



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Gefahren im Umgang mit Lithium- Batterien aus brandschutztechnischer Sicht**

**Bachelorarbeit**  
im Studiengang  
Gefahrenabwehr/Hazard Control

**Robert Leon Ouvrier**

Matr.-Nr.: 1984211

17. März 2014

Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften Hamburg

1. Gutachter: Prof. Dr. Bernd Kellner
2. Gutachter: Branddirektor Andreas Kattge

## Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit werden die unterschiedlichen Aspekte der Lithium-Technologie betrachtet.

Es wird das Funktionsprinzip von Batterie und Akkumulator erläutert und über Eigenschaften sowie Ausführungen primärer und sekundärer Speichertechnologien informiert. Nach einer kurzen Abhandlung über die Primärelemente werden die Sekundärzellen vorgestellt.

Der wesentliche Teil der Arbeit behandelt den Lithium-Akkumulator. Nach einem Exkurs über die Technologie schließen sich die Themen Gefahren, Schadenverhütung und Brandverhalten an. Das Brandverhalten und das Gefahrenpotential von Lithium-Batterien und Lithium-Akkumulatoren wird anhand der elektrochemischen Eigenschaften und anhand von Einsatzbeispielen erörtert.

Es folgen Ausführungen zu Lagerung und Transport sowie zu geltenden Normen. Nach einigen Anwendungsbeispielen des Lithium-Akkumulators wird auf Schadenfälle und bereits bestehende Einsatztaktiken von Feuerwehren bei Brandeinsätzen mit Lithium-Energiespeichern eingegangen. Die Arbeit schließt im Kapitel *Maßnahmenkatalog* mit Vorschlägen von dem Autor für die weitere organisationsübergreifende Vorgehensweise zur Gefahrenprävention.

### Schlagwörter:

- Lithium-Batterie
- Sicherheitstechnik
- Kompetenzzentrum
- Transport und Lagerung
- Maßnahmenkatalog
- Einsatzempfehlungen

## **Abstract**

Subject of this bachelor thesis are the various aspects of the lithium-ion technology.

This thesis explains the functional principles of battery and accumulator and gives information on the characteristics and technical designs of primary and secondary battery technology. After a brief treatise of the primary cells the secondary cells are explained.

The main part of this thesis focuses on the lithium accumulator. An excursus on the technology of lithium accumulator is followed by the topics of possible hazards, loss prevention and fire behaviour. These topics are discussed based on electrochemical properties and examples of fire-fighting operations.

The next section deals with storage, transportation and standards. Examples of the application of lithium accumulators are given. These are followed by an explanation of the already existing operational tactics which are recommended to the fire brigades when fire-fighting close to lithium energy storages.

The concluding chapter "Maßnahmenkatalog" contains proposals by the author for an inter-organisational approach to prevent hazards that can occur in connection with lithium-ion technology.

### **Keywords:**

- **Lithium-battery**
- **Safety technology**
- **Competence centre**
- **Transportation and storage**
- **Catalogue of measures**
- **Instructions and recommendations for rescue operations**

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Vorwort</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Allgemeine Funktionsprinzipien von Batterie und Akkumulator</b> .....	<b>12</b>
3.1 Die galvanische Zelle.....	12
3.2 Ausführungsformen .....	13
<b>4 Primärelemente</b> .....	<b>14</b>
4.1 Grundlagen der Primärelemente.....	14
4.2 Bisherige Primärelemente .....	15
4.3 Li-Primärelemente .....	16
4.3.1 Technologie Li-Batterien.....	16
4.3.2 Ausführungsbeispiele .....	17
4.3.3 Herstellung .....	18
4.3.4 Sicherheitsrisiken .....	19
<b>5 Sekundärzellen ausgenommen der Lithium-Technologie</b> .....	<b>20</b>
5.1 Sekundärelemente allgemein .....	20
5.2 Bisherige Sekundärelemente.....	20
<b>6 Lithium-Akkumulator</b> .....	<b>24</b>
6.1 Technologie.....	24
6.2 Leistungsklassen .....	29
6.3 Zell- und Batteriedesign.....	30

---

6.4	Laden und Entladen .....	31
6.5	Herstellung .....	32
6.6	Marktentwicklung.....	35
6.7	Gefahren .....	36
6.7.1	Gefahrenklassen .....	36
6.7.2	Fehlermechanismen auf Zellebene.....	37
6.7.3	Schadenreaktion.....	38
6.7.4	Sicherheitstechnik .....	39
6.8	Schadenverhütung und Sicherheitsregeln .....	41
6.8.1	Technische Maßnahmen zur Gefahrenreduzierung .....	41
6.8.2	Bauliche Maßnahmen.....	42
6.8.3	Organisatorische Maßnahmen.....	42
6.8.4	Schutzmaßnahmen für Personen .....	43
6.9	Brandverhalten .....	44
6.9.1	Brandversuche Elektrolyt.....	44
6.9.2	Gefahren während des Herstellungsprozesses.....	45
6.10	Lagerung und Transport .....	46
6.10.1	Lagerung .....	46
6.10.2	Transportvorschriften.....	48
6.10.3	Internationale Vorschriften .....	48
6.10.3.1	Erforderliche Prüfung für den Transport.....	50
6.10.3.2	Einzelregelungen.....	51
6.10.3.3	Vorschriften für Lufttransport .....	52
6.10.3.4	Vorschriften für Straßen-/ Eisenbahntransport.....	52
6.10.3.5	Sondervorschriften .....	53
6.11	Gesetzliche Regelung.....	54
<b>7</b>	<b>Anwendungen von Lithium-Batterien .....</b>	<b>58</b>
7.1	Beispiele.....	58
7.2	Anwendungen mit hoher Leistung.....	58
7.2.1	Kraftfahrzeuge mit Lithium-Batterien.....	58
7.2.2	Lithium-Batterien für Traktionsanwendungen.....	61
7.2.3	Energiespeicher im öffentlichen Netz.....	61

---

<b>8</b>	<b>Schadenfall .....</b>	<b>62</b>
8.1	Beispiele.....	62
8.2	Verbrennungsreaktionen .....	63
8.3	Löschverfahren.....	64
8.4	Vorgaben für den Einsatz mit Lithium-Batterien.....	66
8.4.1	Einsatzhinweise im Schadenfall von Fahrzeugen .....	67
8.4.2	Rettungs- und Löscharbeiten an Fahrzeugen .....	67
8.4.3	Empfehlungen des ÖBFV bei Fahrzeugen.....	68
<b>9</b>	<b>Maßnahmenkatalog .....</b>	<b>70</b>
9.1	Anforderungen an Kraftfahrzeug-Hersteller .....	71
9.1.1	Rettungskarte .....	71
9.1.2	Fahrzeugidentifikation.....	72
9.1.3	Interne Sicherheitseinrichtungen.....	72
9.2	Andere Fahrzeuge .....	73
9.3	Rettungskräfte/ Feuerwehren .....	73
9.3.1	Kompetenzzentrum .....	74
9.3.2	Einsatzkräfte.....	77
9.3.3	Gesetzgeber.....	78
9.3.4	Transportfahrzeuge .....	78
<b>10</b>	<b>Ergebnis und Diskussion.....</b>	<b>79</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>81</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>86</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>87</b>
	<b>Erklärung an Eides Statt.....</b>	<b>89</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzipdarstellung einer galvanischen Zelle.....	12
Abb. 2: Schematischer Aufbau einer alkalischen Zink-Manganoxid-Batterie .....	15
Abb. 3: Beispiele für 3V-Lithium-Primärbatterien .....	16
Abb. 4: NiCd-Batterie, Bahnanwendung .....	21
Abb. 5: NiMH-Batterie von der Fa. Cobasys für Toyota-Kraftfahrzeuge.....	22
Abb. 6: NaNiCl-Batterie/ZEBRA-Batterie .....	23
Abb. 7: Funktionsprinzip des Lithium-Ionen-Akkus .....	25
Abb. 8: Elektronenmikroskopaufnahmen zweier Polypropylen-Separatoren.....	26
Abb. 9: Verwendete Materialkombinationen für Lithium-Ionen-Batterien.....	27
Abb. 10: Beispiele für Batteriepacks kleiner und großer Leistung.....	31
Abb. 11: Beschichtung von Elektroden.....	32
Abb. 12: Herstellungsprozess von prismatischen und zylindrischen Zellen .....	34
Abb. 13: Energiedichte und Leistungsdichte von aktuellen und zukünftigen Batterietechnologien .....	35
Abb. 14: Lithiumbedarf in Kilotonnen pro Jahr bei konstanter Schätzung .....	36
Abb. 15: Mögliche Fehlermechanismen auf Zellebene .....	38
Abb. 16: Versuchsaufbau für die Überhitzung einer Li-Flachzelle.....	44
Abb. 17: Ergebnis des Überhitzungsversuchs mit abgesenktem Sauerstoffgehalt.....	45
Abb. 18: Gefahrgutsymbol und Gefahrentafel.....	49
Abb. 19: Anordnung der Batterie im Opel Ampera.....	59
Abb. 20: Pyro-Switch: Auslösung und mit getrennter Verbindung.....	59
Abb. 21: Auszug aus der Rettungskarte des Opel Amperas.....	60
Abb. 22: Li-Batterie für Traktionsanwendung: Grundmodul / Batterieeinheit.....	61
Abb. 23: Zerstörte Li-Batterie des Dreamliners.....	62
Abb. 24: Brand einer Frachtmaschine ausgelöst durch brennende Li-Batterien.....	62
Abb. 25: Verbrennungsdreieck .....	63
Abb. 26: Erforderliche Voraussetzung für eine Explosion .....	64
Abb. 27: Kompetenzzentrum als zentrale Koordinierungsstelle .....	75

---

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Auszug aus elektrochemischer Spannungsreihe .....	13
Tab. 2: Auswahl technisch wichtiger Primärbatterien.....	14
Tab. 3: Vergleichsdaten heutiger Primärzellen .....	17
Tab. 4: Leistungsklassen von Li-Batterien .....	29
Tab. 5: Einteilung in Gefahrenklassen bei Betrieb außerhalb der Spezifikation .....	37
Tab. 6: Sondervorschriften .....	54



## 1 Vorwort

Diese Bachelorarbeit gibt den aktuellen Stand der Entwicklungen, Anwendungen und Anforderungen neuer Batterietechnologien auf Lithiumbasis wieder. Sie basiert ausschließlich auf dem Studium der verfügbaren Literatur sowie auf Recherchen im Internet. Daneben wurden Vortragsdokumente, Firmenunterlagen und Normen ausgewertet. Eigene Untersuchungen und Arbeiten waren im Rahmen der Bachelorarbeit nicht vorgesehen.

Die Arbeit kann nur eine Momentaufnahme darstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass neueste Erkenntnisse und Untersuchungsergebnisse nicht immer zur Verfügung standen. Der Text enthält Verweise auf die wesentlichen Literaturstellen.

Es wird auf die Belange der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben eingegangen, speziell auf die mit der Li-Technologie verbundenen Einsatzgefahren und -szenarien. Die Arbeit schließt mit Vorschlägen für zukünftige Strategien zu diesem Themenkomplex.

Für die Unterstützung durch die zahlreichen Firmen, Behörden und Organisationen möchte ich mich herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Kellner und Herrn Branddirektor Kattge für die Betreuung und gutachterliche Tätigkeit sowie den Mitarbeitern der Feuerwehr Hamburg für ihre Hilfestellung.

## 2 Einleitung

Laut einer aktuellen Studie der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft KPMG spielen Batterie- und Hybridantriebe in den USA und Europa auch in den nächsten Jahren nur eine untergeordnete Rolle. Die befragten Manager setzen stattdessen auf sparsamere Verbrennungsmotore einige auch auf Elektroantriebe, gespeist von Brennstoffzellen. Bei asiatischen Herstellern, u. a. aus China, herrscht eine ausgewogenere Meinung vor. Zwei von fünf Unternehmen wollen mehr in elektrisch angetriebene Fahrzeuge investieren (KPMG AG; Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2014).

Trotz dieser verhaltenen Prognosen werden sich Fahrzeuge durchsetzen, die ausschließlich elektrisch angetrieben oder in der Mischform als Plug-in-Hybrid ausgeführt sind (E-Mobility) (KPMG AG; Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2014). Dies gilt nicht nur für Pkw sondern insbesondere auch für andere Fahrzeugtypen wie Busse oder Fahrzeuge für den Gütertransport. Diese Entwicklung der alternativen Antriebssysteme ist vor allem durch die begrenzten fossilen Brennstoffe vorangetrieben sowie durch die zunehmende Luftverschmutzung in Ballungsräumen und den ständigen Ausbau der erneuerbaren Energiequellen. Die Dynamik der Umstellung mag aus heutiger Sicht noch gering sein, der Weg ist aber vorgezeichnet.

Neben der E-Mobility darf die Vielzahl der elektrischen Systeme nicht vergessen werden, die bisher netzgespeist betrieben wurden und nun, dank der Akkumulatoren auf Lithiumbasis, zunehmend netzunabhängig ausgeführt werden.

Der Akkumulator, d.h. die wieder aufladbare Batterie, bildet heute das Schlüsselement, da sich die übrigen Komponenten eines elektrischen Antriebssystems bereits auf einem hohen Entwicklungsniveau befinden. Mit der inzwischen industriell nutzbaren Lithium-Technologie (Li-Technologie) für Akkumulatoren erhalten die alternativen Antriebssysteme einen deutlichen Schub. Hohe Entwicklungspotentiale, im technischen, als auch im wirtschaftlichen Bereich, gilt es weiterhin umzusetzen. Die technischen Daten der heutigen Li-Akkumulatoren übertreffen bereits bei weitem die der bisherigen Batterie-Systeme.

Die Li-Technologie beinhaltet aufgrund der verwendeten Elemente jedoch ein höheres Gefahrenpotential als beispielsweise Akkumulatoren mit Blei- oder Nickel-Metallhydrid-Technik. Hinzu kommt in Ausführungen mit hohem Energieinhalt, wie z. B. in der E-Mobility, ein hohes Spannungslevel. Nicht zu vergessen sind die aufsehenerregenden Meldungen wie *"Boeing Dreamliner wegen brennender Li-Batterie gesperrt"* oder *"Brennende Elektrofahrzeuge mit Li-Batterie nach einem Unfall"*.

---

Die aktuellen Probleme können zum Teil noch auf den geringen Erfahrungsschatz mit der neuen Technologie zurückgeführt werden, da diese sozusagen noch in den Kinderschuhen steckt. Die Probleme machen andererseits auch deutlich, dass mit der vermehrten Nutzung der Li-Technologie, für alle davon betroffenen Stellen, ein weiteres Kapitel aufgeschlagen wird. Dies gilt insbesondere für die Einsatzkräfte im Schadens- oder Brandfall, also auch für Feuerwehren. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass vorbeugende Maßnahmen nicht zu vergessen sind.

### 3 Allgemeine Funktionsprinzipien von Batterie und Akkumulator

#### 3.1 Die galvanische Zelle

Das Grundprinzip einer Batterie bildet die galvanische Zelle. Sie wandelt chemische Energie in elektrische Energie um. Die Zelle enthält zwei Elektroden aus verschiedenen Metallen, die in eine stromleitende wässrige Lösung, den Elektrolyten, eingetaucht sind. Die Metalle haben ein unterschiedlich starkes Bestreben mit dem Elektrolyten zu reagieren. Metalle, die positive Ladungen abgeben, sind gegenüber dem Elektrolyten negativ geladen. Positive Ionen gehen in Lösung und die Elektronen bleiben auf dem Werkstoff. Um einen neutralen Zustand zu erlangen müssen nun die negativen Ladungsträger freigegeben werden. Andere Metalle sind bestrebt positive Ionen aufzunehmen und sind somit gegenüber dem umgebenen Medium positiv geladen. Um in einen neutralen Zustand zu kommen müssen Elektronen aufgenommen werden. Zwischen den beiden Metallen und dem Elektrolyt entsteht so ein Spannungs- und Ladungsunterschied. Die oben beschriebenen Vorgänge sind charakteristisch für eine wird als galvanische Zelle (s. Abb. 1) (Tkotz, et al., 2002, 531).

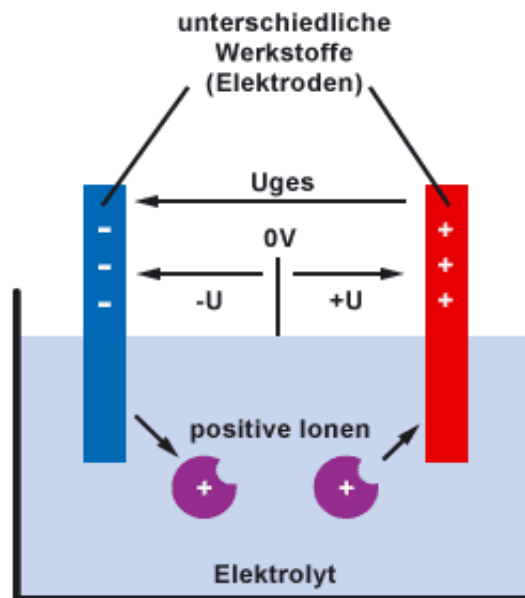


Abb. 1: Prinzipdarstellung einer galvanischen Zelle  
(Schnabel, 2014)

Die Erzeugung von Ladungs- und Spannungsunterschieden wird in einer Batteriezelle nutzbar gemacht. Metalle zeigen bei der Reaktion mit dem Elektrolyt unterschiedliche Tendenzen. Es entsteht ein Ionenfluss vom edleren zum unedleren Metall und

Elektronen werden freigesetzt. Dadurch zersetzt sich das unedlere Metall. Die durch den Ladungsunterschied an den Elektroden aufgebaute Spannung kann an den Elektroden genutzt werden.

Die Polarität und die Spannungshöhe der Elektrodenwerkstoffe sind der elektrochemischen Spannungsreihe zu entnehmen. Die Potentialdifferenzen gegenüber der neutralen Bezugselektrode Wasserstoff ergeben den Betrag der Gesamtspannung (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Auszug aus elektrochemischer Spannungsreihe  
(Atkins, Bär, & Paula, 2006, 250)

Metall		Spannung [V]
Lithium	Li <sup>+</sup>	- 3,04
Natrium	Na <sup>+</sup>	- 2,71
Magnesium	Mg <sup>2+</sup>	- 2,35
Aluminium	Al <sup>3+</sup>	- 1,66
Zink	Zn <sup>2+</sup>	- 0,76
Eisen	Fe <sup>2+</sup>	- 0,44
Zinn	Sn <sup>2+</sup>	- 0,14
Wasserstoff	H <sup>+</sup>	0,00
Zinn	Sn <sup>4+</sup>	+ 0,05
Kupfer	Cu <sup>2+</sup>	+ 0,35
Silber	Ag <sup>+</sup>	+ 0,8
Gold	Au <sup>+</sup>	+ 1,5

### 3.2 Ausführungsformen

Man unterscheidet galvanische Zellen in drei Gruppen:

Die **Primärzelle** (Batterie) erhält ihren elektrochemischen Energieinhalt bei der Herstellung aus der Kombination der verwendeten Materialien. Der Entladevorgang ist irreversibel.

Als **Sekundärzelle** (Akkumulator) wird eine wiederaufladbare Zelle bezeichnet. Die Anzahl der Lade-/Entladezyklen ist begrenzt.

Bei der als **Tertiärzelle** bezeichneten Brennstoffzelle werden die chemischen Energieträger von außen der Zelle zugeführt. Damit ist theoretisch ein kontinuierlicher Betrieb möglich. Diese Form der Energiewandlung ist nicht Bestandteil dieser Ausarbeitung (Linde, 2012).

## 4 Primärelemente

### 4.1 Grundlagen der Primärelemente

Bei den Primärelementen fließt nach dem Schließen des Stromkreises einmalig und nur in eine Richtung ein Strom, bis die Ladungsmenge verbraucht ist. Die elektrochemischen Vorgänge lassen sich nicht mehr umkehren, weil das negative Elektrodenmaterial irreversibel gebunden ist. Das Primärelement kann somit nicht wieder aufgeladen werden.

Eine höhere Spannung eines Batteriesystems wird durch Reihenschaltung von mehreren Zellen erzielt. Soll die Kapazität vergrößert werden ist eine Parallelschaltung anzuwenden. Neben der Spannung und der Kapazität gibt es weitere Auswahlkriterien für Batterien, wie z. B. Lagerfähigkeit, Lebensdauer, Temperaturbedingungen, Größe und Gewicht. Je nach Anwendungsgebiet haben Primärbatterien unterschiedliche Spezifikationen (s. Tab. 2):

Tab. 2: Auswahl technisch wichtiger Primärbatterien  
(Tkotz, et al., 2002, 532)

Elemente Anode/ Katode	Nenn- span- nung [V]	Eigenschaften, Vorteile, Nachteile	Energie- dichte [Wh/cm <sup>3</sup> ]	Anwendungs- beispiel
Zink/Mangan- dioxid (Leclanché)	1,5	Bei niedriger Temperatur 2 Jahre lagerfähig, nach Tiefenentladung auslauf- gefährdet, preiswert	0,08 - 0,15	Taschenlampen, Spielzeug
Zinkpulvergel/ Mangandioxid (alkalisch)	1,5	Hohe Leistung (auch bei großen Strömen), hohe Belastbarkeit, geringe Selbstentladung (etwa 3%/a), hohe Auslaufsicherheit	0,15 - 0,4	Blitzlichtgeräte, Kameras
Zink/Silberoxid	1,55	Gute Spannungs- konstanz, lange Lebens- dauer, Selbstentladung (etwa 5%/a), 2 Jahre lagerfähig bei Raumtemperatur, teuer	0,4 - 0,6	Uhren, Fotoapparaten, Taschenrechner
Lithium/ Chromoxid, Lithium/ Manganoxid	1,5 - 3,6	Geringe Selbstentladung (etwa 1%/a), hohe Lagerzeit (bis 10 Jahre), rückstromgefährdet, hoher Kaufpreis	0,4 - 1,0	Speicherpufferun- g (Memory back- up), Uhren, Fotogeräte, Alarmanlagen

## 4.2 Bisherige Primärelemente

### Zink/Mangandioxid-Batterie/Leclanché-Zelle

Die Leclanché-Zelle wurde 1866 von dem gleichnamigen französischen Chemiker vorgestellt. Seitdem durchlief sie eine ständige Entwicklung und Optimierung. Der verwendete flüssige Elektrolyt wurde durch einen gelförmigen ersetzt. Damit wurde diese Technologie zum sogenannten Trockenelement. Der Zinkbecher wird bei Tiefentladung zersetzt und es kommt zum Leck der Batterie. Verwendete Materialien und die Produktionsverfahren sind preiswert und einfach (Tkotz, et al., 2002, 533).

### Alkalische Zink-Mangandioxid-Batterie

Die alkalischen Zink-Mangandioxid-Zellen haben die früher verwendeten Leclanché-Zellen weitestgehend abgelöst. Ein Vorteil dieser Zelle, gegenüber dem Vorgängermodell, liegt in der Beständigkeit der Anode, die aufgrund des sauren Milieus nicht aufgelöst wird. Somit bleibt die Zelle dicht und auch bei Tiefentladung auslaufsicher. Die Zelle ist mit bis zu drei Jahren Lagerdauer lange lagerfähig und ermöglicht durch konstanten Innenwiderstand eine Hochstromentladung (schnelle Entladung, die um ein Vielfaches höher ist als die Nennstromstärke) (Tkotz, et al., 2002, 533).

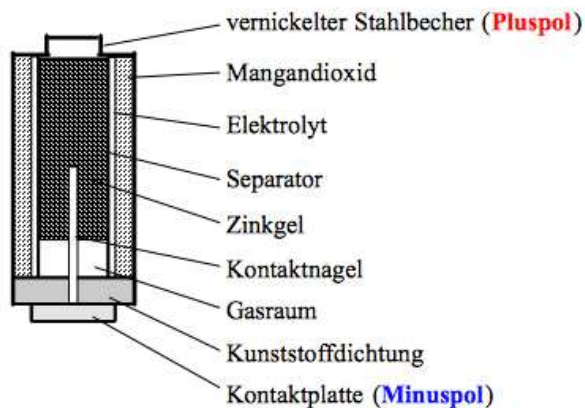


Abb. 2: Schematischer Aufbau einer alkalischen Zink-Manganoxid-Batterie (Rossmann, 2014)

### Zink-Silberoxid-Batterie

Die Zink-Silberoxid-Batterie unterscheidet sich nur im Kathodenmaterial von der alkalischen Zink-Mangandioxid-Batterie. Es wird Silberoxid als Kathode (positiver Pol) verwendet. Durch das Silber werden die Energiedichte und der Preis angehoben. Die Zink-Mangandioxid-Batterie wird vorwiegend als Knopfzelle hergestellt (Tkotz, et al., 2002, 533).

## 4.3 Li-Primärelemente

### 4.3.1 Technologie Li-Batterien

Li-Batterien gehören zu den aussichtsreichsten elektrochemischen Energiespeichern für mobile Anwendungen. Aufgrund der geringen Dichte von Lithium ( $0,53 \text{ g/cm}^3$ ) und dem höchsten Normalpotential der metallischen Elemente ( $-3,04 \text{ V}$ ; vgl. Tab. 1) ist es besonders gut für negative Elektroden von Primärzellen geeignet (Tkotz, et al., 2002, 532).

Bei gebräuchlichen Li-Knopfbatterien handelt es sich zumeist um Li-Mangandioxid- und Li-Kohlenstoffmonofluorid-Zellen. Das als Anode verwendete Li-Metall reagiert beim Entladevorgang zuerst zu  $\text{Li}^+$  und bindet sich dann irreversibel mit Mangandioxid-Ionen zu  $\text{LiMnO}_2$ . Die spezifische Energie liegt bei  $200 \text{ Wh/kg}$  (Treub & Rüetschi, 1998, 53ff).

Diese Art von Batterien findet häufig in Schaltungen von Computern, Quarzuhren und Steuerschaltungen Verwendung. Sie überzeugt durch die hohe Lebensdauer und eine geringe Selbstentladung von weniger als  $1 \text{ %/a}$ . Eine hohe Energiedichte wird mit zylindrischen Primärelementen erreicht, in denen die Elektroden als Wickel ausgeführt sind. Die Anode besteht aus einer, als Hohlzylinder ausgeführten Lithiumfolie (Treub & Rüetschi, 1998, 53ff).



