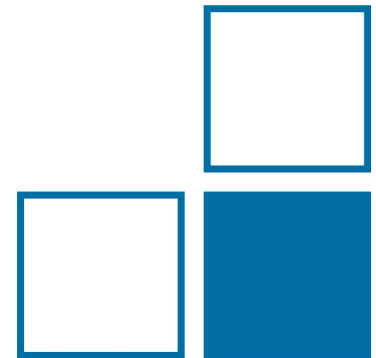


Grundlagen der Batteriesicherheit

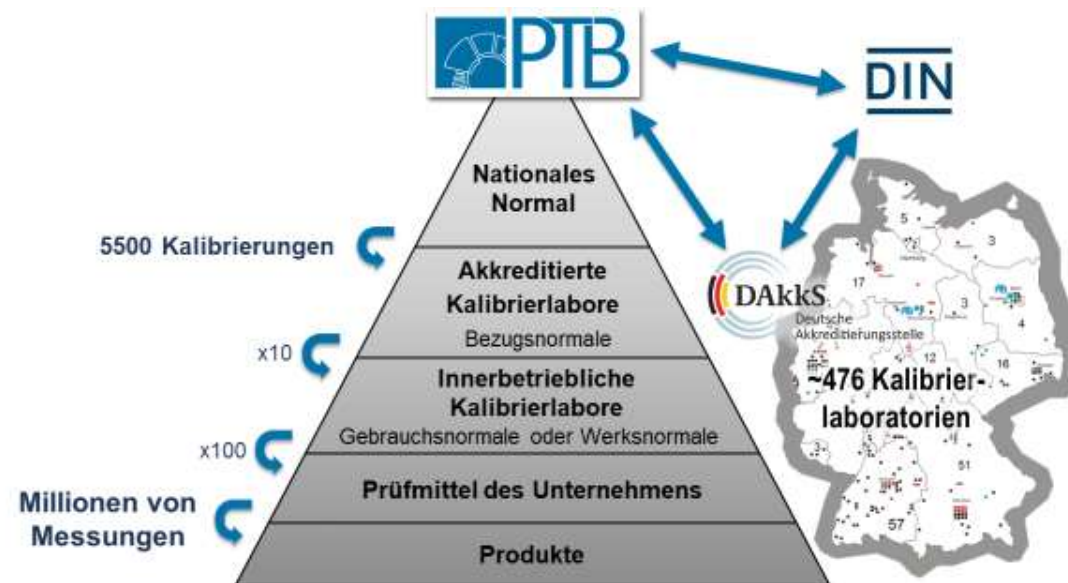
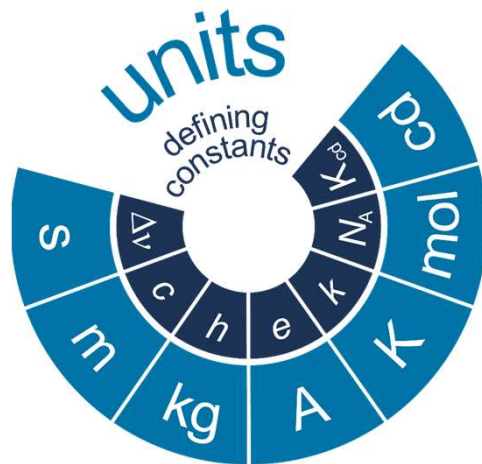
Stefan Essmann, AG 3.55 „Regenerative
Energieträger und –speicher“



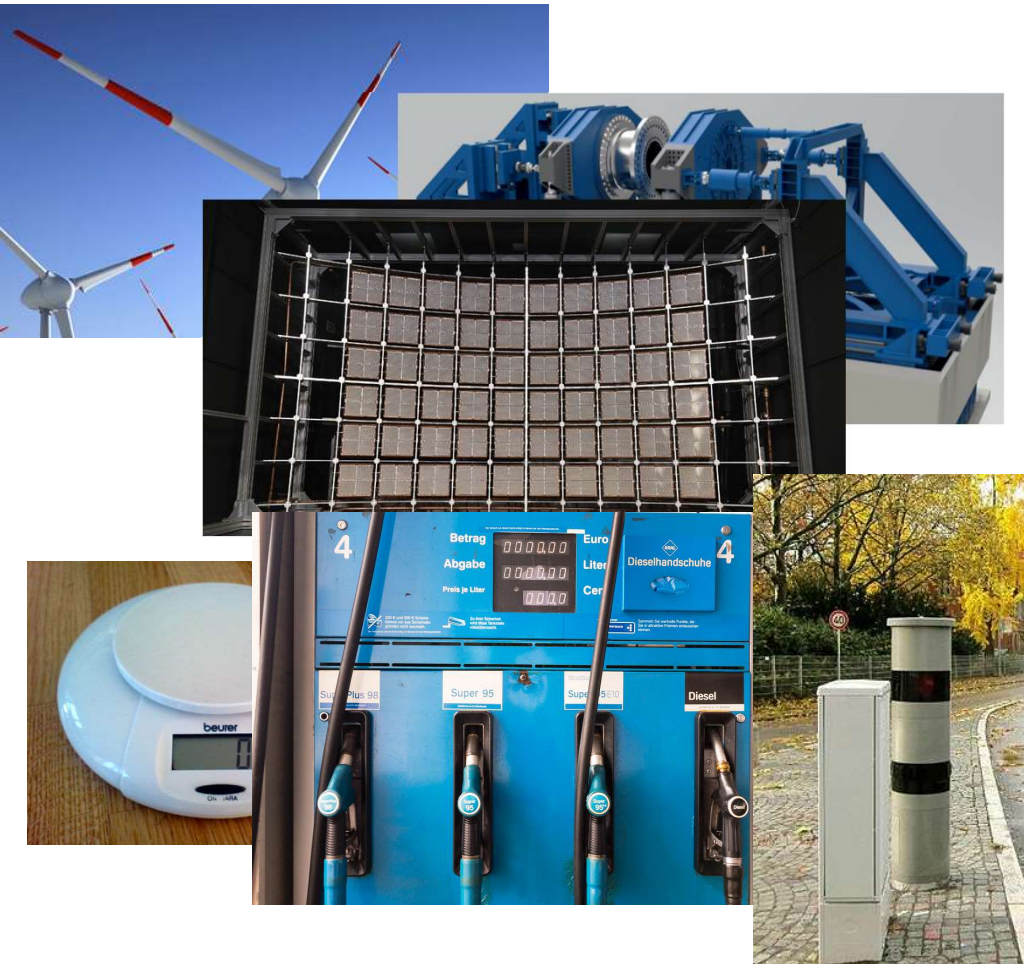
Was ist die PTB?



- Das nationale Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland
- Oberste Bundesbehörde beim BMWK
- Darstellung und Weitergabe der gesetzlichen Einheiten

