

Schutz vor Thermal Runaway

Physikalisch-mechanische Schutzmaßnahmen in Lithium-Ionen-Batterieanwendungen

1. Was ist ein Thermal Runaway?

In Lithium-Ionen-Batterien laufen unter normalen Bedingungen kontrollierte elektrochemische Reaktionen ab. Gerät eine Zelle jedoch außer Kontrolle – etwa durch mechanische Beschädigung, Überladung, einen internen Kurzschluss oder fertigungsbedingte Defekte –, so setzt eine sich selbst verstärkende Kettenreaktion ein, die als Thermal Runaway (TR) bezeichnet wird.

Dabei steigt die Temperatur im Inneren der Zelle rasant an: Die Wärme beschleunigt weitere chemische Reaktionen, die wiederum noch mehr Wärme freisetzen. Innerhalb von Sekunden kann die Zelltemperatur auf über 700 °C klettern. Brennbare Elektrolytgase entweichen, können sich entzünden und – im schlimmsten Fall – zu einer Stichflamme oder Explosion führen. Das eigentlich Gefährliche ist jedoch die Ausbreitung: Erhitzt eine Zelle ihre Nachbarzellen über den kritischen Schwellwert, werden auch diese instabil. Diese Kettenreaktion von Zelle zu Zelle wird als Thermal Propagation bezeichnet.

Kerngefahren im Überblick

Temperaturen bis über 700 °C · Austritt brennbarer und giftiger Gase (HF, CO) · Lichtbogen- und Stichflammenbildung · Druckaufbau bis hin zur mechanischen Explosion · Kettenreaktion auf benachbarte Zellen (Thermal Propagation) · Brandgefahr für Umgebungsbauteile, Insassen oder Anlageninfrastruktur

2. Grundprinzip der Schutzstrategie: Mehrere Barrieren

Da ein Thermal Runaway nicht mit einer einzigen Maßnahme zuverlässig verhindert werden kann, verfolgt die Industrie das Konzept der gestaffelten Sicherheitsebenen – ähnlich einem Schweizer Käse-Modell. Keine einzelne Schicht ist perfekt, aber mehrere übereinandergelegte Schichten schließen gemeinsam alle Lücken.

Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen drei Ebenen: der Zellebene (Verhinderung, dass eine einzelne Zelle in den Runaway übergeht), der Modulebene (Verhinderung der Ausbreitung auf Nachbarzellen) und der Packebene (Schutz der Umgebung durch strukturelle Integrität und kontrollierte Entgasung). Ergänzend überwacht das Batteriemanagementsystem (BMS) kontinuierlich Spannung, Temperatur und Strom jeder Zelle und kann bei Auffälligkeiten frühzeitig eingreifen – etwa durch Lastreduzierung oder Abschalten des betroffenen Moduls. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich jedoch auf die physikalisch-mechanischen Maßnahmen, die das eigentliche Rückgrat der Sicherheitsstrategie bilden.

3. Anwendungsfall bestimmt die Strategie: E-Mobilität versus stationäre Speicher

Obwohl die physikalischen Grundlagen eines Thermal Runaway in beiden Anwendungen identisch sind, unterscheiden sich die Schutzkonzepte erheblich – denn die Randbedingungen könnten unterschiedlicher kaum sein.

3.1 Elektrofahrzeuge (EV): Gewicht schlägt alles

Im Fahrzeug ist jedes Gramm Mehrgewicht ein Feind der Reichweite. Die Schutzstrategie orientiert sich daher vor allem am Ziel, den Insassen genügend Zeit zur Evakuierung zu verschaffen – mindestens 5 bis 10 Minuten nach Ausbruch eines Thermal Runaway in einer Zelle. Das Fahrzeug zu retten ist dabei zweitrangig.

Typische Maßnahmen im EV-Bereich sind deshalb passive Systeme: dünne Glimmer-Lamine (Mica) zwischen den Zellen, keramikbeschichtete Kompressionspads und intumeszierende Klebebänder, die bei Hitze aufschäumen und als Brandbarriere wirken. Zusätzlich muss das Gehäuse so konstruiert sein, dass ein Unfall (Crash) nicht unmittelbar zu einem internen Kurzschluss führt, und alle Schutzkomponenten müssen nach 100.000 km Rüttelbeanspruchung noch intakt sein.