Abb. 3: Beispiele für 3V-Lithium-Primärbatterien (VARTA Microbattery GmbH, 2014)

Im Vergleich zu herkömmlichen Batterien sind Klemmspannung (Spannung zwischen zwei Anschlüssen einer Batterie), Kapazität und Energiedichte höher. Die Selbstentladung ist geringer. Die spezifische Energie kann bei einer Zellspannung zwischen  $3 \text{ V}$  und  $4 \text{ V}$  bis zu  $490 \text{ Wh/kg}$  betragen. Im Gegensatz dazu beträgt die spezifische Energie einer Alkali-Mangan-Zelle  $128 \text{ Wh/kg}$  bei einer Spannung von  $1,2 \text{ V}$ .



Je nach Typ sind die Li-Primärbatterien in einem Temperaturbereich von -40 °C bis 92 °C einsetzbar (Treib & Rüetschi, 1998, 55).

Die Li-Primärbatterien mit hoher Energiedichte unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Elektrolyte und des aktiven Materials der Elektrode, das sich beim Entladen reduziert. Das Material der Kathode kann fest, flüssig oder auch im Elektrolyt gelöst sein. Für Li-Primärbatterien sind Kathodenmaterialien, wie Mangandioxid, Thionylchlorid, Sulfurylchlorid und Schwefeldioxid gebräuchlich. Eine Acetonitril-Lösung mit Lithiumnitrit oder Li-Aluminiumchlorid in Acetonitril sind gängige Elektrolyte, die mit weiteren Leitsalzen versehen werden können (Treib & Rüetschi, 1998, 53ff).

### 4.3.2 Ausführungsbeispiele

Die lithiumbasierten Grundtypen für Energiespeicher sollen im Folgenden hinsichtlich der wesentlichen Bestandteile beschrieben werden. Die Kenntnisse über die wesentlichen Bestandteile und Bauarten bestimmen zu einem erheblichen Teil das jeweilige Gefahrenpotential (Treib & Rüetschi, 1998, 56).

Tab. 3: Vergleichsdaten heutiger Primärzellen  
(Jacobi, 2001)

Typ	Typische Lastspannung [V]	Anwendung
Li-Thionylchlorid-Batterie	3,4	Netzunabhängige Versorgung von Sicherheitstechnischer Elektronik und elektronischen Energiezählern sowie Heizkostenverteilern im Industrie- und Militärbereich.
Li-Mangandioxid-Batterie	2,9	Weit verbreitete Anwendung in Kameras, Uhren und Speicherpufferung.
Li-Schwefeldioxid-Batterie	2,7	Militärische Anwendung.
Li-Iod-Batterie	2,8	Stromversorgung für Herzschrittmacher.
Li-Eisensulfid-Batterie	1,5	Fotobereich

#### Li-Thionylchlorid-Batterie

Die Li-Thionylchlorid-Batterie ist mit 10 Jahren Lagerfähigkeit, guter Schockbelastbarkeit und Baugrößen von 370 mAh bis 20000 Ah geeignet für viele unterschiedliche netzunabhängige Anwendungen. Sie wird zum Beispiel in Raketen-silos als Notstromversorgung verbaut. In spezifizierter Ausführung ist sie in einem Temperaturbereich von -40 bis 150 °C zu nutzen (Treib & Rüetschi, 1998, 61).

### **Li-Mangandioxid-Batterie**

Die Li-Mangandioxid-Batterien enthalten Mangandioxid-Kathoden. In zylindrischen Zellen liegen die Elektroden meistens als spiralförmig gewickelten Folien vor, als Separator dient Polypropylenvlies. Die Batterie lässt sich lange und ohne wesentliche Verluste lagern, daher findet sie oft in militärischen Bereichen Anwendung (Treib & Rüetschi, 1998, 52).

### **Li-Schwefeldioxid-Batterie**

Li-Schwefeldioxid-Batterien werden im Industrie- und Militärssektor verwendet. Aufgrund gefährlicher Inhaltstoffe ist der Transport mit hohen Auflagen verbunden. Die Sicherheitsbedenken hinsichtlich der giftigen Stoffe sind sehr hoch, dadurch findet die Batterie keine Anwendung im privaten Bereich. In Sonarbojen und militärischen Überwachungsgeräten wird dieser Energiespeicher eingesetzt (Jacobi, 2001, 87ff).

### **Li-Iod-Batterie**

Diese Batterie ist mit einer Gangautonomie mit bis zu 15 Jahren geeignet für den Einsatz in Herzschrittmacher und Quarzarmbanduhren. Die Li-Anode ist mit Polyvinylpyridin beschichtet. Als Separator wird Li-Iodid verwendet. Ein Komplex aus Iod und Polyvinylpyridin bildet die Kathode. Die Lebensdauer der Batterie steht in Abhängigkeit zu dem Patientenzustand (Treib & Rüetschi, 1998, 57f) (Jacobi, 2001, 91ff).

### **Li-Eisensulfid-Batterie**

Die Kathode besteht bei einer Li-Eisensulfid-Batterie aus metallischer Li-Folie, die Anode aus einem metallischen Träger mit aufgebrachtem Eisensulfid. Die Li-Eisensulfid-Batterie weist eine geringe Selbstentladung auf. Der Energieinhalt liegt nach zehnjähriger Lagerung bei etwa 85 % des Ausgangswertes. Das ist eine sechsmal höhere Kapazität als gleichgroße Alkali-Mangan-Zelle bei 20 °C (Treib & Rüetschi, 1998, 136ff).

#### **4.3.3 Herstellung**

Die Herstellung von Li-Batterien erfolgt in Trockenräumen mit einer Luftfeuchtigkeit von unter 1 %. Lithium reagiert bereits mit geringen Mengen Wasser und Sauerstoff. Eine Reaktion zwischen Lithium, Sauerstoff und Wasser kann zu irreversiblen Schäden der Li-Zelle führen und somit deren Lebensdauer senken. Im Vergleich zu wässrigen Elektrolyten, hat das bei der Li-Ionen-Zelle verwendete Medium eine sehr geringe Leitfähigkeit, die durch dünn ausgeführte Elektroden kompensiert wird (Treib & Rüetschi, 1998, 52ff).

Die ersten Li-Metall-Primärzellen waren theoretisch wieder aufladbar. Beim Wiederaufladen kehrte das Lithium allerdings nicht wieder in die ursprüngliche Form zurück, es bildete stattdessen spitze, nadelförmige Auswüchse von Li-Kristallen aus, sogenannte Dendriten. Diese konnten den Separator durchstoßen und einen inneren Kurzschluss der Batterie auslösen. In der heutigen Batterietechnologie werden entsprechende Li-Metall-Batterien auch als Akkumulatoren eingesetzt. Die Gefahr von Dendritenbildung beim Ladevorgang ist weitestgehend minimiert worden (Treib & Rüetschi, 1998, 56).

#### **4.3.4 Sicherheitsrisiken**

Mit zunehmender Batteriegröße und Energiedichte der Li-Batterien steigt ihr Sicherheitsrisiko. Bei Knopfzellen ist das Risiko minimal, durch die Konstruktion dieser Primärzellen kann das Risiko der Überhitzung reduziert werden. Zylindrische Zellen, mit zylindrischer Kathode aus Aktivkohle, regulieren den maximalen Endladestrom durch ihre begrenzte Oberfläche und den hohen Innenwiderstand. Eine Überhitzung findet selbst bei Kurzschluss kaum statt (Treib & Rüetschi, 1998, 56).

Zylindrische Zellen, mit dünnen, gewickelten Li-Elektroden, können sich bei inneren-, oder äußerlich herbeigeführten Kurzschlüssen, so stark erhitzen, dass die Li-Anode bei 180 °C schmilzt. Das kann zur Explosion der Batterie führen. Um das Risiko der Überhitzung zu senken, wird bei manchen Ausführungen eine semipermeable Membran verbaut, die sich bei Temperaturerhöhung schließt und den Stromfluss senkt. In Gerätebatterien (sogenannten Batteriepacks) verhindern strombegrenzende und thermische Sicherungen die Überhitzung und eine parallelgeschaltete Diode pro Zelle das Umpolen der Batterie (s. Kapitel 6.7.4) (Jossen & Weydanz, 2006, 146f, 164).

## 5 Sekundärzellen ausgenommen der Lithium-Technologie

### 5.1 Sekundärelemente allgemein

Primärspeicher-Technologien werden bevorzugt in technischen Systemen als Langzeitenergiespeicher verwendet. Sekundäre Energiespeicher dagegen setzen sich deutlich im Aufgabenfeld von primären Energiespeichersystemen ab.

Der Begriff Sekundärzelle steht für den wiederaufladbaren, elektrochemischen Energiespeicher, den Akkumulator. Die Sekundärelemente können im Gegensatz zur Batterie, durch die Zuführung von elektrischer Energie, aufgeladen und erneut als Energiespeicher verwendet werden. Die Selbstentladung des Akkumulators liegt jedoch deutlich über der einer Primärzelle.

Der Akkumulator wird sowohl in der Literatur sowie auch umgangssprachlich als Batterie bezeichnet. Zu den bekannten Beispielen zählt die Starterbatterie im Kraftfahrzeug (Kfz) oder die Traktionsbatterie im Elektrofahrzeug. Dementsprechend wird auch im nachfolgenden Text der Akkumulator mit Batterie bezeichnet.

### 5.2 Bisherige Sekundärelemente

Bevor die Li-Batterien ausführlich betrachtet werden, sollen im Folgenden die Eigenschaften der bekannten Batterietechnologien umrissen werden.

#### **Blei-Batterie**

Das Elektrodenmaterial der Blei-Batterie besteht sowohl kathoden-, als auch anodenseitig, aus Blei. Der Elektrolyt kann flüssig oder als Gel ausgeführt sein. Die in der Regel plattenförmig aufgebauten Elektroden sind durch Separatoren getrennt. Der flüssige Elektrolyt besteht aus Schwefelsäure, welche bei einer Gel-Blei-Batterie im Gel gebunden ist. Bei flüssigen Elektrolyten wird während des Entladens und Ladens Wasserstoff freigesetzt (BSE USV-Technik KG, 2013).

Die Blei-Batterie zählt zu den ältesten Speichertechnologien und stellt ein sehr robustes System dar. Bekannte Anwendungen sind Starterbatterien im KFZ, Traktionsbatterien, z. B. in Gabelstaplern, oder stationäre Batterien in Anlagen für unterbrechungsfreie Stromversorgungen. Die Blei-Batterie hat im Vergleich zu neueren Speichertechnologien eine geringe spezifische Energiedichte von ca. 25 bis 35 Wh/kg, deshalb ist sie für einen Einsatz im Elektrofahrzeug ungeeignet. Die Spannung pro Zelle berechnet sich nach der Säuredichte, diese beträgt bei geladener Batterie 1,28 g/cm<sup>3</sup> und in entladener 1,1 g/cm<sup>3</sup>. Die Zellspannung beträgt im geladenen Zustand 2,1 V.

Die Nennspannung wird in der Regel mit 2 V pro Zelle angegeben (Treib & Rüetschi, 1998, 75ff).

### **Nickel-Cadmium-Speichertechnologie**

Die positive Elektrode der Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd-Batterie) besteht aus Nickelhydroxid, die negative Elektrode aus Cadmiumhydroxid. Letzteres geht beim Laden in metallisches Cadmium über. Als Elektrolyt wird konzentrierte Kalilauge eingesetzt.

Der Aufbau der NiCd-Batterie ähnelt der Blei-Batterie, mit dem Unterschied, dass bei der NiCd-Batterie für die Stromführung ein Ableitsystem eingesetzt werden muss. Bei der Bleibatterie leitet das Elektrodenmaterial den Strom ab. Die Elektroden werden durch Polymerfaservlies getrennt. Ihre Leerlaufspannung beträgt 1,2 V und die spezifische Energiedichte liegt zwischen 35 und 50 Wh/kg (Treib & Rüetschi, 1998, 90ff).

Die NiCd-Zellen zeichnen sich gegenüber Bleibatterien mit einer deutlich höheren Lebensdauer und besseren Schnellladefähigkeit aus. Sie sind sehr robust gegenüber elektrischen und mechanischen Beanspruchungen. Aufgrund des geringen Innenwiderstands sind sie sehr belastbar, es besteht keine Gefahr der thermischen Instabilität. Weitere besondere Merkmale sind eine extrem hohe Lebensdauer und eine sehr lange Lagerfähigkeit. NiCd-Batterien werden unter anderem in der Luftfahrt und Bahntechnik eingesetzt (Treib & Rüetschi, 1998, 90ff).



Abb. 4: NiCd-Batterie, Bahnanwendung  
(Accumulatorenwerke HOPPECKE Carl Zoellner & Sohn GmbH, 2014)

Aufgrund der toxischen Bestandteile wurde das Inverkehrbringen der Batterie ab 01.12.2009 durch das Batteriegesetz (BattG) in Deutschland mit speziellen Ausnahmen (Raumfahrt und Rüstungsindustrie) verboten. Zu den Ausnahmen zählen Not- oder Alarmsysteme, Notbeleuchtung, medizinische Ausrüstung und kabellose Elektrowerkzeuge (BattG, i.d.F. vom 24.02.2012, §3). Da die Energiedichte der Li-Ionen-Batterie annähernd doppelt so hoch ist wie die von NiCd-Batterien, werden diese nach und nach ausgetauscht. Wegen ihrer Robustheit ist sie jedoch auch weiterhin im Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen von Bedeutung.

### **Nickel-Metallhydrid-Batterie**

Bei der technisch ausgereiften Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH-Batterie), wird anstelle des Cadmiumhydroxids Metallhydrit verwendet, eine wasserstoffspeichernde Legierung. Als Elektrolyt wird wie bei der NiCd-Zelle eine stark konzentrierte Lauge eingesetzt. Abhängig vom Ladezustand liegt die Klemmspannung bei ca. 1,2 V. Bei Hochleistungszellen beträgt die spezifische Energie 45 Wh/kg und bei Hochenergiezellen bei 75 Wh/kg (Amann, et al., 2012, 212ff).

NiMH-Zellen werden als Rundzelle und als kleinprismatische Zelle ausgeführt, die in Modulen zu größeren Einheiten zusammengesetzt werden (Treib & Rüetschi, 1998, 101ff). Die NiMH-Batterie zeichnet sich durch eine hohe Ladezyklenzahl und niedrige Entladetiefe aus. Das Einsatzgebiet reicht vom Kleinleistungsbereich bis zum Einsatz in Hybridfahrzeugen (z. B. Toyota Prius).



Abb. 5: NiMH-Batterie von der Fa. Cobasys für Toyota-Kraftfahrzeuge (yenra.com, 2004)

## Hochtemperatur-Batterie

Bei der Natrium-Nickel-Chlorid-Batterie (NaNiCl), auch ZEBRA-Batterie genannt (Zero Emission Battery Research Activities), besteht die positive Elektrode aus einem Metallchlorid, das negative Elektrodenmaterial aus flüssigem Natrium. Als Separator wird eine elektronenleitende Keramik eingesetzt, die gleichzeitig auch den Elektrolyt darstellt. Die Zellen müssen beheizt werden, wenn die innere Verlustwärme bei Belastung nicht ausreicht. Die Leerlaufspannung beträgt 2,6 V, die spezifische Energie 90- 120 Wh/kg (Treub & Rüetschi, 1998, 142ff, 216).

Die Hochtemperatur-Batterien haben sich bis auf Spezialeinsätze (Rüstungsindustrie, Flottenbetrieb) nicht durchgesetzt, trotz guter technischer Kenndaten. Die Zellen müssen bei einer Temperatur von ca. 300 °C betrieben werden (Treub & Rüetschi, 1998, 142ff).

Die Zelle besteht aus einem Stahlbecher, welcher gleichzeitig als negativer Pol fungiert und direkt mit dem flüssigen Natrium in Verbindung steht. Die positive Elektrode liegt im Zentrum der Zelle.



Abb. 6: NaNiCl-Batterie/ZEBRA-Batterie  
(Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG)

Ein generelles Problem der Hochtemperaturbatterien auf Natriumbasis besteht in dem Reaktionsverhalten zwischen Natrium und Wasser unter Wasserstoffabspaltung. Natrium ist ein Element der ersten Hauptgruppe und weist somit ähnliche Reaktionseigenschaften wie Lithium auf.

Eine weitere Hochtemperatur-Batterie ist die Natrium-Schwefel-Batterie, mit einer Zellspannung von ca. 2 V. Die Entwicklung der Natrium-Schwefel-Zelle wurde Ende der 90er Jahre aufgrund von technischen Problemen abgebrochen (Treub & Rüetschi, 1998, 140ff).

## 6 Lithium-Akkumulator

Dieses Kapitel gibt eine detaillierte Übersicht über technische und rechtliche Besonderheiten von Li-Akkumulatoren. Im Fokus der Betrachtungen stehen unter anderem die Gefahren, welche von dieser Technologie ausgehen. Ebenso werden gesetzlich vorgegebene oder von offizieller Stelle empfohlene, präventive und operative, Maßnahmen vorgestellt.

Im Folgenden Text wird, wie auch im vorangegangenen Kapitel, der Akkumulator als Batterie bezeichnet.

### 6.1 Technologie

Die Li-Batterie als Endprodukt ist das Ergebnis einer auf folgenden Parameter abgestimmten Entwicklung (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012, 19):

- Energieinhalt, entnehmbare Energie
- Leistung, Überlastfähigkeit, Innenwiderstand
- Wirkungsgrad beim Laden und Entladen
- Batteriespannung, Spannungsverlauf während der Entladung
- Lebensdauer, Zyklenzahl
- Einsatztemperatur, maximale Temperatur, Kühlmöglichkeiten
- Ladedauer
- Gefahrenpotential, innere Sicherheit
- Schutz gegen Umgebungseinflüsse
- Batterieeigene Zusatzeinrichtungen, Batteriemanagementsystem (BMS), Trenneinrichtung
- Kosten pro kWh
- Gewicht pro kWh



## Funktionsweise

Li-Akkumulatoren funktionieren im Prinzip wie galvanische Zellen (s. Kapitel 3.1), jedoch findet bei ihnen keine irreversible chemische Reaktion der aktiven Materialien statt. In der Anode und Kathode werden Li-Ionen lediglich eingelagert. Beim Wiederaufladen findet eine Umlagerung der Li-Ionen statt (Linde, 2012, 43).

Im Li-Ionen-System wird kathodenseitig ein Lithium interkalierendes (einlagerndes) Metalldioxid (z. B.  $\text{Li-MO}_2$ ) verwendet (Graf, 2013, 31ff) und als Anode ein Kohlenstoffmaterial. Auch dieses ist geeignet für die Einlagerung von Lithium (Wurm, Öttinger, Wittkämper, Zauter, & Vuorilehto, 2013, 45ff). Bei dem Elektrolyt handelt es sich um ein Gemisch aus organischen Lösungsmitteln wie Ethylencarbonat oder Dimethylcarbonat, mit einem Li-Leitsalz als Leitzusatz (Hartnig & Schmidt, 2013, 61ff).

Die Li-Atome sind, aufgrund der Materialeigenschaften von Lithium, im geladenen Zustand der Batterie im Trägermaterial der Anode (negativer Pol) eingebettet. Das anodenseitige Trägermaterial kann aus unterschiedlichen Materialkombinationen bestehen (Hard Carbon, Graphit, Titanat oder Silizium) (Wurm, Öttinger, Wittkämper, Zauter & Vuorilehto, 2013, 45ff).

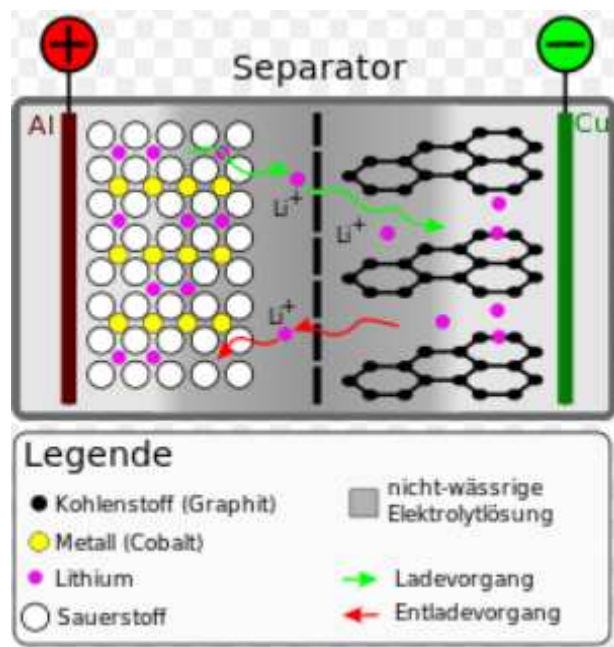


Abb. 7: Funktionsprinzip des Lithium-Ionen-Akkus (Cepheiden, 2009)

Bei einem äußeren Stromfluss, über einen Verbraucher von der Anode zur Kathode, geben die Li-Atome ein Elektron an die Anode ab. Parallel dazu diffundieren die

verbleibenden Li-Ionen durch die semipermeable Membran zur Kathode. Dort werden die Elektronen jedoch nicht aufgenommen, sondern verbleiben im ionisierten Zustand im Metallgitter der Kathode. Die Elektronen werden von den stark ionisierten Metallen der Kathode absorbiert (Treib & Rüetschi, 1998, 113ff).

Die Reaktionen beschränken sich auf den Transport von Li-Ionen von der einen zur anderen Elektrode. Diese Akkumulatoren werden auch als Ionen-Transferbatterien oder Shuttlebatterien bezeichnet (Treib & Rüetschi, 1998, 113ff).

Die Kathode (positiver Pol) wird je nach Batterietyp aus unterschiedlichen Materialkombinationen gefertigt (Mischmaterial aus Kobalt, Nickel, Mangan, Eisen). Leichte Oxide und Bronzen, wie zum Beispiel Oxide des Cobalts, Nickels, Mangans, Molybdäns, Vanadiums sowie Magnesium- und Kupfervanadat-Bronzen, lagern Ionen reversibel auf Hohlräumen und Gitterfehlplätzen ein. Im Gegensatz zur Li-Primärzelle müssen die Kathoden von Akkumulatoren nicht nur in der Lage sein, beim Entladen abgegebene Li-Ionen aufzunehmen, sondern auch beim Laden wieder freizusetzen. Die Zellspannung solcher Li-Transferbatterien beträgt 3,6 V (Treib & Rüetschi, 1998, 118f).

Anode und Kathode sind durch den Separator getrennt. Er ist durch eine ausreichende Ionenleitfähigkeit gekennzeichnet, verhindert aber den Durchtritt von Elektronen. Der Separator besteht in der Regel aus mikroporösen Kunststoffen sowie Vliese aus Polymer- und Glasfaser (s. Abb. 8) (Weber & Roth, 2013).

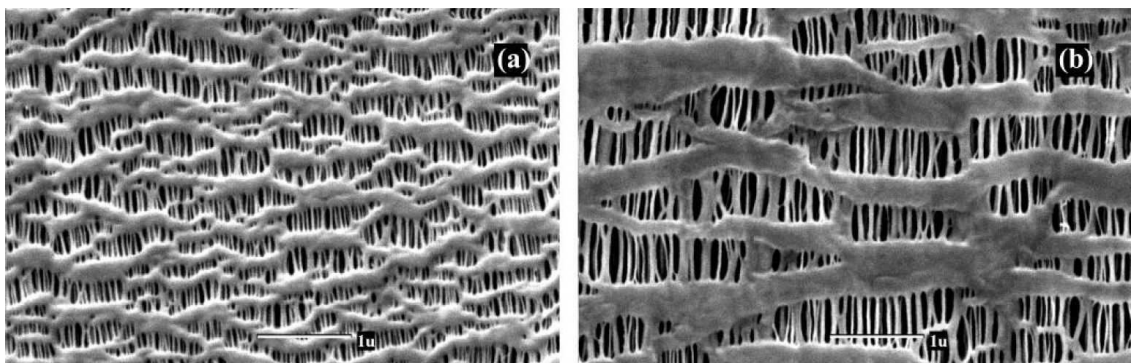


Abb. 8: Elektronenmikroskopaufnahmen zweier Polypropylen-Separatoren (Jaiser, 2012)

Der Elektrolyt zeichnet sich in der Regel durch eine gute Ionen-Leitfähigkeit aus, zusätzlich geht er keine Reaktion mit den am Ladungsaustausch beteiligten Ionen ein. Er besteht aus einem organischen Lösungsmittel mit einem Li-Leitsalz (Hartnig & Schmidt, 2013, 61ff).

Beim Laden und Entladen eines Li-Akkumulators bilden sich Interkalations- oder Einlagerungsverbindungen des Lithiums in der Anode, welche zu einer Volumenänderung des Akkumulators führt. Mit der Verwendung von Graphit, oder graphit-ähnlichem Kohlenstoff als negative Elektrode, kann diese Volumenänderung geringfügig gehalten werden. Die Volumenänderung beträgt bei diesem Typ Akkumulator theoretisch 9 %. Silizium hat eine elfmal höhere Energiedichte als eine Kohlenstoffmodifikation, jedoch beträgt die Volumenänderung des Siliziums bei Ionenaufnahme und -abgabe bis zu 400 % (Wallentowitz & Reif, 2006, 256ff).

### Elektrische Eigenschaften

Die elektrischen Eigenschaften der Zelle, wie z. B. Spannung und Energiedichte sowie Lebensdauer und Gefahrenpotential, werden wesentlich durch die Materialkombination der Kathode bestimmt. Lithium ist Element Nr. 3 des Periodensystems. Es ist durch ein hohes Potential gegenüber Wasserstoff (-3,04 V, s. Tab. 1) sowie eine hohe gewichtsbezogene Kapazität gekennzeichnet.