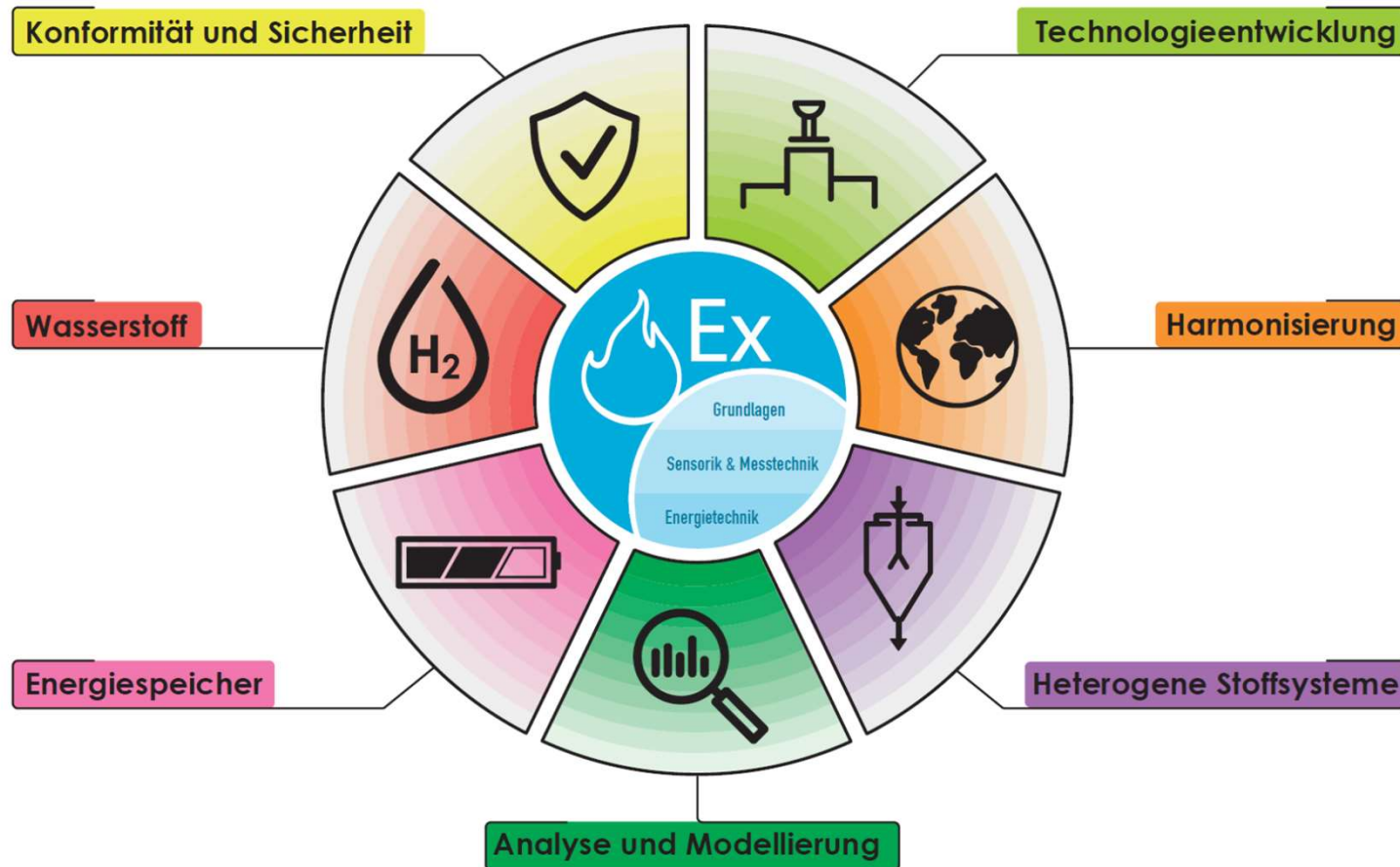


Was ist die PTB?



- Forschung für Wirtschaft und Gesellschaft
 - z. B. Rückführung großer Drehmomente für Windkraftanlagen
 - z. B. Messung der Effizienz von Solarzellen
- Konformitätsbewertung von Messgeräten
 - z. B. Waagen
 - z. B. Zapfsäulen
 - z. B. Geschwindigkeitsmessgeräte

Explosionsschutz in der PTB

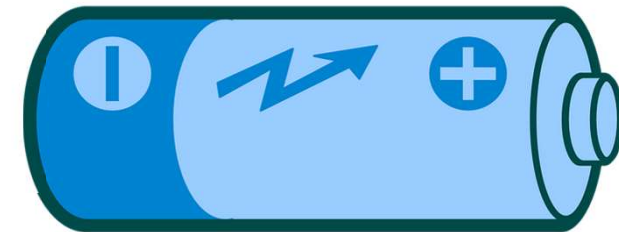




Regenerative Energieträger und -speicher



efzn
Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen



... vor dem Hintergrund Explosionsschutz

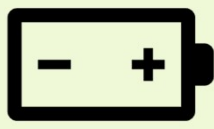
Agenda



01
Vorstellung PTB



02
Rolle von
Lithium-Ionen-
Batterien



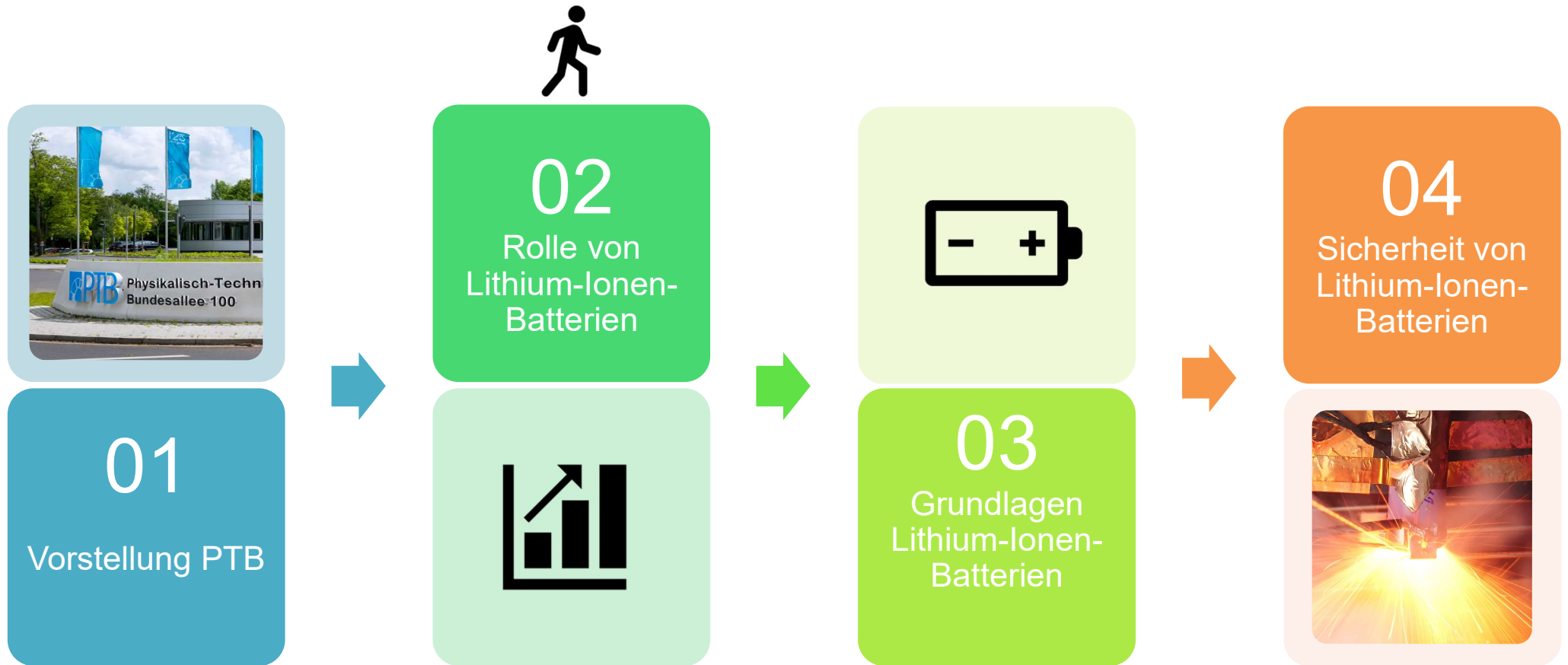
03
Grundlagen
Lithium-Ionen-
Batterien



04
Sicherheit von
Lithium-Ionen-
Batterien



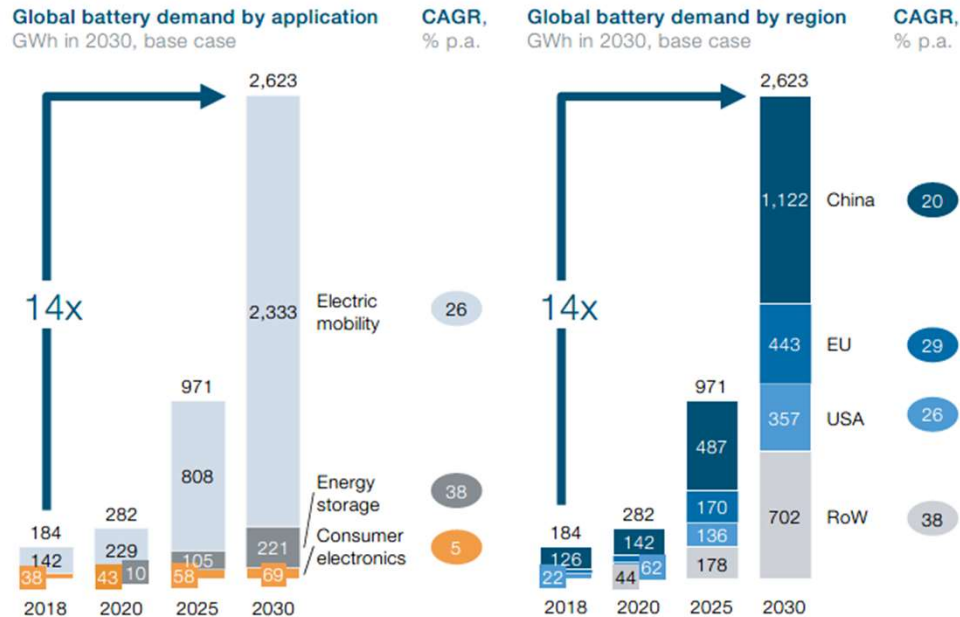
Agenda



Rolle von Batterien in der Zukunft

Figure 3: Global battery industry growth by application and region by 2030

Compared to today, global battery demand is expected to grow by a factor of ~14 to reach ~2,600 in 2030



World Economic Forum, A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030, Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation, 2019.

