



Brandschutztechnische Betrachtungen bei Lithium-Ionen-Batterien u. Lithium-Metall-Batterien

Forschungsstelle für Brandschutztechnik am KIT - Engler-Bunte-Institut, Lehrstuhl für Verbrennungstechnik (EBI-VBT), www.ffb.kit.edu



■ **Lithium-Ionen-Batterien (Akkumulatoren, Sekundärbatterien)**

- Antriebsbatterien in elektromotorbetriebenen Fahrzeugen (HV-Systeme)
- Pedelecs, E-Bikes, E-Roller, E-Surfboards, LED-Leuchtschuhe
- Starterbatterien
- „schnurlose“ Elektrowerkzeuge und Gartengeräte
- Mobiltelefone, Smartphones, Kameras, Camcorder, Spielzeuge
- Sicherheitsstromversorgungen, Notfallsysteme
- Medizinische Geräte, E-Rollatoren, E-Mobile, E-Rollstühle
- Solarspeicher (privater und kommerzieller Bereich)

■ **Lithium-Metall-Batterien (Primärbatterien)**

- netzunabhängige Versorgung von elektronischen Geräten, LED-Leuchtschuhe
- in der Sicherheitstechnik z.B. bei Langzeit-Rauchwarnmeldern
- in elektronischen Energiezählern und Heizungskostenverteilern
- als Pufferbatterien für elektrische Geräte wie z.B. Kameras, Uhren, speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)
- in Airbags, Motorsteuerungen, Bordcomputern

Energiedichte von Energiespeichern u. Primärenergieträgern

■ Blei-Akku:	ca. 35 Wh/kg
■ NiMH-Akku:	ca. 70 - 100 Wh/kg
■ Lithium-Ionen-Batterie:	ca. 100 – 200 Wh/kg
■ Benzin / Diesel:	ca. 12.000 Wh/kg
■ Wasserstoff:	ca. 33.300 Wh/kg

Eine Lithium-Ionen-Batterie kann im Versagensfall
das 6 – 10 fache
der elektrisch gespeicherten Energie in Form von thermischer Energie
freisetzen.

Energieinhalt von Lithium-Ionen-Batterien (Auswahl)

■ Camcorder:	7,4V DC;	0,02 kWh (20 Wh)
■ Elektrowerkzeuge:	36 V DC;	0,18 kWh (180 Wh)
■ Pedelecs, E-Bikes:	36 V DC;	0,5 kWh (500 Wh)
■ Elektrofahrzeuge:		
■ Smart EQ		17,6 kWh
■ BMW i3	360 V DC;	37,9 kWh
■ Tesla S	375 V DC;	100 kWh
■ Audi e-tron / Porsche Taycan	400 / 800 V DC	95 kWh / 100 kWh
■ VW ID.3		45 kWh - 77 kWh
■ Mercedes-Benz EQC	400 V DC	80 kWh
■ Mercedes-Benz Citaro E-Cell (E-Bus)	660 V DC	243 kWh - 330 kWh
■ MAN Lion's City E (E-Bus)		480 kWh - 640 kWh
■ Solaris Urbino 18 electric (E-Bus)	660 V DC	90 kWh - 240 kWh
■ BYD (E-Bus)		380 kWh - 547 kWh
■ Freightliner eCascadia (LKW)		550 kWh
■ Schiffe:		
■ Außen- und Innenbordmotoren	26 V - 48 V – 144 V – 360 V	ca. 3 kWh bis 30 kWh
■ Elektro-Frachtschiff (2.000 Tonnen) (Guangzhou, China)		2.400 kWh
■ Stationäre Speicher für private PV-Anlagen:		bis ca. 24 kWh
■ Kommerzielle stationäre Batteriespeicher		
■ WEMAG AG (Schwerin): Stromnetzstabilisierung		15 MWh
■ Eneco / Mitsubishi Corporation (Jardelund): Batterie-Speicherkraftwerk		50 MWh
■ Tesla (Hornsedale, Australien): Windenergiespeicheranlage		129 MWh

Lithium-Ionen-Zellen - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Negative Elektrode (Anode) *)

■ Lithium-Interkalationsverbindung ($\text{Li}_{1,0}\text{C}_6$):

- Lithium-Ionen werden reversibel in eine feste Wirtsmatrix (Graphit) eingelagert
- Dendritische Lithiumabscheidungen möglich (=> Kurzschluss, therm. Zersetzung)
- In fester Form toxikologisch unbedenklich, als Feinstaub bedenklich

■ Lithium-Titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

- höhere Sicherheit gegenüber z.B. Überladung, Tiefentladung, mechan. Beschädigung, Kurzschluss; einsetzbar auch bei tieferen Temperaturen im Minusbereich
- geringere Energiedichte
- leicht reizend für die Atemwege

■ Kupfer als Stromableiter:

- Abscheidung von Kupfer (Dendritbildung) und Kurzschluss möglich

■ Separator

■ Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP):

- Schmelztemp: ca. 130°C – 135°C bzw. ca. 160°C – 165°C

■ Shutdown-Separator: dreilagig

- Mittellage aus PE und 2 Außenlagen aus PP

■ Vliesstoff Komposite-Separatoren:

- Polymervlies mit gesinterter Keramikbeschichtung, Temperaturbeständigkeit bis 700°C

Lithium-Ionen-Zellen - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Elektrolyt

- Organische Substanzen: brennbar, überwiegend schwach wassergef., (WGK 1), reizend, Dämpfe schwerer als Luft
 - Ethylencarbonat (EC, $C_3H_4O_3$)
 - Propylencarbonat (PC, $C_4H_6O_3$)
 - Dimethylcarbonat (DMC, $C_3H_6O_3$)
 - Diethylcarbonat (DEC, $C_5H_{10}O_3$)
 - Ethylmethylcarbonat (EMC, $C_4H_8O_3$)
- Leitsalz im Elektrolyt:
 - Lithiumhexafluorophosphat ($LiPF_6$)
 - überwiegende Verwendung, verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden, stark wassergefährdend, Bildung von Fluorwasserstoff (HF) bei Kontakt mit Wasser
 - Angaben für Elektrolyte variieren zwischen WGK 2 und WGK 3, teilweise findet sich die Angabe „kann Krebs erregen“
 - Lithiumbis(oxalato)borat (LiBOB):
 - fluorfrei, etwas geringere Leitfähigkeit als $LiPF_6$, Toxizität und Wassergefährdung: keine Angabe
 - Vinylencarbonat (VC): SEI filmbildendes Additiv, ätzend, giftig, wassergef. (WGK 2)

Wassergefährdungsklassen

- **Wassergefährdende Stoffe** werden entsprechend ihrer Gefährlichkeit in eine der folgenden Wassergefährdungsklassen eingestuft:
 - WGK 1: schwach wassergefährdend
 - WGK 2: wassergefährdend (neue Bezeichnung: „deutlich wassergefährdend“)
 - WGK 3: stark wassergefährdend
- **Nicht wassergefährdend sind Gemische, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:**
 - Der Gehalt an Komponenten der WGK 1 ist geringer als 3 % Massenanteil.
 - Der Gehalt an Komponenten der WGK 2 und 3 ist geringer als 0,2 % Massenanteil.
 - Es sind keine Komponenten der WGK 3, krebserzeugende Komponenten oder Komponenten unbekannter Identität gezielt zugesetzt.
 - Dem Gemisch sind keine Dispergatoren oder Emulgatoren gezielt zugesetzt.
 - Das Gemisch schwimmt in oberirdischen Gewässern nicht auf.

