

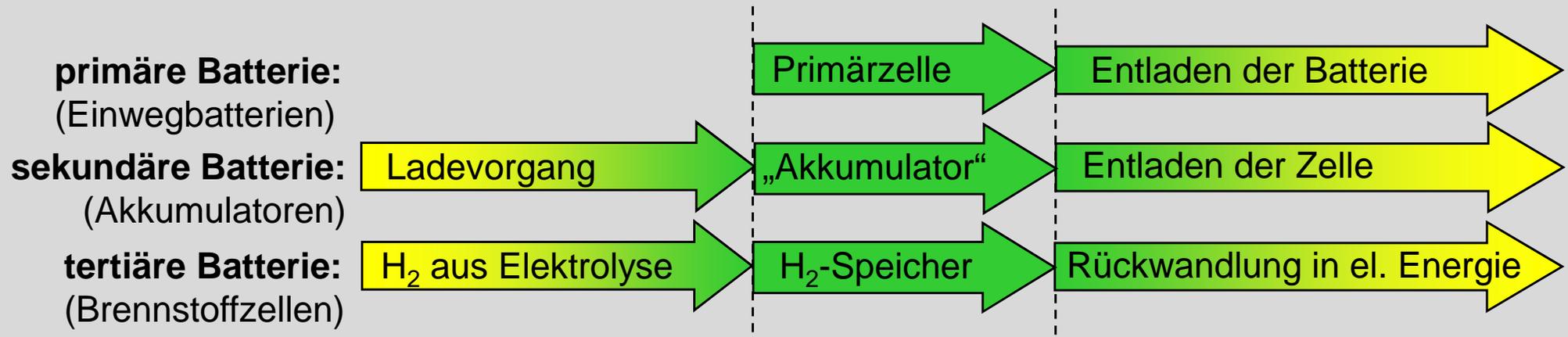
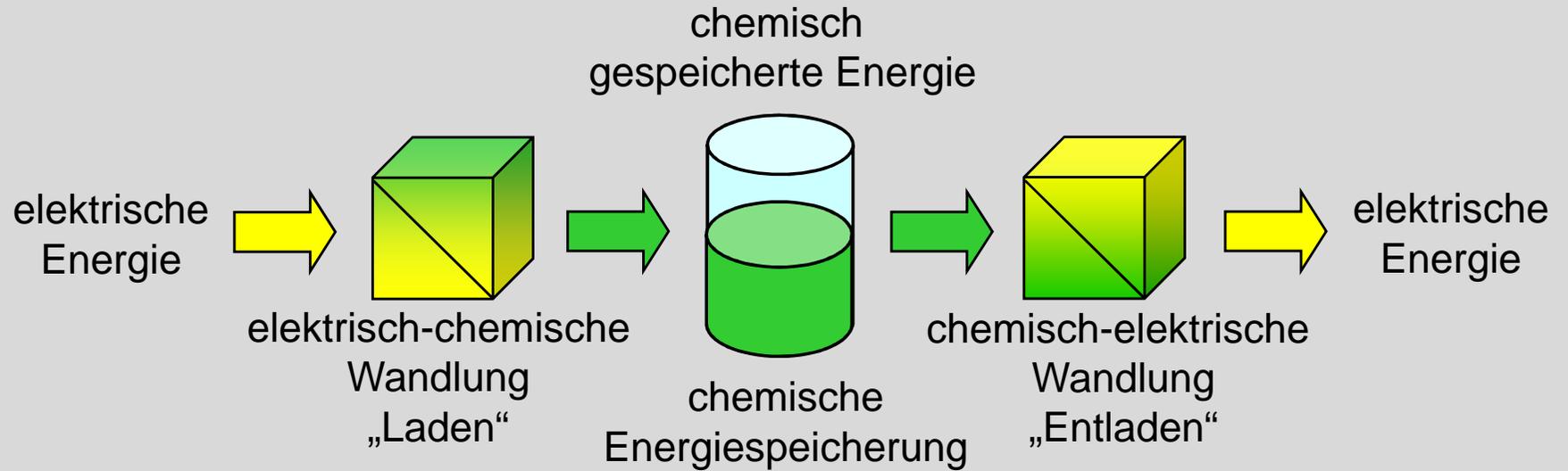
Batteriesysteme

André Weber

Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik IWE
Adenauerring 20b, Geb. 50.40 (FZU), Raum 314
phone: 0721/608-7572, fax: 0721/608-7492
andre.weber@kit.edu
www.iwe.kit.edu

Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik





Hybrid-Kraftfahrzeug

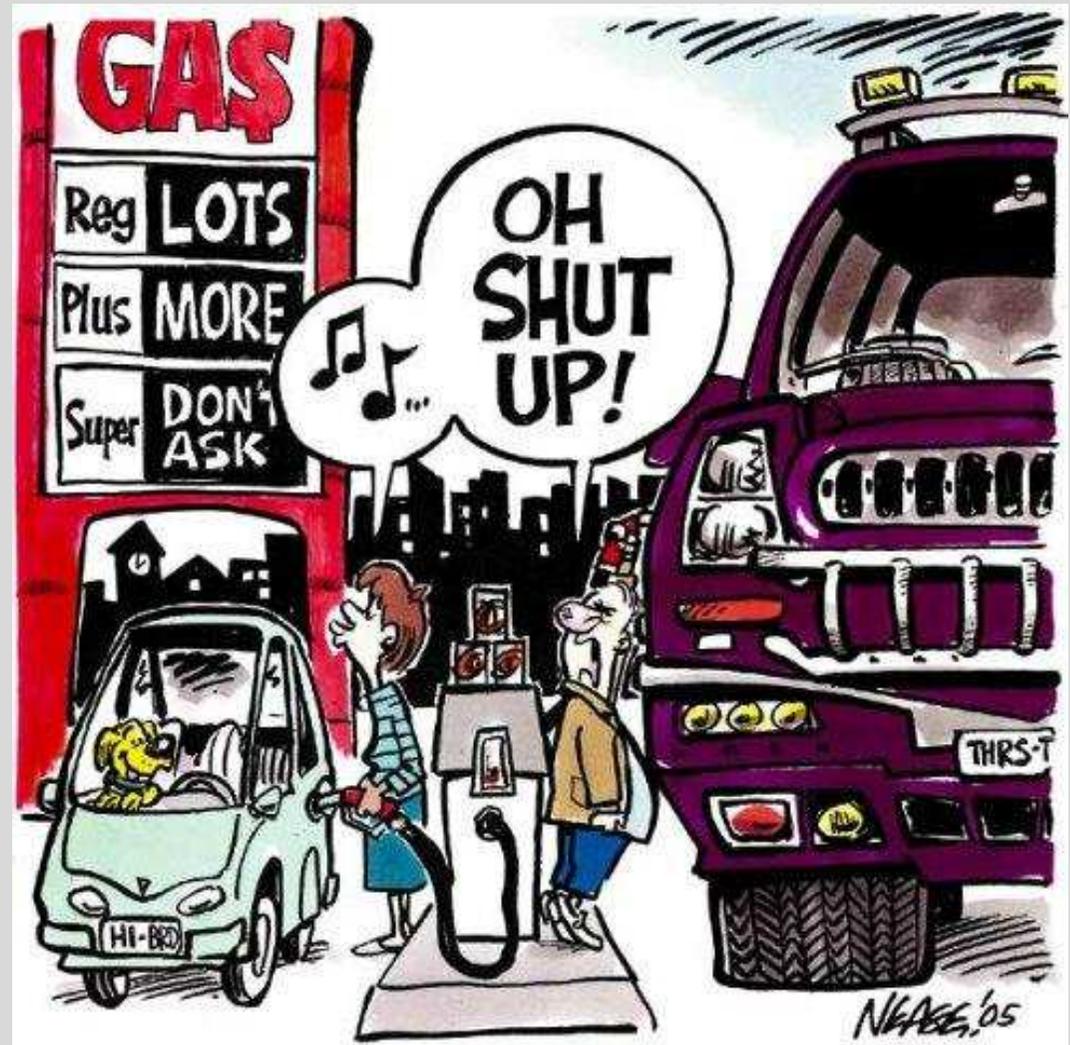
...mindestens

- zwei verschiedene Energiewandler
...und...
- zwei verschiedene
Energiespeichersysteme
im Fahrzeug zum Zweck des Antriebs
vorhanden.

Hybrid-Elektrofahrzeug

Hybridfahrzeug, das seine
Energie/Leistung aus

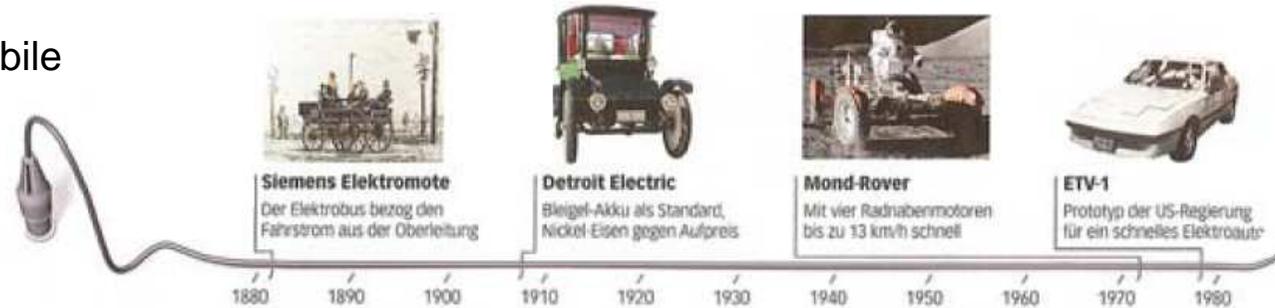
- *einem* Betriebskraftstoff
...und...
- *einer* Speichereinrichtung für
elektrische Energie/Leistung
bezieht (Batterie oder Brennstoffzelle).



Elektromobilität

Geschichte der Elektroautos (EV Electric Vehicles)

Die ersten Automobile waren elektrisch!



90er Jahre: Mehrere tausend Fahrzeuge auf dem Markt!



2010: Neue Rahmenbedingungen!