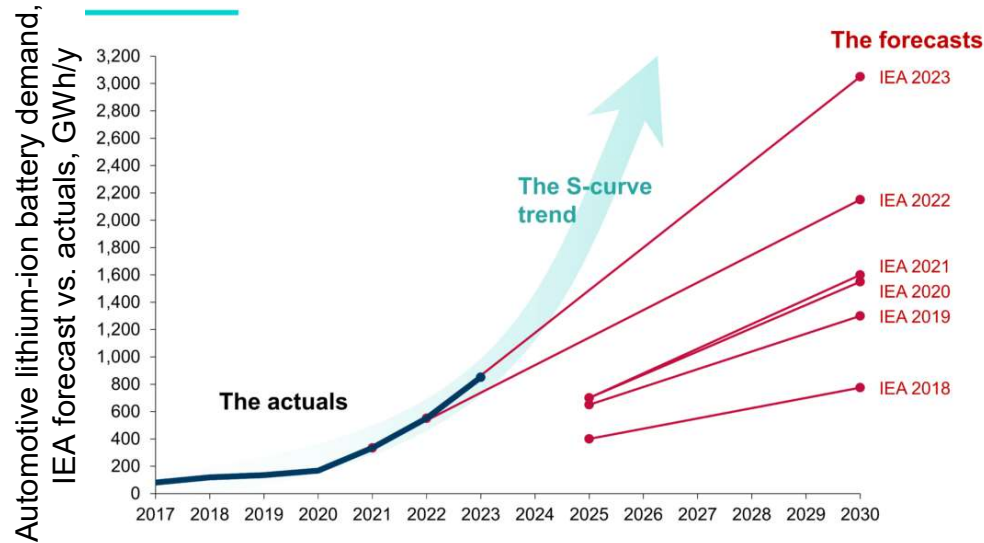
Batterien ermöglichen

- (lokal) emissionsfreie Mobilität
- Integration erneuerbarer Energie in das elektrische Netz

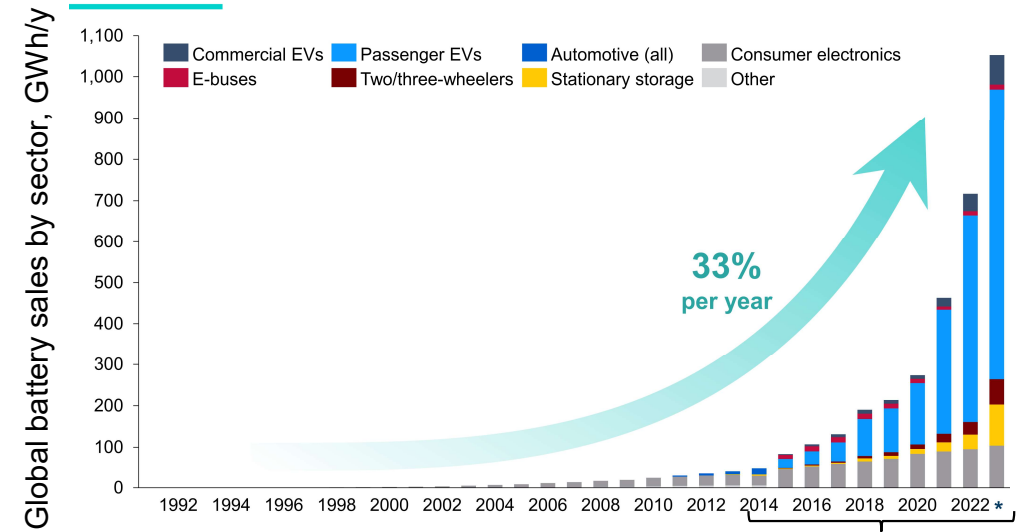
Massives Wachstum von Batterie-Anwendungen und -Produktion vorhergesagt

14x in 12 Jahren ⇔ 25 % p.a.

Rolle von Batterien in der Zukunft



Source: IEA Global EV Outlook (2018-2023) current policy scenarios and actuals; BNEF Long-Term Electric Vehicle Outlook (2023) for 2023 estimate.



Ca. 3.200 GWh (2014-2023)

3.200 GWh entspricht

- bei 3,7 V und 3 Ah (Rundzelle im Format 18650)
→ 288 Milliarden Batterien
- bei 3,7 V und 20 Ah (Pouchzelle für E-Auto)
→ 43 Milliarden Batterien

□ Walter, D.; Bond, K.; Butler-Sloss, S.; Speelman, L.; Numata, Y.; Atkinson, W. X-Change: Batteries: The Battery Domino Effect, 2023.

Batterie-Unfälle

- E-Mobilität
- Stationäre Speicher
- Mobile Geräte

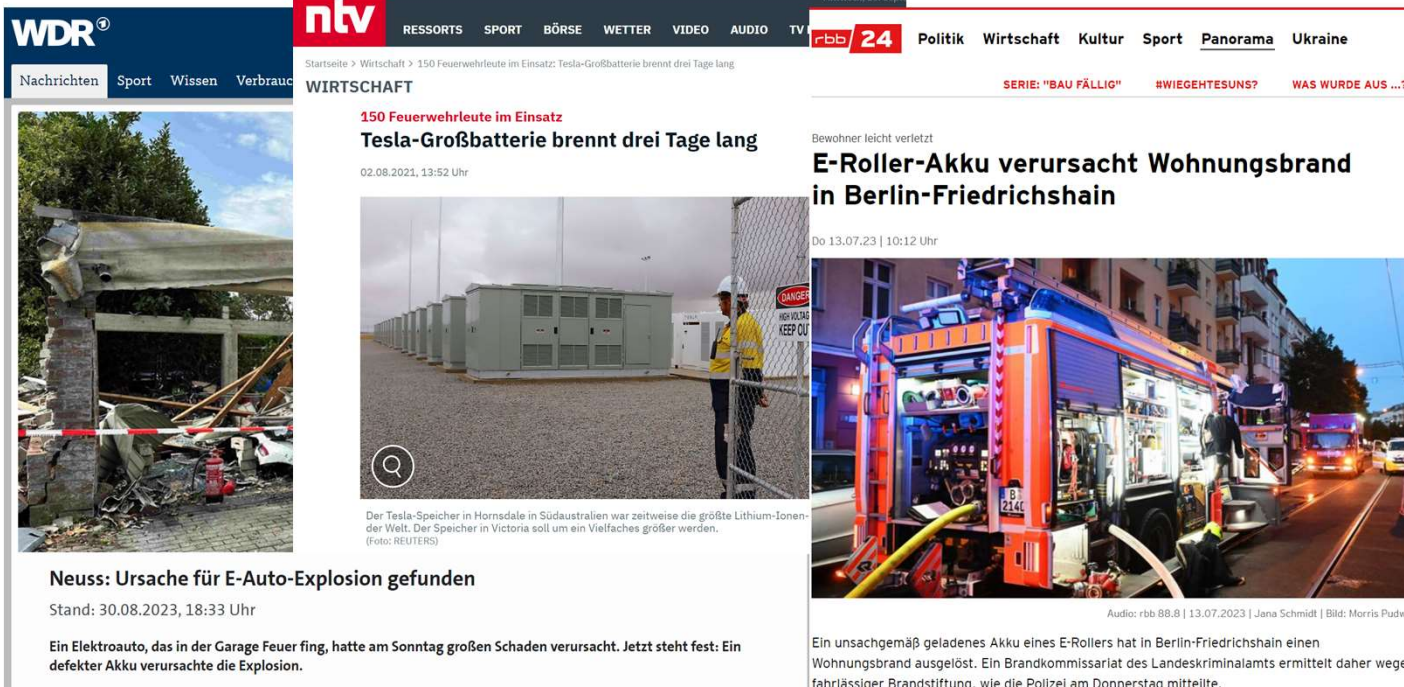
25 %
Wachstum
pro Jahr

Unfälle mit Batterien sind
an der Tagesordnung.

Ausfallrate von LIB trotz
Sicherheitseinrichtungen:
 $\approx 1:10^7$ bis $1:4 \cdot 10^7$
(1:10 Mio. bis 1:40 Mio.)

□ Doughty, D., Roth, E. P., A General Discussion of
Li Ion Battery Safety. Electrochem. Soc. Interface
21.2 (2012). doi: 10.1149/2.F03122if.

Anzahl LIB im Umlauf:
 $> 10^{10}$



The collage features three main news items:

- WDR:** A photograph showing the aftermath of an explosion, with debris and a damaged structure.
- ntv:** An article titled "150 Feuerwehrleute im Einsatz: Tesla-Großbatterie brennt drei Tage lang" (150 firefighters in action: Tesla large battery burns for three days long), dated 02.08.2021, 13:52 Uhr. It includes a photo of a large industrial battery unit.
- rbb 24:** An article titled "E-Roller-Akku verursacht Wohnungsbrand in Berlin-Friedrichshain" (E-scooter battery causes apartment fire in Berlin-Friedrichshain), dated Do 13.07.23 | 10:12 Uhr. It includes a photo of a fire truck at a residential building.

Additional text at the bottom left of the collage:

Neuss: Ursache für E-Auto-Explosion gefunden
Stand: 30.08.2023, 18:33 Uhr
Ein Elektroauto, das in der Garage Feuer fing, hatte am Sonntag großen Schaden verursacht. Jetzt steht fest: Ein defekter Akku verursachte die Explosion.

Additional text at the bottom right of the collage:

Ein unsachgemäß geladenes Akku eines E-Rollers hat in Berlin-Friedrichshain einen Wohnungsbrand ausgelöst. Ein Brandkommissariat des Landeskriminalamts ermittelt daher wegen fahrlässiger Brandstiftung, wie die Polizei am Donnerstag mitteilte.