Quelle:

- Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe - VwVwS), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie Umweltbundesamt, Berlin, 1999
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) vom 18. April 2017, Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 22, Bonn, 21. April 2017

Lithium-Ionen-Zellen - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Positive Elektrode (Kathode)

- Lithiumcobaltdioxid (LiCoO_2):
 - bei hohen Temperaturen und Überlastung starke exotherme Reaktion unter Sauerstoffabgabe aufgrund der Zersetzung
 - reizend, gesundheitsgefährdend, möglicherweise krebserregend
- Lithiumeisenphosphat (LFP, LiFePO_4):
 - thermodynamisch sehr stabil, beim Erhitzen keine Sauerstoffabgabe im Gegensatz zu Lithiumcobaltdioxid, schlechte elektrische und ionische Leitfähigkeit, ungiftig
- Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2)$)
- Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (LiNiCoAlO_2)
 - Ni, Co: Gesundheitsgefahr, Verdacht auf kanzerogenes Potential
- Manganspinell (LiMn_2O_4):
 - keine Zersetzungsreaktionen bei höheren Spannungen und hohen Temperaturen,
 - geringe Toxizität
- Aluminium als Stromableiter: hohe thermische Stabilität

Lithium-Ionen-Zellen - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

Kühlsysteme bei größeren Batterien - Beispiele

Wasser-Glykol-Gemisch

- Glykol (Ethylenglykol^{*)}): gesundheitsschädlich, reizend, brennbarer Stoff (schwer entzündbar), schwach wassergefährdend (WGK 1)

3MTMNOVECTM High-Tech Flüssigkeit ^{**)}

- „Material brennt nicht“^{***)}
- „chronisch wassergefährdend, Kategorie 4“, „Einatmen: keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit zu erwarten“, „keine signifikante Augenreizung zu erwarten“, „Hautkontakt, Verschlucken: kann gesundheitsschädlich sein“^{***)}
- *„Wenn das Produkt zu hohen Temperaturen ausgesetzt wird - durch absichtlich falsche Handhabung oder Fehler in den Gerätschaften - können giftige Zersetzungsprodukte entstehen z.B.“^{***)}*
- *„Fluorwasserstoff (MAK-Wert: 3 ml/m³; 2 mg/m³, MAK und BAT-Werte Liste 1997, DFG)“^{***)}*
- *„Perfluorisobutylene (PFIB) (Grenzwert: 0,01 ml/m³ = 3M-intern!)“^{***)}*
 - *GESTIS^{*)}: „PFIB ist ein farbloses, auch in hochtoxischen Konzentrationen geruchloses Gas (fehlende Warnwirkung!), das 50-mal toxischer als Blausäure und 10-mal toxischer als Phosgen ist. Bereits Spuren als Verunreinigungen in fluorhaltigen Monomeren haben zu schwersten Intoxikationen, auch mit tödlichem Ausgang, geführt.“ „Für den Atemschutz möglichst frei tragbares Isoliergerät („Pressluftatmer“) nutzen, weil Masken mit A-Kohlefilter keine ausreichende Sicherheit bieten.“*

Quelle:

- ^{*)} GESTIS-Stoffdatenbank - Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin, 2019, <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>,
- ^{**)} 3MTM NovecTM 7200 High-Tech Flüssigkeit Sicherheitsdatenblatt, 16/06/2017, https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/unternehmen-de/sds-suche/

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.

Lithium-Metall-Batterien - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Negative Elektrode (Anode)

■ Lithium (Metall)

- leichtentzündlich, Lithium verbrennt zu Lithiumoxid
- Umsetzung mit Wasser zu Lithiumhydroxid (ätzend, giftig) und Wasserstoff (Knallgasbildung)
- Umsetzung mit Stickstoff zu Lithiumnitrid
 - leicht entzündlich, ätzend, exotherme Reaktion, erfolgt langsam bereits bei Zimmertemperatur
- wassergefährdend (WGK 2)

■ Separator

- Polyethylen (PE)
 - Schmelztemp: ca. 130°C – 135°C

Lithium-Metall-Batterien - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Elektrolyt

- Organische Substanzen: brennbar, reizend, schwach wassergefährdend (WGK 1),
 - Ethylencarbonat (EC, $C_3H_4O_3$): fest
 - Propylencarbonat (PC, $C_4H_6O_3$): flüssig, Dämpfe schwerer als Luft
 - Ethylenglycoldimethylether (DME, $C_4H_{10}O_2$): leichtentzündlich, giftig,
- Thionylchlorid ($SOCl_2$)
 - Dämpfe schwerer als Luft
 - nicht brennbar, Oxidationsmittel
 - zersetzt sich in Wasser mit heftiger Reaktion
 - giftig
- Leitsalz im Elektrolyt:
 - Lithiumperchlorat ($LiClO_4$)
 - starkes Oxidationsmittel, brandfördernd (Sauerstoff abgebende Verbindung)
 - gesundheitsschädlich
 - Aluminiumchlorid ($AlCl_3$)
 - ätzend

Lithium-Metall-Batterien - Zusammensetzung und toxikologische Eigenschaften (Auswahl)

■ Positive Elektrode (Kathode)

- Mangandioxid
 - brandfördernd, oxidierender Stoff
 - gesundheitsschädlich
- Graphit
 - brennbar

Zukunft: Festkörperbatterien (Akkus) (Auswahl)

Eigenschaften

- Energiedichte bis zu 400 Wh/kg
- Deutlich schneller aufladbar als bisherige Lithium-Ionen-Batterien
- Deutlich reduziertes Gewicht bei gleichem Energieinhalt und Volumen
- Hohe Toleranz gegenüber Überladung und thermischer Beanspruchung
- Bisher zum Teil geringere Zyklenstabilität als Li-Ionen-Batterien

Zusammensetzung (Beispiele)

- **Anode:** bei Lithium-Schwefel-Batterie^{*)}: in der Regel Lithium-Metall^{*)} als Folie oder Beschichtung
 - Alternative: Silicium-Legierungs-Anoden^{*)} oder Magnesium^{****)} statt metall. Lithium
 - Bei Vollphosphat-Batterie^{**)}: $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$

^{*)} Quelle: Fraunhofer-Allianz Batterien, 2018
<https://www.batterien.fraunhofer.de/>

Kathode:

- Schwefel^{*)} in der Regel als Komposit mit Kohlenstoff
- Vollphosphat^{**)}: $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$
- **Festkörperelektrolyte** (anorganisch):
 - Mineralien wie
 - Perowskite z.B. $(\text{Li}, \text{La})\text{TiO}_3$ ^{***)}
 - Granate z.B. $\text{Li}_5\text{La}_3\text{M}^{\text{V}}_2\text{O}_{12}$ bzw. $\text{Li}_7\text{La}_3\text{M}^{\text{IV}}_2\text{O}_{12}$ (für vierwertige bzw. fünfwertige Übergangsmetalle $\text{M}^{\text{IV}} = \text{Zr}$ bzw. $\text{M}^{\text{V}} = \text{Ta}$)^{***)}
 - Gläser und Glaskeramiken auf Basis von Lithiumnitriden, -sulfiden, -boraten, und -phosphaten, z.B. bei Vollphosphat $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ ^{**)}
 - **Separator:** bei Festkörperbatterien nicht erforderlich

^{**)} Quelle: Shicheng Yu, et al., Monolithic All-Phosphate Solid-State Lithium-Ion Battery with Improved Interfacial Compatibility, Jülich, Aachen, 2018, <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2018/2018-08-20-die-mischung-machts--schnellladefaeheige-festkoerperbatterie.html>

^{***)} Quelle: KIT - Institut für Angewandte Materialien - Energiespeichersysteme (IAM-ESS), Eggenstein-Leopoldshafen 2018, http://www.iam.kit.edu/ess/730_891.php

^{****)} Quelle: KIT - Institute of Nanotechnology, Eggenstein-Leopoldshafen und Helmholtz Institute- HIU, Ulm, 2019, <http://www.int.kit.edu/1286.php>, <http://www.hiu-batteries.de/batteriefororschungszentrum-in-deutschland/>

Markteintritt: voraussichtlich ab 2025 ? 2030 ?

