EN 62109-1	Überwachung der Zellspannungen und Ausschluss von Überladung oder Überspannung durch Batteriemanagementsystem(BMS), BMS muss auch bei eigenem Fehler in sicheren Zustand schalten. Überwachung der Kommunikation, um Überladung sicher zu verhindern. Mehrstufige Überwachung im Lade-/Entladegerät	
6.3.3	Tiefentladung	Vermeidung von Tiefentladung zur Erhaltung des sicheren Zustandes. Nach einer Tiefentladung ist Laden zu vermeiden. Der sichere Betriebsbereich der Module/Packs muss eingehalten werden.	UN38.3, EN 50272-2, IEC 62619, DIN EN 62109-2	Überwachung der Zellspannungen und Ausschluss von Tiefentladung durch Batteriemanagementsystem(BMS), BMS muss auch bei eigenem Fehler in sicheren Zustand schalten. Überwachung der Kommunikation, um Tiefentladung sicher zu verhindern. Mehrstufige Überwachung im Lade-/Entladegerät	Abschalten der Batterie oder des Ladegeräts
6.3.4	Überstrom	Vermeidung von Überströmen von außen, DC und AC (Hausnetz, Wechselrichter, induktive Lasten) sowie Querströme zwischen Modulen/Packs	UN38.3, IEC 62619	Balancing zwischen Zellen und zwischen Modulen/Packs zur Vermeidung von Querströmen, Hinweise in Installationsanleitung zur Auswahl der Überstromsicherungen. Stromüberwachung und Ausschluss von Überstrom z. B. durch Abschaltung der Batterie oder des Ladegerätes Derating in Abhängigkeit der Zelltemperatur durch das Lade/Entladegerät	Überstromsicherungen Abschalten der Batterie oder des Ladegeräts
6.3.5	Über- und Untertemperatur	Es gelten die gleichen Schutzziele wie auf der Batterieebene	DIN EN 62619 6.1.4.4	Derating durch Reduzieren des Lade- oder Entladestroms, Heizung der Batterie, Kühlung der Batterie, Aufstellungsort Auswahl (indoor, outdoor, beschattet usw.)	Abschaltung bei Über- und Untertemperatur
6.3.6	Mechanische Schäden von außen	Ausreichende Widerstandsfähigkeit der Konstruktion gegen Schwingung, Vibration, Schock.	UN38.3, DIN EN 50272, DIN EN 62109-1, Schlagprüfung IK nach IEC 62262	Entsprechend stabile Konstruktion von Gehäuse, Transportgriffen, Befestigungspunkten, gedämpfte Lagerung kritischer Komponenten im System, Schockindikatoren für Transport, Warnhinweise am Gerät, Hinweise in Installationsanleitung zu sicherem Transport und sicherer Aufstellung	

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen
6.3.7	Mechanische Schäden von innen	Einwirkungen im Betrieb (z. B. thermisch, mechanisch) darf nicht zum Lösen von Bauteilen und unsicheren Zuständen führen	UN38.3, VDE AR 2510-2/-50, IEC 62619,	Wahl der Komponentenfixierung unter Berücksichtigung der thermischen, chemischen und mechanischen Einwirkungen (Wachstum der Zellen im Betrieb berücksichtigen) und Eigengewicht, Markierungen zum Ermitteln gelöster Schraubverbindungen, Schraubensicherungslack, selbstsichernde Muttern	
6.3.8	Fehlinstallation	Fehlinstallation dürfen nicht zu unsicheren Zuständen führen. (z. B. Verpolung, fehlerhafte Befestigung) Bevorzugt sind diese durch konstruktive Maßnahmen und fehlertolerantes Design zu vermeiden.	VDE AR 2510-2/-50, IEC 62619	Hinweise in Installationsanleitung und am Gerät, konstruktive Vermeidung von Verpolung, eindeutige Kennzeichnung aller Anschlüsse, Produktschulungen	
6.3.9	Fehlbedienung	Fehlbedienung darf nicht zu unsicheren Zuständen führen. Die Bedienung sollte fehlertolerant und selbstbeschreibend sein.	VDE AR 2510-2/-50, IEC 62619	Hinweise in Installationsanleitung und am Gerät, fehlertolerante und selbsterklärende Bedienung, Risikoanalyse vorhersehbarer Fehlbedienung	
6.3.10	Gefährliche Berührspannung	Gefährliche Berührspannungen dürfen im Einfehlerfall nicht auftreten!	VDE AR 2510-2/-50, VDE 0100/410, EN 50272-2, IEC 62619, DIN EN 62109-1	Isolation, Einhaltung der normativen Luft- und Kriechstrecken, Schutzleiter sind so anzuschließen, dass dieser bei Kabelzug zuletzt gelöst wird, geerdete Gehäuse, Berührungsschutz für Teile mit gefährlichen Berührspannungen.	FI-Schutz
6.3.11	Missbrauch	Verschlusstechniken und Reinigungshinweise sind so auszuführen, dass Missbrauch verhindert wird	UN38.3, VDE AR 2510-2/-50, VDE 0100/410, EN 50272-2, BATSO 02, IEC 62619	(Warn)Hinweise in Installationsanleitung und am Gerät, Risikoanalyse zur vorhersehbaren Fehlanwendung, konstruktive Vermeidung von Missbrauch, Geräteöffnung nur mit Spezialwerkzeug	Ggf. Abschaltung bei unzulässiger Geräteöffnung
6.3.12	Unklarer Betriebszustand	Unklare Betriebszustände sind im Design zu vermeiden.	VDE AR 2510-2	Hinweise in Installationsanleitung und am Gerät zum Verhalten bei Fehlermeldungen oder unklaren Betriebszuständen	
6.3.13	Schadstoffemissionen (gasförmig, flüssig, fest)	Schadstoffhaltige Flüssigkeiten dürfen das System nicht verlassen. Gefährliche Gase müssen (im Havariefall) ausreichend abgeleitet werden.	UN38.3, VDE AR 2510-2/-50, EN 50272-2, BATSO 02, IEC 62619	Konstruktive Maßnahmen um Schadstoffe einzuschließen, aufzufangen oder kontrolliert abzuleiten (Auffangwannen, Tropfschutz, Entlüftungsöffnungen usw.), ggf. Verdünnung durch entsprechende aktive Lüftung, Gehäuse mit entsprechendem IP-Schutz	
6.3.14	Unzureichende funktionale Sicherheit. Fehler in der Gefährdungsanalyse und/oder der Risikobewertung	Korrekte Gefährdungsanalyse, Risikobewertung und richtige Festlegung der Sicherheits-Integritätslevel (SIL), richtige Dimensionierung der Abschaltelemente, Einfehlersicherheit	E DIN EN 62619, DIN EN 61508	Durch das Prüflabor überprüfte funktionale Sicherheit	Produktrevison (z. B. Software- und/oder Hardware-Updates), Rückrufaktionen bei sehr kritischen Fehlern