In Abhängigkeit der Materialkombinationen von Kathode und Anode, ergeben sich unterschiedliche Spannungslagen und Energiedichten. Ferner werden dadurch weitere Eigenschaften wie z. B. Zyklenzahl und Gefährdungspotential beeinflusst. Abb. 9 zeigt einige Beispiele:

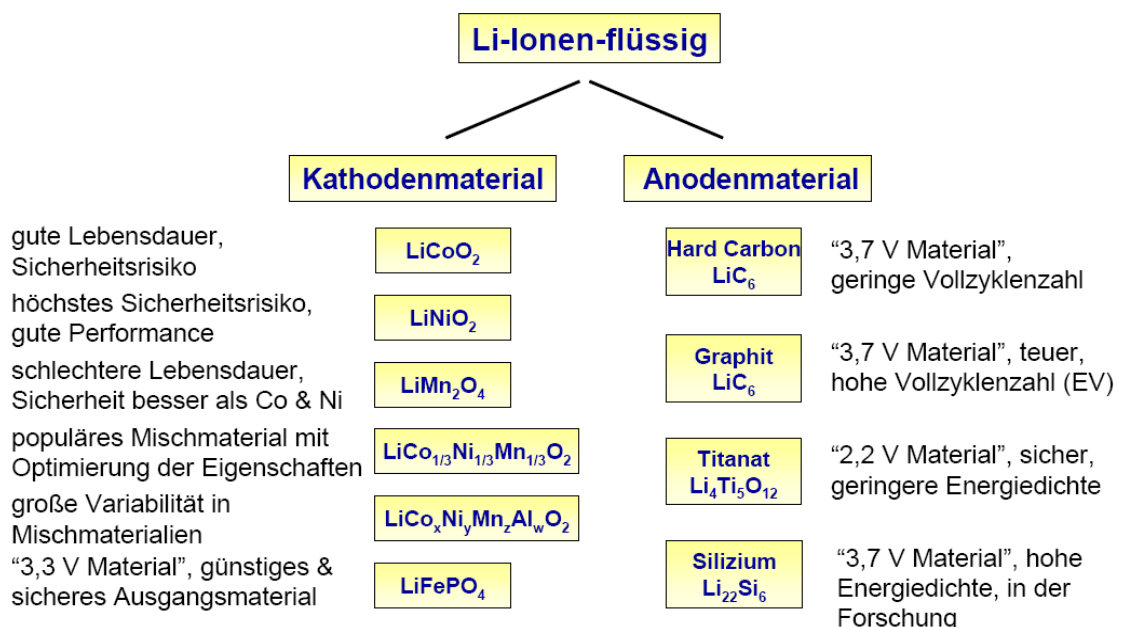


Abb. 9: Verwendete Materialkombinationen für Lithium-Ionen-Batterien (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013, 299)

In der Literatur werden verschiedene Entwicklungsrichtungen angegeben. Dazu zählt im Zuge der Entwicklung der 3. Generation der Li-Systeme z. B. die Erhöhung der Zellenspannung von 3,7 V auf 4,5 V. Basis dieser Entwicklung ist die Veränderung der Potentiallage des Kathodenmaterials durch Variation des Cobaltanteils. Ferner wird eine Kapazitätserhöhung durch Veränderung des Metalloxids der Anode von 130 mAh/g auf 160 mAh/g genannt (Korthauer, 2012).

### **Separator**

Bei den Separatoren handelt es sich um mikroporöse Membranen. Sie spielen im Aufbau der Zelle eine zentrale Rolle und müssen dafür mehrere Eigenschaften erfüllen:

- Hohe Durchlässigkeit für Li-Ionen
- Geringe Dicke gewährleistet einen geringen Innenwiderstand und eine hohe Packungsdichte
- Hohe Temperaturbeständigkeit bis ca. 130 °C
- Ausreichende Flexibilität im Hinblick auf Fertigungstechnik und Robustheit
- Mechanische Festigkeit gegen Beschädigung durch Dendriten (vgl. Kapitel 4.3.4)

Zurzeit werden hauptsächlich polymere Folien (Polypropylen PP, Polyethylen PE) ein- oder mehrlagig eingesetzt. Diese zeichnen sich durch gute elektrochemische Eigenschaften, bei allerdings geringer Temperaturbeständigkeit (<130°C) aus. In einer von innen kurzgeschlossenen Zelle herrschen Temperaturen, die einen gewöhnlichen Kunststoffseparator schmelzen lassen. Eine verstärkte Kurzschlussreaktion ist die Folge (Weber & Roth, 2013, 79ff).

Keramische Separatoren wurden in den letzten Jahren erprobt. Diese bieten den Vorteil, durch Dendritenbildung nicht beschädigt zu werden und erhöhen somit das Sicherheitsniveau der Zelle. Die Herausforderung besteht darin, den Keramik-Separator für Li-Ionen durchgängig und flexibel zu gestalten. Die ca. 20 µm dicke Keramikfolie vereint damit die Stärken von den verwendeten Kunststoffseparatoren mit dem temperatur- und beschädigungsresistenten Keramikmaterial. Separatoren auf der Basis von Vliesstoff mit aufgetragenem Keramikmaterial gewährleisten eine hohe Flexibilität und Temperaturstabilität. Sie finden deshalb besonders für Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen Anwendung (Arora & Zhang, 2004, 4423ff).

Bei den sogenannten Shutdown-Separatoren schmilzt die polymere Separatorfolie oberhalb einer Temperatur von 130°C und verliert ihren porösen Charakter. Damit wird ein sich selbstverstärkender, Wärme bildender Prozess, Thermal Runaway, unterbrochen (Weber & Roth, 2013, 79ff).

## Elektrolyte

Der polare Elektrolyt gewährleistet, auf Basis eines Leitsalzes, den Ionen-Transport zwischen Anode und Kathode. Bei festen Elektrolyten ist das Leitsalz in Makromolekülen gelöst oder in eine Polymermatrix eingebettet. Bei Flüssigelektrolyten ist das Leitsalz vollständig in einem Lösemittel gelöst. Dieses darf keine Spuren von Wasser enthalten, da Lithium mit Wasser stark reagiert. Elektrolyte müssen im Wesentlichen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Elektrochemische Stabilität, d. h., keine Zersetzung innerhalb des Spannungsbereiches
- Hohe Ionenmobilität
- Keine Reaktion mit den Elektroden der Zelle
- Ausreichende thermische Stabilität bezüglich der Zersetzung bei hohen Temperaturen oder Verdickung bei niedrigen Temperaturen
- Geringe Toxizität im Falle eines Austritts aus der Zelle

Bei der Li-Polymer-Batterie kann auf einen flüssigen Elektrolyten verzichtet werden, denn der auf Polymerbasis ausgeführte Separator ist als feste oder gelförmige Folie in einer Schichtdicke unter 100 µm ausgeführt. Die leicht formbaren Folien ermöglichen unterschiedliche Zellenbauformen, z. B. Rund- oder Flachzelle (Hartnig & Schmidt, 2013, 61ff).

## 6.2 Leistungsklassen

In der Literatur werden wiederaufladbare Li-Technologien in drei Leistungsklassen eingeteilt, wobei diese Einteilung in der Regel auch den Energieinhalt kategorisiert:

Tab. 4: Leistungsklassen von Li-Batterien  
(GDV, 2012, 2)

Leistungsklasse	Gewicht	Batteriespannung	Anwendungsbeispiele
Gering	< 1 kg	< 60 V	Digitalkameras, Laptops, Kleinwerkzeuge, Multimedia
Mittel	> 1 kg	< 60 V	Elektrofahrräder, Rasenmäher, mobile Werkzeuge, Segway
Hoch	> 1 kg	> 60 V	Hochvolt-Elektroantriebe im Hybrid- und Elektrofahrzeug, Gabelstapler

Ein weiterer Fortschritt im Bereich der hohen Leistungsklassen besteht in der Möglichkeit, die Batterie als Hochenergie- oder als Hochleistungsbatterie auszuführen. Letztere zeichnet sich durch eine hohe Strombelastbarkeit aus.

### **6.3 Zell- und Batteriedesign**

Am häufigsten werden Li-Zellen in drei Bauformen realisiert. Darüber hinaus lassen sich durch die Kombination mehrerer Zellen Batteriepacks aufbauen (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013, 302f).

#### **Rundzellen**

Rundzelle bestehen aus zylindrisch gewickelten und gekapselten Elektroden. Die Vorteile einer Rundzelle sind bekannte Produktionsprozesse und auch ein, bei einem gewissen Innendruck, für Flüssigkeiten und Gas undurchlässiges Gehäuse. Als Nachteile gelten die schlechte Packungsdichte und die schwierige Wärmeabfuhr bei dichter Packart (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013, 302f).

#### **Flachzelle**

In Flachzellen sind die Elektroden übereinander geschichtet und in einer Folie eingeschlossen. Diese, sogenannte „Coffeebag Zelle“ oder „Pouchbag Zelle“, hat ein gutes Oberflächen-Volumen-Verhältnis, welches die Kühlung erleichtert und höhere Energiedichten ermöglicht. Probleme können jedoch hinsichtlich langfristiger Dichtigkeit und Volumenzunahme durch Innendruck und Materialausdehnung entstehen (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013, 302f).

#### **Prismatische Zelle**

Die prismatische Zelle besteht aus einem oval gewickelten Zellstock, sie vereint damit die positiven Eigenschaften der Rundzelle mit der Flachzelle. Die herausragenden Eigenschaften sind eine hohe Packungsdichte und Biegesteifigkeit (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013, 302f).

#### **Batteriepacks**

Li-Ionen-Zellen werden in unterschiedlichen Größen und Bauformen hergestellt. Für hohe Kapazitäten und Spannungen sind die Zellen in Batteriepacks zusammengefasst, aus denen wiederum größere Batterieeinheiten aufgebaut werden können. Beispiele hierfür sind Batterien in Elektrofahrzeugen, wie z. B. dem Opel Ampera mit einer nutzbaren Kapazität von 16 kWh oder das amerikanische Tesla Modell S, 60 bis 85 kWh (Adam Opel AG, 2011, 21) (Tesla Motors, 2014).

Die hohe Packungsdichte stellt besondere Anforderungen an die Kühlung der Zellen. Ferner ist jede Zelle während des Lade- und Entladevorgangs zu überwachen. Dazu ist ein Batteriemanagementsystem (BMS) erforderlich.

Das Gehäuse eines Batteriepacks muss einen ausreichenden Schutz gegen mechanische Einwirkungen von außen garantieren, um im Schadenfall eine gefährliche und selbstverstärkende Hitzeentwicklung (Thermal Runaway) zu vermeiden. Ebenso muss eine Möglichkeit zur Entgasung vorhanden sein. (Leuthner, 2013, 17)



Abb. 10: Beispiele für Batteriepacks kleiner und großer Leistung (Ableiter, 2008)

## 6.4 Laden und Entladen

Beim Laden und Entladen eines Batteriepacks kann es, durch Überladung, oder Umpolung einzelner Zellen, zu irreversiblen Zellschäden kommen. Um dies zu verhindern ist ein zuverlässiges Batteriemanagementsystem (BMS) erforderlich.

### Batteriemanagementsystem (BMS)

Ein BMS enthält folgende Funktionen (Dorn, Schwartz, & Steurich, 2013, 177ff):

- Ausbalancieren der Zellen beim Laden und Entladen
- Lastmanagement in Verbindung mit dem Verbraucher
- Überstrom-Schutz, Kurzschlusssicherung
- Bestimmung des Ladezustandes, Ladekontrolle
- Isolationsmessung
- Leistungsschutz mit Vorladeschaltung
- Systemdiagnose, Bestimmung der Zellgesundheit, Speicherung der Historie
- Authentifizierung und Identifizierung mit Produktdaten der Zelle
- Kommunikation

## Ladetechnik

Das gängigste Ladeverfahren ist das Konstantstrom-Konstantspannungsladeverfahren. Die typischen Ladeschlussspannungen für Standardmaterialien liegen bei 4 bis 4,2 V pro Zelle (Dorn, Schwartz, & Steurich, 2013, 177).

Während des Ladevorgangs ist jede Zelle zu überwachen, um eine Überspannung zu verhindern. Das BMS und das Ladegerät müssen eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Spezielle Kühlstrategien und eine Begrenzung, auf zulässige Entladespannungen, verringern eine Alterung und erhöhen das Sicherheitsniveau (Leuthner, 2013).

## 6.5 Herstellung

### Herstellung der Elektrode

Abb. 11 zeigt schematisch den Herstellungsprozess der Elektroden einer Li-Batterie. Der Beschichtungsprozess ist für Li-, NiCd- und NiMH-Batterien identisch.

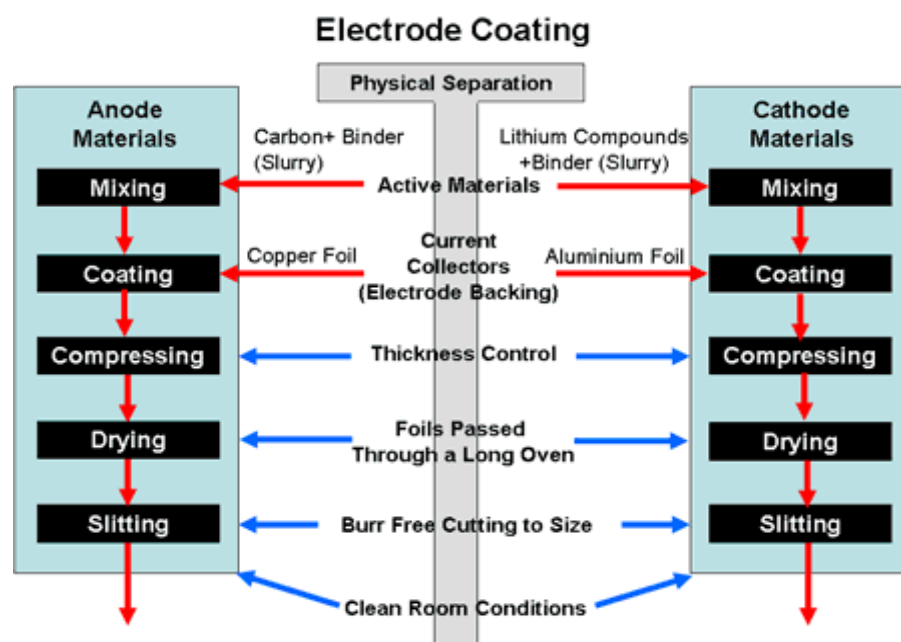


Abb. 11: Beschichtung von Elektroden (Woodbank Communications Ltd, 2005)

Das aktive Elektrodenmaterial wird auf beide Seiten der jeweiligen Metallfolie mittels Binder aufgebracht. Die Anode hat eine Kupferfolie als Basis, die Kathode eine Aluminiumfolie. Das Elektrodenmaterial dient als Stromableiter. Die Größe und Oberflächenstruktur der aufgetragenen Partikel beeinflusst die Effektivität der Zelle. Die aufgetragenen Metallpartikel dürfen nicht scharfkantig sein, da sonst die Gefahr besteht, dass die Partikel den semipermeablen Separator beschädigen.



Die Beschichtung von Anoden- und Kathodenmaterial wird räumlich getrennt durchgeführt. Eine Kontamination, der zu beschichtenden Elektrode, mit dem jeweils anderen Stoff, führt zu einer Fehlfunktion der Zelle. Nach der Schichtdickenkontrolle und der folgenden Trocknung, wird die Produktion mit dem Formschnitt abgeschlossen (Pettinger, 2013, 222).

### **Herstellung der Zelle**

Anoden-, Kathoden- und Separator-Folie werden stoffschlüssig miteinander verbunden. Der Separator wird passgenau oder in Zickzack-Form gefaltet und zwischen die Elektroden gelegt, um den Ionendurchfluss zu erhöhen. Zur Abwendung eines inneren Kurzschlusses muss eine Beschädigung der Separatorfolie während des Fertigungsprozesses ausgeschlossen werden.

Die so entstandene Elektroden-Separator-Folie wird bei der Rundzelle um einen Dorn gewickelt und mit den entsprechenden Anschlüssen verbunden. Die Elektroden werden schließlich in eine Kapsel, der sogenannten „Jelly roll“, eingelassen und mit ihr verschweißt (Pettinger, 2013, 225ff).

Für die prismatische Zelle sind in der Literatur zwei Verfahren genannt. Die in ovaler Form gewickelte Zelle ähnelt dem Fertigungsprozess der Rundzelle, die geschichtete Ausführung entspricht der Flachzelle.

Die Anoden- und Kathodenplatten werden bei geschichteten Zellen abwechselnd und vom Separator getrennt gestapelt. Hierdurch wird eine optimale Raumausnutzung bei hoher Kapazität erreicht. Durch die Schichtstruktur von mehreren Elektroden sind die Kosten der prismatischen Zelle im Gegensatz zur Rundzelle höher.

Die folgenden Schritte sind für die unterschiedlichen Zelltypen wieder identisch. Die Zellen werden mit ihrer Ummantelung sowie den dazugehörigen Sicherheitseinrichtungen verbunden und bis auf eine kleine Öffnung verschlossen. Nach dem Befüllen der Zelle mit dem Elektrolyt wird auch die Öffnung verschlossen.

Die Befüllung muss in einem Trockenraum unter Wasserausschluss erfolgen, da der Elektrolyt sich bei Kontakt mit Wasser unter Emission von toxischen Gasen zersetzt.

Nach dem Montageprozess und dem Etikettieren werden die Zellen einem präzise gesteuerten und kontrollierten Lade- und Endladevorgang unterzogen, um die Materialien zu aktivieren. Der Formationsprozess beginnt mit einer niedrigen Spannung, die im Laufe der Formatierung gesteigert wird.

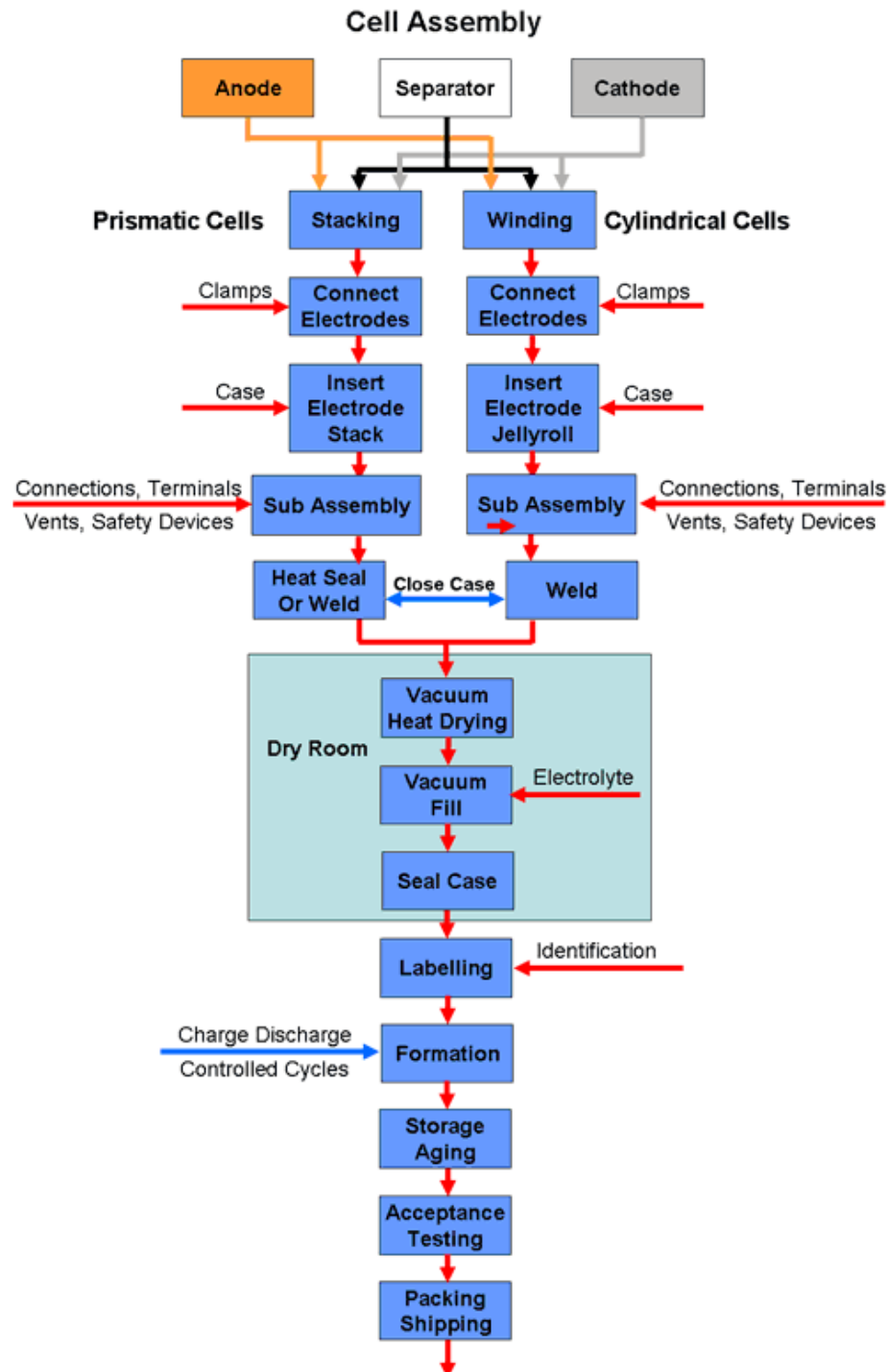


Abb. 12: Herstellungsprozess von prismatischen und zylindrischen Zellen  
(Woodbank Communications Ltd, 2005)

Bei der Formatierung werden Kenngrößen der Zelle, wie zum Beispiel Innenwiderstand, Kapazität und zugeführte Leistung, überwacht und dokumentiert. Anschließend folgt die künstliche Alterung der Zelle durch Wärmebehandlung und die Endkontrolle der Batterie.

Der gesamte Herstellungsprozess wird streng überwacht. Reinraumbedingungen verhindern die Kontamination der Produktionsstätte (Pettinger, 2013, 225ff).

## 6.6 Marktentwicklung

Laut einer Studie der Unternehmensberatung Mc Kinsey aus dem Jahr 2012 wird mit künftigen Kathodenmaterialien eine Steigerung der Speicherkapazität um 50 % bis 100 % erwartet. Bis 2020 soll eine Steigerung der Kapazität um 40 % erreichbar sein.

Große Erwartungen werden in die Layer-Technologie gesetzt. Ein Kapazitätswachstum von theoretisch 30 % ist bei einem Wechsel von graphit- auf siliziumbasierte Materialien möglich. Ein Problem der Siliziumtechnologie liegt in der höheren Ausdehnung und Schrumpfung des Materials. Diese Volumenänderung führt zu einer Pulverisierung der Schichten und damit zu einer raschen Kapazitätsreduzierung. Abhilfe verspricht man sich von hochporösem Silizium-Anodenmaterial, was zusätzlich kürzere Lade- und Entladeprozesse ermöglicht (Hensley, Newman, Rogers, & Shahinian, 2012).

Der Preis für Hochvoltakkus wird sich von derzeit 500 bis 600 \$/kWh (2012) auf 160 \$/kWh im Jahr 2025 in den USA reduzieren (Hensley, Newman, Rogers, & Shahinian, 2012).

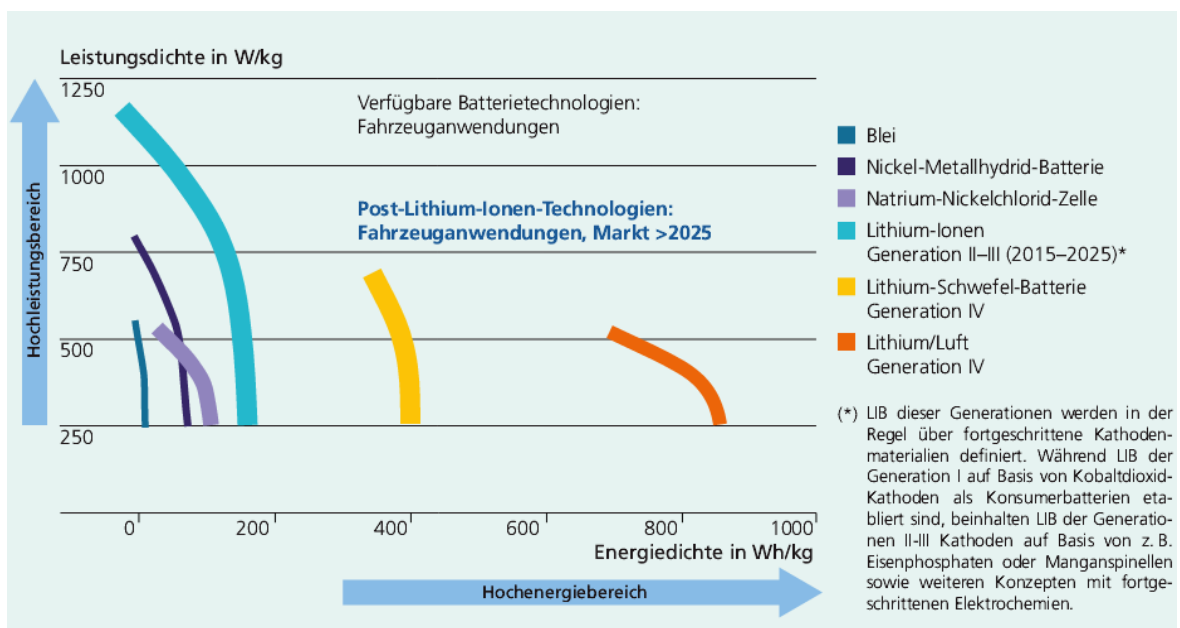


Abb. 13: Energiedichte und Leistungsdichte von aktuellen und zukünftigen Batterietechnologien (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012)

Die Produkt-Road-Map des Fraunhofer-Instituts zeigt die zukünftige Entwicklung der Energie- und Leistungsdichte im Hochleistungsbereich (s. Abb. 13). Ausgehend von der Bleitechnologie mit 35 Wh/kg, wird mit den Li-Generationen II und III eine Energiedichte über 190 Wh/kg prognostiziert, mit Generation IV, der Li-Schwefel-Technologie,

ein Wert von 400 Wh/kg. Für Li-Luft liegt der theoretische Wert bei 800 Wh/kg. Der Zeithorizont für die Li-Schwefel-Technologie liegt nachdem Jahr 2020, für die Li-Luft-Technologie nach 2030. Mit steigender Energiedichte verringert sich die Leistungsdichte (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012).