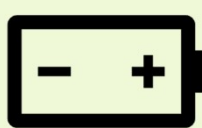
Agenda



01
Vorstellung PTB



02
Rolle von
Lithium-Ionen-
Batterien

03
Grundlagen
Lithium-Ionen-
Batterien

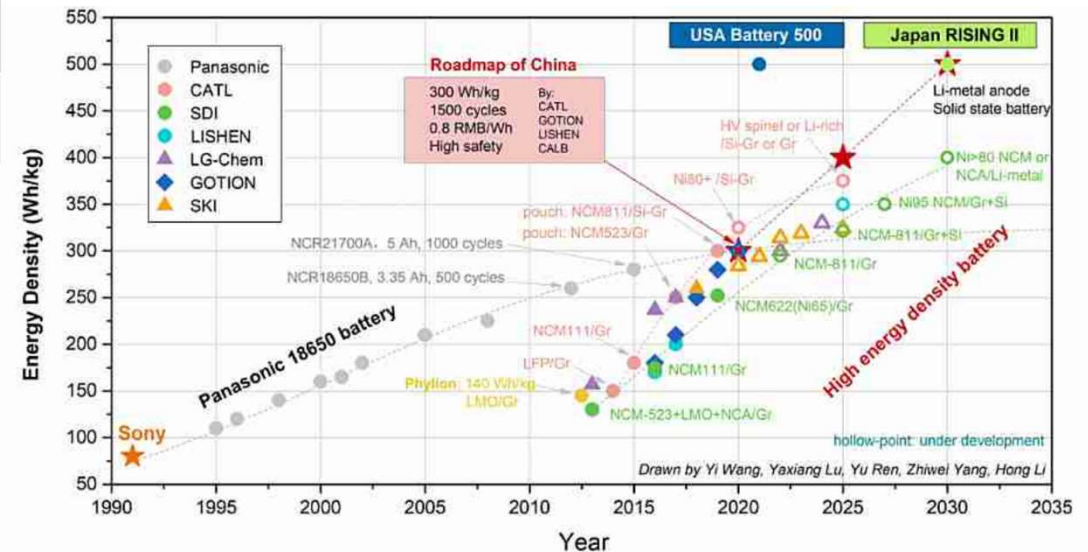


04
Sicherheit von
Lithium-Ionen-
Batterien



Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien

Vorteile	Nachteile
Hohe Energiedichte	Ressourcenbedarf und -verfügbarkeit
Hoher Wirkungsgrad	(Kosten)
Große Lebensdauer	Sicherheit
Geringe Selbstentladung	



Edström, K.; Dominko, R.; Fichtner, M.; Perraud, S. Battery 2030+ Roadmap, 2020.

Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

Lithium-Ionen-Zellen bestehen aus

2 Elektroden

- Kathode (positive Elektrode) - Metalloxide (z.B. Mangan, Nickel oder Cobalt)
- Anode (negative Elektrode) - Wirtsgitter meist aus Graphit

Stromableiter

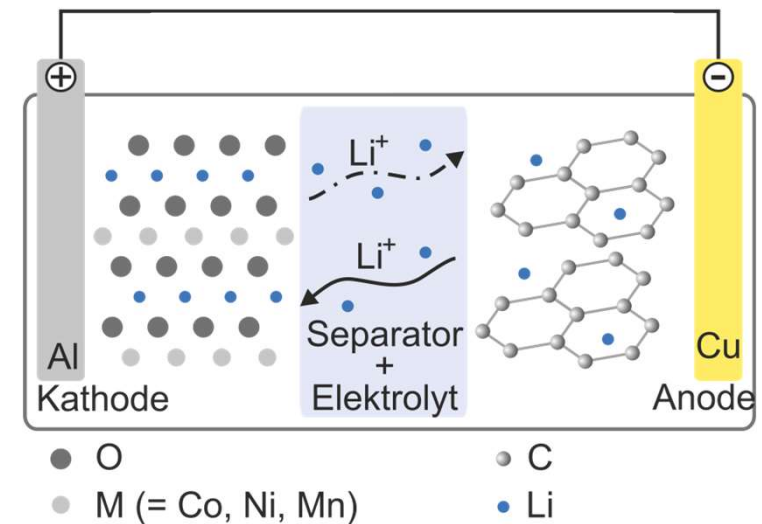
- Kollektoren aus dünnen Metallfolien, aufgebracht auf den Elektroden
- Kathode: Stromableiter aus Aluminium
- Anode: Stromableiter aus Kupfer

Separator

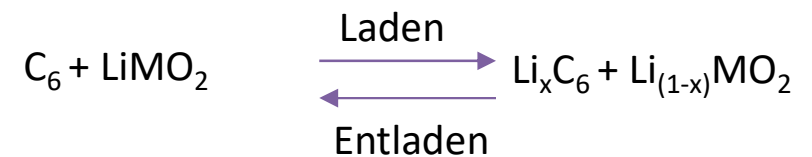
- Ionendurchlässig, isoliert Elektroden gegeneinander

Elektrolyt

- Ionenleitfähiger Elektrolyt

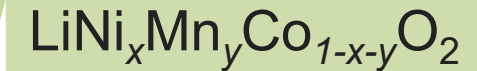


Quelle: KIT, Institut für Thermische Verfahrenstechnik



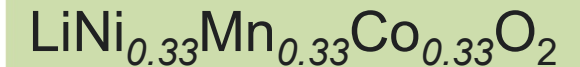
Typische Kathodenmaterialien

Abkürzung	Kathodenmaterial
LCO	lithium cobalt oxide
LFP	lithium iron phosphate
LMO	lithium manganese oxide
NCA	lithium nickel cobalt aluminium oxide
NMC	lithium nickel manganese cobalt oxide
LTO	lithium titanate

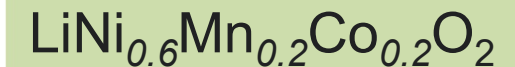


Molare Anteile, z. B.

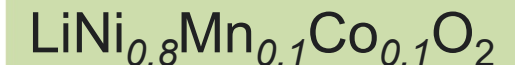
NMC111/NMC333



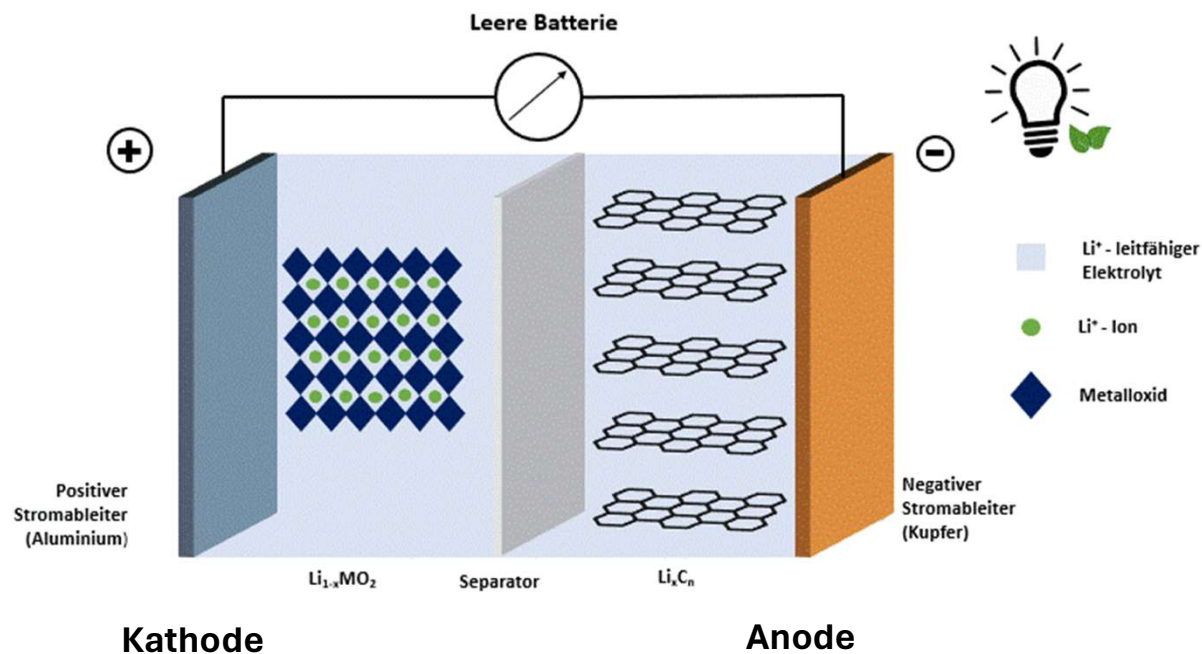
NMC622



NMC811



Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle



Entladevorgang

- Elektronen fließen über externen Stromkreis zur Kathode
- Li⁺-Ionen gelangen durch den Separator zur Kathode

Ladevorgang

- Elektronen fließen über externen Stromkreis zur Anode
- Li⁺-Ionen gelangen durch den Separator zur Anode

Besonderheit der Lithium-Ionen Zellen

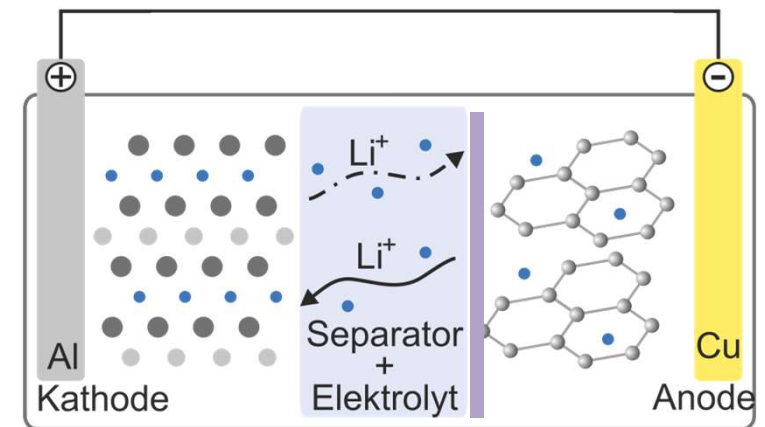
Interkalationsprinzip

- Lithium-Ionen werden als Gastatome in die Strukturen der Elektroden eingelagert (interkaliert)
- Lithium-Ionen wandern zwischen den Elektroden hin und her und werden durch Leitungselektronen an der Doppelschicht elektrisch kompensiert (Interkalation).