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen
		bei sicherheitsrelevanten Funktionen.			
6.3.15	Produktions- und Designfehler	Vermeidung von sicherheitsrelevanten Produktions- und Designfehlern	E DIN EN 62619 Kap. 5.6 (Qualitätssicherungsplan)	Prozeduren und Prozess für die Inspektion der Materialien und Komponenten insbesondere der Zelle siehe 6.1.9.	Regelmäßige wiederholte Qualitätsaudits

6.4 Allgemeine Schutzziele

Nr.	Gefahrenquellen	Angestrebtes Schutzziel	Welche Normen decken dies ab	Mögliche präventive Maßnahmen	Mögliche korrektive Maßnahmen
6.4.1	Unzulängliche mechanische Verarbeitung	Sicheres und stabiles mechanisches Design (keine scharfen Ecken und Kanten, Quetschstellen) zur sicheren Installation, Handhabung und Betrieb sowie Kontrolle während der Installation auf mechanische Einwirkungen.	IEC 62619,		QM-System
6.4.2	Vandalismus	Grundschatz gegen Aufbruchversuche und äußere mechanische oder körperliche Kräfte einschließlich Benutzung von einfachen Werkzeugen (RC2 = Schraubendreher, Zange, Keil etc.) sobald das System öffentlich oder durch dritte zugänglich ist, beziehungsweise dafür vorgesehen ist.	EN 50272-2, Schlagprüfung IK IEC 62262	Stabile Gehäuse, Anbringen von Schlössern, Materialauswahl, Auswahl Aufstellungsort (abschließbare Räume etc.). Eindeutige Hinweise an den Aufstellungsort in der Installationsanleitung.	
6.4.3	Brand	Brand von innen und außen; grundlegende Widerstandsfähigkeit gegen Hitze/Feuer, Vermeidung von Brandübertritt von innen nach außen sowie bersten. Vermeidung von Weiterleitung von äußeren Bränden	EN 50272-2, EN 61010-1; BATSO 02, E-VDE AR 2510-50, o.a.	Vermeidung von Brandbeschleunigung, geeignete Designauswahl (Gehäuse, Abschottungen etc.), Anforderungen an Aufstellort in Installationsanleitung, Materialauswahl des Gehäuses, Aufbau entsprechend der von der Landesbauordnung geforderten Brandschutzvorschriften.	
6.4.4	Blitz/Überspannung	Kurzfristige/transiente Überspannung/-Strom darf keinen Einfluss auf die Systemsicherheit haben, Berücksichtigung von Selektivität	VDE 0100/440, VDE 0185-305, IEC 62619	Überspannungsschutz(grob, mittel, fein) (sicherheitsrelevantes BMS erfordert ggf. Feinschutz)	
6.4.5	Verschmutzung	Vermeidung von unsicheren Betriebszuständen durch Verschmutzungen wie Staub/Flüssigkeiten und Fremdkörper	IEC 62619 E-VDE AR 2510-50	Luft- und Kriechstrecken in Abhängigkeit des voraussichtlichen Verschmutzungsgrades, Kennzeichnungen müssen dauerhaft sichtbar sein, Zuluftfiltereinsatz und regelmäßige Wartung, Gehäuse mit entsprechendem IP-Schutz	Filterwechsel, Reinigung, Sichtprüfung
6.4.6	Druck	Wenn im System Druck aufgebaut wird, muss dieser abgefangen/kompensiert oder kontrolliert abgebaut werden können, kein unsicherer Betriebszustand durch äußeren Luftdruck/Luftdruckwechsel	UN38.3, EN 50272-2, IEC 62619	Einsatz von Überdruckventilen oder sonstigen Maßnahmen zur Druckregulierung, Hinweise zum Aufstellort in der Installationsanleitung (Höhenlagen)	
6.4.7	Besondere Anforderungen aus der Umgebung (Korrosion, Gase, Überschwemmung)	Bei entsprechend vorgesehenen Aufstellbedingungen in korrosiver Atmosphäre oder bei Überschwemmungsgefahr, sind besondere Anforderungen an das Design des Systems zu berücksichtigen.	E-VDE AR 2510-2, BATSO 02	Eindeutige Hinweise zum Aufstellort in der Installationsanleitung, Wahl der Isolierungen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen	
6.4.8	Einhaltung gesetzlicher Vorgaben	Einhaltung der Niederspannungsrichtlinie, Produktsicherheitsgesetz, Batteriegesetz, EMV-Richtlinie, UN-Transporttests, Gefahrgutverordnung und andere			