

Technische und sicherheitskritische Herausforderungen im (batterie-) elektrischen Fahrzeugantrieb

Arbeitssicherheit für Rettungskräfte, 25.11.2022

Prof. Dr.-Ing. Stephan Zipser (HTW Dresden)

1. Kurzvorstellung
2. Energiespeicher im Fahrzeug
3. Batterie und batterieelektrischer Antriebsstrang
4. Kernaussagen Masterarbeit: H. Kuntzsch: „Brandbekämpfung von Elektrofahrzeugen in Parkhäusern“

2. Energiespeicher im Fahrzeug

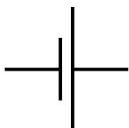
Energie zum Überwinden der Fahrwiderstände (Roll- und Luftwiderstand, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand): Energiespeicher im Fahrzeug.

Energiespeicher

(1) Elektrisch

(4) Mechanisch

(2) Elektrochemisch
Batterie



(3) Chemisch
Diesel, Benzin,
Erdgas, Wasser-
stoff,



- Für große Reichweite schwere/große Batterie
- Positiv: wg. besserem Wirkungsgrad bei E-Antrieb aber nur noch $\approx 1/4$ der Energie beim Verbrennungsmotor notwendig*

Mittlere Energiedichte
 $\approx 150 \dots 250 \text{ Wh/kg}$ bei
Li-Ionen-Antriebsbatterie

$\approx 1,6 \%$

Sehr hohe Energiedichte
(Heizwert), Ottokraftstoff
 $\approx 12\,000 \text{ Wh/kg}$ bzw.
 9 kWh/l

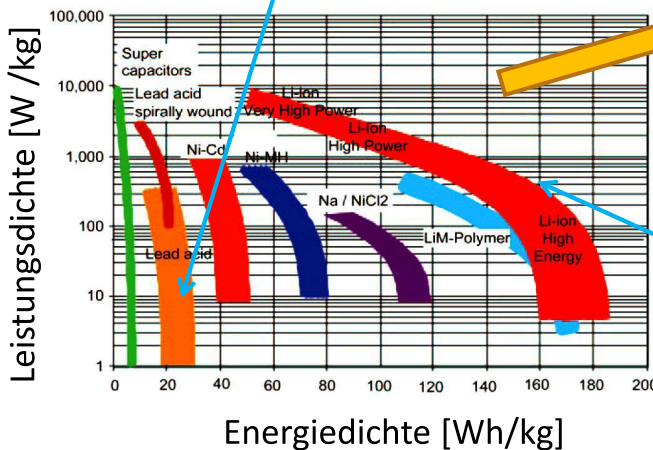
*Verbrennermotor ca. $\eta \approx 20 \%$, batterie-elektrischer Antriebsstrang mit $\eta \approx 80 \%$, zudem ist Nutzbremmung möglich

Entwicklung Batteriespeicher im Straßenfahrzeug

- Um 1900 Hybrid- und E-Fahrzeuge mit **Blei-Säure-Batterie**: zu schwer (geringe Energiedichte) → nur Nischenanwendung (z.B. Gabelstapler) und Starterbatterie Verbrennungsmotor
- 1991 Hersteller SONY: Massenproduktion **Li-Ionen-Zellen** für Consumer-Produkte
- 1997 Hybridauto Toyota Prius 1 (NiMH-Batterie)
- 2012 Batterieauto Tesla (Li-Ionen mit „18650-Zellen“)