Zusätzlich zur Doppelschicht in der porösen Elektrode:

Solid Electrolyte Interphase (SEI)

- Ausbildung einer Grenzschicht auf der Oberfläche der Anode während der ersten Ladung (Formierung) im Rahmen der Zellproduktion
- Notwendig für Funktion der Lithium-Ionen-Zelle
- Entscheidend für die Funktionsfähigkeit, Performance und Lebensdauer der Zelle

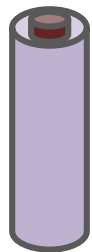
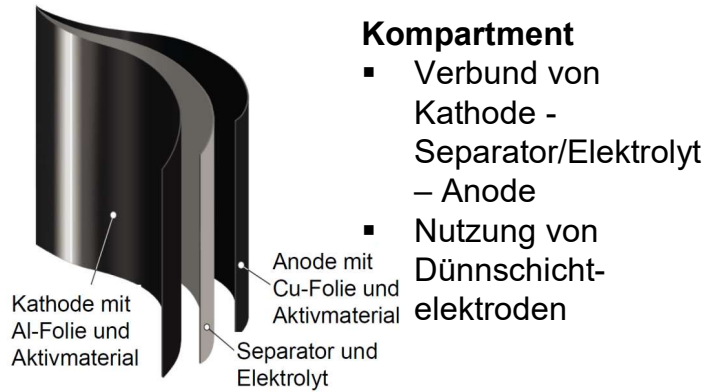


● O
● M (= Co, Ni, Mn)
● C
● Li

Solid Electrolyte Interphase (SEI)

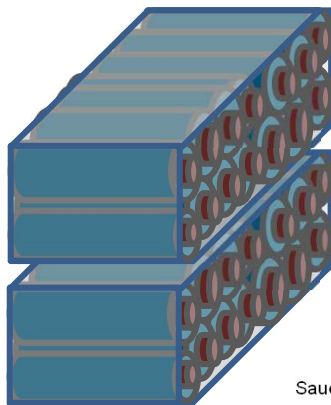
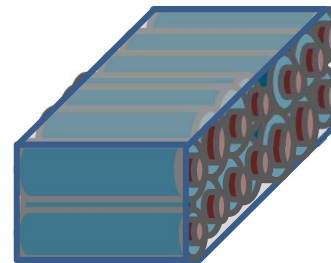
Quelle: KIT, Institut für Thermische Verfahrenstechnik

Von der Zelle zum Batteriesystem



Zelle

- Anordnung von mind. einem Kompartiment
- Gehäuse
- Interne Kontaktierung



Modul

- Zusammenschluss mehrerer Zellen
- Reihen- oder Parallelschaltung
- Externe Kontaktierung
- Fixierung durch ein Gehäuse
- Teilweise Kühlung und Batteriemanagementsystem (BMS)

System

- Verbund aus mehreren Modulen
- Reihen- oder Parallelschaltung
- Externe Kontaktierung
- Fixierung durch Gehäuse
- Teilweise Kühlung und BMS

Sauer, D. U., Produktionstechnik für die Batterieproduktion, 2010, RWTH

Formate



18650
21700
26650
4680

zylindrisch



prismatisch



Pouch-Zelle

Batteriemanagementsystem (BMS)

Definition

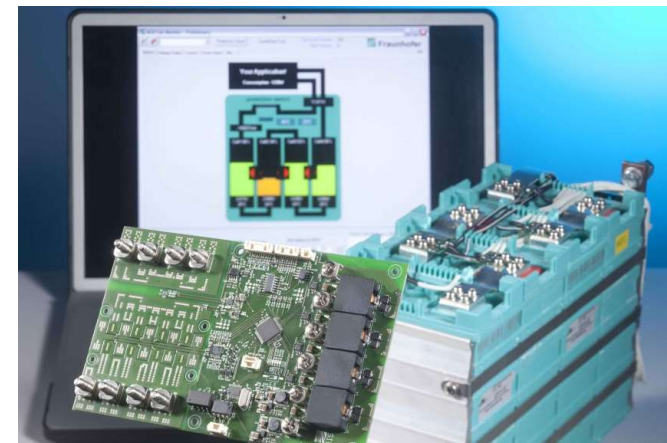
Das Batteriemanagementsystem (BMS) ist eine elektronische Schaltung, welche zur Überwachung und Regelung einer Anordnung von nachladbaren Akkumulatorzellen – einer wiederaufladbaren Batterie – dient.

Das BMS ...

- ... steuert den Energiefluss
- ... überwacht kritische Parameter
- ... maximiert die Batterieperformance
- ... kommuniziert Informationen

Die Messdatenerfassung basiert auf den 3 Eingangsmessgrößen:

- Batteriezellspannung
- Batteriezelltemperatur
- Batteriesystemstrom



Quelle: Fraunhofer IIS

**BMS ist notwendig für Betrieb der LIB
und elementar für die Sicherheit**

Betriebsbereich von Lithium-Ionen-Batterien

Datenblatt einer NMC-Pouch-Zelle

深圳市格瑞普电池有限公司 SHENZHEN GREPOW BATTERY CO., LTD	DOC NO.: 001 REV. : A Page 6 of 14
--	--

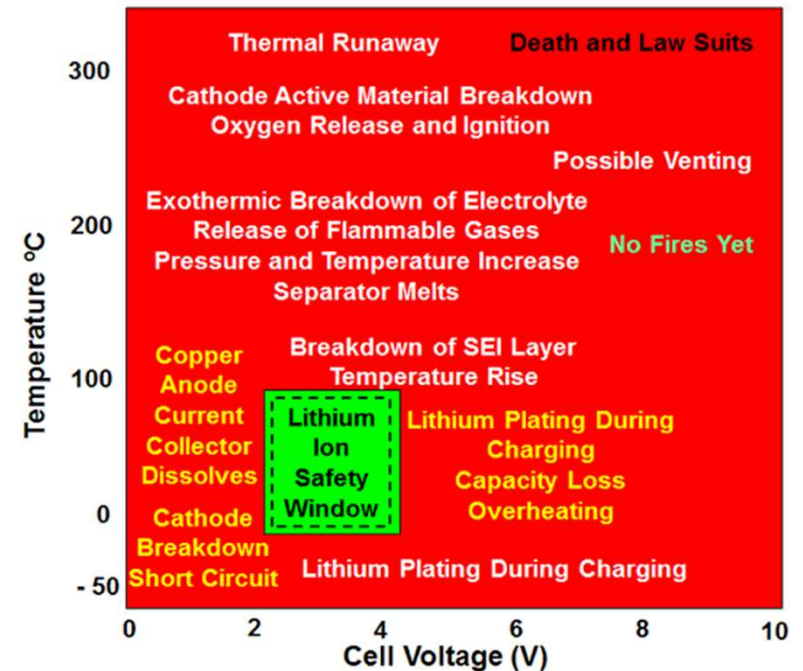
QR-YF-QP-030-17

4. 电池常规性能检查及测试 Routine Inspection and Testing of Battery Performance

4.1 电池常规性能 Routine Inspection of Battery Performance

标称容量 Typical Capacity①	20000mAh		
最小容量 Minimum capacity	19500mAh		
标称电压 Nominal Voltage	3.7V		
开路电压 Open-Circuit Voltage	4.15V-4.20V		
出货电压 Voltage of shipment	3.75V-3.85V		
交流内阻 AC Impedance	≤2.0mΩ		
充电条件 Charge Condition	标准充电电流 Standard Charge current	10000mA	
	快速充电电流 Rapid Charge current	20000mA	
充电时间 Charging time	标准充电: 3.0 小时 (参考值) Standard Charging: 3.0 hours(Ref.)		
	快速充电: 1.5 小时 (参考值) Rapid charge: 1.5 hours(Ref.)		
放电条件 Discharge Condition	标准放电电流 Standard Discharge current	10000mA	
	最大持续放电电流 Max. Constant discharge current	60000mA	
	瞬间放电电流 Peak discharge current	100000mA (≤3S)	
工作温度范围 Range of work temperature	充电温度 Charge Temperature	10~15℃	(0.5C)
		15~45℃	(1C)
	放电温度 Discharge Temperature	-20~0℃	(0.2C)
		0~10℃	(0.5C)
		10~45℃	(3C)
		45~60℃	(0.5C)
① 标称容量: 0.5C,4.2V~2.75V@23°C±2°C Typical Capacity:0.5C,4.2V~2.75V@23°C±2°C			