Elektromobilität

Geschichte der Elektroautos (GM)

1966 GM Electrovan



1966

1972



1972 Lunar Roving Vehicle

New materials
for FC membranes

1990



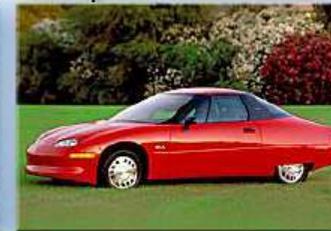
1990 Opel Impuls

2000 Opel HydroGen1



1996

2000



1996-1999 GM EV1

2007 Opel HydroGen4



2007

2010



2010 Chevrolet Volt
2011 Opel Ampera

Space technology

- Low performance
- Huge systems
- Lack of suitable materials

E-hype & ZEV mandate

- Limited range
- Long recharging time
- Range anxiety
- Poor battery life
- Too expensive

E-hype & Li-ion batteries

GM APCE

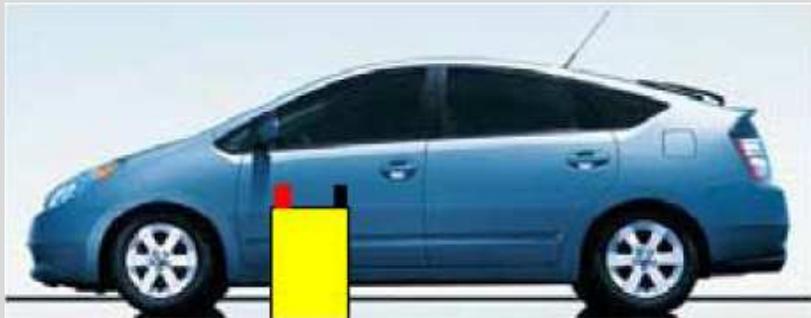
Elektromobilität: Konzeptfahrzeug von Volkswagen (mit Lithium-Ionen Traktionsbatterie)



Der EU-Standard des neuen Steckersystems (7-polig, 400V, 63A) wurde April 2009 beschlossen.

Elektromobilität

Typen von Hybridfahrzeugen



Hybridfahrzeug (HEV)

Speicher ca. 1 kWh, Ladung nur während Fahrt, Treibstoffeinsparung max. 20%.



Plug-In Hybridfahrzeug (PHEV)

Speicher 5-10 kWh, Ladung aus dem Netz, 50-70 km Reichweite ohne Treibstoff, volle Reichweite, volle Leistungsfähigkeit.



Elektrofahrzeug (EV)

Speicher 15-40 kWh, Ladung aus dem Netz, 100 - 300 km Reichweite ohne Treibstoff.

Hybridfahrzeuge

Betriebsmodi bei Hybridfahrzeugen

„Boosting“

Verbrennungsmotor und E-Maschine arbeiten beim Beschleunigen zusammen. Antriebsdrehmomente addieren sich, der Verbrennungsmotor kann ohne Einbußen im Beschleunigungsverhalten leistungsschwächer gewählt werden.

Elektrisches Fahren (Vollhybrid bzw. EV)

Antrieb nur durch den Elektromotor, emissionslose und leise Fortbewegung.

Generatorbetrieb

Der Verbrennungsmotor wird in einem hohen, betriebsgünstigen Drehmomentbereich betrieben (Lastpunktanhebung), die E-Maschine arbeitet im Generatorbetrieb. Die nicht zur Fortbewegung benötigte Motorleistung wird zum Laden der Traktionsbatterie verwendet.

Rekuperation

Bremsen mittels E-Maschine im Generatorbetrieb Traktionsbatterie wird geladen.

Segeln

Verbrennungsmotor und E-Maschine inaktiv.

Start/Stopp-Funktion

Automatisches Abschalten des Verbrennungsmotors bei Stillstand des Fahrzeuges, selbstständiger Start des Motors bei Freigabe der Bremspedals vor erneutem Anfahren.

• Micro-Hybrid

- E-Maschine: 2-3 kW
- Betriebsspannung 12V.
- einfache Integration in bestehende Fahrzeugmodelle
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb
- mögliche Verbrauchseinsparung: bis 10%

• Mild-Hybrid

- E-Maschine: 10-15 kW
- Betriebsspannung: 42-150V
- mögliche Verbrauchseinsparung: bis 20%
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb, „Boosting“, Rekuperieren

• Voll-Hybrid (& Power-Hybrid)

- E-Maschine: >15 kW (>50kW)
- Betriebsspannung: >120V.
- Betriebsmodi: Start/Stopp, Generatorbetrieb, „Boosting“, Rekuperieren, elektr. Fahren
- Hybridanordnung: z.B. Parallelhybrid
- mögliche Verbrauchseinsparung: >20%



Hybridfahrzeuge

Beispiele



Toyota

Prius II

Mercedes-Benz

S 400 HYBRID

Mercedes-Benz

ML 450 HYBRID

Motor

57 kW / 78 PS

205 kW / 279 PS

205 kW / 279 PS

max. Drehmoment

115 Nm

338 Nm

338 Nm

E-Motor

1x / k.A.

1x / 160 Nm

2x / 260+270 Nm

Traktionsbatterie

Ni-MH, prismatisch

Li-Ionen, zylindrisch

Li-Ionen, zylindrisch

Verbrauch* (komb.)