3.2 Stationäre Batteriespeicher (BESS): Asset-Schutz im Vordergrund

Ein stationärer Speicher – etwa ein Container für einen Solarpark – unterliegt keinen Gewichtsbeschränkungen, steht aber oft in enger Nachbarschaft zu weiteren Containern mit Megawattstunden gespeicherter Energie. Ein unkontrollierter Brand kann Millionenwerte vernichten. Das Primärziel lautet daher: den Brand auf ein einzelnes Modul oder Rack begrenzen.

Stationäre Systeme verfügen daher häufig über aktive Löschsysteme (Gaslöschung mit z.B. IG-55 oder Aerosol-Löcher), physische Stahlbarrieren zwischen Modulen und hochpräzise Gassensoren, die Elektrolytdampf oder Kohlenmonoxid detektieren, noch bevor sichtbarer Rauch entsteht. Moderne Containerbauweise sieht zudem sogenannte Explosion Vents vor – kontrolliert berstende Dachabschnitte, die im Druckfall nach oben öffnen und so das Gehäuse erhalten.

Merkmal	Elektrofahrzeug (EV)	Stationärer Speicher (BESS)
Schutzziel	Evakuierungszeit (Insassenschutz)	Asset Protection & Propagation Stop
Brandschutz-Logik	Passiv (Verzögerung)	Aktiv (Löschen / Isolieren)
Gewichtslimit	Streng (Reichweitenrelevanz)	Kaum vorhanden
Kühlung	Wasser-Glykol-Kreislauf	Klimatisierung, zunehmend Immersion
Gehäuse	Crash-optimiert (Alu/Stahl)	Feuerfest (Container-Stahl, Beton)
Überwachung	BMS (Spannung, Temperatur)	BMS + externe Gassensorik

4. Schutz auf Zellebene: Die erste Barriere

Auf Zellebene geht es darum, die Wärmeübertragung von einer defekten Zelle auf ihre Nachbarn so weit zu verlangsamen, dass das Gesamtsystem stabil bleibt oder zumindest genug Zeit für Gegenmaßnahmen bleibt.

4.1 Zell-Umwicklung (Cell Wrapping)

Jede einzelne Batteriezelle wird mit einer isolierenden Folie umwickelt. Das klingt unspektakulär, ist aber die erste Verteidigungslinie gegen thermisch bedingte Kurzschlüsse. Eingesetzte Materialien sind typischerweise PET-basierte Klebebänder (z. B. tesa 58352 oder Nitto No. 360) mit einer Durchschlagfestigkeit von bis zu 7 kV und Beständigkeit gegen Batterieelektrolyte.

Für anspruchsvollere Szenarien kommen Polyimid-Folien (Kapton®) zum Einsatz – jene bernsteinfarbenen, extrem hitzebeständigen Materialien, die sich auch in der Luft- und Raumfahrt bewährt haben. Sie behalten ihre Schutzwirkung auch bei kurzzeitig sehr hohen Temperaturen.

4.2 Mica-Laminat: Der Hochtemperatur-Goldstandard

Zwischen den Zellen – besonders bei prismatischen Zellen und Pouch-Zellen – wird Mica (Glimmer) als Trennbarriere eingesetzt. Mica ist ein natürliches Mineral, das Temperaturen von über 1.000 °C standhält, ohne zu schmelzen oder zu entflammen. Damit ist es das bevorzugte Material, um die Plasmaflamme und den heißen Gasstrahl bei einem Venting-Ereignis von der Nachbarzelle fernzuhalten.

In der Praxis wird Mica selten pur verwendet – es ist spröde. Anbieter wie Avery Dennison (Flame Tough-Serie) verarbeiten es als Laminat: Eine Mica-Kernschicht wird beidseitig mit Klebeschichten oder dünnen PET-Folien kombiniert. Das ergibt ein Material, das sowohl hitzebeständig als auch handhabbar und selbstklebend ist.

4.3 Aerogel-Matten: Ultraleichte Hochleistungsisolatoren

Aerogele sind hochporöse, extrem leichte Festkörper mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit aller festen Materialien. Als dünne Matten zwischen Zellen eingesetzt, verlangsamen sie die Wärmeübertragung dramatisch, ohne nennenswert Bauraum zu beanspruchen. Anbieter wie Aspen Aerogels liefern entsprechende Produkte, die häufig als Hybridlösung mit Mica kombiniert werden, um sowohl die thermische Isolation als auch die mechanische Stabilität zu maximieren.