Der Li-Bedarf wird bis 2030 bei konservativer Schätzung auf 50.000 t/a ansteigen (s. Abb. 14), wobei auf die Elektromobilität, der größte Anteil, von über 30.000 t/a entfällt. Bereits ab dem Jahr 2020 entfallen über 50 % des Gesamtbedarfs auf die Elektromobilität. Der Bedarf für mobile Elektronik und sonstige Anwendungen steigt dagegen nur moderat an. Im Vergleich dazu kann der Anteil für Primärbatterien vernachlässigt werden (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012).

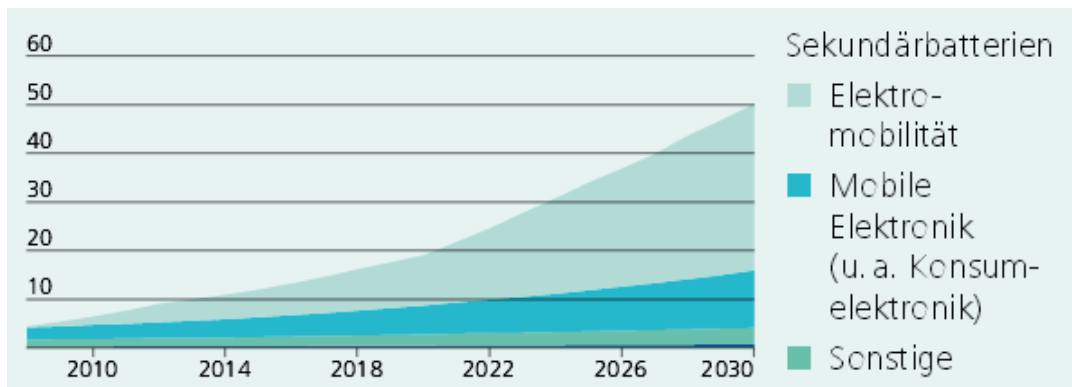


Abb. 14: Lithiumbedarf in Kilotonnen pro Jahr bei konstanter Schätzung (Thielmann, Sauer, Isenmann, Wietschel, & Plötz, 2012)

## 6.7 Gefahren

### 6.7.1 Gefahrenklassen

Gemäß European Council for Automotive R&D (EUCAR) werden die möglichen Gefährdungen die durch das Betreiben außerhalb der Spezifikation entstehen in sieben Gefahrenklassen unterteilt (s. Tab. 5). Bis einschließlich Gefahrenklasse zwei laufen die Vorgänge intern ab. Die Umgebung wird nicht beeinträchtigt. Die Auswirkungen von einer betroffenen Batterie in Gefahrenklasse drei und vier äußert sich in einem Masseverlust (vgl. Tab. 5).

Ab Gefahrenklasse fünf kommt es zum Brand der Zelle, in den weiteren Klassen wird dies zusätzlich durch Bruch oder Explosion verstärkt. Eine Brandausbreitung auf benachbarte Zellen ist ebenfalls möglich. Aus brandschutztechnischer Sicht sind die Gefährdungen ab Klasse fünf von besonderer Bedeutung.

Das von der VdS Schadenverhütung GmbH (VdS) vorgegebene Schutzziel, Feuer und damit die Brandausbreitung auf benachbarte Zellen zu vermeiden, umfasst die Gefahrenklassen eins bis vier (rote Linie). Die Gefahrenklassen fünf bis sieben sind, so weit wie möglich, durch geeignete Maßnahmen auszuschließen (Buser, 2013).

Tab. 5: Einteilung in Gefahrenklassen bei Betrieb außerhalb der Spezifikation (Eigendarstellung in Anlehnung an (GCSFP, 2010, 231))

Gefahren- klasse	Mögliche Gefährdung	Klassifizierung und Auswirkung
0	Kein Effekt	Keine Auswirkung oder Funktionseinschränkung
1	Passive Sicherheits- vorrichtung löst aus	Zelle reversibel beschädigt, Reparatur des Schutzsystems notwendig. Keine Beschädigung, Leckage, exotherme Reaktion oder Explosion. Kein Gasaustritt, Feuer, Bruch oder Thermal Runaway.
2	Defekt, Beschädigung	Zelle irreversibel beschädigt, Reparatur notwendig. Keine Leckage, exotherme Reaktion oder Explosion. Kein Gasaustritt, Feuer, Bruch oder Thermal Runaway.
3	Leck, Masseverlust < 50%	Austritt des Elektrolyten < 50%. Keine Leckage, exotherme Reaktion, Explosion. Kein Gasaustritt, Feuer, Bruch, Thermal Runaway.
4	Abblasen, Masseverlust > 50%	Austritt des Elektrolyten $\geq 50\%$ . Keine Explosion. Kein Feuer oder Bruch
5	Flammenbildung, Feuer	Kein Bruch, keine Explosion oder herumfliegenden Teile.
6	Bersten	Keine Explosion, aber herumfliegende Teile der aktiven Masse.
7	Explosion	Explosionsartige Zersetzung der Zelle.

### 6.7.2 Fehlermechanismen auf Zellebene

In Abb. 15 sind Fehlermöglichkeiten einer Li-Batterie dargestellt, die durch externe Einflüsse und interne Fehler verursacht werden können. Als fehlerhafter Gebrauch gelten Überladung, externe Wärmezufuhr und Kurzschluss sowie eine unzulässige mechanische Beeinflussung, wie z. B. Verformung, Vibration oder Schock. Interne Fehler, wie z. B. Dendritenbildung, können aufgrund von Fabrikationsfehlern oder Tiefentladung, z. B. durch eine mangelhafte Zellbalance, auftreten (Mähliß, 2012).

Bedingt durch die zellinternen Abläufe kann es unabhängig von der Fehlerursache zum Zellbrand und/oder zur Zellöffnung kommen, mit der Folge, dass Gase freigesetzt werden oder ein Brand mit Rauchbildung entsteht. Gegebenenfalls führen die Fehlereinflüsse auch nur zum Ausfall der Zelle ohne unmittelbare Reaktionen nach außen (Mähliß, 2012).

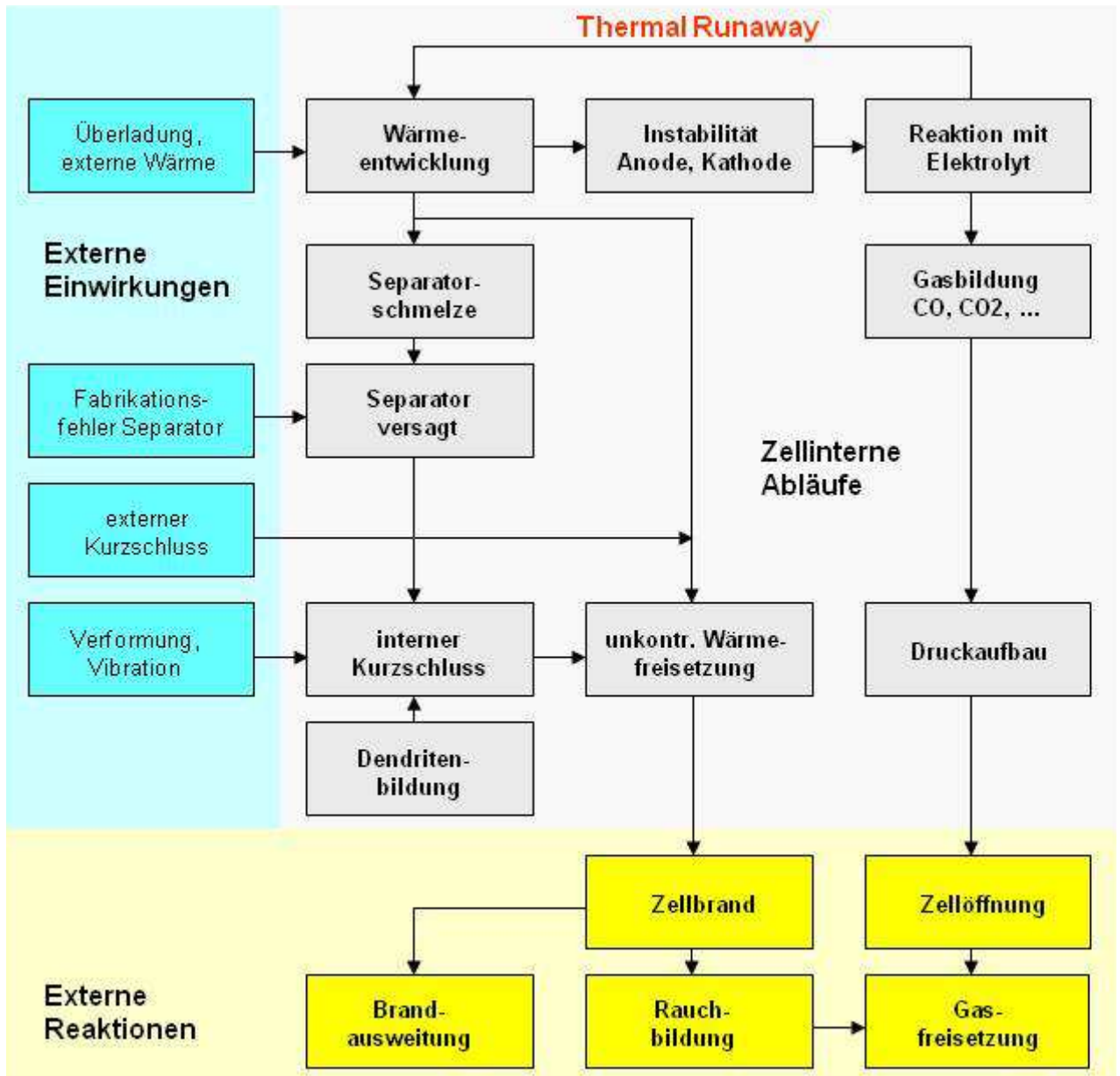


Abb. 15: Mögliche Fehlermechanismen auf Zellebene (Eigendarstellung in Anlehnung an (Morawietz, 2013))

### 6.7.3 Schadenreaktion

Im Schadenfall erfolgt eine exotherme Reaktion, in der der organische Elektrolyt aufgespalten wird. Dabei wird neben leicht entzündlichen, organischen Gasen auch Wasserstoff freigesetzt.

Die Gase entzünden sich, sobald die Temperatur in der Zelle deren Flammpunkt überschreitet. Die untere Explosionsgrenze von Wasserstoff liegt bei 4,0 Vol% und die obere Explosionsgrenze liegt bei 77 Vol% (Hauptmanns, 2013, 14). Die Werte unterscheiden sich, je nach Quelle, um bis zu 2 Vol%. Wasserstoff bildet innerhalb dieser Konzentration ein zündfähiges Gemisch mit dem Luftsauerstoff.

Bei geringer Zündenergie (12 bis 19  $\mu\text{J}$  bei Normalbedingungen) kann es schlagartig abbrennen (Hauptmanns, 2013, 21). Die, detailliert in der Zelle, auftretenden Reaktionen werden von Experten als sehr komplex eingestuft.

Die, aufgrund der Entzündung entstehende Temperaturerhöhung, kann einen Kreisprozess nach sich ziehen, der als "thermisches Durchgehen" (Thermal Runaway) bezeichnet wird. Bei entsprechend hohen Temperaturen, kann sich das in der Zelle enthaltene Lithium, entzünden. Benachbarte Zellen überhitzen und geraten ebenfalls in Brand. Bei einer Verbrennung entstehen, durch die Verwendung von fluor- und/oder chlorhaltigen Leitsalzen, gasförmige Stoffe mit einem erheblichen Gefahrenpotential für Personen und Umgebung. Fluor- oder Chlorverbindungen wirken stark ätzend.

#### **6.7.4 Sicherheitstechnik**

Im Folgenden wird auf einige Fehlerursachen mit Reaktionen und dagegenwirkende Sicherheitstechniken näher eingegangen.

##### **Innerer Kurzschluss**

Ein Versagen des Separators führt zu einem inneren Kurzschluss der Zelle. Dieses kann durch Dendritenbildung, Schmelzen des Separators aufgrund von Überhitzung und durch Fabrikationsfehler ausgelöst werden.

Dendriten, nadelförmige Li-Kristalle können, z. B. durch ausgefällte Kupfer-Ionen, entstehen. Kupferatome des anodenseitig angeordneten Kupferblechs (Ableitermaterial) verbinden sich bei einer Tiefenentladung mit der Elektrolytflüssigkeit. Der fehlende Elektrolyt erhöht den Innenwiderstand, weshalb sich die Zelle beim Laden erhitzt.

Bei den ersten Li-Batterien mit metallischem Lithium, in Folienform als Elektrode integriert, kam es zu Problemen wegen der Dendritenbildung. Diese Ausführung wird, aufgrund des Gefahrenpotentials, heute nicht mehr verwendet. Beim Entladen oxidiert das Lithium zu  $\text{Li}^+$  und beim Laden wird das Lithium zu Metall reduziert. Bei der Reduktion können sich Dendriten bilden, welche zu inneren Kurzschlüssen des Akkumulators führen. Lithiummetall reagiert bei dem Kontakt mit dem Elektrolyt zu Polymerisationsprodukten. Beim Entladen und Laden des Akkumulators restrukturiert sich die Oberfläche und immer mehr Polymerisationsprodukte bilden sich bei direktem Kontakt mit dem Metall (Treib & Rüetschi, 1998, 113ff).

## **Volumenzunahme**

Beim Laden und Entladen eines Li-Akkumulators bilden sich Interkalations- oder Einlagerungsverbindungen des Lithiums in der Anode, welche zu einer Volumenänderung des Akkumulators führt. Mit der Verwendung von Graphit oder graphitähnlichem Kohlenstoff als negative Elektrode, kann diese Volumenänderung geringfügig gehalten werden. Sie beträgt bei diesem Typ Akkumulator theoretisch 9 % (Treib & Rüetschi, 1998, 114f).

Die Volumenänderungen führen zu einem schwankenden Innendruck der Zelle, mit entsprechenden Wechselbelastungen des Gehäuses und der Zellbestandteile. Bei einem anormalen Überdruck kann es zum Elektrolytaustritt kommen (Masseverlust). Die Zellen sind deshalb mit Sicherheitsventilen ausgestattet (Treib & Rüetschi, 1998, 114f).

## **Umpolung**

In Batteriepacks mit mehreren, in Reihe geschalteten Zellen, kann es aufgrund von Tiefenentladung, in Verbindung mit einer unzureichenden Balancierung, zur Umpolung einer Zelle kommen.

Durch eine unzureichende Balancierung weisen die Zellen eine ungleichförmige Spannungsverteilung auf. Sobald die Spannung der am stärksten entladenen Zelle 0 V beträgt, wird die Spannung dieser Zelle umgepolt. Der Grund hierfür ist, dass die anderen noch nicht vollständig entladenen Zellen den Stromfluss über die Last aufrecht halten.

Eine Umpolung schädigt die Zelle irreversibel. Es bildet sich Wasserstoff, die Zelle bläht sich auf und kann explodieren. Die Gefahr der Umpolung kann durch geeignete Sicherheitselektronik in dem BMS verhindert werden (Treib & Rüetschi, 1998, 118ff) (Mähliß, 2012).

## **Reaktion bei Über- und Tiefenentladung**

Beim Überladen der Li-Ionen-Zelle wird die Schichtstruktur der Metalloxide zerstört. Es erfolgt eine exotherme Reaktion, in der der organische Elektrolyt aufgespalten wird. Dabei wird neben leichtentzündlichen, organischen Gasen auch Wasserstoff freigesetzt. Bei einer Tiefenentladung kann es, ebenso wie bei der Überladung, zu einer Zersetzung des Elektrolyts mit Wasserstoffbildung kommen (Mähliß, 2012).

## **Innere Sicherheitstechnik**

Bei zu starker Beanspruchung des Akkumulators oder bei einem Kurzschluss, kann das Lithium schmelzen (Schmelztemperatur  $180,5^{\circ}\text{C}$ ). Das Lithium reagiert mit dem Elektrolyt und mit dem aktiven Material der positiven Elektrode.



Als Schutzmaßnahme kann der Separator von Li-Batterien mit hitzeempfindlichen Stoffen beschichtet werden, die bei entsprechender Temperatur schmelzen und dadurch den Separator versiegeln. Eine ähnliche Technik kann auch auf den Elektrolyt angewandt werden (Treib & Rüetschi, 1998, 113f).

Um einer Dendritenbildung vorzubeugen, werden auch Li-Legierungen als Anoden verwendet. Als Legierungsmaterialien kommen unter anderem Aluminium, Indium oder Antimon zum Einsatz. Weiterhin wird das Verpressen und Versintern von Li-Aluminium in Pulverform oder der Einsatz von Schaumnickel als Träger für Li-Aluminium genannt. Daneben finden auch polymergestützte Legierungselektroden oder intermetallische Verbindungen wie Zinn-Silber und Zinn-Antimon mit eindiffundiertem Lithium Erwähnung (Treib & Rüetschi, 1998, 114).

### **Sicherheitseinrichtungen**

Alle aufladbaren Li-Batterien besitzen integrierte, elektrische Sicherheitsvorkehrungen. Dazu gehören eine Überstrom-Sicherung, ein Sicherheitsventil und ein Positive Temperature Coefficient Resistance Switch (PTC-Schalter), der bei Übertemperatur den Stromfluss unterbricht. Der PTC-Schalter besteht aus einem leitenden Polymer, welcher bei einer Grenztemperatur hochohmig wird (Treib & Rüetschi, 1998, 120).

## **6.8 Schadenverhütung und Sicherheitsregeln**

Brände, in Verbindung mit Li-Batterien, sind durch eine hohe Wärmeentwicklung gekennzeichnet. Bereits existierende, konventionelle Löschtechnik ist nicht oder nur teilweise für die Brandbekämpfung von Li-Batterien ausgelegt. Auch nach Abschluss der Löscharbeiten ist eine Rückzündung möglich.

Hinsichtlich der Wirksamkeit konventioneller Löschsysteeme bestehen zurzeit nur geringe gesicherte Erkenntnisse. Ausgehend von einer Gefahrenanalyse werden bereits in Einzelfällen optimierte Löscheinrichtungen und Schutzkonzepte entwickelt. Auf die Schutzkonzepte wird im Folgenden näher eingegangen. Sie lassen sich in technische, organisatorische und personelle Maßnahmen unterteilen (Anwander, 2013).

### **6.8.1 Technische Maßnahmen zur Gefahrenreduzierung**

Technische Einrichtungen zur Gefahrenreduzierung können sich sowohl auf die Batterie, als auch auf die Produktionsstätten und Einsatzorten beziehen.

## **Batteriemanagementsystem (BMS)**

Das BMS schützt die Batterie vor Überladung, Überlastung, Temperaturüberschreitung und Tiefenentladung. Die Auslegung der elektrotechnischen Komponenten muss gemäß einem aus der Risikoanalyse abgeleiteten Performancelevel erfolgen (DIN EN ISO 13849-1, 2008).

## **Hochvolt-Batterien**

Batterien in Hochvolt-Fahrzeugen sind in der Regel durch technische Maßnahmen eigensicher ausgeführt. Diese enthalten u. a. einen umfänglichen Berührungs- und Lichtbogenschutz. Die Verbindung zur Hochvolt-Batterie erfolgt über lichtbogensichere Steckverbinder mit entsprechendem Berührungsschutz und nicht über Schraubanschlüsse. Bei Entfernen der Abdeckungen von Hochvoltsystemen sollten sich diese selbsttätig abschalten (DGUV, 2012).

### **6.8.2 Bauliche Maßnahmen**

Um einer unkontrollierten Brand- und Rauchausbreitung vorzubeugen, werden an die gebäudetechnische Auslegung entsprechende Anforderungen geknüpft. Dazu gehören u. a. ausreichende Sicherheitsabstände sowie geeignete bauliche Abtrennungen bei der Lagerung und Handhabung von Li-Batterien (GDV, 2012).

Eine wesentliche Bedeutung kommt einer flächendeckenden Brandfrüherkennung zu. Diese sollte für alle Bereiche, in denen Li-Batterien verwendet werden, permanent aktiviert und mit einer ständig besetzten Stelle verbunden sein. Wichtig ist auch eine Branddetektion bei noch nicht auftretendem Rauch (GDV, 2012).

Als effektiv wird der Einsatz von Wassernebel angesehen, da er neben dem eigentlichen Löschen auch einen Kühleffekt mit sich bringt und die Gefahr von Rückzündungen sowie Kettenreaktionen, d.h. ein Übergreifen des Feuers auf benachbarte Zellen reduziert (GDV, 2012).

Falls das Schutzziel mit Löschanlagen nicht erreicht werden kann, sind zusätzliche Maßnahmen gefordert. Dazu zählt u. a. die Reduzierung des Sauerstoffgehaltes durch Einleitung von Stickstoff.

### **6.8.3 Organisatorische Maßnahmen**

Zusätzlich zu den technischen Maßnahmen erhöhen organisatorische Maßnahmen die Sicherheit im Umgang Li-Batterien. Diese betreffen u. a. die folgenden Arbeits- und Handlungsanweisungen:

- Einhaltung des erforderlichen Temperaturbereiches, keine direkte Sonneneinstrahlung, räumlicher Abstand von Wärmequellen
- Vermeidung mechanischer Einwirkungen, die zur Beschädigung der Batterie führen können (Schock, Vibration, Verformung)
- Sicherheitsentlüftungen der Batteriesysteme dürfen nicht verschlossen werden
- Die Batterie ist vor äußeren Kurzschlüssen schützen
- Die Bereitstellung in Produktionsbereichen ist auf vertretbare Mengen zu begrenzen
- Vermeidung von Mischlagerung, Unterbringung der Batterien in feuerbeständig ausgeführten Lagersystemen
- Bereitstellung geeigneter Löschmittel, dies gilt auch für Löschanlagen
- Kennzeichnung der Gefahrenbereiche, Definition der allgemeinen Sicherheitsregeln (Anwander, 2013).

#### **6.8.4 Schutzmaßnahmen für Personen**

Diese Schutzmaßnahmen gliedern sich in drei Kategorien.

- Schutzmaßnahmen im Umgang mit der Batterie betreffen die Personen, die im täglichen Umgang Li-Batterien handhaben und mit diesen arbeiten, z. B. den Staplerfahrer, der die Traktionsbatterie des Fahrzeugs wechseln muss.
- Für Mitarbeiter, bei Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen, im Bereich der Servicewerkstätten, im Produktionsprozess und in Forschung und Entwicklung bietet, die DGUV-I-8686 (Deutsche gesetzliche Unfallversicherung e.V.) umfangreiche Informationen (DGUV, 2012).
- Auf die Schutzmaßnahmen für die Rettungs- und Einsatzkräfte im Schadenfall wird in Absatz 8 näher eingegangen.

Besonderer Beachtung ist der Spannungslage der Batterien zu widmen. Spannungen oberhalb von 60 V Gleichspannung (DC) bergen zusätzliche Gefährdungen und erfordern geeignete Schutzmaßnahmen. Zu den bekannten Sicherheitsregeln, vor Beginn der Arbeiten an diesen Systemen, zählen u. a.:

- Freischalten der Anlage
- Gegen Wiedereinschalten sichern
- Spannungsfreiheit feststellen
- Erden und kurzschließen
- Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken
- Schulung der Mitarbeiter, z. B. nach der DGUV BGI/GUV-I 8686 (DGUV, 2012)

## 6.9 Brandverhalten

### 6.9.1 Brandversuche Elektrolyt

Brandversuche mit Li-Ionen-Batterien haben gezeigt, dass vom organischen Elektrolyten ein hohes Gefahrenpotential ausgeht. Die kritische Substanz einer Li-Ionen-Zelle ist der Elektrolyt. Bei Verbrennung entsteht u. a. Flusssäure.

In Entzündungsversuchen wurde die Sauerstoffkonzentration ermittelt, unterhalb der keine Entzündung des Elektrolyten stattfindet:

- Raumtemperatur: 13,5 Vol% O<sub>2</sub>
- Bei Siedetemperatur (93 °C): 13,0 Vol% O<sub>2</sub> (Wagner Group GmbH, 2010)

Daraus folgt, dass Sauerstoffreduktion als Lösung im Lager fungiert.



zu Simulation der Lagerbegebenheiten, wurde die Zelle zwischen zwei Aluplatten (Abstand 6 cm) gelegt



Abb. 16: Versuchsaufbau für die Überhitzung einer Li-Flachzelle (Wagner Group GmbH, 2010)

Abb. 16 zeigt das Versuchsergebnis einer Überhitzung einer Li-Ionen-Zelle bei reduziertem Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft. Bei einer Temperatur von 74 °C öffnet sich die Zelle. Dadurch kommt es innerhalb einer Minute zum Temperaturanstieg auf 115 °C, den Zündpunkt des Elektrolyts (vgl. Abb. 17). Die, innerhalb von 2 min auf unter 50 °C sinkende Temperaturkurve zeigt, dass aufgrund der Sauerstoffreduzierung, kein Brand entsteht (Wagner Group GmbH, 2010).