4,3 l/100 km

7,9 l/100 km

7,7 l/100 km

CO₂-Emission

104 g/km

190 g/km

185 g/km

Markteinführung (D)

2003*

2009

2009

* Werksangaben nach NEFZ-Zyklus ** Prius I 1997 (J) 2000 (D), Prius II (2003), Prius III (2009)

NiMH-Batterie im Prius II

28 Module mit 6 Zellen
(168 Zellen @ 1,2V = 201,6 V)

Zelltyp: prismatisch

Nennkapazität: 6,5 Ah

Gewicht: 39 kg

Energie: 1,3 kWh

Energiedichte: 41 Wh/kg

Spitzenleistung: 40 kW

Leistungsdichte: 1300 W/kg

Elektrische Reichweite: 3 km

Hersteller: Panasonic

Preis Batterie: ~2500€ (7/2008)



Elektromobilität

Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera

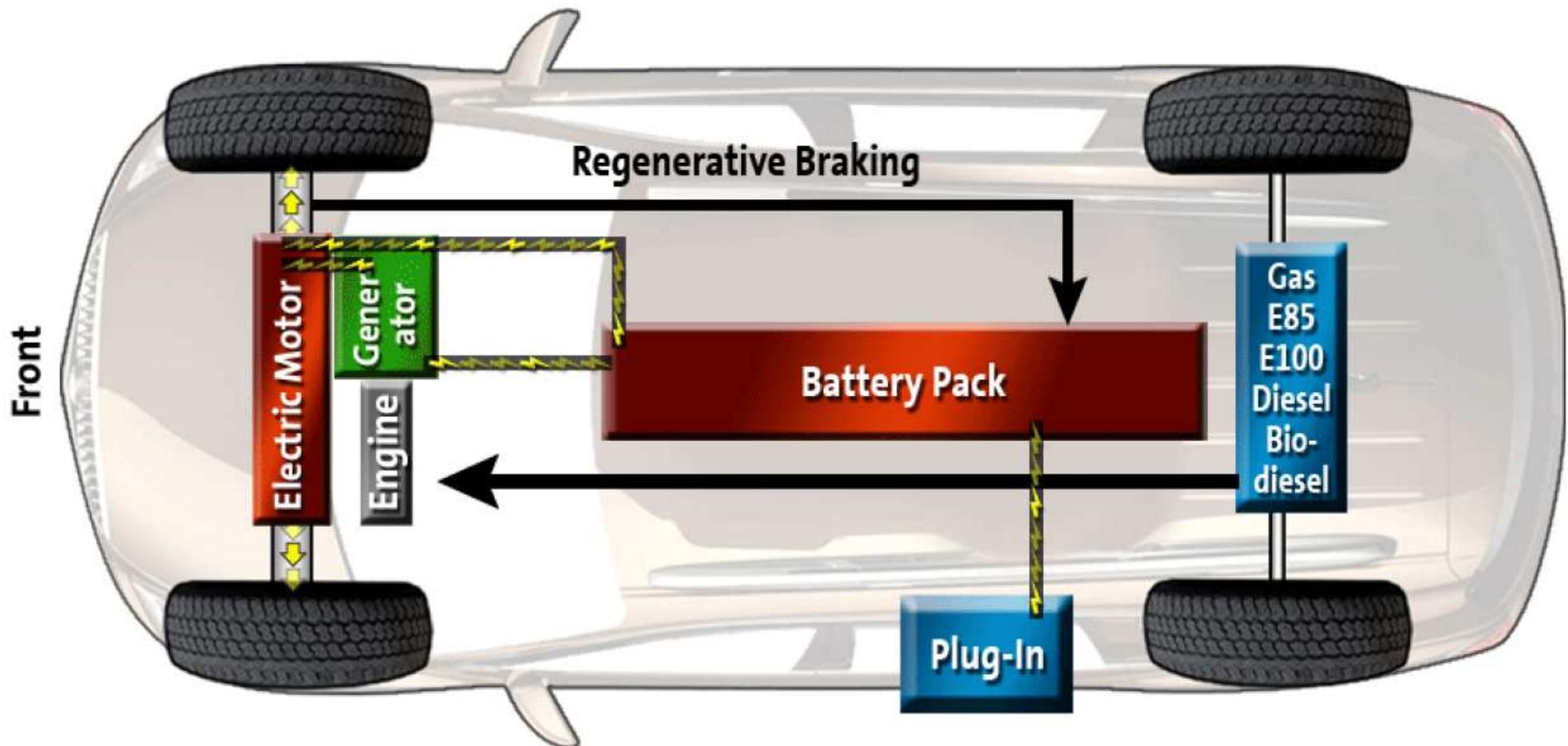
Max. power:	111 kW
Max. torque:	370 Nm
Top speed:	160 km/h
Acceleration (0-100 km/h):	<10 s
Energy content (battery):	16 kWh
Charging time:	4 – 6h @ 230 V
Range (battery-electric):	40 – 80 km
(total):	>500 km



GM APCE

Elektromobilität

Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera



Elektromobilität

Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera

- Li-Ion pouch cells (288)
- Energy content: 16 kWh
- Charging time: 4 - 6 h @ 230 V, 16 A
- Max. discharge power: > 111 kW
- Nominal voltage: 370 V
- Liquid cooling
- System weight: 198 kg
- Warranty: 8 years / 160,000 km