4.4 ATP-Pads und Kompressions-Pads

Lithium-Ionen-Zellen "atmen" – sie dehnen sich beim Laden aus und ziehen sich beim Entladen zusammen (Swelling). Starre Barrieren würden bei diesem zyklischen Druck mechanisch versagen oder die Zellen beschädigen. Sogenannte Anti-Thermal-Propagation-Pads (ATP-Pads), wie sie 3M anbietet, lösen dieses Dilemma: Sie sind hochkompressibel, nehmen den Ausdehndruck auf und wirken gleichzeitig als thermischer Isolator. Eingearbeitete Flammenschutzmittel verstärken im Brandfall die Barrierewirkung.

4.5 Flammhemmende Kunststofffolien für Zellgehäuse

Für Gehäuseauskleidungen, Zellabstandhalter und Modul-Innenverkleidungen werden flammhemmende Thermoplast-Folien aus Polypropylen eingesetzt. Ein bekanntes Beispiel ist das ITW Formex GK – eine UL 94 V-0-zertifizierte Folie, die Lichtbögen und Hitze im Modulinneren abschirmt. Ähnliche Produkte wie PolyPro FR von The Gund Company bieten hohe Durchschlagfestigkeit und chemische Beständigkeit bei sehr geringem Gewicht und lassen sich durch Stanzen, Thermoformen oder Laserschneiden in nahezu jede Geometrie bringen – ideal für die Serienfertigung.

Diese Polypropylen-basierten Folien erreichen ihre Flammhemmwirkung durch intumeszierende Additivsysteme. Moderne halogenfreie Ansätze – etwa Phosphor-Stickstoff-Systeme (P-N-Systeme) – erzeugen beim Erhitzen eine schützende Kohlenstoff-Schaumschicht (Char), die den Wärmetransport blockiert und die Ausbreitung der Flamme unterbricht. Gegenüber älteren, bromierten Systemen bieten sie den Vorteil geringerer Rauchentwicklung und erfüllen internationale Regularien wie RoHS und REACH.

5. Schutz auf Modulebene: Die zweite Barriere

Auf Modulebene geht es darum, einen Brand, der in einem einzelnen Zellpaket begonnen hat, innerhalb des Moduls zu kapseln und nicht auf benachbarte Module übergreifen zu lassen.

5.1 Hochtemperaturfolien als Gehäuseauskleidung

Nomex-Aramidpapiere (DuPont/Krempel) sind seit Jahrzehnten der Standard für elektrische Isolation in Hochtemperaturumgebungen. Als Laminat verarbeitet – typischerweise in der Konfiguration

Nomex/Mylar/Nomex (NMN) – bieten sie hervorragende Durchschlagfestigkeit und behalten ihre mechanischen Eigenschaften bis etwa 220 °C. Sie schmelzen nicht und sind inhärent flammhemmend.

Als Alternative gewinnen Lösungen wie FiberCork (Synflex) an Bedeutung. Dieses Verbundmaterial kombiniert die extrem geringe Wärmeleitfähigkeit von Naturkork mit der mechanischen Stabilität von Holzfasern und Glasgewebe. Kork ist zudem kompressibel, ein natürlich nachwachsender Rohstoff und kann Swelling-Drücke. Allerdings ist FiberCork dicker und weniger beständig gegen aggressive Batteriesäuren.

Eigenschaft	Nomex-Laminat	FiberCork
Thermische Barriere	Mittel (sehr dünn)	Hoch (geringe Wärmeleitfähigkeit)
Durchschlagfestigkeit	Sehr hoch	Mittel
Swelling-Toleranz	Gering (starr)	Gut (elastisch)
Chem. Beständigkeit	Sehr hoch	Mittel (HF-empfindlich)
Bauraumaufwand	Sehr gering	Moderat (dicker)
Nachhaltigkeit	Synthetisch	Naturbasiert (CO ₂ -Vorteil)

5.2 Phasenwechselmaterialien (PCM)

Phasenwechselmaterialien absorbieren thermische Energie durch Schmelzen – ähnlich wie Eis, das Wärme aufnimmt, ohne zunächst die Temperatur zu erhöhen. Diese latente Wärme puffert Temperaturspitzen erheblich ab und gibt dem Schutz- und Detektionssystem mehr Zeit zum Reagieren. PCMs werden als Einlagen oder Beschichtungen in Modulgehäuse integriert.

6. Schutz auf Packebene: Strukturelle Integrität und kontrollierte Entgasung

Selbst wenn alle zell- und modulebenen Barrieren funktionieren, können die heißen Gase eines Venting-Ereignisses das Batteriegehäuse gefährden. Auf Packebene steht daher die strukturelle Integrität kombiniert mit einem sicheren, kontrollierten Entlüftungskonzept im Mittelpunkt.