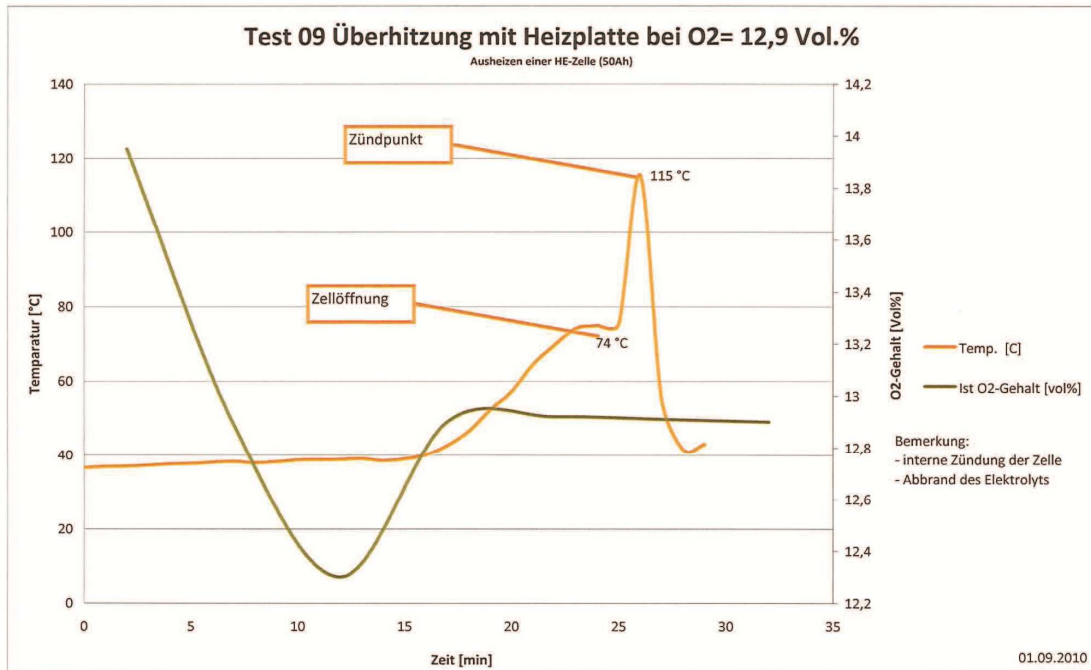


Abb. 17: Ergebnis des Überhitzungsversuchs mit abgesenktem Sauerstoffgehalt (Wagner Group GmbH, 2010)

### 6.9.2 Gefahren während des Herstellungsprozesses

Der in Abb. 12 dargestellte Produktionsablauf einer Li-Zelle ist in den jeweiligen Produktionsschritten mit unterschiedlichen Gefahrenpotentialen behaftet. Ein höheres Gefahrenpotential ist insbesondere in den Phasen Formation und Alterung zu erwarten. Das erstmalige Formatieren und Laden birgt folgende Risiken (Wagner Group GmbH, 2010):

- Thermisches Durchgehen aufgrund interner Kurzschlüsse
- Elektrolytaustritt aufgrund von Montagefehlern
- Gasentwicklung als Folge von Überladung oder Fertigungsfehlern

Die künstliche Alterung geschieht in zwei Phasen: In Phase 1 werden die Zellen bei 45 °C für 5 Tage gelagert, in Phase 2 bei Raumtemperatur für ca. 3 Wochen. Für das Lager sind spezielle Brandschutzkonzepte und -einrichtungen erforderlich. Aufgrund der hohen Packungsdichte im Lager und der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers ist eine Brandbekämpfung mit Wasser ungeeignet, zudem kann Wasserstoff (H<sub>2</sub>), sogenanntes Knallgas, entstehen (Wagner Group GmbH, 2010).

Verschiedene Hersteller bieten Systeme zur Sauerstoffreduzierung an, die auf Stickstoffbasis arbeiten. Dabei wird der Stickstoff aus der Umgebungsluft gewonnen. Stickstoff ist mit 78 Vol% in der Umgebungsluft enthalten. Die weiteren Vorteile sind die gute und gleichmäßige Vermischung mit der Raumluft, in der die Zellen gelagert werden. Die so geschützten Bereiche enthalten ausreichend Sauerstoff für einen

Aufenthalt geeigneter Personen für eine Dauer von zwei Stunden (Wagner Group GmbH, 2010).

## 6.10 Lagerung und Transport

Das Handelsvolumen von lithiumbasierten Batterien und Fertigprodukten mit Li-Batterien steigt weltweit überproportional an. Allein 2010 wurden in Deutschland 5892 t Li-Gerätebatterien in den Verkehr gebracht. Das entspricht 13 % der Gesamtmenge, Tendenz steigend. Dementsprechend wächst auch das Transport- und Lagervolumen an, da unter anderem die Fertigung der Zellen auf nur wenige Standorte konzentriert ist (Umweltbundesamt, 2012, 15ff).

### 6.10.1 Lagerung

#### Vorschriften

Der Brandschutzatlas informiert über die gesetzlichen Grundlagen, Verordnungen, Richtlinien und den Stand der Technik, in Bezug auf den vorbeugenden Brandschutz. Ebenfalls ist in ihm der Stand der Technik für die Lagerung, u. a. von Li-Batterien und deren Produktion, behandelt. Es existieren noch keine Richtlinien und Verordnungen zu dem Thema. Aktuelle Expertenmeinungen sind teilweise gegensätzlich. Als "Stand der Technik" in der Li-Technologie gelten folgende Veröffentlichungen:

**Merkblatt des VdS zur Schadenverhütung beim Umgang mit Li-Batterien.** Die spezifischen Sicherheitsregeln für Li-Batterien sind nach Leistungen gegliedert (GDV, 2012):

- Li-Batterien geringer Leistung (< 1 kg)
  - Keine zusätzlichen Anforderungen neben Hersteller- und Behördenangaben
  - Lagermengen größer 7 m<sup>3</sup> oder mehr als 6 Euro-Paletten sind wie Systeme mittlerer Leistung zu behandeln
- Li-Batterien mittlerer Leistung (> 1 kg, < 60 V)
  - Abgetrennte oder feuerbeständige Räume
  - Keine Mischlagerung
  - Brandmeldeanlagen
  - Sicherheitsdatenblätter mit Angabe geeigneter Löschmittel
  - Lagerflächen größer 60 m<sup>2</sup> und oder Lagerhöhen >3 m sind wie Systeme hoher Leistung zu behandeln

- Li-Batterien hoher Leistung (> 60 V)
  - Empfohlene Maßnahmen:
  - Separierung und Mengenbegrenzung, Lagerung in feuerbeständig abgetrennten Bereichen
  - Nach Sicherheitsdatenblatt zulässige Löschanlagen, Sauerstoffreduzierungsanlage, Inertgaslöschanlage, etc.
  - Schutzmaßnahmen sollten mit dem Sachversicherer abgestimmt werden.

### **ADR (Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße)**

Im Brandschutzatlas wird eine Orientierung an die durch das ADR gegebenen Werte empfohlen (Anwander, 2013). Im ADR sind die Gefährdungspotentiale nach dem Energieinhalt (E) gegliedert:

- E < 200 kWh: Geringes Gefährdungspotential
- 200 kWh < E < 5 MWh: Mittleres Gefährdungspotential; dies entspricht mehr als 6 Europaletten Batterien des VdS-Merkblatts.
- E > 5 MWh: Hohes Gefährdungspotential (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013)

### **Brandschutztechnische Anforderungen**

Aus einer schutzzielorientierten Bewertung können zum Beispiel folgende brandschutztechnischen Anforderungen resultieren:

#### **a) Grundsätzliche Anforderungen, bauliche Ausführung des Gebäudes**

Gemäß dem Brandschutzatlas, muss eine feuerbeständige Abtrennung der Akkumulator-Lagerstätten, das Einhalten von Sicherheitsabständen zwischen den Lagerbereichen und die Verwendung von eigenständigen Gebäuden gegeben sein. Trennwände gegen Brandausbreitung und Gebäude, mit dem Feuerwiderstand einer Brandschutzwand, werden empfohlen.

#### **b) Lagerung defekter Akkumulatoren**

Nach der Überführung einer beschädigten Li-Batterie, in einen gesicherten Zustand, darf diese in einem normalen Lager für Primär- und Sekundär-Batterien verwahrt werden. Eine Sicherung der Batterien beinhaltet das Abdecken und Isolieren von Gefahr- und Kontaktstellen sowie die vollständige Entladung bei großer Beschädigung.

Die Entladung kann unter Emission von Toxinen und einer exothermen Reaktion ablaufen und ist daher von sachkundigem Personal zu begleiten. Durch eine zeitversetzte Schadenreaktion der Batterie ist diese separat, in feuerbeständigen Boxen oder in feuerbeständig abgetrennten Räumen, zu lagern. Wann ein Akkumulator als beschädigt gilt, ist noch nicht von der Fachwelt definiert (Anwander, 2013).

Der Entsorger GRS hat für qualifizierte Sammel- und Annahmestellen geeignete Behälter für die sichere Lagerung alter und schadhafter Batterien entwickelt. Damit ist auch die Zwischenlagerung für beschädigte Hochenergie-Gerätebatterien geregelt (GRS Batterien, 2013).

### **c) Li-Batterien in der Produktion**

Am Arbeitsplatz ist mit organisatorischen Maßnahmen dafür zu sorgen, dass eine bestimmte Menge an Akkumulatoren am Produktionsort (Tagesbedarf) nicht überschritten wird. Die Batterien sind möglichst in feuerbeständigen Schränken oder Containern zu lagern, deren Abstand zu anderen Brandlasten mindestens 2,5 m betragen soll. Löschanlagen sind, soweit vorhanden, entsprechend den jeweiligen Sicherheitsdatenblättern mit geeigneten Löschmitteln zu versehen (GDV, 2012).

### **6.10.2Transportvorschriften**

Der Transport von Batterien, auf Basis von Lithium, über Luft, See, Straße und Schiene unterliegt gesonderten Vorschriften. Das gilt auch für die unterschiedlichen Technologien und Verpackungsarten (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013).

### **6.10.3Internationale Vorschriften**

Von den Vereinten Nationen wurde für den Gefahrguttransport eine Klassifizierung des Transportgutes, je nach Gefahr in den Stufen 1 bis 9 festgesetzt. Die Gefahrgutklassen kennzeichnen das Gefahrgut entsprechend des ausschlaggebenden Gefährlichkeitsmerkmals (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013).

Alle Li-Batterien werden seit dem 01.01.2009 als Gefahrgut der Klasse 9 (*Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände*) eingestuft. Darunter fallen alle Stoffe und Gegenstände, die während der Beförderung eine Gefahr darstellen und die nicht unter die Gefahrgutklassen 1 bis 8 fallen.

Li-Batterien sind, aufgrund der stoffspezifischen Möglichkeiten, zu spontanen und heftigen Zerfalls- oder Polymerisationsreaktionen mit Wärme- und Gasentwicklung, der Gefahrgutklasse 9 zugeordnet.



Zur Kennzeichnung des Transports von Li-Batterien, sind das Gefahrgutsymbol und für bestimmte Transporte, die Gefahren tafel anzubringen. Das Gefahrgutsymbol beinhaltet zusätzlich zu dem Symbol die Ziffer der Gefahrgutklasse (s. Abb. 18).

Die Gefahren tafel enthält auf orangefarbenem Untergrund zwei Nummern. Im oberen Bereich die Kemlerzahl (Gefahrennummer), im unteren die UN-Nummer. Die Gefahren tafel gibt Einsatzkräften von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, Aufschluss über die gefährlichen Eigenschaften des transportierten Gutes (Freiwillige Feuerwehr Aufhausen, 2008).

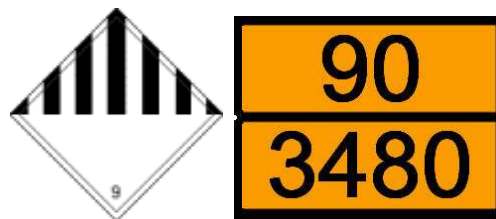


Abb. 18: Gefahrgutsymbol und Gefahren tafel  
(Eigendarstellung in Anlehnung an (Freiwillige Feuerwehr Aufhausen, 2008))

Die Kemlerzahl ist in der ADR, beziehungsweise in der *Regelung zur internationalen Beförderung gefährlicher Güter im Schienenverkehr* (RID), definiert. Die Kemlerzahl gibt Auskunft über die Art der Gefährdung, z. B. eine Gefahr durch Explosion, Radioaktivität oder Ätzwirkung. Für Li-Batterien lautet die Kemlerzahl 90.

Im Allgemeinen entspricht die erste Ziffer der Kemlerzahl, mit Ausnahmen der Gefahrgutklasse, sie kennzeichnet die Art der physikalischen Gefahr. Im Fall von Li-Batterien lautet diese 9 (Umweltgefährdender Stoff, Verschiedene gefährliche Stoffe). Die zweite und ggf. dritte Ziffer, steht für die spezifische Gefahr, im Fall der Li-Batterie ist diese mit 0 besetzt (ohne Bedeutung).

Von den Vereinten Nationen wurden in der *UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods* die UN-Nummer als grenzübergreifende Bezeichnungen für gefährliche Stoffe festgelegt. Für Li-Batterien gelten folgende Nummern (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013):

- UN3480: Li-Ionen-Batterien (einschließlich Li-Ionen-Polymer-Batterien)
- UN3481: Li-Ionen-Batterien in Ausrüstungen oder Li-Ionen-Batterien, mit Ausrüstungen verpackt (einschließlich Li-Ionen-Polymer-Batterien)
- UN3090: Li-Metall-Batterien (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierungen)
- UN3091: Li-Metall-Batterien in Ausrüstungen oder Li-Metall-Batterien, mit Ausrüstungen verpackt (einschließlich Batterien aus Lithiumlegierungen)

### 6.10.3.1 Erforderliche Prüfung für den Transport

Der Transport von Li-Batterien und -Zellen setzt die Prüfung nach dem *Handbuch über Prüfung und Kriterien, Teil III, 38.3* für eine Transportzulassung voraus. Herausgeber sind die Vereinten Nationen, die Übersetzung ist von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) unter dem Titel *Beförderung gefährlicher Güter* veröffentlicht worden.

Abschnitt III Kap. 38.3 des Handbuchs enthält Prüfverfahren zur Klassifizierung von Li-Metall- sowie Li-Ionen-Zellen und –Batterien, als auch die anzuwendenden Sondervorschriften. Nachfolgend sind Beispiele in Kurzform aufgeführt (Vereinte Nationen, 2009, 410ff):

- Li-Zellen und -Batterien müssen für den Transport die Sondervorschriften 188 und 230 der ADR genügen. Für die Zellen ist eine neue Prüfung durchzuführen, die sich von einem geprüften Typ unterscheiden, d.h., wenn Grenzwerte in den Abweichungen in der Li-Masse, im Energieinhalt und in der Spannung überschritten werden.
- Prüfbedingungen und Anzahl der Testobjekte, wie z. B. Zyklenzahl der Tests, Zustand der Testobjekte (geladen, ungeladen), Einfluss des Zelldesigns, Verwendungszweck, etc.
- Definition der Prüfverfahren und Tests (Vereinte Nationen, 2009, 410ff):
  - Höhensimulation (für Lufttransport):  
Kein Masseverlust oder Undichtigkeit, kein Öffnen oder Zerlegung, kein Riss, kein Feuer, Spannungsverlust < 10 %
  - Thermische Prüfung mit extremen und schnellen Temperatur-Änderungen:  
Test der Unversehrtheit, Dichtheit und inneren Verbindungen, kein Masseverlust oder Undichtigkeit, kein Öffnen oder Zerlegung, kein Riss, kein Feuer, Spannungsverlust < 10 %
  - Schwingungsprüfung (Simulation der Belastung während der Beförderung): Kein Masseverlust oder Undichtigkeit, kein Öffnen oder Zerlegung kein Riss, kein Feuer, Spannungsverlust < 10 %
  - Schlag (Simulation der Belastung während der Beförderung):  
Kein Masseverlust oder Undichtigkeit, kein Öffnen oder Zerlegung, kein Riss, kein Feuer, Spannungsverlust < 10 %

- Äußerer Kurzschluss (Simulation eines möglichen äußeren Kurzschlusses): Die äußere Temperatur darf 170 °C nicht überschreiten, keine Zerlegung, kein Riss, kein Feuer
- Aufprall: Die äußere Temperatur darf 170 °C nicht überschreiten, keine Zerlegung, kein Feuer während und nach der Prüfung innerhalb von 6 Std.
- Überladung: Keine Zerlegung, kein Feuer während und nach der Prüfung innerhalb von 7 Tagen.
- Erzwungene Entladung (mit max. Entladestrom, laut Herstellerangabe): Kein Feuer während und nach der Prüfung innerhalb von 6 Std.

### 6.10.3.2 Einzelregelungen

Die Einzelregelungen gliedern sich nach den Verkehrsträgern. Die folgende Aufzählung gibt eine Übersicht über die wichtigsten Einzelregelungen (batteryuniversity.eu GmbH, 2014):

- Im Straßenverkehr gilt das europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR). Die ADR findet in Europa und benachbarten Staaten Anwendung. In Deutschland gilt darüber hinaus die Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) sowie die GGVSEB-Durchführungsverordnung (RSEB) welche eine Einheitliche Durchführung der GGVSEB und der ADR regelt.
- Im Eisenbahnverkehr gilt die RID. Deutschlandweit ist die GGVSEB mit der RSEB als Durchführungsverordnung von Transporteuren einzuhalten.
- In der Seeschifffahrt regelt der International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG-Code) in den Transport von Gefahrstoffen. In der deutschen See regelt darüber hinaus die GGVSEB den Transport.
- Im Binnenschifffahrtsverkehr regelt das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen (ADN) den Transport. Es gelten Sonderverträge für den Rhein (ADNR) und die Donau (ADN-D). Die GGVSEB und RSEB regeln zusätzlich den Wassertransport in Deutschland.
- Im Luftverkehr regeln Technical Instructions (ICAO-TI), herausgegeben von der International Civil Aviation Organisation (ICAO) den sicheren Transport. Diese werden vom Internationalen Verband der Luftverkehrsgesellschaften IATA mit den IATA Dangerous Goods Regulations (IATA-DGR) übernommen. In Deutschland existieren keine zusätzlichen Regelungen.

### **6.10.3.3 Vorschriften für Lufttransport**

Die Anforderungen für den Lufttransport von Li-Batterien basieren auf den schriftlich festgelegten Bestimmungen der Ausgabe 2013–2014 der ICAO technischen Anweisungen für die sichere Beförderung von gefährlichen Gütern im Luftverkehr und der 54. Ausgabe der IATA Gefahrgutvorschriften, der IATA-Dangerous Goods Regulation (IATA-DGR) (Tadiran Batteries GmbH, 2013).

Es wird unterschieden zwischen Li-Ionen- (inkl. -Polymere) und Li-Metall-Batterien/Zellen sowie deren Art der Verpackung, d. h., ob die Li-Batterie separat oder in der Ausrüstung integriert transportiert wird. Als Grundlage für die Freistellung von Li-Ionen-Batterie gilt die Nennenergie in Wattstunden als Bewertungsgrundlage, bei Li-Metall-Batterien die Li-Masse. Alle Zellen und Batterien müssen in Übereinstimmung mit dem UN-Handbuch der Prüfungen und Kriterien, Teil III Unterabschnitt 38.3 (DGR 3.9.2.6) geprüft sein.

Für jede Sendung ist ein Luftfrachtbrief mit den entsprechenden Angaben sowie ein Handlinglabel in Abhängigkeit von der Technologie erforderlich. Die Verpackung darf nur durch eingewiesenes Personal erfolgen (IATA, 2013).

### **6.10.3.4 Vorschriften für Straßen-/ Eisenbahntransport**

Bei dem Transport über Straßen und per Eisenbahn gelten im Wesentlichen die Vorschriften für den Lufttransport, jedoch sind die Begleitdokumente abweichend ausgeführt.

Das beförderte Material ist den UN-Nummern zuzuordnen. Batterien und Zellen dürfen unter Beachtung folgenden Kriterien transportiert werden (Tadiran Batteries GmbH, 2013) (EPTA / ZVEI / IVG, 2012):

- Nachweis, dass die Zelle den Anforderungen des UN-Handbuchs der Prüfungen und Kriterien entspricht
- Zellen/Batterien müssen mit Überdruckschutz versehen sein
- Gefordert wird ein Schutz gegen äußere Kurzschlüsse
- Bei allen Batterien mit mehreren Zellen oder mit Zellen in Parallelschaltung ist eine Einrichtung zur Verhinderung des Rückstroms vorzusehen. Damit wird ein Stromfluss in umgekehrter Richtung durch die Zelle verhindert.

- Die Zellen sind unter Berücksichtigung eines Qualitätssicherungs-Programms (QS-Programm) herzustellen. Dieses beinhaltet Punkte wie Verantwortlichkeiten, Anweisungen für QS und Abläufe, Prozesskontrolle, QS-Aufzeichnungen, Dokumentation, Testeinrichtung, Schulung und Qualifizierung für Personal sowie Endkontrolle (Tadiran Batteries GmbH, 2013).

#### **6.10.3.5 Sondervorschriften**

In der ADR, veröffentlicht über den Bundesanzeiger Verlag, sind Sondervorschriften für den Transport von Li-Batterien festgelegt (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013, Abs.3.3.1). Die Sondervorschrift 188 ausgenommen sind alle anderen Vorschriften tabellarisch zusammengefasst:

##### **Vorschrift 188**

Der Transport ist von übrigen Vorschriften des ADR unter folgenden Bedingungen ausgenommen:

- Beschränkung einer Zelle auf ein Lithiumgewicht  $\leq 1$  g und einen Nenn-Energieinhalt  $\leq 20$  Wh.
- Beschränkung einer Batterie auf ein Lithiumgewicht  $\leq 2$  g und einen Nenn-Energieinhalt  $\leq 100$  Wh. Auf dem Außengehäuse ist die Nennenergie in Wattstunde anzugeben.
- Herstellung mit QS-System und Prüfung gemäß Abs. 38.3 Li-Metall- und Li-Ionen-Batterien des Handbuchs über Prüfung und Kriterien (BAM: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung).
- Keine Kurzschlüsse durch Verpackung, die die Zellen/Batterien völlig umschließt und in einer Außenverpackung untergebracht ist.
- Ausrüstung mit Li-Ionen-Batterie müssen gegen unbeabsichtigtes Einschalten geschützt sein. Die Ausrüstung muss eine starke Außenverpackung darstellen.
- Kennzeichnung und Begleitdokumente gemäß Vorgaben.
- Versandstücke müssen Fallprüfung aus 1,2 m Höhe ohne Beschädigung überstehen, sofern sie nicht in Ausrüstungen eingebaut sind.
- Die Bruttomasse der Versandstücke ist auf 30 kg beschränkt. Ausnahme: Verbaut in Ausrüstungen oder mit Ausrüstungen verpackt.

Tab. 6: Sondervorschriften  
(Eigendarstellung in Anlehnung an (ADR, i.d.F. vom 01.01.2013, Abs.3.3.1))

Vorschrift	Besonderheit
<b>230</b>	Der Transport von Li-Zellen ist erlaubt, wenn ADR 2.2.9.1.7 erfüllt ist (Sicherheitseinrichtungen einer Zelle, QS-Programm, etc.).
<b>310</b>	Befreiung von den Vorgaben des Handbuchs über Prüfung und Kriterien (BAM) für Batterien mit einer Zellenzahl < 100 Zellen oder für ungeprüfte Vorprodukte, wenn die Verpackung gemäß Verpackungsgruppe I oder als Einzelverpackung ausgeführt ist.
<b>348</b>	(Ausgenommen Li-Metall-Batterien) Batterien, die nach dem 31. Dezember 2011 hergestellt werden, müssen auf dem Außengehäuse mit der Nennenergie in Wattstunden gekennzeichnet sein.
<b>636</b>	Die Entladung in einem Gerät während der Beförderung darf einen Grenzwert nicht überschreiten. Die Vorschrift enthält Regelungen für den Transport gebrauchter Zellen/Batterien bis zu einer Masse von 500g.
<b>360</b>	Fahrzeuge, angetrieben von Li-Batterien, fallen unter die Eintragung UN 3171 batteriebetriebenes Fahrzeug.
<b>661</b>	Vorgaben seitens der Behörde für den Transport zur Entsorgung von Li-Batterien und -Zellen. Darunter fallen auch beschädigte Batterien und Zellen.

## 6.11 Gesetzliche Regelung

### Gesetzesgrundlage

Das BattG regelt, auf Basis der Richtlinie 2006/66/EG, das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (BattG, i.d.F. vom 24.02.2012). Das BattG, welches zuletzt am 24.02.2012 geändert wurde, gilt für alle zivil und nicht in der Raumfahrt genutzten Arten von Batterien, unabhängig der Größe, Form, Masse, stofflicher Zusammensetzung oder Verwendung. Dieses Gesetz und die auf Grundlage dieses Gesetzes geltenden Rechtsverordnungen, sind auf Li-Batterien anwendbar. Der Hersteller ist verpflichtet, vor dem Inverkehrbringen einer neuen Batterie dem Umweltbundesamt (UBA) Auskunft über diese zu geben, die vom UBA gesammelt und veröffentlicht werden.

Die Verordnung zur Durchführung des Batteriegesetzes regelt was beim Inverkehrbringen einer Batterie veröffentlicht werden muss (BattGDV, i.d.F. vom 12.09.2009).

Batterien müssen des Weiteren von den Herstellern entsorgt und der stofflichen Verwertung zugeführt werden. Das Gesetz unterscheidet nicht zwischen beschädigten und unbeschädigten Batterien. Hersteller haben auch die Möglichkeit in der Verwertung nicht wirtschaftlich zumutbare oder nicht zu identifizierende Batterien gemeinwohlverträglich und nach der BattVO (Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren) sicher für Umwelt und Menschen zu entsorgen (BattV, i.d.F. vom 09.09.2001)(BattG, i.d.F. vom 24.02.2012).

### **IEC-Normentwurf**

Neben anderen Normungsaktivitäten zum Thema Li-Batterie wird nachfolgend als Beispiel auf den IEC-Normentwurf 62619 eingegangen. Der Titel dieses Entwurfs lautet *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications.*

Der Normentwurf spezifiziert Anforderungen und Tests, für den sicheren Einsatz von Li-Batterien in industrieller Umgebung, mit den folgenden zwei Einsatzgebieten (IEC-NP, 2012):

- Stationärer Einsatz, z. B.: Telekommunikation, UPS, Notstromversorgung, etc.
- Mobile Anwendung: z. B. Flurförderzeuge, Golfwagen, Eisenbahnen, Marine, etc. Straßenfahrzeuge sind ausgenommen.

Der Normentwurf unterscheidet zwischen bestimmungsgemäßer Nutzung und vorhersehbarer missbräuchlicher Nutzung. In jedem Fall müssen die Batterien und Akkus sicher sein, insbesondere von missbräuchlicher Nutzung darf keine Gefahr ausgehen (IEC-NP, 2012).