1900 Hybrid-Fzg.
Lohner Porsche
(Blei-Säure-Batterie)



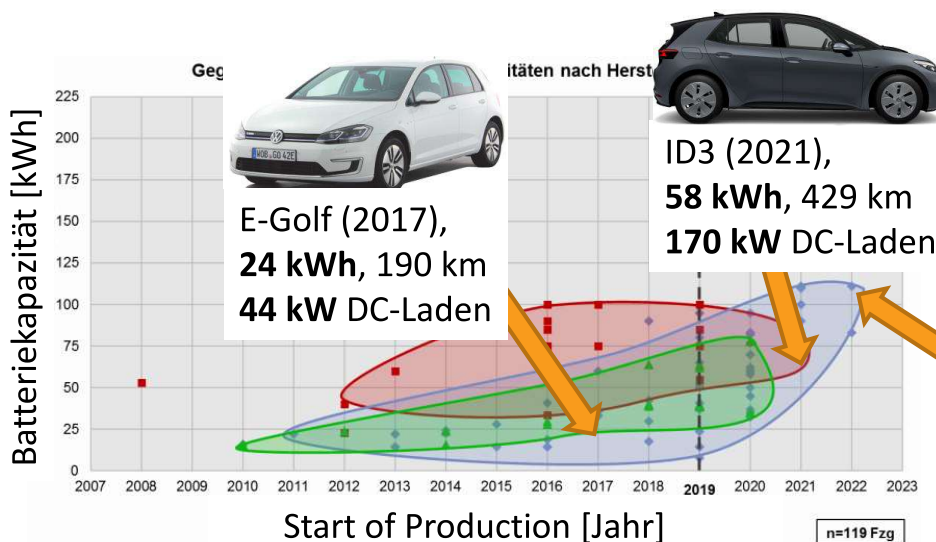
Wachsende Energiedichte: bei gleicher Batteriemasse höhere Energiespeicherung: Batterien könnten kleiner werden

Tesla Model 3 (2019): Li-Ionen-Batterie, mit höherer Energiedichte

$$w = \frac{\text{speicherbare Energie } W_B}{\text{Batteriemasse } m_B} = \frac{78 \text{ kWh}}{478 \text{ kg}} = 156 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$$

[Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge, 2. Auflage, ISBN 978-3-7091-1779-8, 2014 basierend auf Johnsen Controls]

Wunsch nach höherer Reichweite sowie Antriebs- und Ladeleistung (Schnellladung):
Antriebsbatterie mit höherer Speicherkapazität/größe



E-Golf (2017),
24 kWh, 190 km
44 kW DC-Laden



ID3 (2021),
58 kWh, 429 km
170 kW DC-Laden

Schnellladen: hohe Ladeleistung ist bei kleiner Batterie kritisch („C-Rate“): hoher Verschleiß



Volvo EX 90
(präsentiert 2022),
111 kWh, 600 km

Abb. [O. Motz, Analyse, Modellierung und Prognose des Pkw-Ladeverhaltens aus Sicht eines Energieversorgers, DA 2019]

Entwicklung Batteriegröße

- Früher: elektrifizierte kleine Pkw mit kleiner Batterie (im Brandfall günstiger)
- Heute: auch große/schwere Pkw (SUV), ÖPNV-Busse
- Prognose
 - BEV (battery electric vehicle)-Pkw bis ca. 100 kWh, Entfall HEV (hybrid electric vehicle)
 - Nutzfahrzeuge mit teils **sehr großen Batterien** bis 1 000 kWh oder H_2 -Brennstoffzelle

Beispiele Batterie-Lkw

Scania (25 P, 40 t ZGG)

Batterie: 624 kWh (Brutto)

→ 350 km Reichweite

Laden: CCS2 mit 375 kW / 500 A DC

Sicherheit: Massiver Aufprallschutz



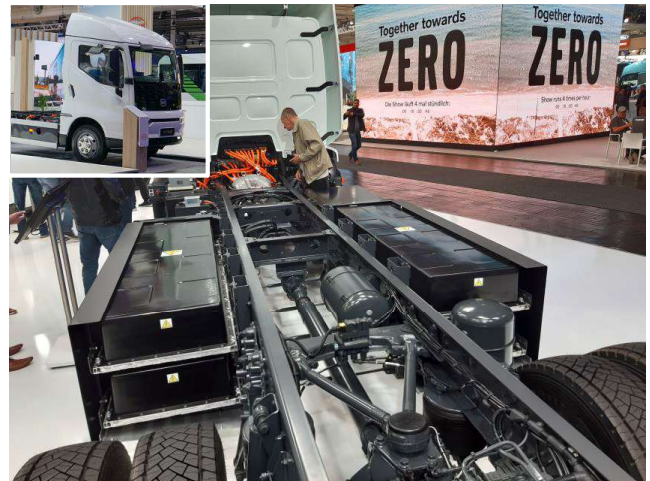
[IAA 2022, Zipser]

BYD (ETM6, 7,5 t)