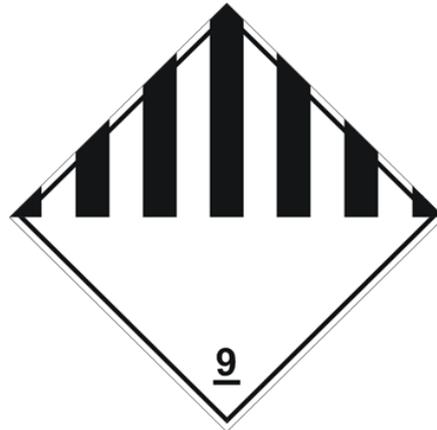
- Audi BP18 e-tron (Designstudie, vorgestellt: 24.8.18): 95 kWh, 800 V DC, volle Aufladung: ca. 15 min

Transport von **Lithium-Ionen-Batterien** und **Lithium-Metall-Batterien**

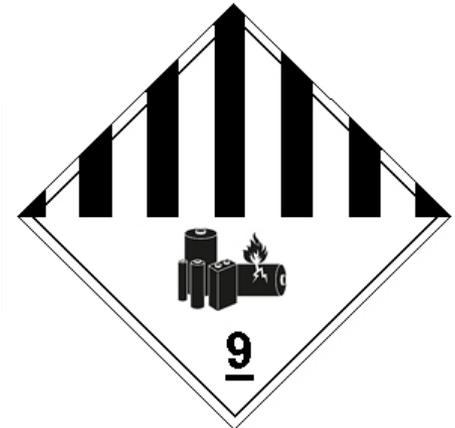
Nach den **UN Transportvorschriften für gefährliche Güter** [UN – Model Regulations /2019/] (=> Orange Book) werden seit dem 1.1.2009

- **alle Lithium-Ionen-Zellen/-Batterien** und **Lithium-Metall-Batterien** als **Gefahrgut der Klasse 9** (Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände) eingestuft.

Kennzeichnung
bisher
(Übergangsregelung
bis 31.12.2018)



Kennzeichnung ab
1.1.2017
(Pflicht
ab 1.1.2019)



- **Voraussetzung für die Zulassung zum Transport:** Nachweis der Tests nach [UN - Tests and Criteria /2019/], Teil III, Abschnitt 38.3. bzw. die deutsche Übersetzung der BAM]

Tests für Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Batterien nach UN Prüfhandbuch Teil III

Abschnitt 38.3.

[UN - Tests and Criteria], [BAM-Handbuch über Prüfungen und Kriterien]

- Test 1: Höhensimulation (Lufttransport unter Unterdruckbedingungen)
- Test 2: Thermische Prüfung (schnelle und extreme Temperaturänderungen)
- Test 3: Schwingung (Schwingungen während der Beförderung)
- Test 4: Schlag (Schläge während der Beförderung)
- Test 5: Äußerer Kurzschluss
- Test 6: Aufprall / Quetschung (mechanische Beschädigung)
- Test 7: Überladung
- Test 8: Erzwungene Entladung (Tiefentladung)

Gefährdungsklassen (Hazard level) nach EUCAR (European Council for Automotive R & D)

Gefährdungs- klasse	Beschreibung	Klassifizierungskriterien und Effekte	Zulässige Gefährdung
0	kein Effekt	kein Effekt, keine Funktionsbeeinträchtigung	
1	Passive Sicherungs- vorrichtung löst aus	kein Defekt, kein Leck, kein Abblasen, kein Feuer, keine Flammen, kein Bersten, keine Explosion, keine exothermen Reaktionen, kein Thermal Runaway. Zelle noch einsetzbar, Sicherungsrichtungen müssen repariert werden	
2	Defekt, Beschädigung	wie Gefährdungsklasse 1 aber die Zelle ist irreversibel geschädigt und muss ausgetauscht werden	
3	Leck, Masseverlust < 50 %	kein Abblasen, kein Feuer, keine Flammen, kein Bersten, keine Explosion, <50 % Gewichtsverlust der Elektrolytlösung (Lösungsmittel + Leitsalz)	Beim Abblasen dürfen keine gesundheitsschädlichen oder giftigen Stoffe austreten
4	Abblasen, Masseverlust >50 %	kein Feuer, keine Flammen, keine Explosion, >50 % Gewichtsverlust der Elektrolytlösung (Lösungsmittel + Leitsalz)	Beim Abblasen dürfen keine gesundheitsschädlichen oder giftigen Stoffe austreten.
5	Feuer oder Flammen	kein Bersten, keine Explosion (z.B. keine umherfliegende Teile)	Beim Abblasen und Verbrennen dürfen keine gesundheitsschädlichen oder giftigen Stoffe austreten oder entstehen.
6	Bersten	keine Explosion, aber umherfliegende Teile der aktiven Elektrodenmassen	Beim Abblasen, Verbrennen und Bersten dürfen keine gesundheitsschädlichen oder giftigen Stoffe austreten oder entstehen.
7	Explosion	Explosion (z.B. Zertrümmerung der Zelle)	Beim Abblasen, Verbrennen, Bersten und Explodieren dürfen keine gesundheitsschädlichen oder giftigen Stoffe austreten oder entstehen

Klassifizierung von lithiumhaltigen Batterien

UN 3480	Lithium-Ionen-Batterien (incl. Lithium-Ionen-Polymer-Batterien)
UN 3481	Lithium-Ionen-Batterien (incl. Lithium-Ionen-Polymer-Batterien) in Ausrüstungen eingebaut oder mit Ausrüstungen verpackt
UN 3090	Lithium Metall Batterien (incl. Batterien aus Lithiumlegierung)
UN 3091	Lithium Metall Batterien (incl. Batterien aus Lithiumlegierung) in Ausrüstungen eingebaut oder mit Ausrüstungen verpackt
UN 3166	Fahrzeuge mit Antrieb durch entzündbares Gas oder entzündbare Flüssigkeit oder Brennstoffzellenfahrzeug (incl. Hybrid-Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien)
UN 3171	Batteriebetriebene Fahrzeuge oder batteriebetriebene Geräte z.B. gilt auch für E- Bike mit eingebautem Akku gilt aber nicht für E-Bike mit zusätzlich in einem Karton beigefügten Akku => dann gilt UN 3481 - nicht freigestellt nach ADR

Fahrzeuge nach den UN Vorschriften 3166 und 3171 fallen unter Gefahrgut der Klasse 9 unterliegen beim Abtransport nach einem Unfall jedoch nicht den Vorschriften des ADR für die Straße.

Quelle: Recommendations on the Transport of Dangerous Goods - Model Regulations, Volume I, II, Twenty-first revised edition, United Nations, New York, Geneva, 2019, https://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev21/21files_e.html

Quelle: ADR 2021: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, United Nations, Genf, 2020, <https://unece.org/transportdangerous-goods/adr-2021-files>

Verkehrsträgerspezifische Regelwerke für den Transport gefährlicher Güter

Verkehrsträger	Organisation / Übereinkommen	Regelwerk
Straßenverkehr	UN Economic Commission for Europe (UNECE)	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR)
Schienenverkehr	Intergovernmental Organization for International Carriage by Rail (OTIF)	Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)
Luftverkehr	International Civil Aviation Organisation (ICAO) (Internationale Zivilluftfahrt-Organisation)	ICAO Technical Instructions (TI)
	International Air Transport Organisation (IATA) (Internationale Flugtransport Vereinigung)	IATA Dangerous Good Regulations (DGR) (Pendant der IATA zu ICAO TI)
Seeverkehr	International Maritime Organization (IMO)	International Maritime Dangerous Goods (IMDG)
Binnenschifffahrt	UN Economic Commission for Europe (UNECE)	Accord européen relative au transport international des marchandises Dangereuses par voices de Navigation interieures (ADN)

Sammlung, Verpackung und Transport von Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien nach ADR

-1

Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter GGVSEB

- auf der Straße,
- mit Eisenbahnen und
- auf Binnengewässern

Im § 1 Abs. 3 wird die Verbindung zu dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter „**ADR**“ hergestellt.

Sammlung, Verpackung und Transport von Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien nach ADR

-2

Alle an der Beförderung Beteiligten haben Vorkehrungen zu treffen, um Schadensfälle zu verhindern oder deren Umfang so gering wie möglich zu halten.