Als Gefahren werden genannt:

- Feuer
- Platzen und Explosion
- Kurzschluss als Folge einer Leckage des Elektrolyten
- Austritt entflammbarer Gase
- Mechanische Beschädigung des Gehäuses mit Auswirkungen auf das Innenleben

Auf folgende Punkte wird hingewiesen:

- Geeignete Ausführung der internen Verkabelung und Isolation, wobei die interne Verbindung im Hinblick auf vorhersehbaren Missbrauch besonders erwähnt wird.
- Batterie-Zellen oder -Module sollen mit Druckentlastungssystemen zur Verhinderung von Explosionen ausgerüstet sein. Der Aufbau von Batteriesystemen in einem Gehäuse ist so auszuführen, dass im normalen Einsatz keine Überhitzung oder Überdruckentlastung stattfindet.
- Die Li-Batterie ist so auszuführen, dass Übertemperaturen vermieden werden. Die vom Hersteller angegebenen Grenzen bezüglich Spannung, Strom und Temperatur dürfen nicht überschritten werden. Für die Ladegerätehersteller sind ausreichende Spezifikationen für das Laden des Akkus bereitzustellen.
- Die Ausführungen der Anschlüsse sind zu kennzeichnen und entsprechend den Anforderungen zu gestalten, insbesondere im Hinblick auf Kurzschlüsse.
- Jedes Batteriesystem erfordert unabhängige Kontroll- und Schutzmaßnahmen.
- Die Hersteller von Zellen sollen für den Systemhersteller Empfehlungen betreffend Strom-, Spannung- und Temperaturgrenzen abgeben.
- Ausgleichschaltungen für jede Zelle sollen während des Ladevorgangs ein Umpolen der Zelle verhindern.
- Bezüglich des jeweiligen Einsatzfalls sind entsprechende Schutzeinrichtungen vorzusehen.
- Der Test eines Batteriesystems ist zu dokumentieren.
- Beim Laden mehrerer in Reihe geschalteter Batteriezellen ist die Spannung jeder Zelle zu überwachen, um Überspannung zu vermeiden.
- Die Produktion von Batteriesystemen erfordert einen Qualitätsplan des Herstellers.

Unter dem Kapitel Testanleitung beschäftigt sich die Norm mit dem Thema Spannungen beim Laden und den Folgen bei Überspannung. Dazu zählt zum Beispiel die Instabilität der kristallinen Struktur.

Weiterhin wird der Einfluss der Zelltemperatur beim Ladevorgang diskutiert. Generell wird ein Temperaturbereich von 10 °C bis 45 °C empfohlen. Der Temperaturbereich ist abhängig von Material und Ausführung der Zelle. Ladespannung und Ladestrom sind der Zelltemperatur anzupassen.



Folgende Testszenarien sind für die Zellen und Batteriesysteme durchzuführen:

- Externer Kurzschluss
- Mechanische Einwirkung
- Falltest
- Über-/Untertemperatur
- Überladung
- Starkentladung
- Kontrolleinrichtungen für überhöhte Spannung, Strom und Temperatur
- Test bezüglich der thermischen Instabilität des Batteriesystems

Jeder Test wird, mit detaillierten Angaben über die Testprozedur, in dem Normentwurf ausführlich beschrieben (IEC-NP, 2012).

Ein weiteres Kapitel ist den Sicherheitssystemen gewidmet. Der Hersteller ist verpflichtet, eine Risikoanalyse durchzuführen, um den „Safety-Integrity-Level“ zu bestimmen.

Es folgen die Anforderungen an das BMS bezüglich einer Verhinderung von Überspannung, Überstroms und Übertemperatur.

Ein weiterer Test untersucht das Verhalten des Batteriesystems bei einem Zellenkurzschluss bzw. bei einer Übertemperatur der Zelle.

Die letzten Absätze beinhalten Angaben zum Recycling, Sicherheitsinformationen, Kennzeichnung und Verpackungen für den Transport (IEC-NP, 2012).

## **7 Anwendungen von Lithium-Batterien**

### **7.1 Beispiele**

Die Li-Technologien finden auf allen Gebieten der Energiespeicherung zunehmend Anwendung. Das Spektrum reicht von Kleinstanwendungen bis zu Großenergiespeichern. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt, wobei der Schwerpunkt der Betrachtung auf Speicher mit hohem Energieinhalt liegt.

Von jeden aufgezählten Anwendungen können die in Tab. 5 aufgeführten Gefahren ausgehen. Besondere Gefahren sind Brand und Explosion. In Punkt 8.1 sind einige Beispiele dafür aufgeführt.

Li-Batterien mit mittlerer und geringer Leistung werden in einer Vielzahl von Geräten verwendet. Die Spannungslage dieser Batterien liegt unter 60 V, demnach stellen sie bei Berührung keine Gefährdung dar. Die Einsatzgebiete von Li-Batterien können z. B. Elektrozigaretten, Fotoapparate und Akkubohrmaschinen sein.

Millionenfach im Einsatz befinden sich Li-Batterien in Smartphones und Laptops. Ein starkes Wachstum verzeichnen Anwendungen für Elektrofahrräder.

### **7.2 Anwendungen mit hoher Leistung**

Im hohen Leistungsbereich dominieren Anwendungen für die Elektromobilität. Als weiterer Schwerpunkt werden Batterien mit hoher Leistung als stationäre Energiespeicher im öffentlichen Stromnetz und für Traktionsbatterien verwendet.

#### **7.2.1 Kraftfahrzeuge mit Lithium-Batterien**

Fahrzeuge mit Elektroantrieb werden heute überwiegend als Hybridsysteme aufgebaut. Erste, rein elektrisch betriebene Fahrzeuge, sind auf dem Markt (z. B. Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL). Die Batterien dieser Fahrzeuge sind in Hochvolttechnik ausgeführt, in der Regel auf Li-Technologie. Die Batterien sind als Module gegen äußere mechanische Einflüsse in gut geschützten Bereichen der Karosserie angeordnet, z. B. im Mitteltunnel oder unter der Rückbank. Die Spannungslagen bewegen sich im Bereich bis zu 500 V. Aus diesem Grund sind, im Vergleich zu herkömmlicher Kfz-Elektrik mit Spannungen von 12 V bzw. 24 V, besondere Schutzmaßnahmen von den Herstellern eingebaut.

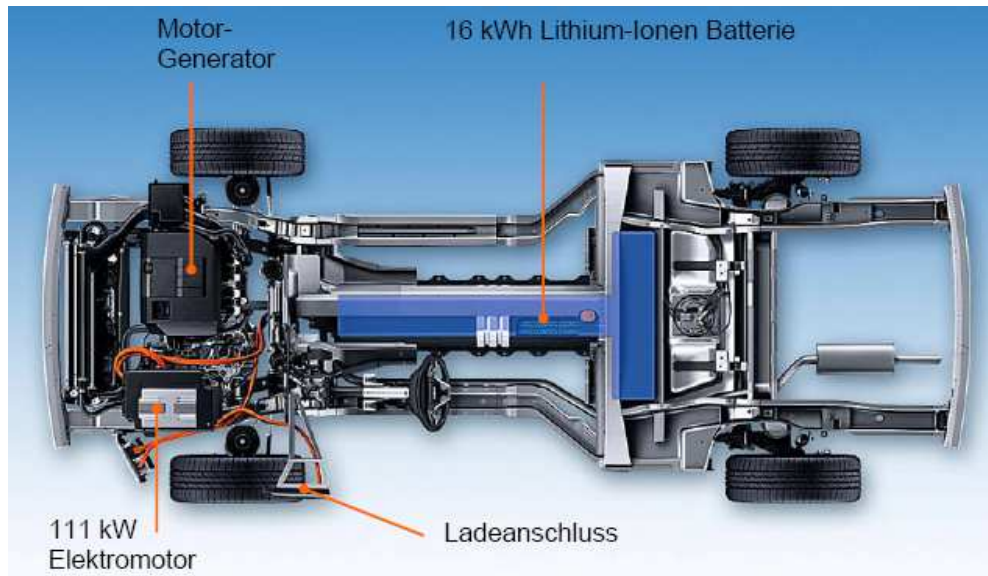


Abb. 19: Anordnung der Batterie im Opel Ampera (Breitinger, 2011)

Die Hochvolt-Kabel (HV-Kabel) sind orangefarbig ausgeführt. Trennstellen sind mittels Steckverbindungen realisiert, um ein Trennen bzw. Stecken ohne Berührung der spannungsführenden Teile zu ermöglichen. Schraubverbindungen treten nicht auf.

Zur Unterbrechung der HV-Leitungen sind die Batterien mit Schnelltrenneinrichtungen versehen (z. B. Pyro-Switch, s. Abb. 20), die im Fall eines Crashes mit dem Auslösen eines Airbags aktiviert werden und das HV-Netz spannungsfrei schalten.

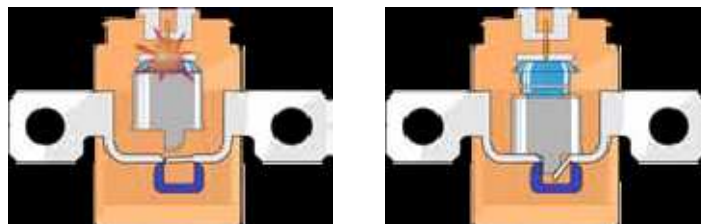


Abb. 20: Pyro-Switch: Auslösung und mit getrennter Verbindung (Autoliv B.V. & Co. KG, 2013)

Von der Li-Ionen-Batterie im Kfz gehen insbesondere folgende Gefahren aus:

- Elektrischer Schlag, durch Berührung spannungsführender HV-Kontaktpunkte
- Lichtbogen, bei Trennung einer Verbindung unter Strom, ausgelöst durch manuelles Trennen einer Steckverbindung oder Deformation im Schadenfall
- Feuer und Ausgasung der Batterie, bei mechanischer Beschädigung mit der Folge eines inneren oder äußeren Kurzschlusses.
- Masseverlust der Batterie, z. B. durch austretenden Elektrolyt (DGUV, 2013)

Die, jedem Fahrzeug zugeordnete Rettungskarte (s. Abb. 21), enthält u. a. auch die Informationen über die Lage der Batterie, der HV-Verkabelung und der übrigen HV-Komponenten, wie z. B. Wechselrichter für die elektrischen Maschinen ( DGUV, 2013).

Die Rettungskarten sind für alle Kfz-Fabrikate mit einer einheitlichen Legende ausgestattet, u. a. auch dem Symbol für HV-Komponenten. Einige Hersteller geben ergänzend zur Rettungskarte Einsatzhinweise für die Rettungskräfte an, wie z. B. Identifizierungsmerkmale des Fahrzeugs.

Gehäuse elektrischer Komponenten sollen nicht geöffnet werden. Karosserieteile im HV-Bereich sowie HV-Leitungen dürfen nicht mit Rettungsgeräten durchtrennt oder deformieren werden (DGUV, 2013).

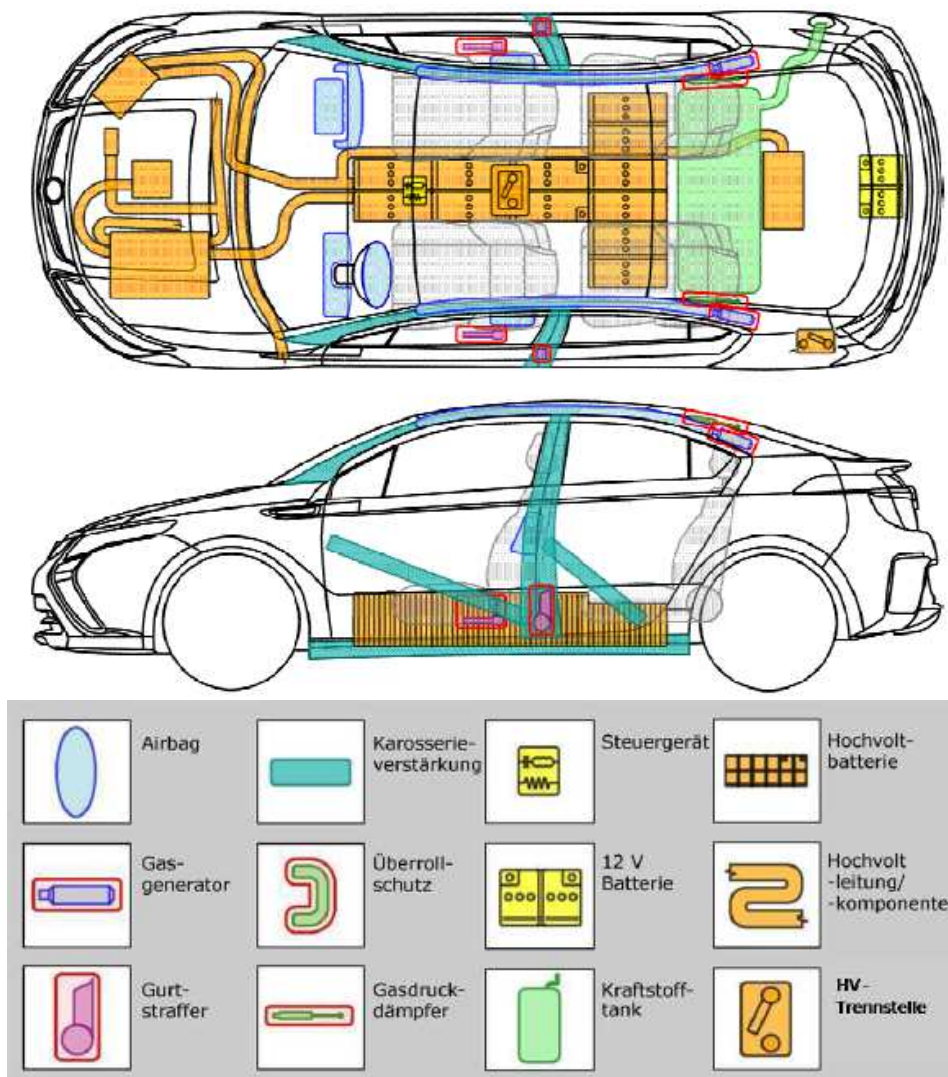


Abb. 21: Auszug aus der Rettungskarte des Opel Amperas (Adam Opel AG, 2011)

### 7.2.2 Lithium-Batterien für Traktionsanwendungen

Für Traktionswendungen werden, im Gegensatz zu den maßgeschneiderten Lösungen im Pkw, überwiegend aus Standardkomponenten aufgebaute oder zusammengesetzte Batterien eingesetzt. Zu den typischen Einsatzbereichen zählen z. B. Flurförderzeuge, Reinigungsmaschinen, elektrische Nutzfahrzeuge und Freizeitanwendungen.

Ein, von der Fa. Hoppecke vorgestelltes, Li-Batterie-System trak power besteht aus mehreren autarken Grundmodulen (s. Abb. 22), die mit einem BMS und einer Schnittstelle zur Übermittlung der systemrelevanten Größen ausgestattet sind. Die Batterien sind als High Energy, oder als High Power Variante verfügbar.



Abb. 22: Li-Batterie für Traktionsanwendung: Grundmodul / Batterieeinheit (HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG, 2014)

### 7.2.3 Energiespeicher im öffentlichen Netz

Alternative Energiequellen, wie zum Beispiel Wind- und Solarenergie, schwanken aufgrund von unterschiedlichen Witterungsbedingungen stark bei der Einspeiseleistung ins öffentliche Netz. Um diese Schwankungen dem Energiebedarf anzupassen, sind große Energiespeicher erforderlich. Neben den bekannten Pumpspeicherwerken wird in der Nähe von Schwerin der größte europäische Batteriespeicher auf der Basis von Li-Technologie entwickelt und gebaut (Wetzel, 2013).

Die Kapazität des Energiespeichers sollen 5 MWh betragen, die Zellen sind für ein entsprechendes Verhältnis von Leistung und Energie ausgelegt. Damit wird eine Lebensdauer von 20 Jahren erwartet (Wetzel, 2013).

## 8 Schadenfall

### 8.1 Beispiele

Der Brand der Li-Batterie im Boeing-Dreamliner wurde rechtzeitig am Boden entdeckt, Personen kamen nicht zu Schaden (s. Abb. 23). Der wirtschaftliche Schaden war umso größer, da alle Flugzeuge dieses Typs für Monate nicht starten durften.



Abb. 23: Zerstörte Li-Batterie des Dreamliners  
(National Transportation Safety Board, 2014)

In einem anderen Schadenfall brannte ein Transportflugzeug am Boden ab. Als Ursache wurde der Brand einer Ladung aus Li-Batterien angenommen (s. Abb. 24).



Abb. 24: Brand einer Frachtmaschine ausgelöst durch brennende Li-Batterien  
(Associated Press, 2013)

Weitaus dramatischer ist der Absturz einer Transportmaschine, wahrscheinlich ebenfalls ausgelöst durch brennende Li-Batterien im Frachtraum.

## 8.2 Verbrennungsreaktionen

Ein Verbrennungsprozess entsteht, wenn die, in Abb. 25 dargestellten, Größen im richtigen Mengenverhältnis zusammentreffen. Bei schadhafte Li-Batterien kann der brennbare Stoff aus dem organischen Elektrolyten, dem Lithium und auftretenden Reaktionsprodukten bestehen. Zum Beispiel erzeugen der Elektrolyt oder (Lösch-) Wasser in Verbindung mit Lithium Wasserstoff. Der benötigte Sauerstoff ist in der Umgebungsluft enthalten oder wird durch zelleigene chemische Reaktionen freigesetzt. Lithium ist ein sehr reaktionsfähiges Metall, es reagiert stark exotherm mit Wasser zu Lithiumlauge (LiOH) und leicht entzündbarem Wasserstoff (H<sub>2</sub>).



Abb. 25: Verbrennungsdreieck  
(Stefan-XP, 2006)

Ein unkontrollierter Stromfluss, z. B. durch einen internen Kurzschluss, erzeugt ausreichende Wärme für eine Entzündung. Eine Brandbekämpfung wird dadurch erschwert, dass alle drei Größen des Verbrennungsdreiecks in der Li-Zelle auftreten können. Dies gestaltet eine Beeinflussung von außen schwierig (Buser, 2012).

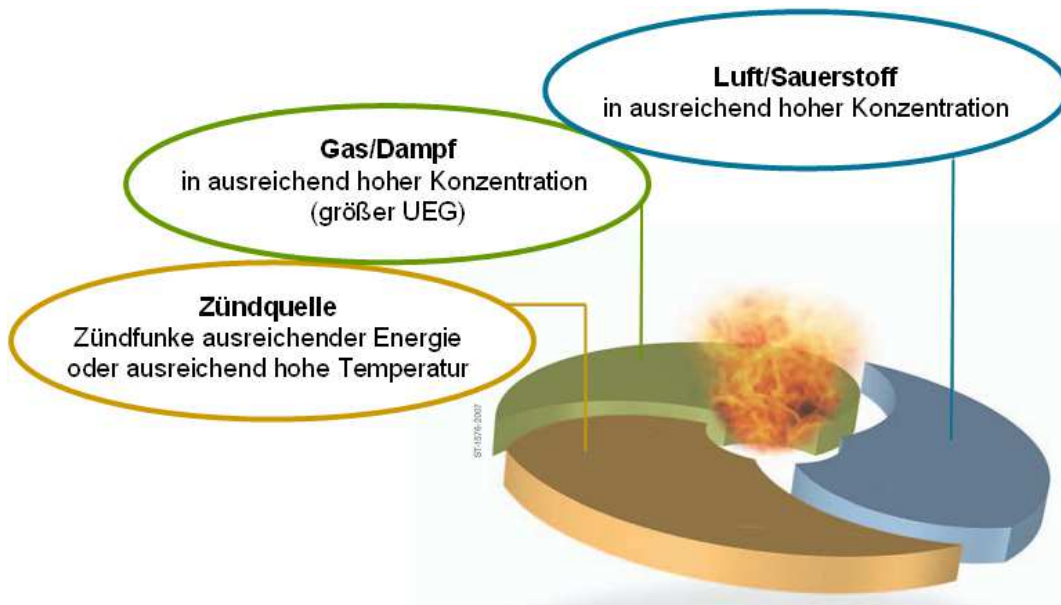


Abb. 26: Erforderliche Voraussetzung für eine Explosion  
Eigendarstellung

Die Grundvoraussetzungen einer Explosion bestehen aus einem entzündlichen Gas in Verbindung mit Sauerstoff, beides in ausreichend hoher Konzentration, und einer Zündquelle. Eine Explosion kann wirksam verhindert werden, wenn eine dieser Voraussetzungen unterbunden wird. Die Höhe der freigesetzten Energie wird wesentlich durch das Verhältnis der Konzentration von Gas und Sauerstoff bestimmt.

### 8.3 Lösungsverfahren

Mit einem geeigneten Verfahren zur Brandbekämpfung von Li-Batterien, sollten gute Löschergebnisse erzielt werden, gleichzeitig sollte aber auch die Kontamination der Umgebung mit hochreaktiven Verbindungen aus der havarierten Zelle oder Batterie verhindert oder zumindest eingeschränkt werden.

Bekannt und heute im Brand- und Schadenfall von Li-Batterien eingesetzte Löschmittel sind Wasser, Wasser mit Zusätzen (Schaum), Sand und Metallbrandpulver. Geschlossene Räume werden auch mit Inertgaslöschanlagen oder Sauerstoffreduzierungsanlagen ausgestattet (Anwander, 2013).



## **Wasser**

Das Kühlen und Löschen beschädigter Zellen und Batterien erfordert große Wassermengen. Dadurch wird die Kerntemperatur der unbeschädigten Zellen herabgesetzt und eine Kettenreaktion mit einer möglichen Explosion vermieden. Durch die Verwendung von Wasser als Löschmittel werden beschädigte Zellen entladen (GDV, 2012).

Lithium kann in Verbindung mit Wasser unter Flammenbildung reagieren. Bei der Reaktion zwischen dem Löschwasser und Lithium kann Wasserstoff entstehen. Dieser kann sich bei zündfähiger Atmosphäre schlagartig entzünden und führt somit zu einem zu beachtenden Problem beim Einsatz von Wasser.

## **Wasser-Schaummittel-Gemisch**

Löschverfahren mit Wasser und Löschmittelzusätzen erhöhen den Wärmeübergang an das Löschmittel. Kurze Löschzeiten unter geringerem Wasserverbrauch sind möglich. Umweltschädliche Inhaltstoffe sind zu vermeiden. „Cold-Metal“ und eine 3%ige Mischung von F-500, einem Multifunktionslöschmittelzusatz, in Wasser haben zu guten Resultaten geführt (Joß & Döringer, 2011, 3).

## **Sand, Metallbrandpulver**

Brennende Zellen oder Batterien können mit Sand oder Metallbrandpulver abgedeckt werden. Das Metallbrandpulver verschmilzt bei hohen Temperaturen auf der Oberfläche der brennenden Li-Zellen und löscht den Brand durch Ersticken. Unter Sauerstoffabschluss kann die Zelle nicht mehr weiter brennen. Allerdings setzen brennende Li-Zellen Sauerstoff frei, so dass eine verschmolzene Pulverschicht auf der Oberfläche den Brand nur bedingt begrenzt (Joß & Döringer, 2011, 4).

Durch eine fehlende Kühlung kann es weiterhin zur Kettenreaktion kommen. Beim Entfernen des Löschmittels und erneute Sauerstoffzufuhr können Verpuffungen und Schwelbrände erneut auftreten. DEKRA und die Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg raten von dem wenig erfolgversprechenden Löschverfahren ab (Joß & Döringer, 2011, 4).

## **Halon 1301 (Negativbeispiel)**

Halon 1301, ein reaktionsträges Edelgas, wird in Löschanlagen eingesetzt, in denen konventionelle Löschmittel wie z. B. Wasser oder Schaum empfindliche technische Einrichtungen zerstören würden, u. a. in Flugzeugen. In einer Untersuchung, unterstützt von der FAA (Federal Aviation Administration), wurde Halon 1301 als Löschmittel zur Brandbekämpfung von brennenden, primären Li-Batterien im Flugzeug untersucht. Es hat sich gezeigt, dass Halon 1301 dafür nicht geeignet ist, da es lediglich die Farbe der Flammen verändert, aber keine Auswirkungen auf die Dauer

und Intensität des Feuers hat. Zudem kann die, durch den Einsatz von Halon 1301 im Flugzeug reduzierte Temperatur, oberhalb der Selbstentzündungstemperatur von Lithium liegen, so dass eine Brandausbreitung auf benachbarte Batterien nicht verhindert wird (FAA Fire Safety Brigade, 2013).

### **Neue Löschverfahren**

In einem Patent aus dem Jahre 2012 (Patentinhaber u. a. Firma Bosch), wurde ein Verfahren zur Bekämpfung und/oder Vorbeugung eines Brandes von Li-Ionen-Zellen und Li-Ionen-Polymer-Zellen, auf Basis einer wässrigen Lösung eines Kalzium-Salzes und ein Gel-Löschmittel (z. B. Firesorb) angemeldet. Das, selbst nicht brennbare Löschmittel, kann für alle Li-Ionen- und Li-Ionen-Polymer-Zellen mit allen Aktivmaterialien angewendet werden (Woehrle, Denninger, Schmidt, & Kern, 2009).

Bei einem Brand oder einer Explosion einer Li-Batterie wird sehr reaktives und gesundheitsschädliches Material freigesetzt. Das als Leitsalz verwendete Lithiumhexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ ) kann zu hochreaktiven und toxischen Verbindungen zersetzt werden. Die Zersetzungsprodukte werden durch das Kalzium gebunden und nahezu wasserunlöslich. Die guten Kühleigenschaften sind durch das Gel-Löschmittel gegeben (Woehrle, Denninger, Schmidt, & Kern, 2009).

In diesem Zusammenhang werden auch vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Löschmitteln, wie z. B. Firesorb, Wasser und  $\text{CO}_2$  genannt, eingesetzt bei entflammten handelsüblichen Flachzellen auf Basis Li-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid und Li-Cobalt-Oxid mit Leitsalz  $\text{LiPF}_6$  (Woehrle, Denninger, Schmidt, & Kern, 2009).

Die Ergebnisse werden in der Patentanmeldung wie folgt zusammengefasst:

Kohlendioxid ist als Löschmittel nicht geeignet. Nach dem Aufbringen von Wasser ist ein neues Wiederaufflammen sichtbar. Im Löschwasser sind Fluorid-Ionen enthalten. Optimale Ergebnisse wurden mit einer wässrigen Kalziumlösung und einem Gellöschmittel (Firesorb) erzielt (Woehrle, Denninger, Schmidt, & Kern, 2009).