Batterie: 126 kWh → 200 km Reichweite

Laden: 120 kW

Sicherheit: Aufprallschutz?, aber gute
Zugänglichkeit beim Löschen

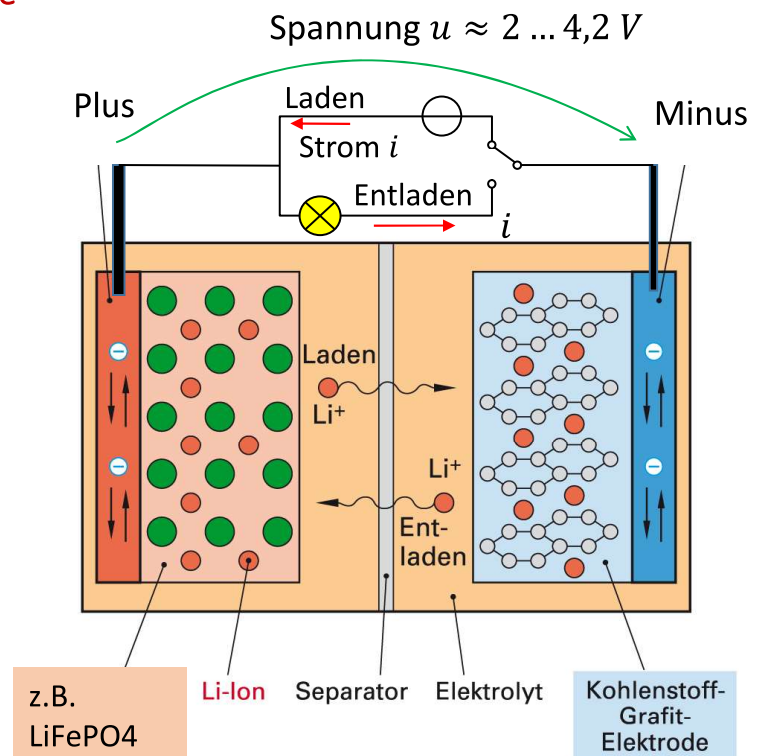


[IAA 2022, Zipser]

3. Batterie und batterieelektrischer Antriebstrang

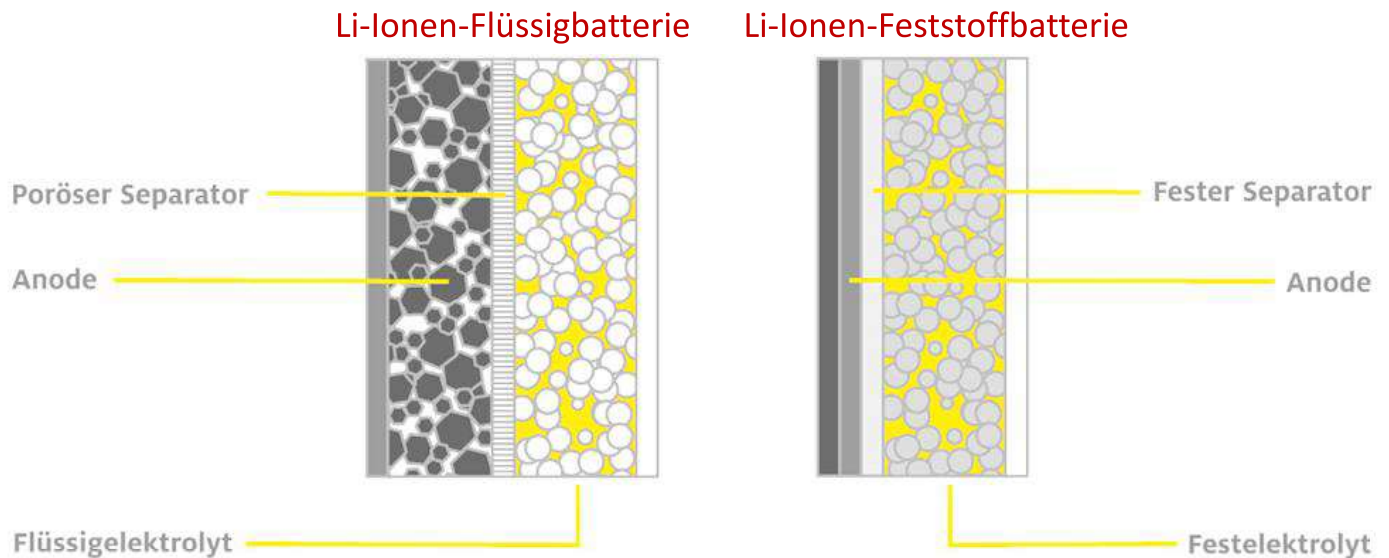
▪ Aufbau und Funktion Li-Ionen-Batteriezelle