- Auftraggeber des Absenders
- Absender
- Verpacker
- Verlader
- Befüller
- Beförderer
- Entlader
- Empfänger

Sammlung, Verpackung und Transport von Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien nach ADR

-3

Sondervorschriften und Verpackungsanweisungen z.B. für

- kleine Batterien ≤ 100 Wh (pro Batterie)
- Batterien > 100 Wh (pro Batterie)
- Prototypen und kleine Produktionsserien
- unbeschädigte Batterien zur Entsorgung bzw. Recycling
- beschädigte oder defekte Batterien
 - nicht kritisch (voraussichtlich keine Gefahr während Transport)
 - kritisch (voraussichtlich Gefahr während Transport)
 - Bisher muss nach **Sondervorschrift SV376** für **kritische beschädigte oder defekte Lithium-Ionen-Zellen oder -Batterien und Lithium-Metall-Zellen oder -Batterien**, die nicht mehr dem nach den anwendbaren Vorschriften des Handbuchs Prüfungen und Kriterien geprüften Typ entsprechen, bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) **für jeden einzelnen Transport eine Einzelfallgenehmigung eingeholt werden.**

VDA- Leitfaden: Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen (Auszug)

„**Ein Unfall ist als schwer einzustufen**, sofern eine **deutliche Deformation der Fahrzeugstruktur erkennbar** ist, die über die äußere Beschädigung von Blech-, Karosserie oder Anbauteilen hinausgeht.“

„**10. Abschleppen, Bergen, Transportieren, Pannenhilfe und Verwahrung**“

„Unter Berücksichtigung vorheriger Maßnahmen (siehe 10.2) und dem Beschädigungsgrad hat der **Bergeunternehmer die Verkehrssicherheit des Transportes sicherzustellen**.

Eine **mögliche Gefährdung** durch beschädigte Hochvolt-Komponenten (**z.B. Stromschlag oder Brandrisiko durch Energiespeicher**) ist zu beachten.“

Quelle: Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin 2020, https://www.vda.de/dam/vda/Medien/DE/Themen/Sicherheit-und-Standards/Retten-und-Bergen/Unfallhilfe-und-Bergen/Unfallhilfe_Bergen_FAQ_dt_082020.pdf

Sammlung von gebrauchten, nicht beschädigten Lithium-Ionen-Batterien

Beispiel



Sammelbox der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS)

- für gebrauchte, nicht beschädigte Lithium-Ionen-Batterien (UN 3480) und Lithium-Metall-Batterien (UN 3090)
 - Material: Wellpappe
 - Beschriftung: „Bitte nur entladene Batterien einwerfen und bei Lithiumbatterien die Pole abkleben.“

Transport von beschädigten Batterien

(Verpackungsgruppe I: hohe Gefahr) und
Prüfstandsbehälter (nicht für Transport) - Beispiel 1



LionGuard storage box: hier Typ 280 *)

- für lithiumhaltige Batterien UN 3480 und UN 3490
- Doppelwandig verzinkte Metallwände und Deckel mit PyroBubbles® (Hohlglassgranulat)
- Nutzraum (L x B x H): 1130 x 894 x 598 mm
- Tragfähigkeit: 400 kg



Prüfstandsbehälter LionGuard test bench 4500

- maßgeschneidert für lithiumhaltige Batterien UN 3480 und UN 3490
- mit Füllkissen mit PyroBubbles® (Hohlglassgranulat) und Überdruckventilen

Transport von beschädigten Batterien

(Verpackungsgruppe I: hohe Gefahr) - Beispiel 2



Behälter TBK200 **)

- VG I Verpackung für UN 3480 geeignet zum Transport beschädigter Batterien,
- Filter- und Isolationssystem als zusätzliches Schutzsystem,
- Nutzraum (L x B x H): 1220 x 670 x 300 mm,
- Nutzlast: 280 kg

Weitere Maßnahmen:

- Vermiculit: Mineral, nicht brennbar zum Ausfüllen des Zwischenraumes zwischen Batterie und Umverpackung,
- Trockeneis (festes Kohlendioxid): auf Kunststoffplane zwischen Batterie und Deckel zur Kühlung.

Batterieprüf- und Lagerräume - Beispiele



Lithium-Ionen-Batterie-Prüfraum^{*)}
mit Feuerwiderstand REI 90 / F90 bis
REI 120 / F120 von innen und außen



Lithium-Ionen-Batterie-Lagerraum^{*)}
mit Feuerwiderstand REI 90 / F90 bis
REI 120 / F120 von innen und außen



Lagerung eines Crashtest-Fahrzeuges^{*)}
inkl. Lithium-Ionen Energiespeichern

Entladung von Lithium-Ionen-Batterien - 1

- **Entladen der Batterie über mehrere Tage in einem Wasser-/Salz-bad**
 - in chemikalienbeständigen Auffangwannen aus PE,
 - Verwendung von Leitungswasser,
 - Ggf. Zugabe von Kochsalz (NaCl) oder Natriumsulfat (Na_2SO_4),
 - Nicht in geschlossenen Räumen ohne entsprechende Lüftungsmaßnahmen wegen möglicher Wasserstoffreaktion mit Luft (Knallgasexplosion) aufgrund von Elektrolysereaktionen,
 - H_2 : untere Expl.grenze: 4,0 Vol.-%, obere Expl.grenze: 77 Vol.-%
 - Nur sehr bedingt möglich bei einer im Fahrzeug eingebauten Batterie oder hermetisch dichten Modulen.
 - **Feuerwehr:** Unter Umständen **Transport und Lagerung von Elektrofahrzeugen in Mulden, die mit Wasser geflutet werden können.**



Brand eines zu einem Elektroauto umgerüsteten Smart am 24.11.2017^{*)}

- Löschmaßnahmen: 3,5 Std.
- Mulde ca. 1 Woche gebunden

^{*)} Quelle: Feuerwehr Reutlingen, 2017, <https://feuerwehr.reutlingen.de/de/Aktuell/Eins%C3%A4tze/Meldung?view=publish&item=article&id=10666> sowie Schweizerische Feuerwehr-Zeitung 118 swisfire.ch 10/2018, S. 22 - 25

■ Entladen der Batterie durch ohmschen Lastwiderstand

- Nur bei noch intakten und zugänglichen Batterien, Batteriemodulen und Anschlusssteckern möglich,
- Batteriemanagementsystem (BMS) muss Entladung erlauben,
- Dauer der Entladung über mehrere Stunden (in Abhängigkeit vom Energieinhalt der Batterie),
- Lastwiderstand kann sehr heiß werden.

■ Entladen der Batterie durch elektronische Lasten

- Laststrom in einem definierten Bereich elektronisch regelbar,
- Nur bei noch intakten und zugänglichen Batterien, Batteriemodulen und Anschlusssteckern möglich,
- Batteriemanagementsystem (BMS) muss Entladung erlauben,
- Dauer der Entladung ggf. über mehrere Stunden (in Abhängigkeit vom Energieinhalt der Batterie) bei gegenwärtig verfügbaren handelsüblichen elektronischen Lasten,
 - Die Geräte sind üblicherweise über Lüfter luftgekühlt.
- Bei einer zu schnellen Entladung besteht ggf. die Gefahr, dass die Batterie überhitzen kann und unsicher wird.