## **8.4 Vorgaben für den Einsatz mit Lithium-Batterien**

Die nachfolgenden Beispiele beinhalten Vorgaben für den Einsatzfall an einem verunfallten Fahrzeug mit einer Li-Batterie. Es wird deutlich, dass angesichts der von der Li-Technologie ausgehenden Gefahren, hier noch erheblicher Handlungsbedarf besteht (Joß & Döringer, 2011).

### **8.4.1 Einsatzhinweise im Schadenfall von Fahrzeugen**

Die steigende Benutzung von Elektrofahrzeugen führt zu einer steigenden Menge an Unfällen mit Elektrofahrzeugen. Daraus resultierend sind von der Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg, in Zusammenarbeit mit der DEKRA, folgende Hinweise und Empfehlungen bei Unfällen oder Bränden von Li-Batterien veröffentlicht worden (Joß & Döringer, 2011):

- Eintreffende Einsatzkräfte müssen über die mögliche Identifikation von Elektrofahrzeugen und über taktische Änderungen aufgeklärt werden.
- Die Einsatzkräfte müssen über vorherrschende Spannungen von bis zu 400 V informiert werden.
- Bei einem Separatorbruch/-riss kommt es zur Reaktion der beiden Elektroden. Durch die große, schlagartig freiwerdende Energie steigt die Temperatur rasch an. Gase bilden sich im Inneren der Zelle als Reaktionsprodukte, der Druck der Zelle steigt somit an.
- Die Stärke der Reaktion ist abhängig vom Kathodenmaterial. Oxidische Materialien zerfallen durch hohe Aktivierungsenergie unter Abgabe von Sauerstoff stark exotherm. Bei Li-Eisen-Phosphat-Batterien findet keine Reaktion mit Wärme- und Sauerstoffabgabe statt.
- Durch einen Unfall kann die Isolation zwischen Akkumulator und Karosserie beschädigt werden. Einzelne Bauteile des Fahrzeugs können so unter Spannung stehen.
- Lichtbögen können zwischen unfallbedingt kurzgeschlossenen Bauteilen entstehen. Dies kann zu einem Brand der Batterie oder des Kraftfahrzeugs führen.
- Bei einem Unfall soll ein allpoliges Abschalten des Akkumulators den Stromübergang auf andere Baugruppen des Kfz verhindern (Joß & Döringer, 2011).

### **8.4.2 Rettungs- und Löscharbeiten an Fahrzeugen**

Bei einem verunfallten Fahrzeug, mit Elektro- oder Elektrohybridantrieb, sind gemäß der DGUV, neben den allgemein gültigen Standards, weitere Regeln zu beachten. Einsatzkräfte müssen auf die zusätzlichen Gefahren aufmerksam gemacht werden (DGUV, 2013).

Sofern vorhanden, ist das fahrzeugspezifische Rettungsdatenblatt heranzuziehen. Dies ist aus dem FRS (Feuerwehr Rettungsdatenblatt System) der Firma Silver-DAT-Deutschland zu beziehen und kann offline und online angewendet werden.

Ein angepasster Rettungseinsatz setzt eine korrekte Identifikation des Antriebssystems voraus. Dies ist zum Beispiel mit der AUTO-Regel durchführbar (DGUV, 2013):

- A Austretende Betriebsstoffe (Zisch- und Knattergeräusche, Nebelbildung)
- U Unterboden, Motor- und Kofferraum erkunden (orangefarbene HV-Leitungen)
- T Tankdeckel öffnen (elektrisches Ladesystem)
- O Oberfläche absuchen (einschlägige Beschriftungen, fehlender Auspuff, Batterieschutzschalter z. B. im Motorraum oder im Armaturenbrett)

Vor Beginn der Lösch- und Rettungsarbeiten ist die Hochvoltanlage zu deaktivieren, sofern dies nicht automatisch erfolgt ist. Die Bauteile können auch bei allpoliger Abschaltung noch unter Spannung stehen. Arbeiten an HV-Leitungen und -Batterien können durch einen Stromschlag zu tödlichen Verletzungen führen, ebenso das Berühren beschädigter Komponenten des Antriebssystems. Beim Arbeiten mit hydraulischen Rettungsgeräten ist auf orangefarbene HV-Kabel zu achten (DGUV, 2013).

Die Li-Batterien sind in der Regel im unteren Fahrzeugbereich verbaut. Es ist zu berücksichtigen, dass ein Fahrzeug auch mit mehreren Elektromotoren und den dazugehörigen Leistungselektronik-Baugruppen ausgestattet sein kann.

Aus den in Brand geratenen oder beschädigten Batterien können reizende und ätzende Gase oder Flüssigkeiten austreten. Eine beschädigte Batterie kann sich auch nach längerer Zeit noch entzünden. Wichtig ist die Kühlung des Systems mit Wasser. Bei Einsatz von Wasser als Lösch- und Kühlmittel ist, aufgrund der möglichen Batteriespannung bis 1000 V, ein ausreichender Strahlrohrabstand einzuhalten (Sprühstrahl 1 m, Vollstrahl 5 m) (DGUV, 2013).

Li-Batterien gelten als Gefahrgut. Deshalb dürfen verunfallte Fahrzeuge nur von Fachkundigen verladen, auf offenen Fahrzeugen transportiert und im Freien gelagert werden (DGUV, 2013).

### **8.4.3 Empfehlungen des ÖBFV bei Fahrzeugen**

Die Schulungsunterlage des ÖBFV (Österreichischer Feuerwehrverband), zum Thema Elektro-Hybridfahrzeuge, soll hier nur in Kurzform und bezogen auf Li-Batterien wiedergegeben werden (Mörk-Mörkenstein, Sternad, Schuster, Amann, & Springer, 2012):

- 
- Die elektrischen Komponenten des Hochvoltsystems eines Pkw sowie der Sicherheitseinrichtungen werden erläutert. Schlussfolgerung: Es müssen mehrere Elemente der Sicherheitskette versagen, damit eine Gefahrensituation entsteht (Eigensicherheit des Hochvoltsystems).
  - Gefahren bei einem verunfallten Fahrzeug: Lichtbogen, Stromschlag, Elektrolyt-austritt, Selbstentzündung
  - Mögliche Sicherheitsmaßnahmen:
    - Fahrzeug abschalten
    - 12 V-Sicherung des HV-Systems ziehen (oder alle), ggf. 12 V-Batterie abklemmen
    - Stecker der HV-Batterie ziehen, Schutzhandschuhe und Gesichtsvision erforderlich
  - Brandbekämpfung:
    - Offensiv: Große Wassermengen aus sicherer Entfernung (Kühlung), kein Schaum
    - Defensiv: Ausbrennen lassen
  - Abschlussarbeiten
    - Die Gefahr der verzögerten Selbstentzündung ist durch einen Fachmann bzw. eine Fachwerkstatt zu beurteilen. Übergabe an diese erfolgt mit entsprechenden Informationen über den Unfallverlauf.
    - Niemals das Fahrzeug nach einem Einsatz unbeaufsichtigt in einer geschlossenen Halle abstellen.

## 9 Maßnahmenkatalog

*Aus Schaden wird man klug.* Diese Erfahrung bewahrheitet sich auch bei der Einführung der Li-Technik, wie z. B. im Fall der brennenden Batterie im Dreamliner der Firma Boeing.

Wie in diesem Beispiel zeigt sich häufig, dass Produkte mit neuen Technologien und einem damit verbundenen hohen Restrisiko in den Markt eingeführt werden. Davon ebenfalls betroffene Bereiche, wie z. B. Rettungsdienst und Feuerwehr, können sich naturgemäß nur zeitversetzt darauf einstellen. Diese sukzessive Adaption ist besonders bei Technologien problematisch, von denen eine Gefährdung für Mensch und Umwelt ausgeht. Häufig werden Maßnahmen zur Reduzierung der Gefährdung erst ergriffen, wenn diese mit einer nicht mehr vertretbaren Häufung oder, wie beim Dreamliner, mit einem hohen zu erwartenden Schadenpotential eingetreten ist.

Ursache hierfür ist einerseits der mit dem Auftreten der Gefährdung verbundene Lerneffekt, d. h., man wusste es vorher nicht besser. Andererseits wird aber oft die vorausschauende und rechtzeitige Umsetzung von gefährdungsreduzierenden Maßnahmen, mit der Markteinführung einer neuen Technologie versäumt, häufig auch aus wirtschaftlichen Gründen.

Nach den Recherchen zu dieser Arbeit verfestigte sich der Eindruck, dass die Reaktion der betroffenen Bereiche auf die zunehmende Nutzung der Li-Batterie, insbesondere im Bereich der E-Mobility, nur zeitversetzt erfolgt. Das erstreckt sich vom Hersteller, über die Rettungsdienste, bis hin zum Gesetzgeber. Zum Beispiel ist der Informationsaustausch der Rettungskräfte nicht ausreichend und der Informationsstand nicht einheitlich. Dabei ist damit zu rechnen, dass die Li-Technologie in zunehmendem Maße zum Einsatz kommen wird, zumal die Entwicklung dieser Technologie noch weitere Impulse erwarten lässt.

Der folgende, vom Verfasser erstellte, Maßnahmenkatalog hat zum Ziel, *nicht erst durch Schaden klug zu werden*. Er richtet sich an Hersteller, Rettungsdienste bzw. Feuerwehr und Gesetzgeber. E-Mobility, d. h., Fahrzeuge mit Li-Batterie, stehen dabei im Vordergrund. Die vorgeschlagenen Maßnahmen lassen sich ggf. auch auf andere Gebiete der technischen Gefahrenabwehr Gebiete anwenden.

## 9.1 Anforderungen an Kraftfahrzeug-Hersteller

Für die getroffenen Schutzmaßnahmen im Fahrzeug bestehen heute keine einheitlichen Standards. Die Hersteller setzen die Li-Technologie entsprechend den Anforderungen ihrer Produkte und der technischen Möglichkeiten ein. Aus Wettbewerbsgründen wird versucht, immer die neueste Technologie einzusetzen, verbunden mit immer neuen Risiken und Gefährdungspotentialen. Die Konfigurationen, Energieinhalte und Einbauorte im Fahrzeug unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller. Das Gleiche gilt für die Ausführung der elektrischen Anlage, Verlegung der Kabel sowie Aufbau und Anordnung der Leistungskomponenten und Elektromotore.

Für einen effektiven Einsatz im Schadenfall benötigen die Einsatzkräfte von Rettungsdienst und Feuerwehr ausführliche und präzise Angaben über den Aufbau der beteiligten Fahrzeuge. Einsatzkräfte benötigen zum Beispiel Informationen über Notabschaltungen, Lage der HV-Kabel, um Schere und Spreizer gefahrlos einsetzen zu können, und über geeignete Löschverfahren. Diese Informationen sind vom Hersteller bereitzustellen.

### 9.1.1 Rettungskarte

Die bereits von mehreren Pkw-Herstellern eingeführte Rettungskarte muss alle für den Rettungseinsatz relevanten Informationen enthalten und sollte ein standardisiertes Layout aufweisen. Die Rettungskarte ist sowohl im Fahrzeug, als auch auf der Leitstelle oder an gleichwertiger zentraler Stelle in digitaler Form vorzuhalten. Die Einsatzkräfte sind mit Geräten auszustatten, mit denen die Daten online abgerufen werden können. Sinnvoll wäre hier die Nutzung von weit verbreiteten Standards, wie z. B. Mobiltelefon mit Internetzugang.

Die Rettungskarte sollte u. a. folgende Informationen enthalten:

- Originalbild des Fahrzeugs
- Skizze mit der Anordnung der sicherheitsrelevanten Komponenten wie zum Beispiel Batterie und Hochvoltleitungen
- Abschaltmöglichkeiten des Fahrzeugs
- Vorschläge für den Einsatz bekannter Rettungswerkzeuge
- Von der Li-Batterie ausgehende, mögliche gefährliche Emissionen (Gas, Flüssigkeit), Vorgaben für deren Bekämpfung
- Optimales Löschverfahren, zu kühlende Komponenten

- Erkennungsmöglichkeiten für den Zustand der Batterie (gasend, zischend, Wärmebildkameraaufnahmen an bestimmten Bauteilen)
- Kriterien für die gefahrlose Entsorgung des Unfallobjektes mit Angabe des sicheren Aufbewahrungsortes.

### **9.1.2 Fahrzeugidentifikation**

Die Fahrzeugkarte setzt eine eindeutige Identifikation des verunfallten Fahrzeugs voraus, was insbesondere bei schwer beschädigten Karosserien und bei Massenkarambolagen, ein Problem darstellen kann. Deshalb sind Verfahren zu entwickeln und einzuführen, die den Rettungskräften eine Identifikation des Fahrzeugs schnell und einfach ermöglicht. Die zurzeit herausgegebene Empfehlung "Orientierung am Tankdeckel" (vgl. Kapitel 8.4.2) ist dabei wenig hilfreich. Folgende Maßnahmen können, im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten, wirtschaftlich vertretbar umgesetzt werden:

- Eine Verlinkung der Fahrzeug-Datenkarte mit dem Kennzeichen des Fahrzeugs. Damit kann die zutreffende Datenkarte sicher über das Kennzeichen des Fahrzeugs elektronisch abgerufen werden.
- Mehrfach am Fahrzeug angebrachte Codes, über die der Fahrzeugtyp entschlüsselt werden kann und damit den Zugriff auf die Datenkarte des Fahrzeugs ermöglicht. Diese kleinen und für den Fahrer nicht störenden Codes können z. B. an den Rändern, der Scheiben, auf dem Kennzeichen oder auf einem speziellen Träger an verschiedenen Stellen im und am Fahrzeug angebracht sein.
- Stabil verpackte Elektronikmodule, die nach einem Unfall, ausgelöst werden, z. B. durch das Airbag-System, die Fahrzeugdaten auf einem festgelegten Übertragungskanal senden. Ausgerüstet mit einer eigenen Energiequelle sollte dies für einen längeren Zeitraum möglich sein. Mehrere, im Fahrzeug verbaute, Einheiten erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass im Schadenfall noch Informationen gesendet werden können.

### **9.1.3 Interne Sicherheitseinrichtungen**

Für die internen Sicherheitseinrichtungen der Li-Batterie sollten internationale Standards entwickelt und verabschiedet werden. Dazu einige Anregungen:

- Grenzwerte für die mechanische Belastbarkeit durch äußere Beanspruchung, wie z. B. Erschütterung, Schock, Hitzeeinwirkung oder Verformung im Schadenfall.
- Selbsttätiges Abschalten der Batterie im Störfall, u. a. mit festgelegten Grenzwerten und vorgegebenem Sicherheitslevel der Trenneinrichtung.



- Einheitliche manuelle Abschaltmöglichkeit für die Rettungskräfte.
- Vorgabe von Sicherheitskriterien für das Batterie-Management-System bezüglich Eigendiagnose der Batterie mit abgestufter Reaktion bei Toleranzüberschreitung.

## 9.2 Andere Fahrzeuge

Neben den Personenkraftwagen laufen die Entwicklungen für den Einsatz der Li-Batterien in anderen Fahrzeugtypen. Damit sind Fahrzeuge wie z. B. Golfwagen, Reinigungsmaschinen oder Transportfahrzeuge gemeint.

Bei der, zur Letzt genannten Kategorie zählenden, Gabelstapler werden heute Batterien in Standardtechnologie verbaut, deren Energieinhalt deutlich die vom Pkw her bekannten Werte überschreitet. Die höhere Energiedichte der Li-Technologie im Vergleich zu den heutigen Bleisystemen soll, u. a. dazu genutzt werden, die verfügbare Energie auf dem Fahrzeug zugunsten einer längeren Einsatzdauer zu steigern.

Die hohe Menge von Lithium stellt die Entwickler vor besondere Herausforderungen hinsichtlich der Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen. Dies gilt auch für die Rettungskräfte im Schadenfall, besonders wenn mehrere Fahrzeuge auf engem Raum in Lagern oder Fabrikhallen eingesetzt werden.

## 9.3 Rettungskräfte/ Feuerwehren

Deutschlandweit existieren bei den Feuerwehren keine einheitlichen Konzepte für das Löschen von Li-Batterie-Bränden und die optimale Einsatztaktik. Feuerwehrschulen geben Empfehlungen aus, die allerdings sehr allgemein gehalten sind (vgl. Kapitel 8.4.1) und wahrscheinlich auch nur einen Teil der Rettungskräfte erreichen. Es fehlt eine zentrale Stelle als Bindeglied zwischen Herstellern, Rettungsdiensten und Gesetzgebern, eine Art Kompetenzzentrum als zentrale Einrichtung (Treichow & Pester, 2013).

Erste Bemühungen seitens VDA (Verband der Automobilindustrie) und VDK (Verband der Internationalen KrafftFahrzeughersteller), u. a. in Zusammenarbeit mit dem ADAC und dem KBA (Krafftfahrtbundesamt) gehen in diese Richtung. Es wurde eine Task-Force "Rettung von Personen aus verunfallten Fahrzeugen" gegründet, die z. B. die standardisierten Rettungsdatenblätter eingeführt hat. Inzwischen sollen auch die Feuerwehren Zugriff auf die Datenbank der Rettungskarte und auf KBA-Informationen erhalten haben. Inwieweit diese bei Einsätzen genutzt werden, ist laut Aussagen aus Feuerwehrcreisen fraglich (Treichow & Pester, 2013).

### 9.3.1 Kompetenzzentrum

In diesem Kapitel wird auf den möglichen Aufbau und die Aufgabengebiete eines Kompetenzzentrums eingegangen. Es handelt sich hierbei um Vorschläge, die auf Grundlage der vorherigen Kapitel entstanden sind. Die Errichtung eines Kompetenzzentrums hat zum Ziel Feuerwehren und Rettungsdiensten einen deutschlandweit einheitlichen Kenntnisstand zu vermitteln. Den örtlichen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben können mit einer solchen Einrichtung die bestmögliche Unterstützung bei Schadenlagen zur Verfügung gestellt werden.

Das Kompetenzzentrum besteht im Wesentlichen aus Mitarbeitern der Rettungsdienste mit Verbindungen zu den Herstellern, ggf. können Li-Batterie-Spezialisten eingebunden sein. Es sollte als nationale Einheit aufgestellt sein, um schlagkräftig und unabhängig von ggf. länderspezifischen Eigenheiten agieren zu können. Eine spätere Erweiterung auf EU-Ebene ist, angesichts der international vertretenen Hersteller von Systemen mit Li-Batterien, anzustreben.

Die Organisationsstruktur könnte sich z. B. am Technischen Überwachungsverein (TÜV) orientieren, der neben den zahlreichen lokalen Einrichtungen über wenige zentrale „Kompetenzzentren“ mit einem breiten Themenspektrum verfügt.

Eine denkbare Aufgabe des Kompetenzzentrums bestünde aus dem Beschaffen und Auswerten relevanter Informationen, der Hersteller, aus dem Feld oder aus eigenen Quellen. Diese müssten in eine für Rettungsdienste effektiv nutzbare Form umgesetzt und zugänglich gemacht werden. Bereits heute ist der Umfang der Informationen und Veröffentlichungen so groß, dass sie unmöglich von den Rettungskräften im Hinblick auf den Einsatz ausgewertet werden können.

Das Kompetenzzentrum könnte folgende Aufgabengebiete betreuen:

#### **Datenbank**

Ein Schwerpunkt des Kompetenzzentrums läge in dem Aufbau und der Pflege einer zentralen Datenbank für das ganze Bundesgebiet, die von den Nutzern, wie z. B. den Rettungsdiensten, jederzeit abgefragt werden könnte. Die Daten müssten, wie beim Beispiel Rettungskarte, in standardisierter Form vorliegen.

Daneben könnten u. a. Hinweise für Rettungseinsätze und Löschverfahren, oder Ergebnisse aus themenbezogenen Untersuchungen abrufbar sein, die für Löscheinsätze hilfreich sein können. Material für Schulungen der Rettungskräfte könnten ebenfalls über die Datenbank zur Verfügung gestellt werden, dies wäre ein besonderer Nutzen für Rettungseinheiten, wie die Freiwilligen Feuerwehren.

## Datenaufbereitung

Das Kompetenzzentrum hielt Kontakt mit den Herstellern und aktualisierte die Daten bereits zu dem Zeitpunkt, an dem das Produkt auf den Markt kommt. Bezüglich der Rettungskarte betrifft dies beispielweise die Kfz-Industrie.

Entsprechend sind die Hersteller von Li-Batterien und Löscheinrichtungen anzusprechen, wenn es um die Brandbekämpfung in Lagerhallen und Fertigungsbetrieben geht. Aus den Informationen könnten Empfehlungen für Einsatzstrategien abgeleitet werden, ggf. gestützt durch eigene Untersuchungen.

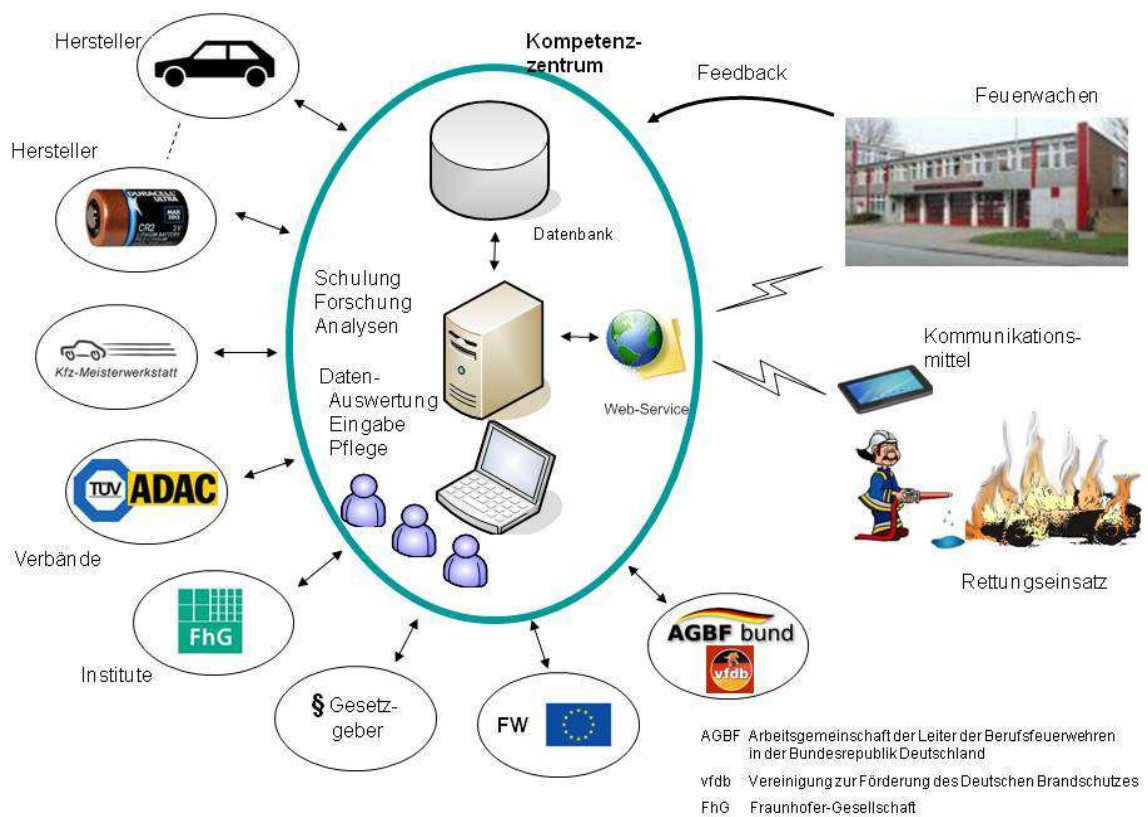


Abb. 27: Kompetenzzentrum als zentrale Koordinierungsstelle  
Eigendarstellung

Die Hersteller müssten verpflichtet werden, die entsprechenden Daten zur Verfügung zu stellen. Das betrifft nicht nur die technischen Daten, sondern auch die eigenen Testergebnisse.

Gemäß dem, aus dem Projektmanagement bekannten "Lessons, Learned", sollten die Ergebnisse aus den Einsätzen in Schadenfällen von den Rettungskräften auf einem leicht handhabbaren Weg an das Kompetenzzentrum gemeldet werden (vgl. Abb. 27). Diese Informationen könnten dort systematisch ausgewertet, verdichtet und zur Ergänzung oder der Korrektur des Informationspools genutzt werden. Die positiven und

negativen Erfahrungen der Rettungskräfte tragen damit zu einer ständigen Aktualisierung der Datenbank bei.

Die Rückmeldungen über die Einsatzfälle bildet auch die Grundlage für eine statistische Auswertung, aus der ggf. weitere Aufgabengebiete oder Aktionen abgeleitet werden können.

### **Forschung und Entwicklung**

Um die Rettungskräfte optimal unterstützen zu können, müsste das Kompetenzzentrum über eine permanent aktualisierte Fachkompetenz verfügen. Diese könnte durch eigene Untersuchungen erarbeitet werden, parallel dazu müsste aber die Zusammenarbeit mit Fachfirmen und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen genutzt werden. Auf diesem Wege können z. B. Verfahren für einen Löscheinsatz im Schadenfall oder die richtige Einsatztaktik für alle Fahrzeuge erarbeitet werden.

Damit könnte das Kompetenzzentrum eine Sachverständigenstelle aufbauen, u. a. für den vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz, insbesondere für Li-Batterien.

### **Schulung**

Neben allen zur Verfügung gestellten Informationen wäre das Training der Einsatzkräfte unabdingbar für einen effektiven Einsatz im Schadenfall. Das Kompetenzzentrum könnte, in Zusammenarbeit mit den Feuerweherschulen, einheitliche Konzepte und Schulungsunterlagen erarbeiten und zur Verfügung stellen. Daneben können Trainer ausgebildet werden, die die Mitarbeiter der lokalen Einsatzkräfte schulen. Die Wirksamkeit der Schulungsmaßnahmen könnte unter anderem mit mobilen Demonstrationseinrichtungen verstärkt werden, die unter Regie des Kompetenzzentrums entwickelt werden würden.