- **Minuspol (Anode):** metall. Ableiter und **Graphit** (leitfähiges Kristall)
- **Pluspol (Kathode):** metall. Ableiter und *namensgebendes Material* z.B. LiFePO4 „Lithium-Eisenphosphat“
- **Elektrolyt:** „Vermittler“, **brennbares** organisches Lösemittel mit Leitsalzen, „Flüssigbatterie“
- **Separator:** Kunststoffolie, verhindert el. Kurzschluss, ermöglicht Transport der Li-Ionen
- **Laden/Entladen:** Äußerer Stromfluss i von Elektronen e^- , innerhalb wandern Li-Ionen („Li-Ionen-Schaukel“)



Ausblick Feststoffbatterie

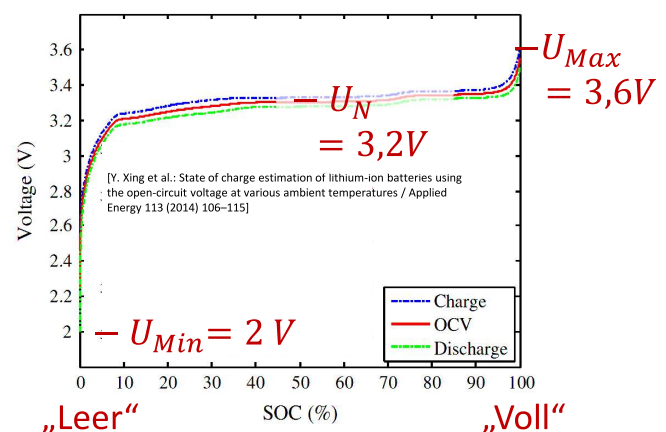
- Fester ionenleitfähiger Separator z.B. Keramik
- Kein flüssiger Elektrolyt (technisch schwierig, da fester Elektrolyt insbes. bei niedriger Temperatur weniger leitfähig ist)
- Verbesserte mechanische Robustheit und el. Sicherheit, kleinerer Bauraum
- Bessere Schnellladefähigkeit durch höhere Ladeleistung



[BMW, ADAC]

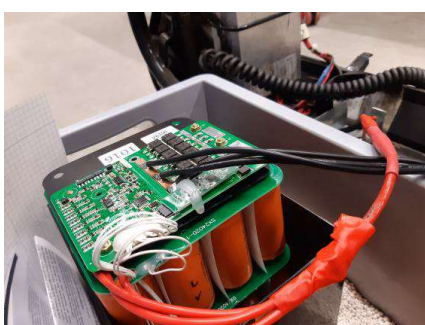
Eigenschaften Batteriezelle (Bsp. LiFePo4-Zelle)

- Spannung hängt von Ladezustand (SoC) ab
 $2,0\text{ V} \leq u_{\text{Zelle}} \leq 3,6\text{ V}$
- Höhere Spannung (**Überladen**) und tiefere (**Tiefentladen**) ist gefährlich: Strukturschäden möglich
- Strukturschäden/ interner Kurzschluss: Batterie kann „Durchgehen“ (*thermal runaway*)
- Aber: mit viel Wasser beherrschbar, bei E-Pkw bis 10.000 l*



Aussagen

- Zellen im E-Fahrzeug mit Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht: Spannung, Lade/Entladestrom und Temperatur
- BMS fest im Batteriegehäuse integriert, überwachte Fahrzeugbatterie viel sicher als „lose Batteriezellen“
- Aber: beschädigte Antriebsbatterien schwierig zu beurteilen (auch in Fzg.-Produktion)
- Unterschied zu Kraftstofftank: auch „leere“ Batterien können brennen (u.a. Elektrolyt)



Batterie mit BMS [Zipser]

*[Masterarbeit: Brandbekämpfung von Elektrofahrzeugen in Parkhäusern, H. Kuntzsch, 2021]