■ Einsatz von Wasser ist zur Kühlung und Brandbekämpfung

durch Wasserlöschanlagen (z.B. Sprinkleranlagen, Sprühwasserlöschanlagen) oder durch Feuerwehreinsatzkräfte unter Beachtung bestimmter Randbedingungen

geeignet:

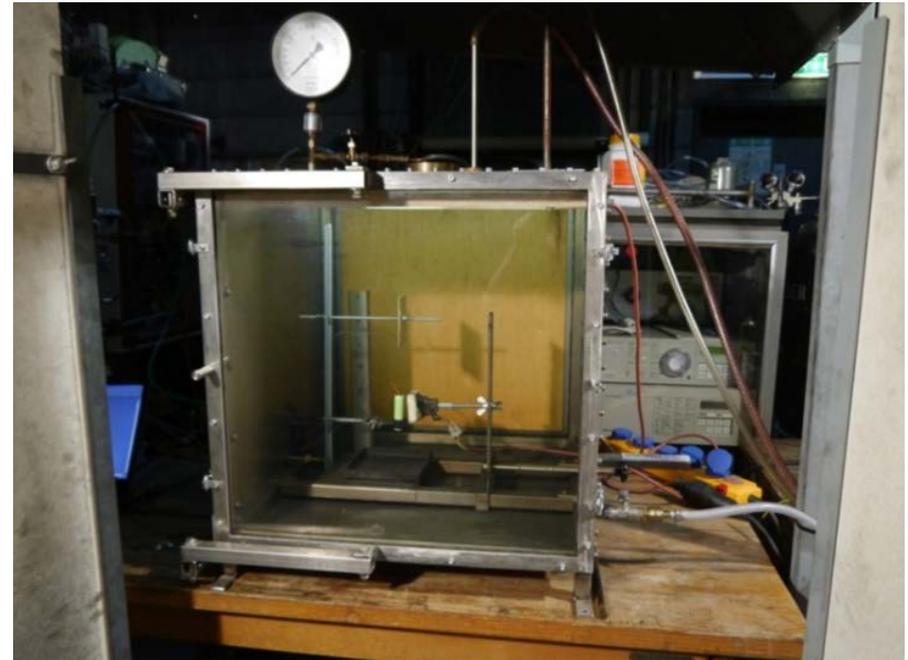
- Mindestabstände beim Löschen z.B. mit Strahlrohr gemäß DIN VDE 0132 ^{*)},
- **ausreichend große (!!!) Wassermenge**,
- mögliche Bildung von Wasserstoff bzw. Knallgas,
- mögliche Bildung von Störlichtbögen (interne als auch externe Kurzschlüsse)
- Thermal Runaway (Thermisches Durchgehen) insbesondere von großen Batterien kann nur sehr bedingt gestoppt werden,
- Eine **direkte Kühlung eingebauter Batterien** z.B. in einem Fahrzeug ist **schwer bzw. kaum möglich**.
 - => **Erhöhung des Wasserbedarfs** bzw. **Zeitbedarfs** für die Brandbekämpfung.
 - **Problematisch auch:** Wenn Außenhülle einer Batterie trotz internen Durchgehens intakt bleibt.
- Der Einsatz **geeigneter Additive und Netzmittel** kann in **Abhängigkeit von der Konzentration bzw. dem Ausmaß der Schaumbildung** helfen, den Wasserbedarf zu reduzieren und den Löscherfolg zu beschleunigen.

■ Einsatz von Löschgasen:

- **Nur sehr geringe Kühlwirkung**,
- Thermal Runaway kann nicht gestoppt werden,
- Ggf. Verhinderung der Entzündung benachbarter Brandlast durch Inertisierung bzw. Sauerstoffreduktion mit Stickstoff oder Argon.

Versuche mit Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Metall-Batterien

Brand- und Rauchverhalten **ohne** und **mit** reduzierter
Sauerstoffatmosphäre (Stickstoff bzw. Argon)



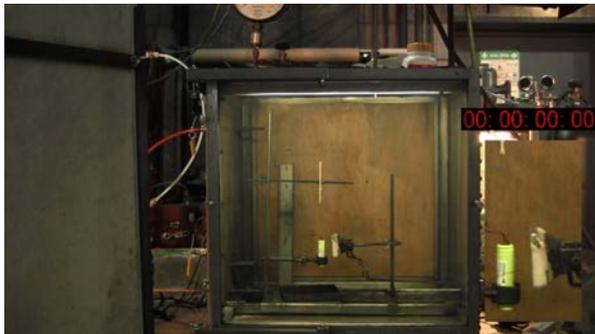
Versuchsaufbau

Versuch mit **Lithium-Ionen-Batterie**

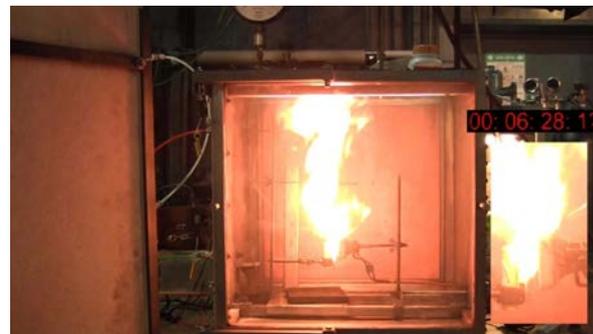
Zylindrische Zelle: Typ ICR-18650

Versuchsbedingungen

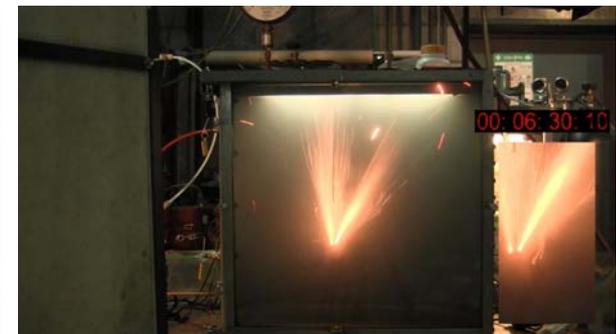
- Thermische Belastung: Aufheizung der Batterie mit Keramikstrahler (6 * 6 cm), Oberflächentemperatur: ca. 860 °C, Abstand: 1 cm
- **hier:** Brand- und Rauchausbreitung in **normaler Luftatmosphäre**