6.1 Venting-Systeme: Kontrolliertes Entgasen statt unkontrollierte Explosion

Bei einem Thermal Runaway entstehen im Zellinneren große Mengen brennbarer Gase unter hohem Druck. Können diese nicht entweichen, droht eine mechanische Explosion des Gehäuses. Venting-Systeme schaffen definierte Sollbruchstellen – beispielsweise spezielle Membrane-Tapes von Avery Dennison, die bei einem definierten Innendruck kontrolliert aufreißen (Burst-Funktion). Das austretende Gas wird dabei in eine ungefährliche Richtung abgeleitet, während der Rest der Tape-Fläche flammbeständig bleibt und das Durchschlagen eines Feuers verhindert.

Bei stationären Speichern geht man noch einen Schritt weiter: Moderne Container-Konstruktionen integrieren sogenannte Explosion Vents ins Dach. Im Druckfall öffnet das Dach kontrolliert nach oben – die Seitenwände und damit der Großteil der Anlage bleiben erhalten. Eine Lösung, die für ein Fahrzeug naturgemäß nicht in Frage kommt.

6.2 Hitzeschilder unter dem Gehäusedeckel

Direkt unterhalb des Packdeckels werden großflächige Barrierematerialien montiert – beispielsweise großformatige Mica-Composite-Elemente oder keramisch gefüllte Elastomere. Diese schützen die Fahrgastzelle (bei EVs) oder die Gehäusestruktur (bei BESS) vor den extremen Temperaturen und dem

Partikelstrom, der beim Zell-Venting entsteht. Temperaturen von bis zu 1.200 °C müssen dabei für mehrere Minuten standgehalten werden.

6.3 Kleben statt Schrauben: Multifunktionale Klebetechnologien

Ein häufig unterschätzter Aspekt der Batteriesicherheit ist der Trend zur Klebetechnik. Immer mehr Hersteller ersetzen mechanische Verbindungen durch spezialisierte Kleb- und Dichtstoffe – nicht nur aus Gewichtsgründen, sondern auch aus Sicherheitserwägungen. Thermisch leitfähige Klebstoffe (Thermal Conductive Adhesives, TCA) auf Polyurethan- oder Acrylatbasis leiten Wärme effizient zur Kühlplatte ab und fixieren die Zellen gleichzeitig mechanisch, sodass sie bei einem Crash nicht verrutschen und einen Kurzschluss auslösen.

Intumeszierende Dichtmassen entlang des Gehäusedeckels schäumen bei Hitze auf und verschließen den Spalt hermetisch gegen Flammen aus dem Inneren. Glasfaser-Gewebebander (3M Glass Cloth Tape 398FR) sichern Kabelbäume und lokale Übergangsbereiche mechanisch bei extremer Hitze.

7. Vergussmassen: Maximaler Schutz mit Kompromissen bei der Wartung

Eine besonders wirksame, aber auch invasive Schutzmaßnahme ist der Einsatz von Vergussmassen (Potting Compounds). Dabei werden Zellen, Module oder Elektronikbaugruppen vollständig in ein aushärtendes Material eingebettet, das gleichzeitig als mechanische Dämpfung, elektrische Isolation und thermische Barriere wirkt.

7.1 Materialklassen im Überblick

Silikonbasierte Vergussmassen (z. B. von Henkel/Loctite oder Sika/Sikasil) sind die erste Wahl, wenn Brandschutz und Flexibilität gefragt sind: Sie sind inhärent flammhemmend, dämpfen Vibrationen hervorragend und widerstehen Temperaturen bis 250 °C dauerhaft. Polyurethan-Vergussmassen bieten höhere Wärmeleitfähigkeit bei geringeren Kosten und fixieren Zellen strukturell. Epoxidharze schützen Elektronikbaugruppen wie das BMS besonders gut, sind aber spröde und können bei Zell-Swelling reißen.