Aufbau Traktionsbatterie

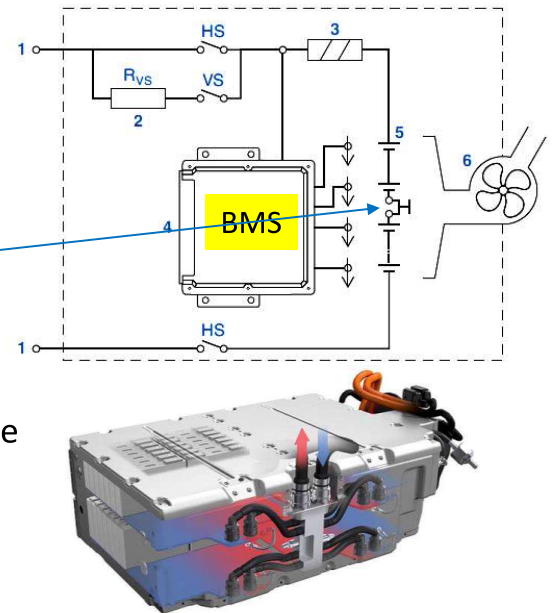
- Batterie: Zusammenschaltung von Zellen
- Parallel → höhere Kapazität /Energiesp.
- In Reihe → höhere Spannung z.B. $U_B = 120 \cdot 3,2 V = 384 V$ (Batterie-Nennspannung)

Warum so hohe Spannung im (Antriebs-) Bordnetz?

- Bei gleicher Leistung $P = u \cdot i$ sind Strom und el. Verlustleistung $P_V = R_L i^2$ geringer (vgl. E-Versorgungsnetz), **Pkw typisch bis 400 V**, teils 800 V

Sicherheitsfeatures

- (4) BMS-Überwachung
- (3) Schmelzsicherung
- „Crashsensor“ deaktiviert Batterie → öffnet Hauptschütze (HS) → Bordnetz spannungsfrei
- (5) Zellpacks mit Servicestecker
- (6) Klimatisierung: keine thermisch kritischen Betriebszustände Fahren/Laden
- (1) Orange markierten Hochvoltkabel: doppelte Isolation, Isolationsüberwachung
- Batt. oft geschützt im Fzg.-Boden



Schutzmaßnahmen HV-Batterie und -Bordnetz (Auswahl)

Begriff Hochvolt (HV) [ECE-R 100], nicht Hochspannung (Energietechnik $U_{DC} > 1,5 kV$, $U_{AC} > 1 kV$)

Gleichspannung $U_{DC} = 60 \dots 1500 V$

Wechselspannung $U_{AC} = 30 \dots 1000 V$

Andere Bordnetze

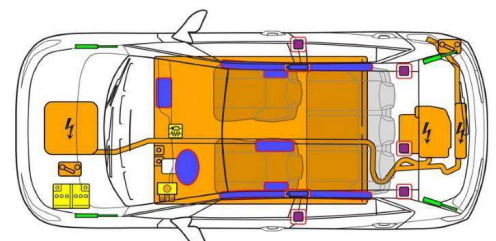
- Auch E-Fahrzeuge: 12 V (Pkw) und 24 V (Nfz) Bordnetz mit Bleibatterie, kleine Verbraucher z.B. Airbag
- Sowie 48 V Bordnetz (vor allem Hybridfahrzeuge, auch mit Li-Ionen-Batterie)



E-Antriebe mit Wechselstrommotor (3 orange Leitungen)

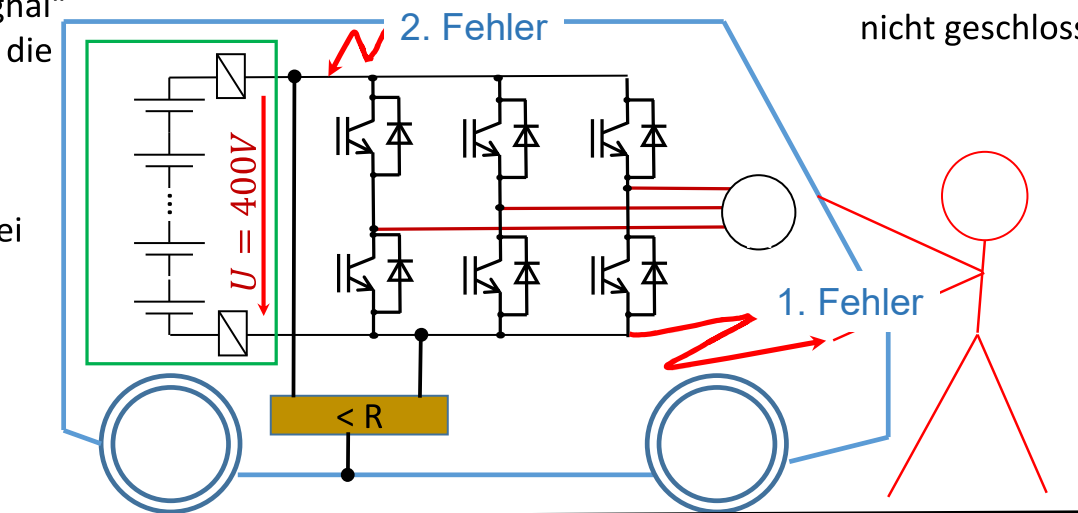
HV-Bordnetz

- Ist mit anderen Bordnetzen gekoppelt, aber galvanisch getrennt
- Fahrzeugchassis wird nicht als Rückleiter/Masse genutzt: doppelte Isolation
- Markierte HV-Bauteile (Aufkleber), orange HV-Leitungen, Rettungskarte