Zeit: 0
Einschalten des Wärme-
strahlers

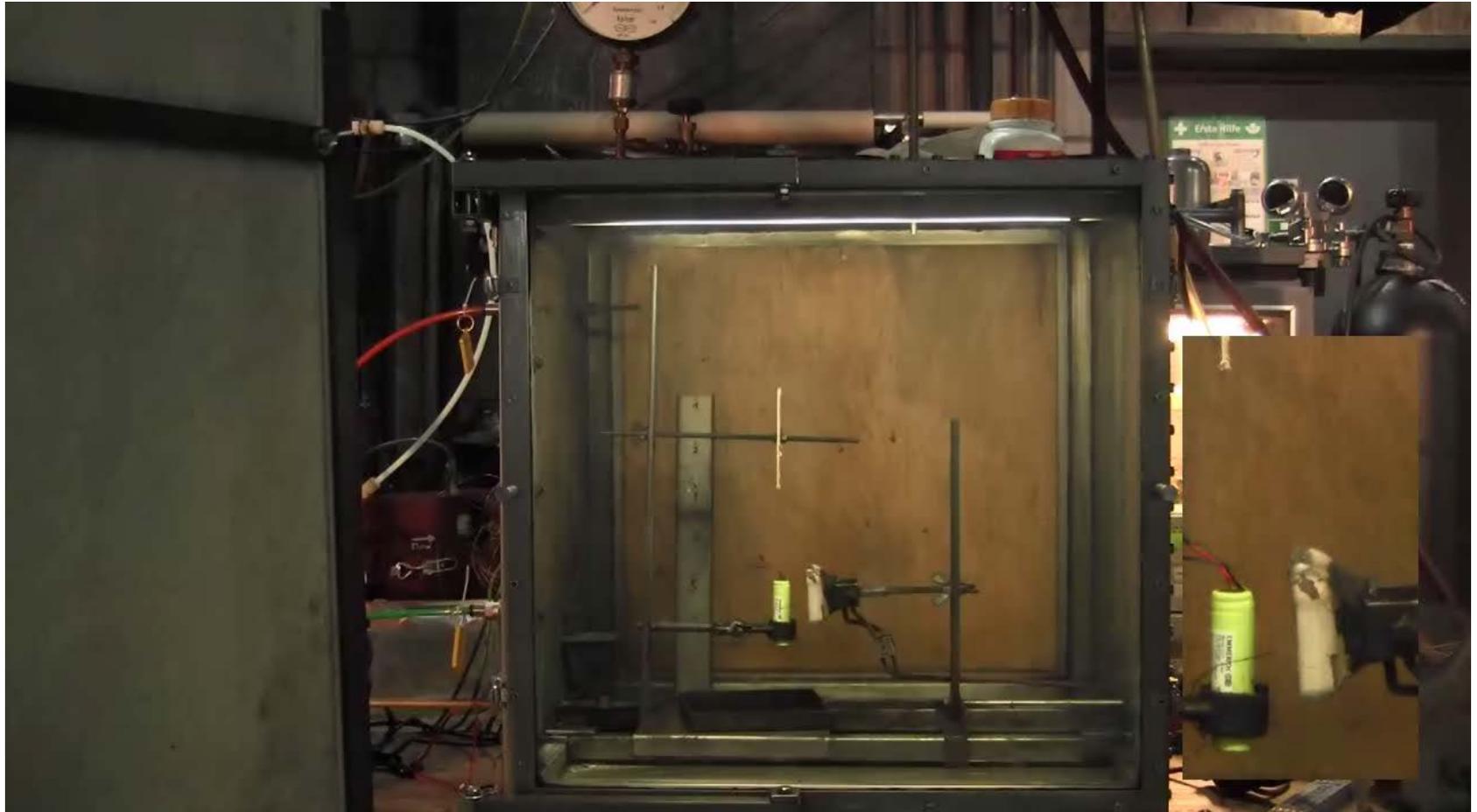


Zeit: 6 min 28 s
Thermisches Durchgehen
(Thermal Runaway) der
Lithium-Ionen-Batterie und
Entzündung eines darüber
aufgehängten Pappkartons
(=> Zündung benachbarter
Brandlast)



Zeit: 6 min 30 s
Thermisches Durchgehen
der Batterie –
fortgeschrittenes Stadium

Versuch: normale Luftatmosphäre Lithium-Ionen-Batterie ICR-18650



Video

Versuch mit **Lithium-Metall-Batterie**

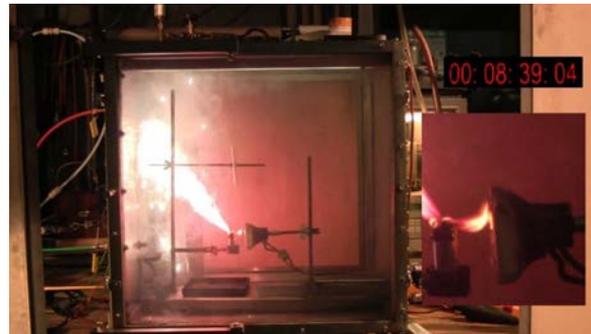
Lithium Fotobatterie Typ: CR17345 (CR-123A)

Versuchsbedingungen

- Thermische Belastung: Aufheizung der Batterie mit Keramikstrahler (6 * 6 cm), Oberflächentemperatur: ca. 860 °C, Abstand: 1 cm
- **hier:** Brand- und Rauchausbreitung in **normaler Luftatmosphäre**



Zeit: 0
Einschalten des Wärme-
strahlers

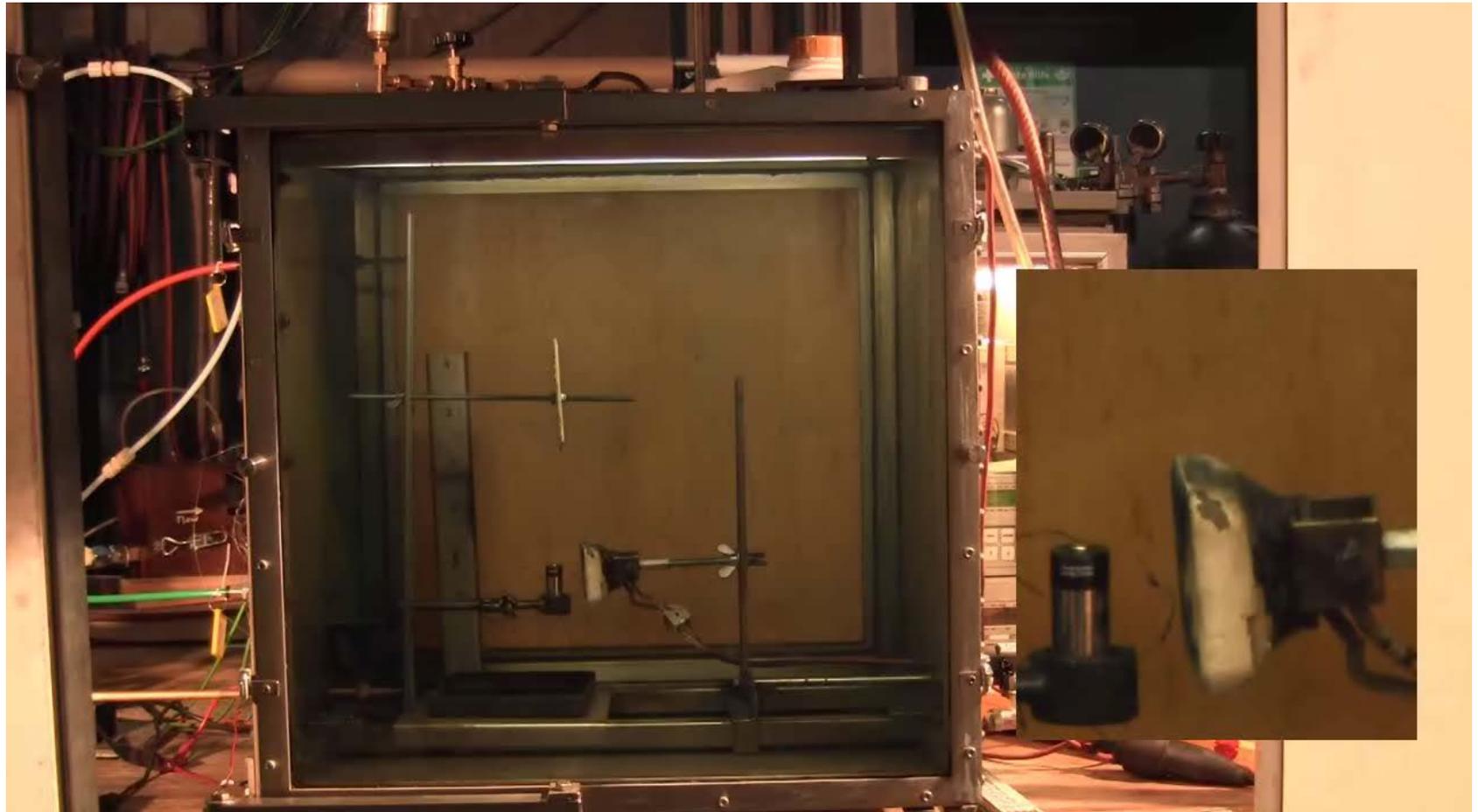


Zeit: 8 min 39 s
Thermisches Durchgehen
(Thermal Runaway) der
Lithium-Metall-Batterie
**Flammenbrand des
Elektrolyten und zusätzlich
Metallbrand**



Zeit: 8 min 49 s
Entzündung eines darüber
aufgehängten Pappkartons
(=> Zündung benachbarter
Brandlast)

Versuch: normale Luftatmosphäre Lithium-Metall-Batterie CR17345 (CR-123A)



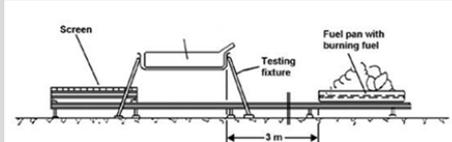
Video

Versuchsergebnisse mit Sauerstoffreduktion - 1

- **Thermisches Durchgehen** konnte **nicht gestoppt** werden,
- **Heftige Reaktion** und **starke Verrauchung** des Versuchsraumes bei allen Versuchen ähnlich stark und unabhängig von der Sauerstoffkonzentration,
- **Normale Luftatmosphäre: Entzündung** des Wellpappkartons,
- **O₂-Konz. ≤ 14 Vol.-%: keine Entzündung** des Wellpappkartons,
- Raum während des Versagens bereits inertisiert: sicherheitsrelevanter zeitlicher Vorteil,
- Im Gegensatz zu Wasserlöschanlagen ist bei Gaslöschanlagen bzw. Sauerstoffreduzierungsanlagen eine **Raumdichtigkeit erforderlich**,
- Mit Inertgasen werden Brandfolgeschäden durch das Löschmittel vermieden.