Lithium Ion Cell Operating Window



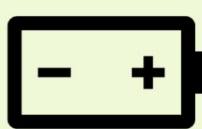
Agenda



01
Vorstellung PTB



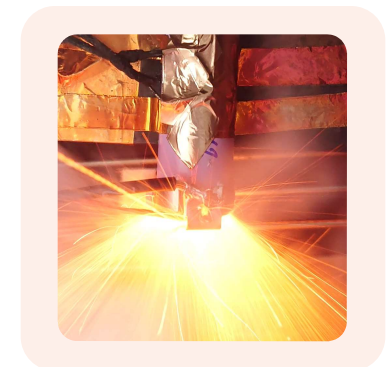
02
Rolle von
Lithium-Ionen-
Batterien



03
Grundlagen
Lithium-Ionen-
Batterien



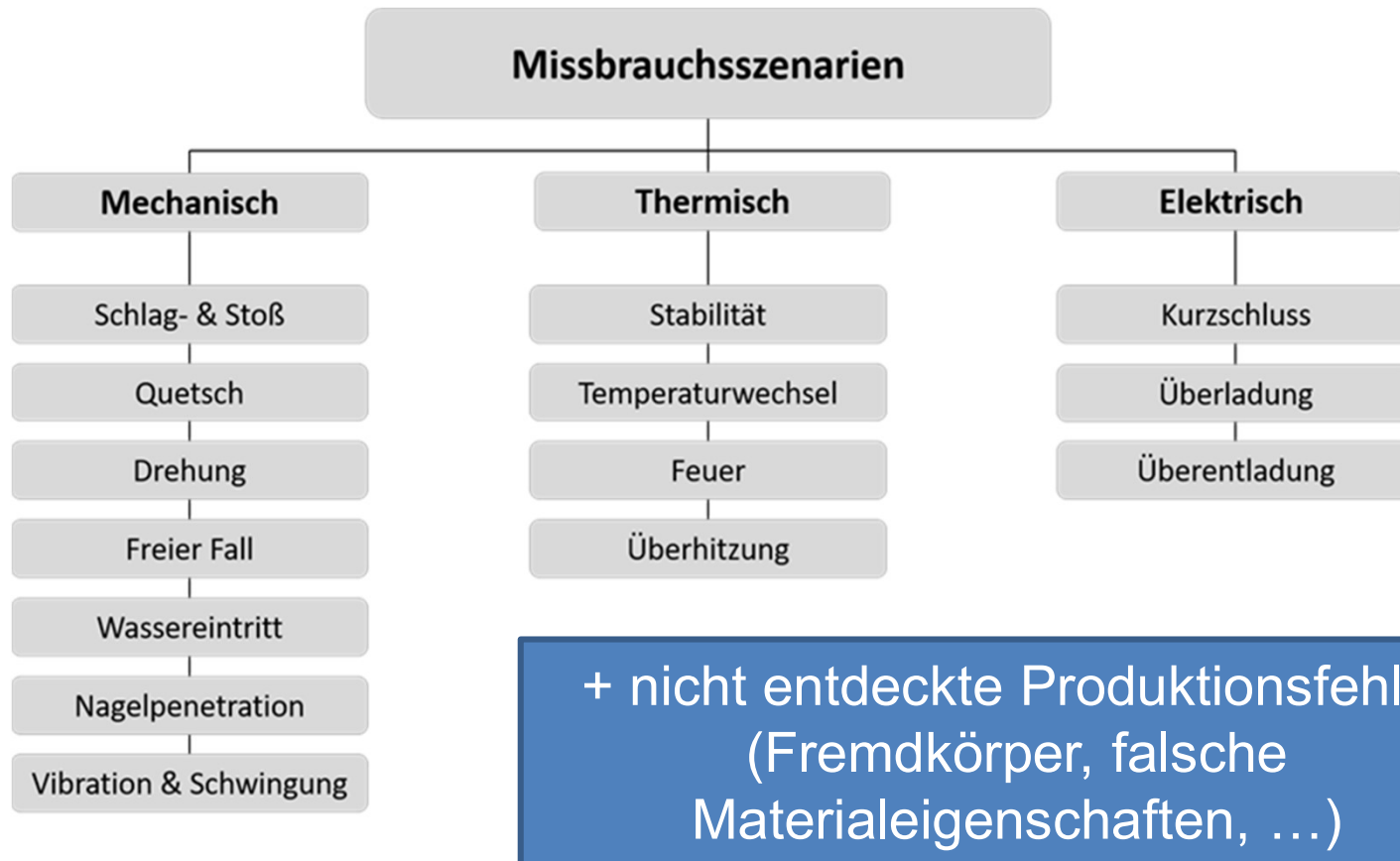
04
Sicherheit von
Lithium-Ionen-
Batterien



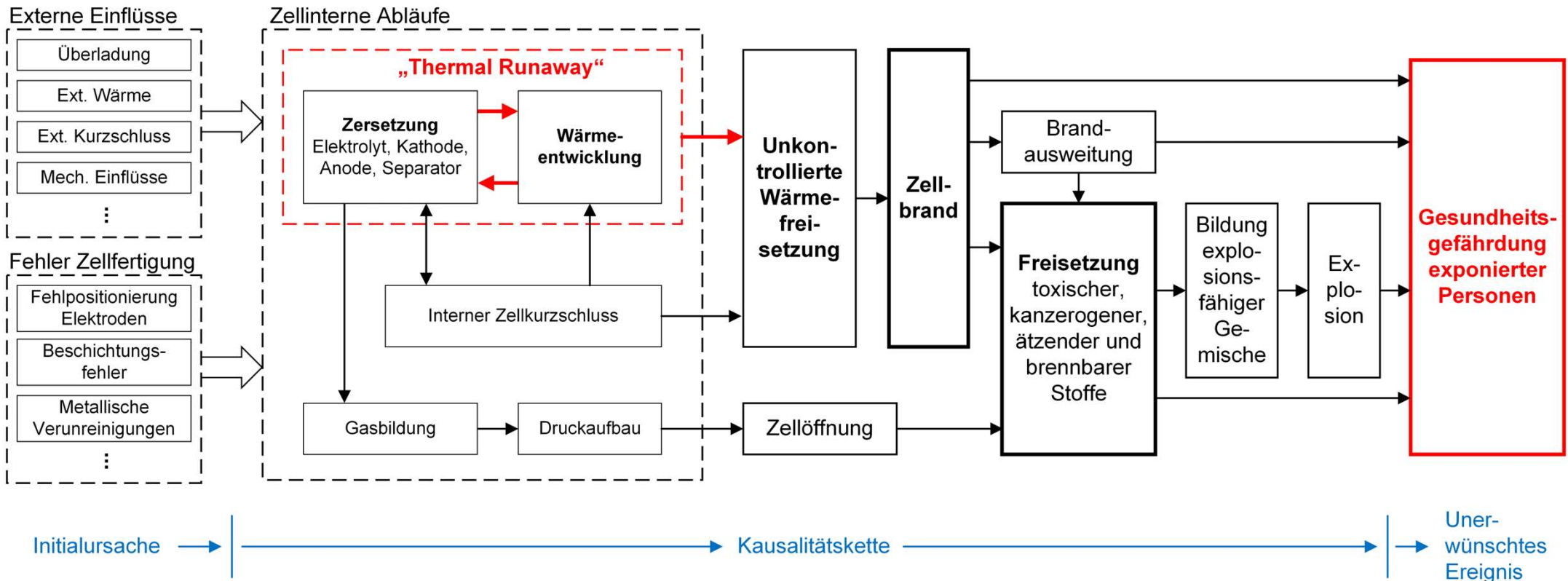
Spezifische Gefahren von Li-Ionen-Batterien