Schutzmaßnahmen und Fehlerfälle

Bei „Crashsignal“
deaktivieren die
Schütze die
Batterie:
Bordnetz
spannungsfrei



1. Iso-Fehler: Stromkreis
nicht geschlossen!

Isolationsüberwachung des HV-Kreises gegen das Chassis

- HV-Batterie/Bordnetz ist an beiden Polen elektrisch isoliert, permanente **Isolationsüberwachung** gegen leitendes „Chassis“, dessen metallischen/leitenden Komponenten sind über **Potentialausgleichsleitungen** verbunden sind. → Automatische Warnung bei Isolationsfehler.
- Ein erster **Isolationsfehler** zwischen HV-Leiter (egal ob + oder -) und leitenden Komponenten führt nicht zu einer Gefährdung.

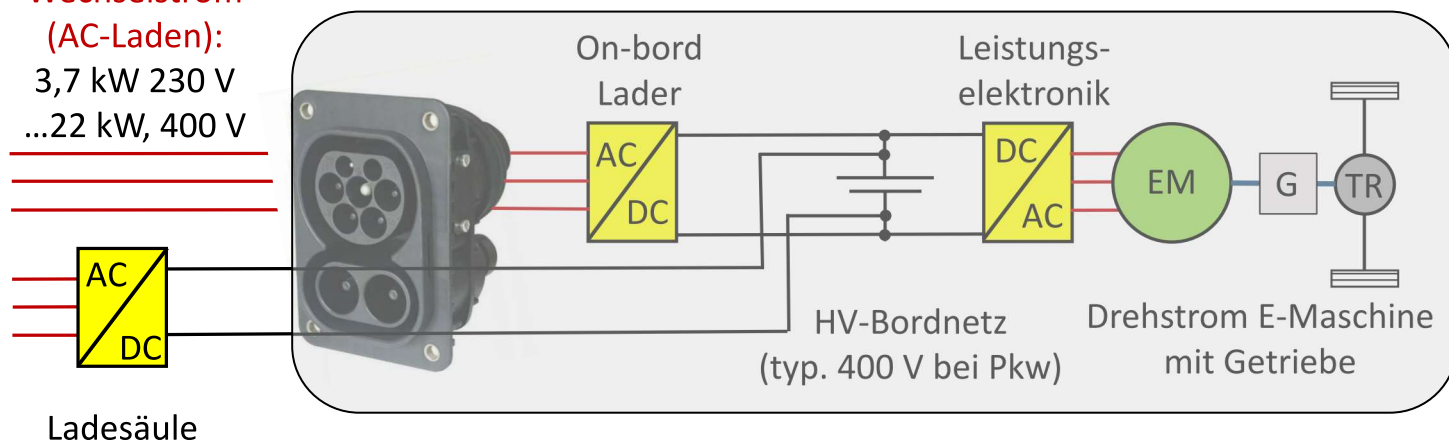
Batterieelektrischer Antriebstrang BEV (BEV...battery electric vehicle)

- Batterie arbeitet mit Gleichspannung
- Motorbetrieb mit Wechselspannung: Leistungselektronik DC → AC
- Generatorbetrieb (Rückspeisung beim Bremsen): Leistungselektronik AC → DC

Wechselstrom

(AC-Laden):

3,7 kW 230 V
...22 kW, 400 V



Ladesäule

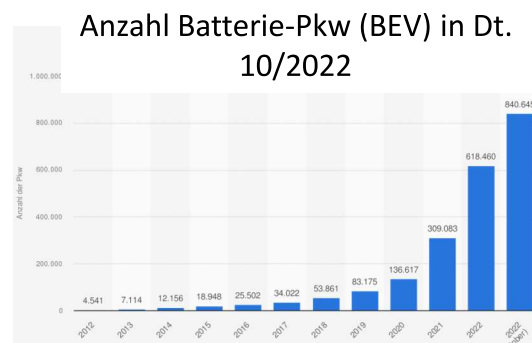
**Schnellladen mit
Gleichstrom (DC)**
Strom u. Spannung
veränderlich
Typ. 50 kW... 350 kW

hohe Ströme (>400 A) und
Verlustleistungen (>15 kW)
möglich: → **Flüssigkühlung** ab
ca. 200 kW, erhöhtes
Brandrisiko?