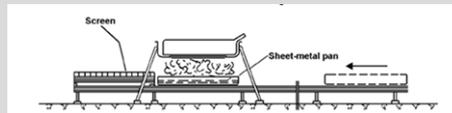
- Bei den hier durchgeführten **Versuchen mit Einzelzellen** konnte **kein wesentlicher Unterschied beim Einsatz von Argon statt Stickstoff** bei den Lithium-Metall-Batterien im Hinblick auf die **exotherme Reaktion von Stickstoff mit dem metallischen Lithium** festgestellt werden.
 - Aufgrund dieser möglichen exothermen Reaktion wäre es allerdings sinnvoll, in **Versuchen im Realmaßstab den Einsatz von Argon statt Stickstoff** mit einer **größeren Menge an Primärbatterien** wie z.B. in einem Lager näher zu untersuchen.
- **Erste Einschätzung: geeignete anlagentechnische Maßnahme** zur Verhinderung der Brandausbreitung über einen Flammenbrand bei lithiumhaltigen Batterien,
- **Versuche mit ausschließlich einzelnen Zellen:** gegenwärtig keine Aussagen z.B. zum gleichzeitigen Durchgehen mehrerer Zellen sowie zur dichtgepackten Lagerung in unterschiedlichen Lagerbereichen und bei unterschiedlichen Lagerarten möglich.

Prüfung der Feuerbeständigkeit von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien nach ECE R 100



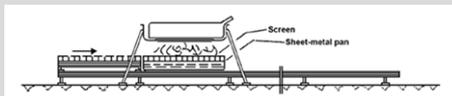
Phase A: Vorwärmen

- Der Kraftstoff (Benzin) ist in der Brennwanne zu entzünden; dabei muss sich diese in einem Abstand von mindestens 3 m zu dem zu prüfenden wiederaufladbaren Batterie befinden.
- Nach einer Vorbrennzeit von 60 s ist die Wanne unter die Batterie zu stellen (Windgeschwindigkeit < 2,5 km/h).



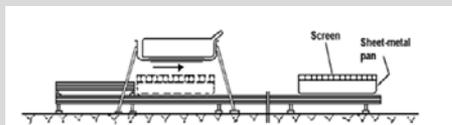
Phase B: Direkte Beflammung

- Die Batterie ist 70 s lang den Flammen des frei brennenden Kraftstoffs auszusetzen (Bewegung der Batterie oder der Brennwanne).



Phase C: Indirekte Beflammung

- Unmittelbar nach Abschluss der Phase B ist der Feuerschirm aus gelochten Schamottesteinen zwischen die brennende Wanne und die Batterie zu schieben.
- Die Batterie ist diesen reduzierten Flammen weitere 60 Sekunden lang auszusetzen.
- alternativ: statt Phase C Verlängerung der Phase B um 60 s.



Phase D: Beendigung der Prüfung

- Die brennende, mit dem Feuerschirm bedeckte Wanne ist wieder in ihre ursprüngliche Lage (Phase A) zu bringen.
- Brennt am Ende der Prüfung die Batterie, dann ist das Feuer nicht zu löschen.
- Beobachtungsdauer: mindestens 3 Std.



Lithium-Ionen-Batterie über dem Benzin-Poolfire in Phase B: Direkte Beflammung (Batterie aus Geheimhaltungsgründen unkenntlich gemacht)

Quelle: ECE Regulation No. 100, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, Revision 2, Annex 8E, Fire resistance, United Nations, Genf 2013, <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs81-100.html>

Brandrückstände eines Kurzschlussversuches einer Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie - 1^{*)}

Chemische Analyse im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung für die Tätigkeiten in der Brandversuchshalle der FFB

Die Rückstände wurden neben anderen Substanzen untersucht auf:

- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Phosgen
- Fluorid
- Flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOCs)
- Dioxine
- Furane

Messtechnik:

- Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS),
- Prüfröhrchen,
- Metallscreening
- Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP),
- Atomabsorptionsspektrometrie (AAS),
- pH- und Leitfähigkeitsmessungen

Die Analyseergebnisse sind nur für den verwendeten Batterie- bzw. Zelltyp unter den durchgeführten Versuchsbedingungen gültig. Bei anderen stofflichen Zusammensetzungen von Batterien und Versuchsbedingungen ist ein abweichendes Analyseergebnis zu erwarten.

Brandrückstände eines Kurzschlussversuches einer Lithium-Ionen-Fahrzeuggatterie - 2^{*)}

Substanz	Messwert mg / kg Probe	Bemerkungen (Gefahrstoffkennzeichnung, Wassergefährdung)
1. Naphthalin	4,63	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, Verdacht auf kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
2. Acenaphthylen	0,36	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, bzgl. Wassergefährdung bisher keine Einstufung. Eindringen in Untergrund und Gewässer sollte aber auf jeden Fall verhindert werden.
3. Acenaphthen	0,85	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, umweltgefährlich, deutlich wassergefährdend (WGK 2)
4. Fluoren	2,88	umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
5. Phenanthren	2,75	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
6. Anthracen	0,46	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, umweltgefährlich, deutlich wassergefährdend (WGK 2)
7. Fluoranthren	0,83	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
8. Pyren	0,77	umweltgefährlich, deutlich wassergefährdend (WGK 2)
9. Benzo(a)anthracen	0,54	kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
10. Chrysen	2,57	kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
11. Benzo(b)fluoranthren	1,51	kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
12. Benzo(k)fluoranthren		
13. Benzo(a)pyren	0,37	kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
14. Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,34	kanzerogen, keine Angabe zur Wassergefährdung
15. Dibenz(a,h)anthracen	0,13	kanzerogen, umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
16. Benzo(ghi)perylen	0,35	umweltgefährlich, stark wassergefährdend (WGK 3)
Summe PAK-EPA (16)	19,34	

**EPA
(Environmental
Protection
Agency, USA)**

**PAK:
16 Substanzen:
„Priority
Pollutants“**

Brandrückstände eines Kurzschlussversuches einer Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie - 3^{*)}

Substanz	Messwert mg / kg Trockenmasse	Bemerkungen
Aluminium	78600	-
Calcium	3100	schwach wassergefährdend (WGK 1)
Cobalt	80600	akute und chronische Gesundheitsgefahren, Verdacht auf kanzerogenes Potential, stark wassergefährdend (WGK 3)
Kupfer	42300	stark wassergefährdend (WGK 3)
Eisen, gesamt	363	-
Lithium	17200	akute oder chronische Gesundheitsgefahren, ätzend, schwach wassergefährdend (WGK 1)
Mangan	72400	längerfristig hohe Dosen von Mn-Staub verursacht Entzündungen der oberen Atemwege und schwere Bronchitis
Natrium	400	akute und chronische Gesundheitsgefahren, ätzend, schwach wassergefährdend (WGK 1)
Nickel	80700	akute und chronische Gesundheits-gefahren, Verdacht auf kanzerogenes Potential, deutlich wassergefährdend (WGK 2)
Phosphor	14400	
Zink	453	stark wassergefährdend (WGK 3)

Brandrückstände eines Kurzschlussversuches einer Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie - 4^{*)}

Substanz	Messwert		Bemerkungen
Fluorid, gelöst	157	mg/l	Der Fluoridwert von 157mg/l lässt bei entsprechenden sauren pH-Werten die Bildung von Fluorwasserstoff**) (extrem hohes akutes Gefährdungspotential, ätzend, deutlich wassergefährdend (WGK 2)) vermuten.
Dioxine und Furane	nicht nachgewiesen	ng/kg Tr	
Phosgen	nicht nachgewiesen-	-	Nachweisgrenze: 0,05 ppm

Bewertung des beauftragten akkreditierten chemischen Labors:

Die Brandrückstände sind inhomogen in dem Reaktionsraum verteilt.