### **Informationsaustausch**

Um mit der Dynamik der technischen Entwicklung mithalten zu können, ist ein permanenter Informationsaustausch mit den thematisch verwandten Stellen unerlässlich. Dazu zählt u. a. der Kontakt zu Rettungskräften anderer Länder. Zu diesem Zweck könnten Fachtagungen veranstaltet werden, und die Mitarbeiter des Kompetenzzentrums an Fachtagungen der Hersteller bzw. der Industrie teilnehmen.

Nicht zu vergessen ist die Rücksprache mit Automobilclubs, um einerseits Maßnahmen für den Schadenfall abzustimmen sowie diese an die Fahrzeugführer zu kommunizieren und andererseits Erfahrungen der Clubs mit Li-Fahrzeugen zu erhalten.

## **Nachsorge**

Das Thema Entsorgung, der mit Lithium beladenen Rückstände nach erfolgtem Einsatz, ist ebenfalls von Bedeutung. Hier gilt es Regeln für die Batteriebeseitigung aufzustellen, um Folgeschäden zu vermeiden.

Ebenso sind Empfehlungen für die Begehung von Lager- oder Produktionshallen nach einem Brandereignis zu erarbeiten, in denen noch teilweise intakte Zellen vorhanden sind.

### **9.3.2 Einsatzkräfte**

Neben einem ausgereiften und vollständigen Datenmaterial sind für einen wirkungsvollen Rettungs- und Brandbekämpfungseinsatz weitere Maßnahmen erforderlich.

Es müssen geeignete Geräte und Einrichtungen für Einsatzfälle, in Verbindung mit Li-Batterien, zur Verfügung gestellt werden.

Die Einsatzkräfte sind entsprechend der neuen Gefahren durch die Li-Technologie zu schulen, wofür Trainingsanlagen zur Verfügung gestellt werden müssen. Zu den Schulungsinhalten zählen u. a. auch:

- Eigenschaften und Gefahren, hervorgerufen durch die elektrischen Komponenten, insbesondere durch die Li-Batterie
- Abfrage und Interpretation der Informationen aus der Datenbank
- Absichern der Einsatzstelle hinsichtlich der Gefährdung durch hohe Spannungen
- Rettungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der elektrischen Komponenten
- Das richtige Löschverfahren und -mittel
- Auswirkungen auf die Umwelt einschätzen und bewerten sowie Maßnahmen einleiten (Toxizität des Löschmittels)
- Elektrotechnische Grundkenntnisse
- Nachsorge
  - Gefahren bei der Begehung
  - Entsorgung der Rückstände mit Dokumentation
  - Feedback an das Kompetenzzentrum

### 9.3.3 Gesetzgeber

Der Siegeszug der Li-Batterietechnologie scheint unaufhaltsam. Neben dem hohen Leistungsbereich in der E-Mobility und Traktion ermöglichen Li-Batterien auch den netzunabhängigen bzw. kabellosen Betrieb von Geräten der mittleren Leistungsklasse, wie z. B. Rasenmäher, Elektro-Fahrräder oder Power Tools. Li-Batterien kleiner Leistung im Mobiltelefon oder in Kameras sind heute eine Selbstverständlichkeit.

Der zu erwartende, exponentielle Anstieg der im Markt befindlichen Anzahl an Li-Batterien, verbunden mit wachsendem Energieinhalt und Lithiumanteil, birgt neue Gefahrenpotentiale in sich. Zum Schutz von Personen und Anlagen sollte der Gesetzgeber dieser Entwicklung Rechnung tragen und bereits im Vorwege geeignete Regeln zur Reduzierung der Gefahren aufstellen. Dies betrifft den kompletten Lifecycle einer Li-Batterie, von der Herstellung, über den Einsatz, bis hin zur Entsorgung. Wegen der Dauer von Gesetzgebungsverfahren können auch andere Fachgremien, wie zum Beispiel der VDE, aktiv werden und entsprechende Richtlinien verfassen.

Ferner müssen die zurzeit gültigen Gesetze, Normen und Richtlinien, wie z. B. das BattG oder der Brandschutzatlas, laufend den Anforderungen der Li-Technik angepasst werden. Dies betrifft auch die existierenden Vorschriften zum Transport von lithiumbasierten Batterien oder Geräten (s. Kapitel 6.10).

Für die Kommunikationswege sind gesetzliche Mindeststandards festzulegen. Es gilt festzulegen wer, wen, wann und mit welchen Inhalten zu informieren hat.

### 9.3.4 Transportfahrzeuge

In Fertigungseinrichtungen eingesetzte Transportfahrzeuge, wie z. B. batteriebetriebene Gabelstapler, sind heute überwiegend mit Blei-Batterien ausgerüstet. Die wegen der Vorteile zu erwartende Umstellung auf Li-Technologie kann zu einer Akkumulation von sehr hohen Lithiummengen mit ggf. bisher nicht identifizierbaren Risikopotential führen. Zu erwarten sind Energieinhalte pro Batterie von 50 bis 100 kWh.

Deshalb sind vom Hersteller und Nutzer der Fahrzeuge Risikobewertungen durchzuführen, aus denen geeignete Maßnahmen zur vorbeugenden Gefahrenabwehr abgeleitet werden können. Haftungs- und versicherungstechnische Belange sind anzupassen.

Auch müssen die Bereiche der Wartung und Reparatur neu aufgestellt werden. Hierfür sind geeignete Anlagen zu schaffen, Vorgaben zu definieren und Mitarbeiter zu schulen.

## 10 Ergebnis und Diskussion

Die Entwicklung von Fahrzeugen mit batteriegespeisten elektrischen Antrieben wird durch gesellschaftliche, ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen vorangetrieben. Beschleunigt wird diese Entwicklung durch die technischen Fortschritte auf allen Gebieten der Antriebstechnik, besonders aber durch die unaufhaltsamen Fortschritte in der Weiterentwicklung der Lithium-Batterie. Diese, bei weitem noch nicht abgeschlossene Entwicklung, bildet den Katalysator für viele neue Anwendungen, beginnend mit den kleinen und mittleren Batterie-Kapazitäten für Werkzeuge, über den Bereich der E-Mobility, bis hin zu stationären Großspeichern für die Pufferung von Netzschwankungen.

In Fachkreisen wird dieser Entwicklung nur eine mäßige Dynamik beigemessen, allerdings können veränderte Randbedingungen die Marktentwicklung stark beschleunigen, wie zum Beispiel ein technologischer Durchbruch, gesetzgeberische Einflüsse oder eine deutliche Senkung der Herstellkosten. Der Akkuspezialist Enviva Systems testet Li-Ionen-Akkus mit einer Energiedichte von 400 Wh/kg, was nahezu einer Verdoppelung der heutigen Werte gleichkommt. Der Preis soll bei ca. 125 \$ liegen, das entspricht eine Reduzierung um den Faktor 4, verglichen mit den Akku-Preisen des Opel Ampera. Eine Verdreifachung der Kapazität unter Verwendung von Silizium als Elektrodenmaterial verspricht die japanische Firma Sekisui Chemical und das bei um 60% niedrigeren Preisen. Serienprodukte sollen, nach abgeschlossener Forschung und Entwicklung, 2015 verfügbar sein.

Mit wachsendem Volumen ist in der Regel auch ein Mitkopplungseffekt zu beobachten, da sich dann effiziente Großfertigungsanlagen lohnen. Als Beispiel hierfür kann die Halbleiterindustrie oder die Entwicklung der Flachbildschirme angeführt werden.

Viele Fragen der Lithium-Energiespeicher sind noch ungeklärt, z. B. die der Infrastruktur im Bereich der Elektrofahrzeuge. Es gilt ebenfalls zu klären, welche Art der Batterieladung sich durchsetzen wird. Zur Diskussion stehen hier Lademöglichkeit an öffentlichen Parkplätzen, mit stationären oder fahrzeugeigenen Ladegeräten, Wechselbatterien und ob die Fahrzeugbatterie als Puffer in das zentrale Netz eingebunden ist. Antworten auf diese und andere Fragen sind vorab auf breiter Basis zu klären und sollten nicht alleine von Interessen getrieben sein.

Sicher ist, dass die neue Batterietechnologie nicht nur alle Bereiche der Anwendung tangiert, sondern auch deren Umfeld. Dies betrifft insbesondere die Feuerwehren und Rettungskräfte, die sich auf die neue Batterie-Technologie aus brandschutztechnischer Sicht einstellen müssen.

Ausgehend von den heutigen Kenntnissen im Umgang mit Li-Batterien und den besonderen Herausforderungen dieser Technologie, wird sich ein verändertes oder neues Einsatzbild ergeben. Eine feuerwehrseitige Reaktion darauf sollte möglichst rechtzeitig erfolgen und nicht erst als Antwort auf, möglicherweise schlechte, Erfahrungen in Rettungs- und Löscheinsätzen.

In den Recherchen zu dieser Bachelorarbeit hat sich gezeigt, dass einige Feuerwehren, unter anderem die Berliner Feuerwehr, bereits frühzeitig Initiative ergriffen haben. Kooperationen mit Forschungsinstituten, Ingenieurbüros und Unfallversicherern, als auch die Erhebung und Auswertung eigener, themenspezifischer Einsatzdaten, sind beispielhaft für eine fortschrittliche Problemlösestrategie. Viele Feuerwehren arbeiten also zurzeit parallel an dem Thema „Gefahren im Umgang mit Lithium-Batterien aus brandschutztechnischer Sicht“. Die Vorschläge und Empfehlungen, die im Maßnahmenkatalog vom Verfasser festgehalten sind, können einen ressourcen- und kostensparenden Effekt auf Feuerwehren haben. Das Kompetenzzentrum zentralisiert das brandschutztechnische Wissen und hat als landesweite Einrichtung auch die Chance brandschutztechnische Interessen, in Verhandlungen mit Herstellern, Instituten und dem Gesetzgeber, durchzusetzen.

Trotz der Negativbeispiele aus verschiedenen Anwendungen, trotz der zahlreichen Warnungen vor den Gefahren und der Klassifizierung als Gefahrgut wird sich die neue Batterietechnologie durchsetzen. Die Verbreitung und die Entwicklung der Li-Technologie werden weiter fortschreiten. Mit wachsendem Energieinhalt der Batterien steigt auch das Gefahrenpotential. Die Feuerwehr muss sich jetzt dem Entwicklungsprozess anschließen um Gefahren von Mensch und Umwelt abzuwenden. Dies stellt eine neue, aber auch sehr interessante Herausforderung für die Feuerwehren dar.



## Literaturverzeichnis

- Ableiter, C. (2008). *wikipedia.de*. Abgerufen am 04. 02 2014 von <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lithium-Ionen-Accumulator.jpg>
- Accumulatorenwerke HOPPECKE Carl Zoellner & Sohn GmbH. (21. 01 2014). *hoppecke.de*. Abgerufen am 21. 01 2014 von <http://www.hoppecke.de/>
- Adam Opel AG. (2011). *Opel Ampera* . Rüsselsheim: Adam Opel AG.
- Adam Opel AG. (2011). *Rettungskarte des Opel Ampera; i.d.F. 01.07.2012*. Rüsselsheim am Main: Adam Opel AG.
- ADR. (i.d.F. vom 01.01.2013). *vom 30.09.1957*. Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße.
- Amann, N., Beck, M., Bitsche, O., Casals, P., Cebulski, B., Ehret, C., et al. (2012). Komponenten des Hybridantriebs. In K. Reif, K. E. Noreikat, & K. Borgeest, *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe* (S. 75ff). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Anwander, D. (2013). Produktion und Lagerung von Akkumulatoren. In J. Mayr, & L. Battran, *Brandschutzatlas*. Köln: FeuerTRUTZ GmbH.
- Arora, P., & Zhang, Z. (2004). *Battery Separators; Chemical Review 2004, 104*. Chemical Review.
- Associated Press. (21. 01 2013). Batterie-Misere an Bord des Dreamliners. *Spiegel Online* .
- Atkins, P. W., Bär, M., & Paula, J. d. (2006). *Physikalische Chemie*. Weinheim: Wiley-VHC.
- Autoliv B.V. & Co. KG. (2013). *pyroswitch.com*. Abgerufen am 11. 03 2014 von <http://www.pyroswitch.com/funktion.html?&L=0>
- Batteriegesetz (BattG). (i.d.F. vom 24.02.2012). *vom 25.06.2009*.
- batteryuniversity.eu GmbH. (2014). *batteryuniversity.eu*. Abgerufen am 11. 03 2014 von [http://www.batteryuniversity.eu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=169&Itemid=121](http://www.batteryuniversity.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=169&Itemid=121)
- BattGDV. (i.d.F. vom 12.09.2009). *vom 19.11.2009*.
- BattV. (i.d.F. vom 09.09.2001). *vom 02.07.2001*.

Birke, P., & Schiemann, M. (2012). *Akkumulatoren gestern, heute, morgen*. München: Herbert Utz Verlag GmbH.

Breitinger, M. (13. 12 2011). GM kämpft gegen Imageschaden an. *Zeit Online* .

Buser, M. (2012). *Lithium-Batterien; Gefahren und Schutzmaßnahmen*. Wien: Risk Experts Risiko Engineering GmbH.

Buser, M. (2013). *Lithium-Batterien; Kraftwerke im Hosentaschenformat*. Wien.

Cepheiden. (05. 04 2009). *wikipedia.de*. Abgerufen am 23. 01 2014 von

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle\\_%28CoO2-](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_%28CoO2-Carbon,_Schema%29.svg)

[Carbon,\\_Schema%29.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_%28CoO2-Carbon,_Schema%29.svg)

DGUV. (2012). *BGI/GUV-I 8686; Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen*. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV).

DGUV. (2013). *Rettungs- und Löscharbeiten an PKW mit alternativer Antriebstechnik*. Berlin: Deutsche gesetzliche Unfallversicherung e.V.

DIN EN ISO 13849-1. (2008). *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*. Berlin: Beuth.

Dorn, R., Schwartz, R., & Steurich, B. (2013). Batteriemanagementsystem. In R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 177ff). Heidelberg: Springer Vieweg.

EPTA / ZVEI / IVG. (2012). *Versand von Lithium-Ionen-Batterien (< 100 Wh) unter Anwendung der Ausnahmeregelungen des Gefahrgutrechtes; Empfehlungen für Hersteller von Elektrofahrzeugen und Gartengeräten*. Frankfurt am Mein: EPTA / ZVEI / IVG.

FAA Fire Safety Brigade. (2013). *Full Scale Battery Tests*. Federal Aviation Administration.

Freiwillige Feuerwehr Aufhausen. (2008). *Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr; Kemler-Zahl*. Aufhausen: Freiwillige Feuerwehr Aufhausen.

GCSFP. (2010). *Analysis and Comparison of Norms and Standards for the Application of Electric Vehicles and Vehicle Batteries in China and Germany/Europe*. Aachen: German Chinese Sustainable Fuel Partnership (GCSFP).

GDV. (2012). *Lithium-Batterien; GDV-Merkblatt zur Schadenverhütung*. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH; Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

- Graf, C. (2013). Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer, & e. al., *Handbuch-Lithium-Ionen-Batterien* (S. 31ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- GRS Batterien. (2013). *Sichere und ordnungsgemäße Rücknahme von Altbatterien*. Hamburg: Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien.
- Hartnig, C., & Schmidt, M. (2013). Elektrolyte und Leitsalze. In R. Korthauer, & e. al., *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 61ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Hauptmanns, U. (2013). *Prozess- und Anlagensicherheit*. Heidelberg: Springer Vieweg.
- Hensley, R., Newman, J., Rogers, M., & Shahinian, M. (2012). *Battery technology charges ahead*. Boston: McKinsey & Company.
- HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG. (2014). *hoppecke.de*. Abgerufen am 11. 03 2014 von [http://www.hoppecke.de/produkte/batterien\\_nach\\_anwendungen/flurfoerderzeuge/trak\\_r\\_power\\_lion](http://www.hoppecke.de/produkte/batterien_nach_anwendungen/flurfoerderzeuge/trak_r_power_lion)
- IATA. (2013). *Lithium-Batterie-Leitfaden; Beförderung von Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Batterien*. IATA.
- IEC-NP. (2012). *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications*. i.d.V. vom 06.07.2012: IEC-NP.
- Jacobi, W. (2001). Lithium-Batterien. In H.-A. Kiehne, *Gerätebatterien; Grundlagen und Theorie, aktueller technischer Stand und Entwicklungstendenzen* (S. 60ff). Renningen: Expert Verlag.
- Jaiser, D.-I. S. (2012. 05 2012). *kit.edu*. Abgerufen am 21. 01 2014 von [http://www.tvt.kit.edu/370\\_1258.php](http://www.tvt.kit.edu/370_1258.php)
- Joß, B., & Döringer, H. (2011). *Einsatzhinweise für Elektrofahrzeuge*. Bruchsal: Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg.
- Jossen, A., & Weydanz, W. (2006). *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Untermeitingen: Inge Reichhard Verlag.
- Kampker, A., Vallée, D., & Schnettler, A. (2013). *Elektromobilität; Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Korthauer, R. (2012). *Handbuch Elektromobilität*. Frankfurt am Main: EW Medien und Kongresse GmbH.
- Korthauer, R. (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Heidelberg: Springer-Verlag.

- KPMG AG; Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. (2014). *KPMG-Autoumfrage: Technologieführerschaft wird für Unabhängigkeit immer Wichtiger*. Berlin: KPMG AG; Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- Leuthner, S. (2013). Übersicht zu Lithium-Ion-Batterien. In R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ion-Batterie* (S. 13ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Linde, C. (2012). *Unfälle mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen*. Heidelberg: ecomed Sicherheit.
- Mähliß, J. (30. 10 2012). *elektroniknet.de*. Abgerufen am 10. 03 2014 von <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/92479/>
- Morawietz, L. (2013). *Lithium-Ionen-Technologie; Übersichtsvorschlag TU Dresden / IAM GmbH*. Hamburg: Technische Universität Dresden.
- Mörk-Mörkenstein, R., Sternad, M., Schuster, F., Amann, R., & Springer, H. (2012). *Elektro- und Hybridfahrzeuge; Erkennen von Gefahrenquellen; Sicherer Umgang in Gefahrensituationen*. Salzburg: Landesfeuerwehrverband- Salzburg.
- Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG . (kein Datum). *auto-motor-und-sport.de*. Abgerufen am 21. 01 2014 von [auto-motor-und-sport.de](http://auto-motor-und-sport.de)
- National Transportation Safety Board. (01 2014). *ntsb.gov*. Abgerufen am 11. 03 2014 von <http://www.ntsb.gov/news/2013/130114.html>
- Naunin, D., Bader, C., Biermann, J.-W., Brachmann, T., Heinemann, D., et al. (2007). *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Renningen: Expert Verlag.
- NetMediaEurope Deutschland GmbH. (2014). *zdnnet.de*. Abgerufen am 11. 03 2014 von <http://www.zdnnet.de/wp-content/uploads/2012/09/iphone5-gehaeuse-3.jpg>
- Pettinger, K.-H. (2013). Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen. In R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterie* (S. 221ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Rossmann, M. (19. 01 2014). *elektronik-kurs.net*. Abgerufen am 19. 01 2014 von <http://elektronik-kurs.net/>
- Schnabel, P. (19. 01 2014). *Elektronik-Kompendium.de*. Abgerufen am 19. 01 2014 von [Elektronik-Kompendium.de: http://www.elektronik-kompendium.de/](http://www.elektronik-kompendium.de/)
- Stefan-XP. (27. 05 2006). *wikimedia.de*. Abgerufen am 11. 03 2014 von <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Verbrennungsdreieck.svg>
- Tadiran Batteries GmbH. (2013). *Technische Notiz; Transportvorschriften für Lithiummetallbatterien*. Büdingen: Tadiran Batteries GmbH.

- Tesla Motors. (2014). *teslamotors.com*. Abgerufen am 10. 03 2014 von <http://www.teslamotors.com/models/design>
- Thielmann, D. A., Sauer, A., Isenmann, P.-D. D., Wietschel, P. D., & Plötz, D. P. (2012). *Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Tkotz, K., Bastian, P., Bumiller, H., Burgmayer, M., et al. (2002). *Fachkunde Elektrotechnik*. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co.
- Trechow, P., & Pester, W. (02. 12 2013). Feuerwehr fehlen Erfahrungen mit Elektroautos . *ingenieur.de* .
- Traub, L. F., & Rüetschi, P. (1998). *Batterien und Akkumulatoren*. Springer.
- Umweltbundesamt. (2012). *Batterien und Akkus*. Dessau: Umweltbundesamt.
- VARTA Microbattery GmbH. (2014). *varta-microbattery.com*. Abgerufen am 05. 02 2014 von [http://www.varta-microbattery.com/de/produkte/batterien-zellen-und-konfigurationen/technologie/search-results.html?searchfield=type\\_designation&searchvalue=CR2032](http://www.varta-microbattery.com/de/produkte/batterien-zellen-und-konfigurationen/technologie/search-results.html?searchfield=type_designation&searchvalue=CR2032)
- Vereinte Nationen. (2009). *Empfehlungen für die Beförderung gefährlicher Güter; Handbuch über Prüfungen und Kriterien*. New York und Genf: Vereinte Nationen.
- Wagner Group GmbH. (2010). *Brandversuche Lithium-Ionen-Zellen*. Langenhagen: Wagner Group GmbH.
- Wallentowitz, H., & Reif, K. (2006). *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag.
- Weber, C. J., & Roth, M. (2013). Separatoren. In R. Korthauer, & e. al., *Handbuch Lithium-Ionen-Batterie* (S. 79ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Wetzel, D. (29. 04 2013). Schwerins Ökostrom-Akku, größer als eine Turnhalle. *Die Welt* .
- Woehle, T., Denninger, W., Schmidt, D., & Kern, R. (2009). *Patentnr. EP2461872 B1*.
- Woodbank Communications Ltd. (2005). *mpoweruk.com*. Abgerufen am 10. 03 2014 von [http://www.mpoweruk.com/battery\\_manufacturing.htm](http://www.mpoweruk.com/battery_manufacturing.htm)
- Wurm, C., Öttinger, O., Wittkämper, S., Zauter, R., & Vuorilehto, K. (2013). Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterie* (S. 45ff). Heidelberg: Springer Vieweg.
- yenra.com. (31. 08 2004). Abgerufen am 21. 01 2014 von [yenra.com](http://www.yenra.com/): <http://www.yenra.com/>

## Glossar

- Akkumulator Sekundärzelle, umgangssprachlich auch Batterie genannt
- Anode Positiver Pol einer Batterie
- Batterie Elektrochemischer Energiespeicher
- Dendriten Spitze, nadelförmige Auswüchse von Li-Kristallen
- Elektrode Elektronenleitendes Bauteil
- Elektrolyt Stromleitende, wässrige Lösung
- Energiedichte Nutzbarer elektrischer Energiegehalt (Wh/kg; Wh/l)
- Gerätebatterie Gekapselte Batterien, die nach dem BattG in der Hand gehalten werden können
- Halon 1301 Als Feuerlöschmittel zumeist in Flugzeugen eingesetzt
- Hybridantrieb Kombination von verschiedenen Antriebstechniken
- Inertgaslöschanlage Löschanlage mit reaktionsträgen Gasen
- Ion Geladenes Teilchen
- Kapazität Entnehmbare Ladungsmenge
- Kathode Negativer Pol einer Batterie
- Klemmspannung Spannung zwischen zwei Anschlüssen einer Batterie
- Leerlaufspannung Gemessene Spannung ohne Verbraucher
- Parallelschaltung Schaltkreis mit nebeneinander liegenden Bauteilen
- Primärzelle Batterie
- Reihenschaltung Schaltkreis mit hintereinander liegenden Bauteilen
- Ruhespannung Spannung zwischen den Polen im unbelasteten Zustand
- Sekundärzelle Akkumulator
- Separator Ionenleitende, semipermeable Trennmembran
- Speicherkapazität Theoretisch entnehmbare Ladungsmenge (Ah/kg; Ah/l)
- Tertiärzelle Brennstoffzelle
- Thermal Runaway Selbstverstärkende Hitzeentwicklung
- Tiefenentladung Unterschreitung Kapazität einer Sekundärzelle
- Traktionsbatterie Akkumulator der Antriebstechnik von Elektrofahrzeugen
- Überladung Ladung über die Kapazität einer Sekundärzelle

## Abkürzungsverzeichnis

- ADN Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen
- ADR Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (französisch: Accord européen relatif au transport international des Dangereuses par Route)
- BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
- BattG Batteriegesetz
- BattGDV Verordnung zur Durchführung des Batteriegesetzes
- BattV Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren
- BMS Batteriemanagementsystem
- CO<sub>2</sub> Kohlenstoffdioxid
- DGR Dangerous Goods Regulation
- DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
- EUCAR European Council for Automotive R&D
- F-500 Multifunktionslöschmittelzusatz
- FAA Federal Aviation Administration
- GCSFP German Chinese Sustainable Fuel Partnership
- GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
- GGVSEB Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
- H<sub>2</sub> Wasserstoff
- HV Hochvolt
- IATA International Air Transport Association
- ICAO International Civil Aviation Organization
- ICAO-TI ICAO-Technical Instructions
- IEC International Electrotechnical Commission
- IMDG-Code International Maritime Dangerous Goods Code
- Kfz Kraftfahrzeug

---

- Li	Lithium
- Li <sup>+</sup>	Lithium-Ion
- LiMnO <sub>2</sub>	Lithium-Mangandioxid
- NaNiCl	Natrium-Nickel-Chlorid
- NiCd	Nickel-Cadmium
- NiMH	Nickel-Metallhydrid
- NiMH	Nickel-Metallhydrid
- ÖBFV	Österreichischer Feuerwehrverband
- PE	Polyethylen
- Pkw	Personenkraftwagen
- PP	Polypropylen
- PTC-Schalter	Positive Temperature Coefficient Resistance Switch
- RID	Regelung zur internationalen Beförderung gefährlicher Güter im Schienenverkehr
- RSEB	GGVSEB-Durchführungsverordnung
- UBA	Umweltbundesamt
- UN	United Nations
- VdS	VdS Schadenverhütung GmbH
- VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities
- ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.



## **Erklärung an Eides Statt**

Ich, Robert Leon Ouvrier, versichere an Eides Statt, dass ich die vorgelegte Arbeit,

### **Gefahren im Umgang mit Lithium-Batterien aus brandschutztechnischer Sicht,**

Ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle deutlich gemacht.

Hamburg, den 17. März 2014