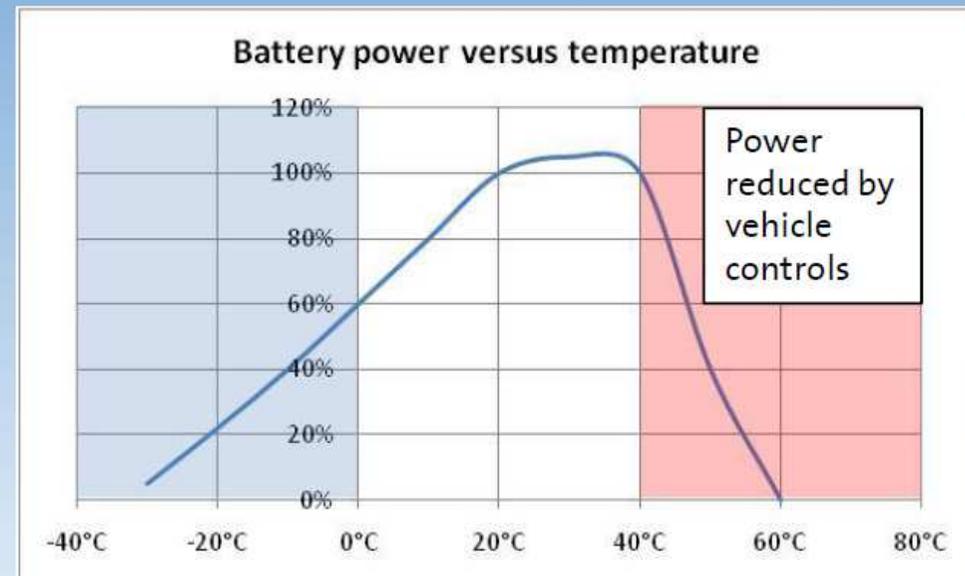
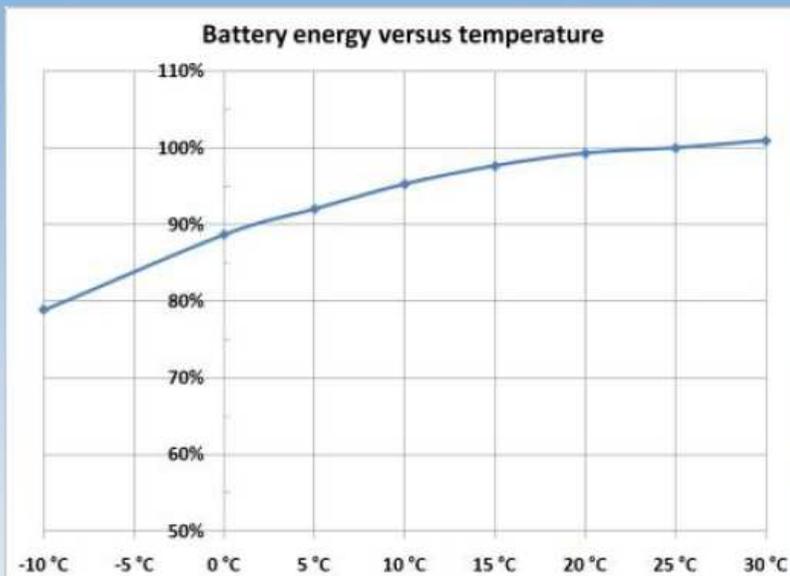


GM APCE

Elektromobilität

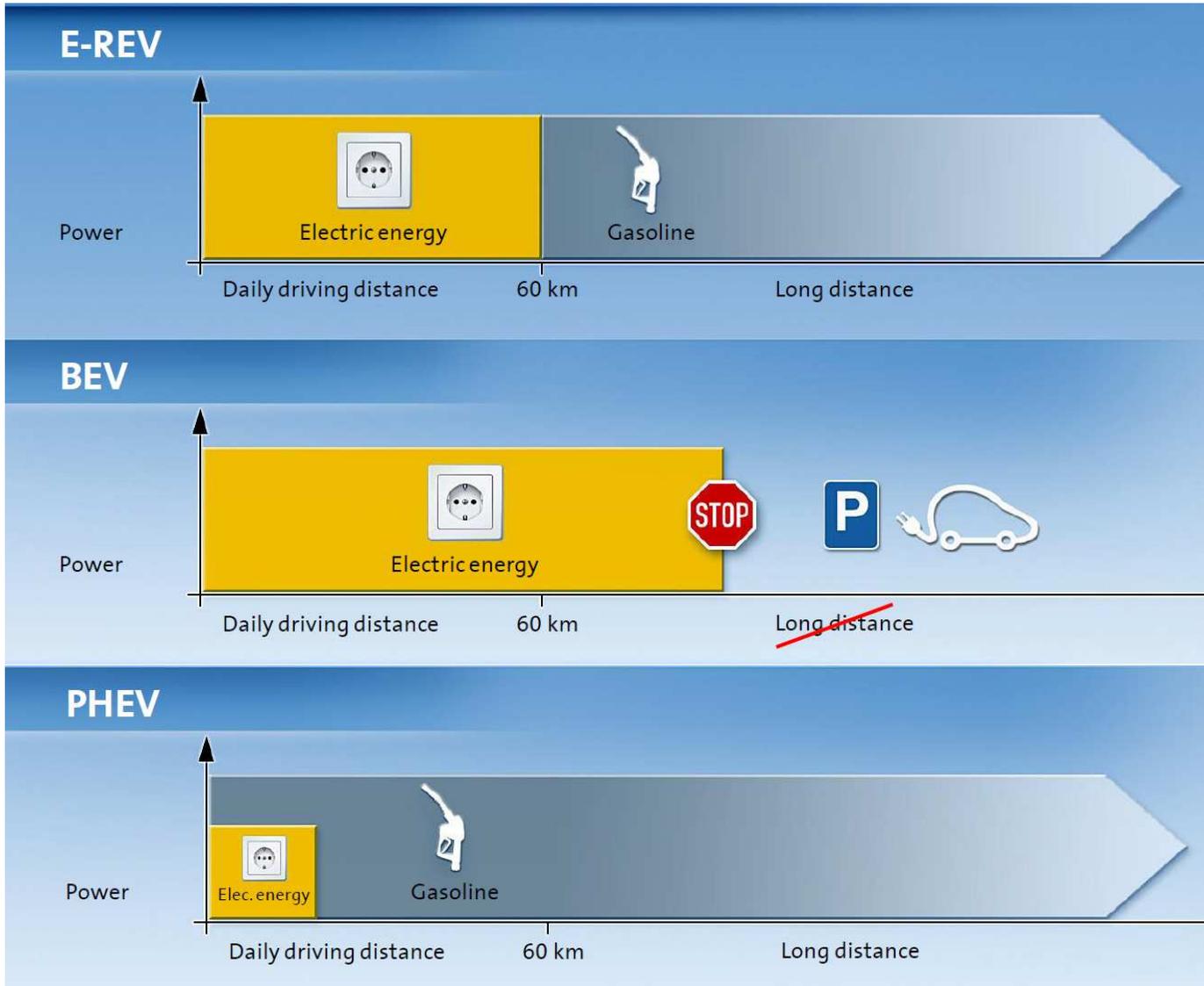
Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera

- Available energy is slightly reduced at low temperatures
- Full power is only available in a small temperature band
 - At low temperatures, power is reduced
 - Below 0°C, there is the risk of Li-plating during charging
 - High temperatures increase the aging of the battery => reduce power to prevent overheating



Elektromobilität

Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera



Elektromobilität

Hybridfahrzeuge – Beispiel Opel Ampera

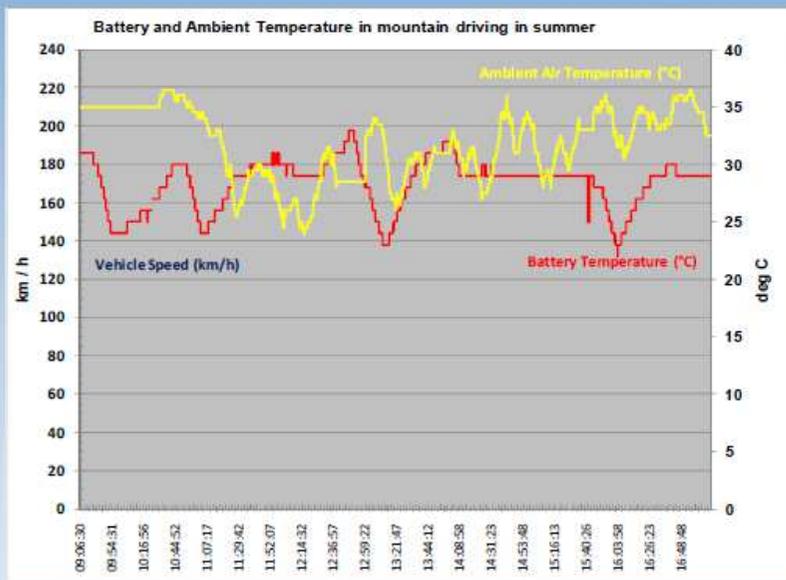


Cooling fin concept enables effective heat exchange to/from Lithium Ion pouch cells