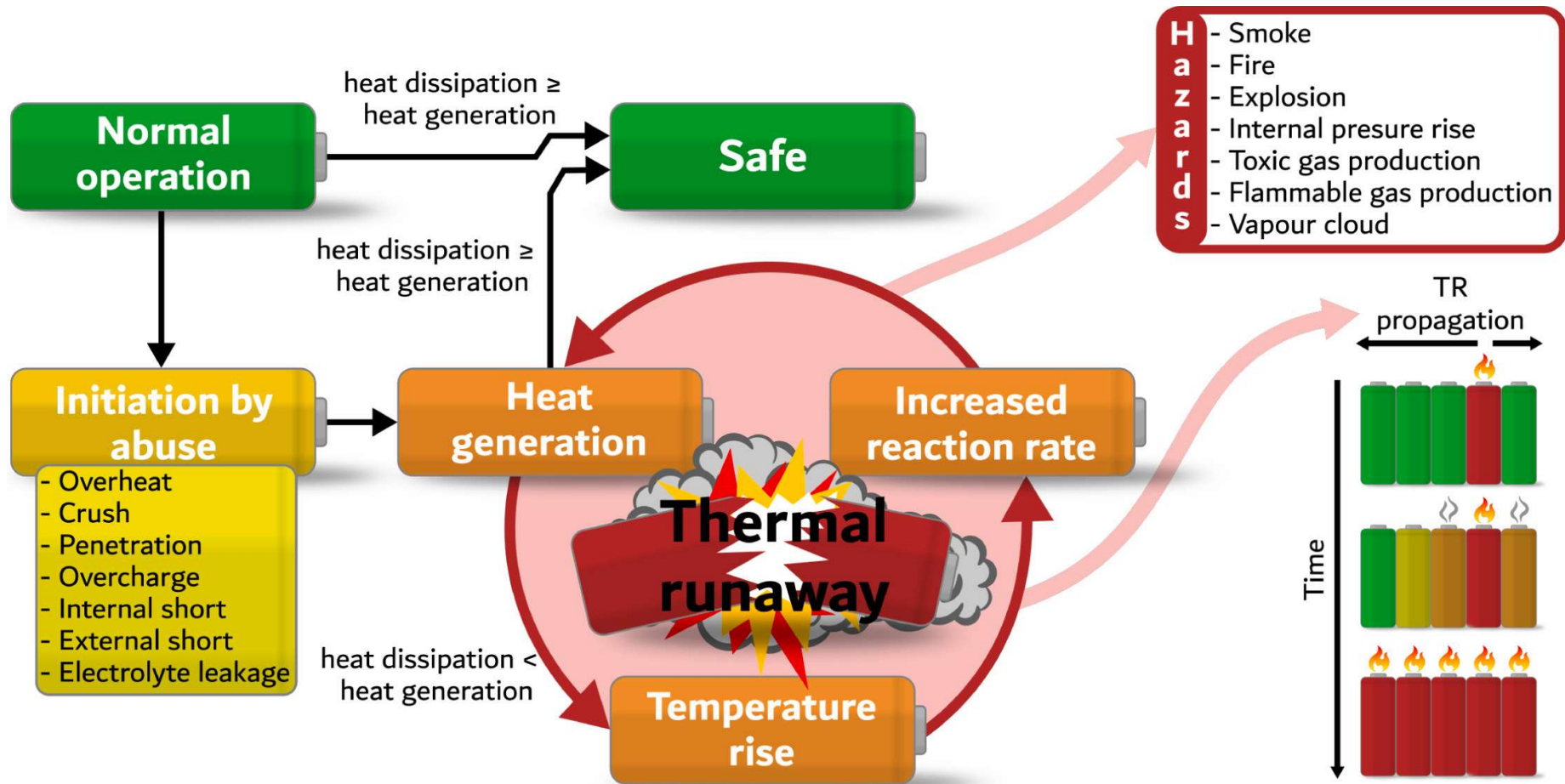
- Spezifische Gefahren beim thermischen Durchgehen von Li-Ionen-Batterien
 - Brennbare Stoffe
 - Fest: Graphit-Anode
 - Flüssig: Organischer Elektrolyt
 - Gasförmig: Zersetzungsprodukte (CO, CH₄, HF, H₂, NO_x, C₂H₄, C₂H₂, C₆H₆, ...)
 - Sauerstoff-Freisetzung aus Kathode
 - Zündquelle



Thermisches Durchgehen

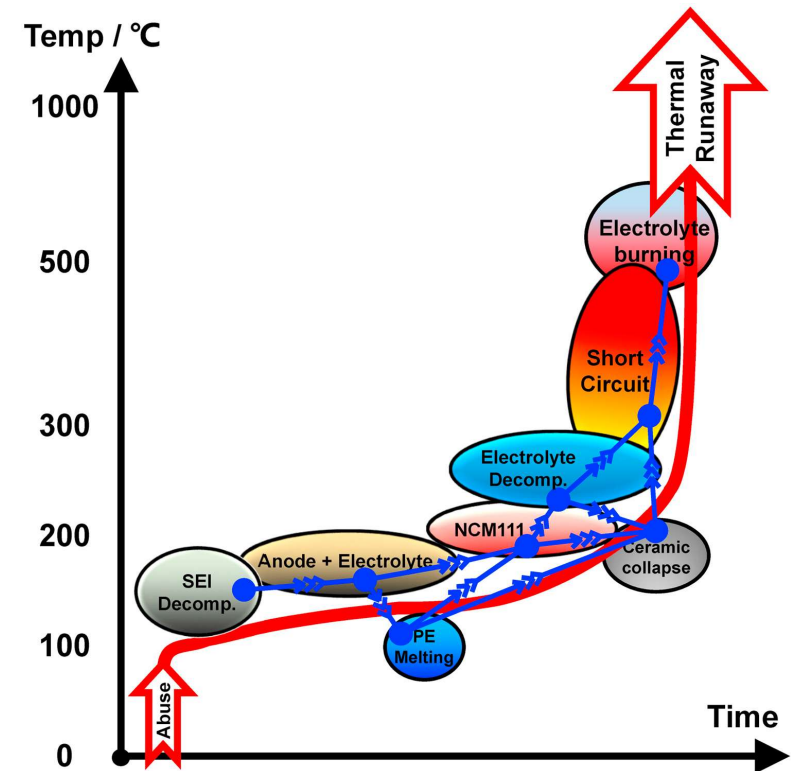
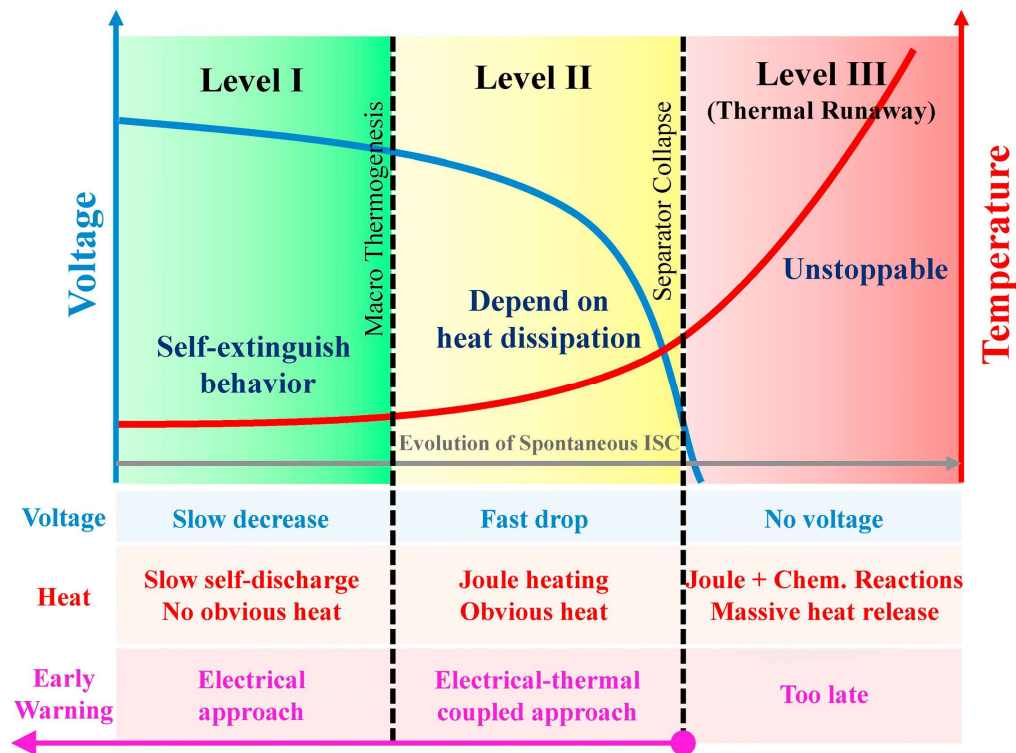


Thermisches Durchgehen



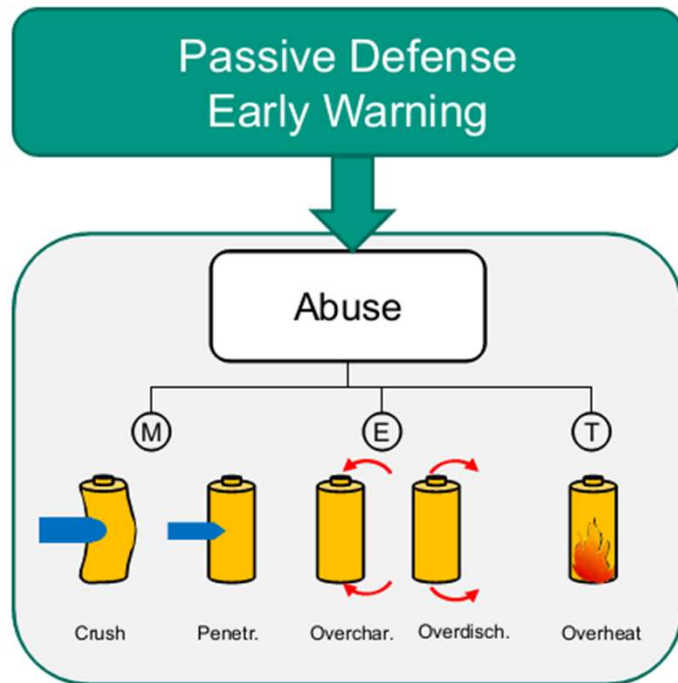
□ Bugryniec et al. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. Journal of Energy Storage 2024, 87, 111288, doi:10.1016/j.est.2024.111288.