- Es kann nicht garantiert werden, dass die Probe repräsentativ ist obwohl von verschiedenen Stellen Material entnommen und durchmischt wurde.
- Die analysierten Parameter schließen nicht aus, dass es weitere Substanzen in den Brandrückständen geben kann.

****)** Fluorwasserstoff (gasförmig) wurde mit FTIR-Spektroskopie in Versuchen mit Lithium-Ionen-Batterien, Typ: ICR-18650 nachgewiesen (siehe KIT-FFB For. Ber. Nr. 192)

- Das **thermische Durchgehen bei Lithium-Ionen-Batterien** wird durch zu **hohe Zelltemperaturen** ausgelöst, die auf **folgende Ursachen** zurück-geführt werden können:
 - starke äußere Erwärmung (z.B. Feuer),
 - niedrige Temperaturen im Minusbereich über längere Zeit mit direkt anschließendem Laden,
 - äußerer Kurzschluss,
 - innerer Kurzschluss durch Zellfehler oder Crash,
 - Überladung der Zelle (max. zulässige Ladespannung üblicherweise 4,20 V),
 - Tiefentladung der Zelle (Unterschreiten der Entladeschlussspannung: ca. 2,5 – 3,0 V)
- Die **Brandgefahr** ist während der **Ladephase am größten**.
- Das **Brandpotential** hängt stark vom **Ladezustand** ab.
 - ungeladene => halb geladene => vollgeladene Zelle
(siehe Videos: <https://www.ifs-ev.org/schadenverhuetzung/feuerschaeden/lithium-akkus/>)
- Die **meisten Lithium-Ionen-Zellen sind nach Literaturlauswertungen nicht für Betriebs- und Lagertemperaturen im Minusbereich und über + 60°C ausgelegt**.
 - Optimale Betriebstemperatur: +20°C bis +40°C (max. Temp.ber.: ca. +1°C bis +55°C)
 - LTO-Zellen mit Lithium-Titanat-Anode: max. Temp.bereich: ca. -30°C bis +60°C
 - Im Automobilbereich kommen auch Lithium-Ionen-Zellen mit einer zulässigen Betriebstemperatur von +85°C zum Einsatz.

- Im Falle des Versagens von Lithium-Ionen-Batterien entstehen je nach Zusammensetzung der Batterien neben der Bildung von
 - **Fluorwasserstoff** und Phosphorpentafluorid bzw. Phosphorsäure
 - weitere giftige und kanzerogene Stoffe z.B. **polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**
- Weiterhin je nach Zusammensetzung der Batterien Freisetzung von
 - **Schwermetalle in Form von Nickel- und Cobaltoxiden**
 - **Graphit**
 - mögliche Gefährdung durch Entzündung, insbesondere bei großen Batterien in Räumen sowie,
 - mögliche Beschädigung von Geräten durch Kurzschlüsse

- Beim Versagen von Lithium-Ionen-Batterien freiwerdende **schwere Elektrolytdämpfe** können sich vor der Entzündung im Bodenbereich sammeln und quasi einen zündfähigen See bilden, der **zunächst nicht z.B. von optischen Rauchmeldern an der Decke detektiert** wird.
- Beim Versagen von Lithium-Ionen-Batterien sei hierdurch insbesondere auch auf die mögliche **Gefährdung von schlafenden Personen** hingewiesen.

- Für Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte sind die personenschutz- und umweltrelevanten Erfordernisse von großer Bedeutung:
 - **persönliche Schutzausrüstung**
 - Gefährdung durch Brand
 - chemische Stoffe
 - elektrische Gefährdung
 - Wechselspannungen über 50 V, Gleichspannungen über 120 V sind lebensgefährlich
 - Stromstärken von 50 mA können tödlich sein, wenn der Strom über das Herz fließt
 - Störlichtbögen (durch interne als auch externe Kurzschlüsse)
 - **Brandbekämpfung**
 - **Löschmittelrückhaltung**
 - z.B. Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) und Elektrolytbestandteile: teilweise stark wassergefährdend und krebserregend

Für die Einsatzkräfte ist nicht nur das

- Versagen von lithiumhaltigen Batterien bei der Verwendung in Geräten oder Fahrzeugen mit **fest eingebauten Batterien**

von Interesse, sondern auch die Gefahr von Bränden im Zusammenhang mit

- **größeren Ansammlungen beim Transport** (Straße, Schiene, Flugzeug, Schiff),
- **Lagerung** in größeren Mengen in Gebäuden,
- **Brände** durch versagende Batterien **in Wohngebäuden, Hotels** etc.,
- In **geschlossenen Räumen** ist bei **Öffnung einer Tür** eine mögliche Gefährdung durch **Zündung von brennbaren Elektrolytdämpfen, Rauchgasdurchzündung oder Backdraft** zu berücksichtigen.

- Gefährdungen und Versagen von Batterien aufgrund der **Überschwemmung von Kellerräumen**, z.B. bei Photovoltaik-Speichern und Elektrofahrrädern,
- **Photovoltaik-Speicher in Dachgeschossen**: Mögliche Überhitzung aufgrund höherer Temperaturen,
- Bei der **Brandbekämpfung mit Wasser** und **Überschwemmung** ist eine **mögliche Wasserstoff- bzw. Knallgasbildung** zu berücksichtigen,
- Eine weitere mögliche **Brandgefahr** ergibt sich beim **Sammeln**, bei der **Lagerung** und beim **Recycling von gebrauchten oder beschädigten Batterien**, teilweise noch im geladenen Zustand und mit nicht isolierten Anschlusspolen.

- Bei **Produktionsbereichen** sowie bei der **Lagerung von Batterien** in größeren Mengen und ggf. hoher Leistung, oder von vielen kleinen Batterien in vielen Verpackungseinheiten ist **bisher kein allgemeines Schutzkonzept** in der Literatur öffentlich **zugänglich**.
- Im Einzelfall müssen **ganzheitliche Brandschutzkonzepte** unter Berücksichtigung z.B. folgender Maßnahmen erstellt werden:
 - **Separierung und Mengenbegrenzung** bei der Lagerung durch **Brandabschnittsbildung** mit feuerbeständigen Bauteilen,
 - Lagerung in **feuerbeständigen Schränken** (ggf. Feuerwiderstand von innen und außen),
 - Maßnahmen zur **Begrenzung der Kontamination** mit toxischen und korrosiven Stoffen,
 - Einsatz von **Löschanlagen oder Sauerstoffreduzierungsanlagen**.

Gefährdungsbeurteilung - 8

- Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens von lithiumhaltigen Batterien hängt stark von der **Qualität der Zellen und der Sicherheitssysteme** ab.
- Von batteriebetriebenen Geräten und Fahrzeugen von Herstellern, die **hohe Qualitäts- und Sicherheitsansprüche** gewährleisten, geht beim Betrieb und bei Ladevorgängen sicherlich nur eine **sehr geringe Gefahr** aus.
- Als **problematisch** müssen aber batteriebetriebene Geräte und Fahrzeuge angesehen werden, die über **kein ausreichendes Sicherheitssystem** verfügen.
- Diese sind eher in Produkten im **Niedrigpreissegment** oder bei **nicht fachgerecht zusammengebauten Batteriesystemen** zu finden.

Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen (Nr. 175)

- Aufbau, Eigenschaften und Einsatzgebiete
- Sicherheitstechnische u. toxikologische Betrachtungen
- Gefahrgutrechtliche Bestimmungen - Transport
- Lagerung
- Sammlung und Recycling
- Branddetektion und Brandbekämpfung
- Versuche an der FFB

Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien (Nr. 192)

- Branddetektion und Brandbekämpfung
- Löschanlagen
- Sauerstoffreduktion mit Inertgasen

im Auftrag der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, KIT - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (Nr. 175: 2015, Nr. 192: 2017)

<http://www.ffb.kit.edu/392.php>

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**