Zwischenfazit/Ausblick

- Li-Ionen-Batterien sehr leistungsfähig, aber empfindlich (Spannung, Temperatur, Stromhöhe)
- **hohes Sicherheitsniveau:** BMS überwachte Li-Ionen-Batterie, HV-Bordnetz mit Isolationsüberwachung
- Ausblick: andere/sicherere Zellchemie, Festkörperbatterie



[statista]

Aber auch **höheres Schadenspotential**

- BEV-Pkw: 840.600 HEV-Pkw: 745.000
- Trend: Batteriegröße wächst → höheres Spannungsniveau, el. Ladeleistungen und (Kurzschluss-) Ströme
- Auch für Experten: Batteriezustand/HV-Bordnetz von außen schwer/nicht einschätzbar



[goettinger-tageblatt.de]

4. Kernaussagen Masterarbeit: „Brandbekämpfung von Elektrofahrzeugen in Parkhäusern“, H. Kuntzsch, 2021

- Bislang relativ wenig Erfahrung beim Löschen von BEV/HEV
- Neue, noch nicht allgemein erprobte Technik
- Ansatz: Recherche und Interview (Fragebogen) von FW, die BEV/HEV gelöscht haben
- Betreuung: S. Martens (M.Sc. Abteilungsleiter Flughafenfeuerwehr Hannover-Langenhagen), S. Zipser (HTW DD)

Löschlanze der Reutlinger Feuerwehr Foto: Markus Nieham



41. Können Sie dieses Löschverfahren empfehlen? *

Markieren Sie nur ein Oval.

- Ja
 Nein
 keine eigenen praktischen Erfahrungen

42. Nennen Sie bitte kurz persönliche Vorteile aus Ihrer Sicht.

43. Nennen Sie bitte kurz persönliche Nachteile aus Ihrer Sicht.

FogNail mit Zugang über das Autodach



44. Können Sie dieses Löschverfahren empfehlen? *

Markieren Sie nur ein Oval.

- Ja
 Nein
 keine eigenen praktischen Erfahrungen

[Fragebogen, H. Kuntzsch]

Aussagen

- Statistisch brennen BEV deutlich seltener als Fahrzeuge mit konventionellen Antrieb
- Batteriebrand entwickelt sich langsam → Zeit zur Menschenrettung
- Die geladene Batterie trägt zum Gesamtheizwert lediglich 15-25 % bei. Der größte Anteil entfällt auf die brennbaren Kunststoffteile (Reifen, Polster, Karosserieteile usw.)
- Taktik/Maßnahmen der Feuerwehr ähnlich dem bei Verbrennerfahrzeugen, **effektivstes Löschmittel ist Wasser**, teure Löschwasserentsorgung
 - Alternativen/Ergänzungen:
 - Löschdecken, Wasserlanzen* in Batterie bzw. für Fzg.-Unterboden (Kühlung)
 - Löschcontainer*
- **Besonders ungünstig: Hybridfahrzeuge.** Sie kombinieren elektrischen Gefahren und Gefahr durch auslaufenden Kraftstoff (entzündet sich, schnelle Brandausbreitung)
- Im Zweifelsfall Fzg. „Ausbrennen lassen“, da Fzg. (wie beim Verbrenner) i.d.R. ein Totalschaden ist
- Brand in Parkhäusern/Tiefgaragen: schwieriges Szenario (Zufahrt Löschfahrzeug, Ausbreitung auf Nachbarfahrzeuge,
- Konkreter Ansatz Aufgabenstellung: im Brandfall Fzg. mit Löschdecke versehen, mit Hubbrille aus Parkhaus schleppen abbrennen lassen oder Löschcontainer

*(Anm.: gem. Dr. D. Schneider, LBD des Freistaates Sachsen, ist der Einsatz dieser Mittel aus Gründen des Unfallschutzes und des Versicherungsrechtes in Sachsen unzulässig.)