Material	Schutzwirkung (TR)	Wärmeleitfähigkeit	Reparierbarkeit
Silikon-Gel (weich)	Sehr hoch	Mittel	Gut – ausgrabbar
PU-Schaum	Mittel	Gering	Mittel – schneidbar
Hartes Epoxid	Hoch (Elektronik)	Hoch	Schlecht – nicht lösbar
Struktur-PU (gefüllt)	Hoch	Hoch (bis 2,0 W/m·K)	Schlecht – nur mechanisch

7.2 Reparierbarkeit als Designziel

Der größte Nachteil von Vergussmassen ist die eingeschränkte Wartungsfreundlichkeit. Während EVs der Massenproduktion (z. B. Strukturbatterien) oft bewusst auf Reparierbarkeit verzichten, um maximale Sicherheit zu erzielen, müssen stationäre Speicher mit 15–20 Jahren Lebensdauer wartungsfreundlicher sein. Hier kommen spezielle Silikon-Gele (Shore 00) zum Einsatz, die sich im Fehlerfall mit einfachem Werkzeug entfernen lassen, sowie Teilverguss-Konzepte, bei denen nur die sicherheitskritischen Bereiche befüllt werden.

8. Aktuelle Trends: Was kommt als nächstes?

8.1 Tauchkühlung (Immersion Cooling)

Die Tauchkühlung gilt als besonders leistungsfähiger Ansatz: Zellen werden vollständig in eine elektrisch nicht leitende (dielektrische) Flüssigkeit eingetaucht. Da die Flüssigkeit jede Zelloberfläche direkt berührt, ist der Wärmeübergang bis zu zehnmal effizienter als bei konventioneller Kühlung. Im Falle eines Thermal Runaway absorbiert die umgebende Flüssigkeit die Energie sofort – die kritische Zündtemperatur für Nachbarzellen wird oft gar nicht erst erreicht.

Der Preis dafür ist erheblich: Die Flüssigkeit erhöht das Systemgewicht, hochwertige dielektrische Fluide sind teuer, und jede Reparatur erfordert das Ablassen und Wiedereinfüllen des "Ölbades". Im Fahrzeugsegment bleibt die Tauchkühlung daher bislang High-Performance-Anwendungen vorbehalten; für stationäre Megawatt-Speicher etabliert sie sich zunehmend als Standard.

8.2 Cell-to-Pack und Cell-to-Chassis-Architekturen

Immer mehr Hersteller lassen das klassische Modul weg und verbauen Zellen direkt im Pack oder sogar im Fahrzeugrahmen (Cell-to-Pack bzw. Cell-to-Chassis). Das erhöht die volumetrische Energiedichte, stellt aber neue Anforderungen an den Schutz: Da keine Modulgehäuse mehr als Barriere dienen, wandert der mechanische Schutz direkt zwischen die Zellen – durch strukturelle Füllschäume, vergossene Keramik-Compounds oder besonders robuste Mica-Aerogel-Hybride.

8.3 Intelligente Elektrolyte und intumeszierende Beschichtungen

Auf Materialebene forschen Institute weltweit an thermoresponsiven Elektrolyten, die bei Erreichen einer kritischen Temperatur den Ionentransport im Zellinneren schlagartig unterbrechen – eine Art molekulare Schmelzsicherung. Parallel dazu entwickeln Hersteller wie Freudenberg 3D-formbare intumeszierende Beschichtungen, die direkt auf Zellverbinder oder Gehäuseteile aufgebracht werden und im Brandfall eine hochisolierende Kohlenstoffschicht bilden.

9. Das Sicherheitsschichtprinzip in der Praxis

Ein moderner Hochvolt-Speicher kombiniert alle beschriebenen Maßnahmen zu einem mehrstufigen Schutzkonzept. Im Querschnitt durch ein typisches Cell-to-Pack-System sieht der Aufbau von unten nach oben folgendermaßen aus:

- Kühlplatte (Aluminium) als Wärmesenke
- Thermisch leitfähiger, elektrisch isolierender Gap Filler (Silikon- oder PU-basiert) zwischen Kühlplatte und Zelle
- Zellgehäuse, umwickelt mit PET- oder Polyimid-Tape als primäre (elektrische) Isolation
- Mica-Aerogel-Inlay oder ATP-Pad zwischen den Zellen als Anti-Propagation-Barriere
- Intumeszierendes Dichtmittel am Gehäusedeckel
- Hitzeschild aus Mica-Composite oder keramischem Elastomer unter dem Deckel
- Venting-Membran oder Berstscheibe für kontrollierte Druckentlastung

Kein einzelnes dieser Materialien würde allein ausreichen. Erst das Zusammenspiel aller Schichten macht aus Tausenden energiedichter Zellen ein System, das selbst unter extremen Bedingungen beherrschbar bleibt. Daneben wirken das Batteriemanagementsystems (BMS) durch Überwachung und Abschaltung für weitere Sicherheit.