Thermisches Durchgehen



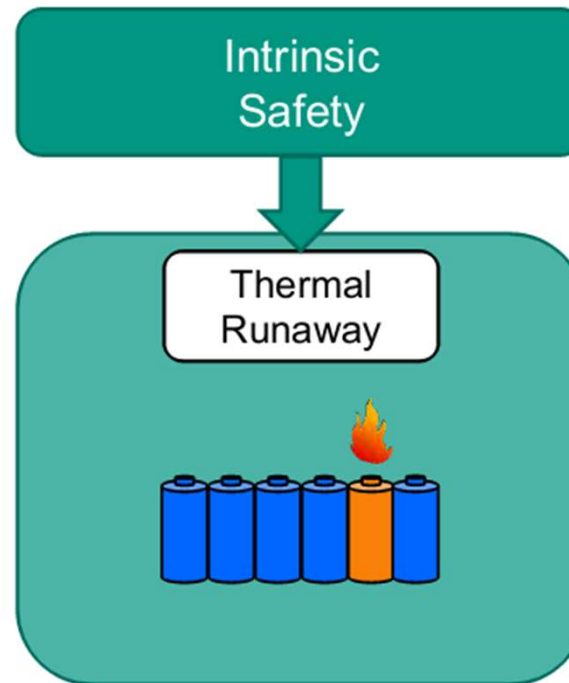
□ Feng, X.; Ouyang, M.; Liu, X.; Lu, L.; Xia, Y.; He, X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials* 2018, 10, 246–267, doi:10.1016/j.ensm.2017.05.013.

Schutzziele bei Lithium-Ionen-Batterien



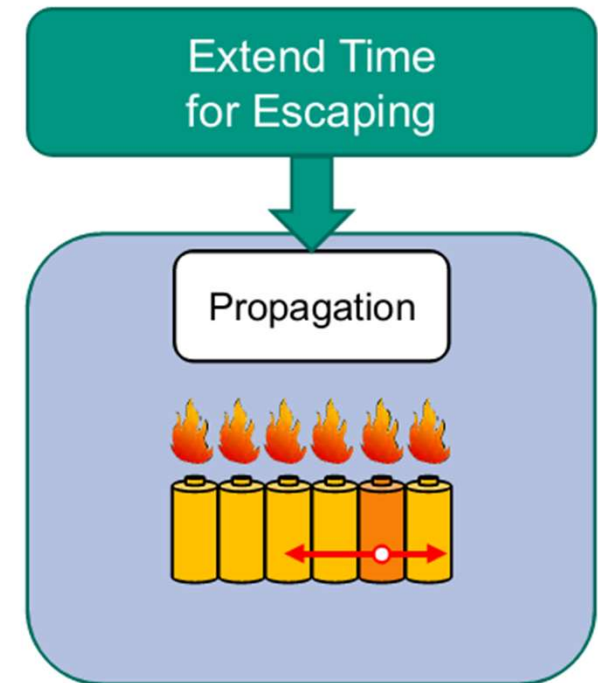
Step 1 – BMS

Detection of mechanical, electric, thermal abuse



Step 2 – Cell

Venting, CID, PTC



Step 3 – Pack

Passive propagation prevention

Adapted from: Feng et al., *Energy Storage Materials* 10 (2018) 246

Thermisches Durchgehen

Laborversuch (PTB)

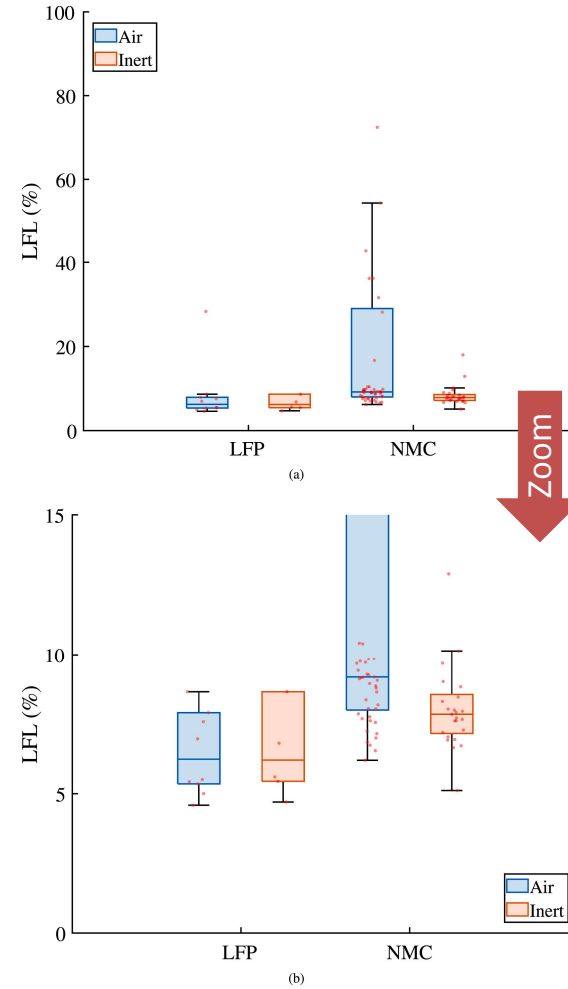
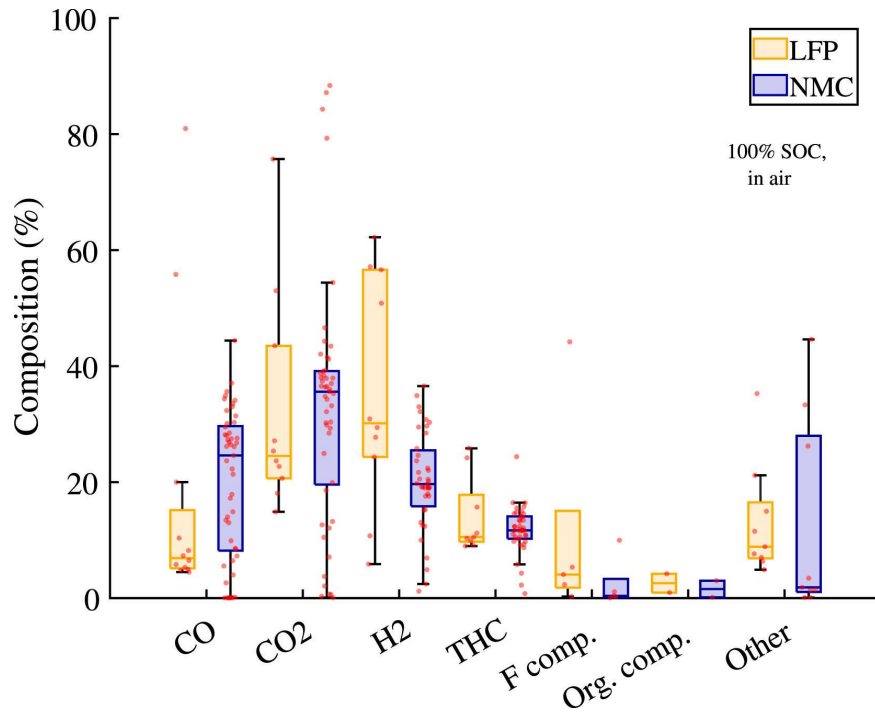



Busdepot in Guangxi (China)



https://www.youtube.com/watch?v=T71cVhxG_v4

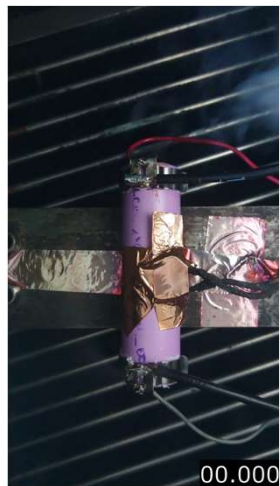
Gefährliche Gase aus Batterien



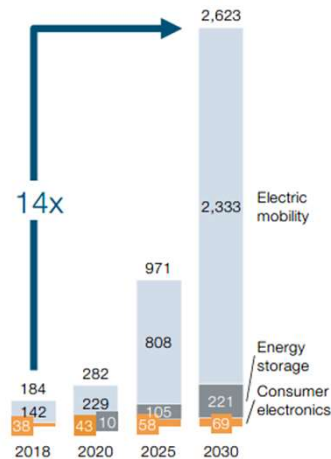
-  *brennbar*
-  *ätzend*
-  *giftig*
-  *reizend*
-  *karzinogen*
-  *gewässer-gefährdend*

▫ Bugryniec et al. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. Journal of Energy Storage 2024, 87, 111288, doi:10.1016/j.est.2024.111288.

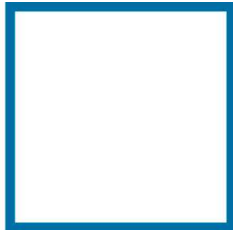
Zusammenfassung



Global battery demand by application
GWh in 2030, base case



- Lithium-Ionen-Batterien bleiben mittelfristig Stand der Technik
- Zahl der Batterien nimmt massiv zu
- Energiedichte nimmt weiter zu
- Unfälle werden (rein statistisch) immer wieder passieren
- Betriebsfenster einhalten (BMS)
- Im Fall eines thermischen Durchgehens Gefährdung durch Feuer, Explosion, Gefahrstoffe



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Stefan Essmann

Telefon: 0531 592-3550

E-Mail: stefan.essmann@ptb.de

www.ptb.de