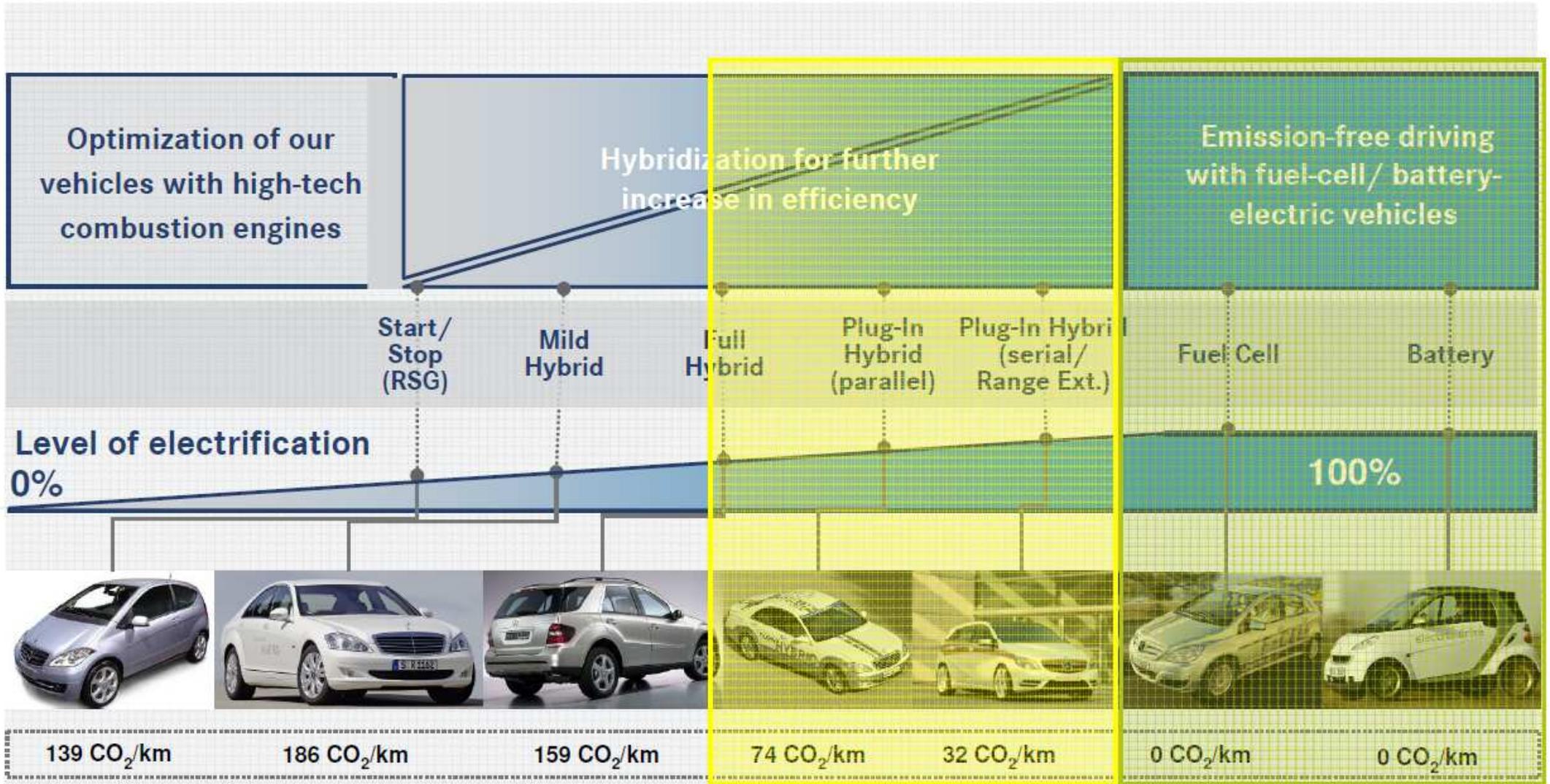
Thermal System Concept



Efficient heat transport and equal temperature distribution



Daimler Roadmap to sustainable Mobility



Mild-Hybrid (Start Stopp-Funktion)

E-Motor: 15 kW

V-Motor: V6, 205 kW

Beschleunigung: 7,2 s (0-100 km/h)

Mehrgewicht (Hybrid): 75 kg

Verbrauch: 7,9 l (Einsparung 2,2 l
gegenüber Vorgängermodell)

CO₂-Emission: 190 g/km

Traktionsbatterie:

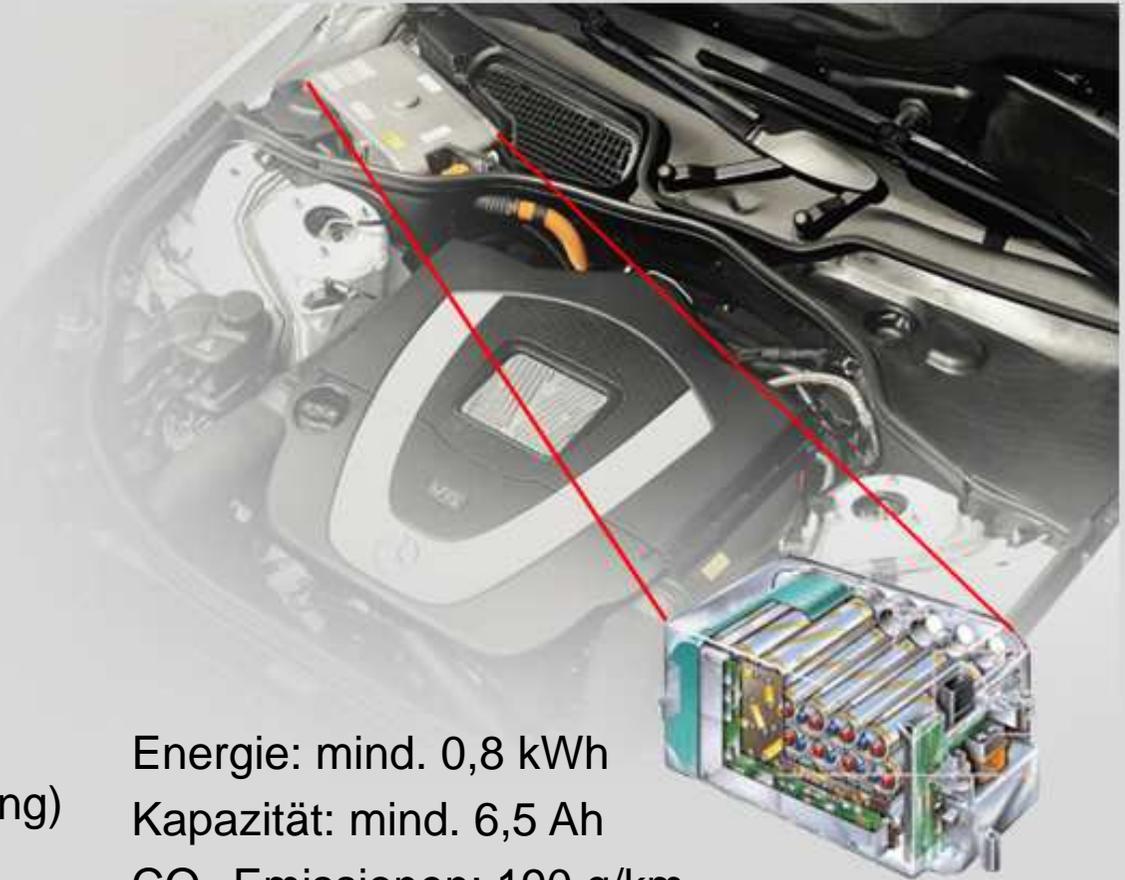
Li-Ionen, zylindrisch

35 Zellen, 1 Zellblock (Zellen + Kühlung)

Kühlung über Fahrzeugklimaanlage

Nennspannung: 126 V (87,5 V bis 144 V)

Leistung 19 kW/10 s (EoL 50% SOC)



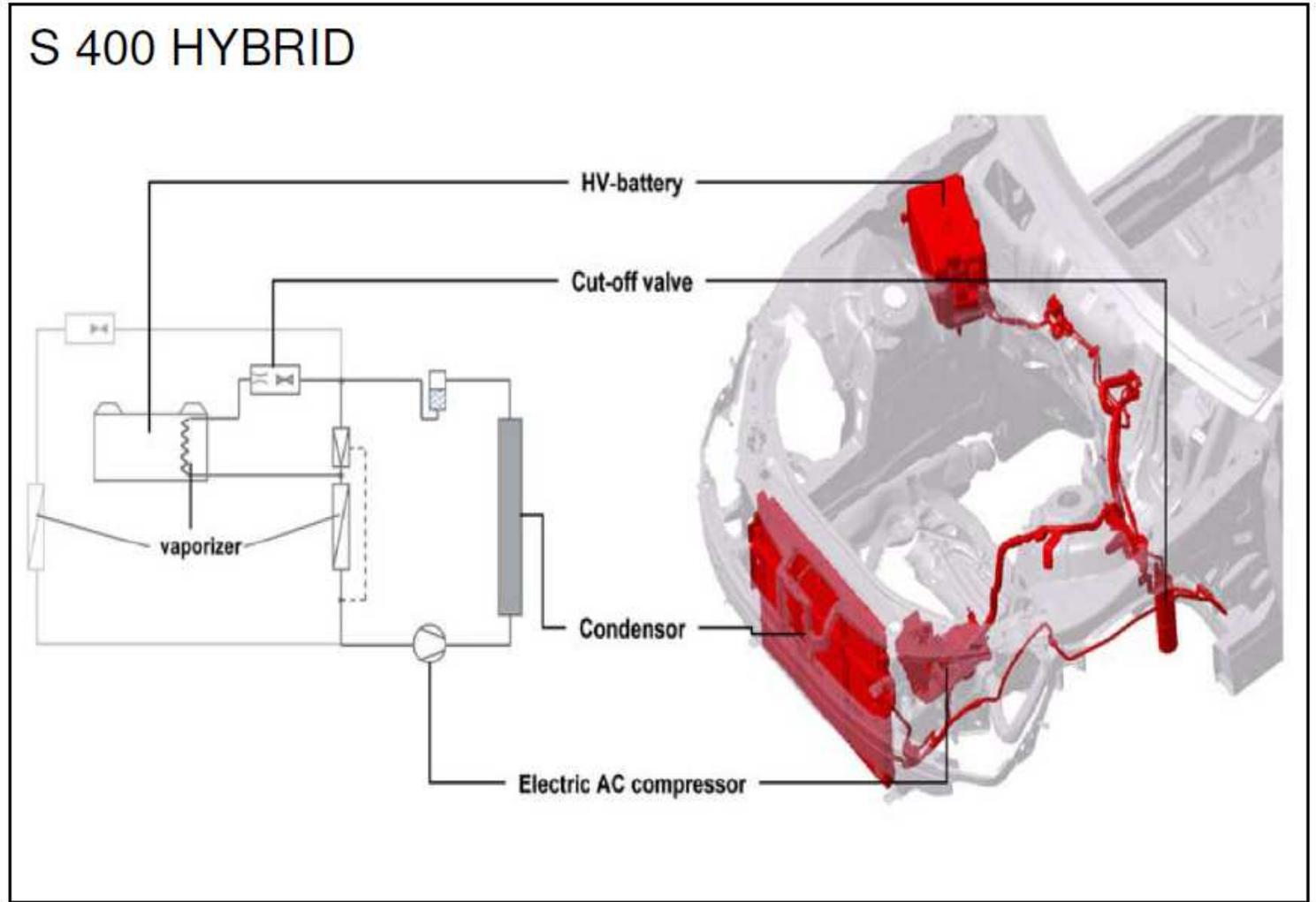
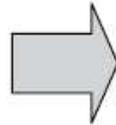
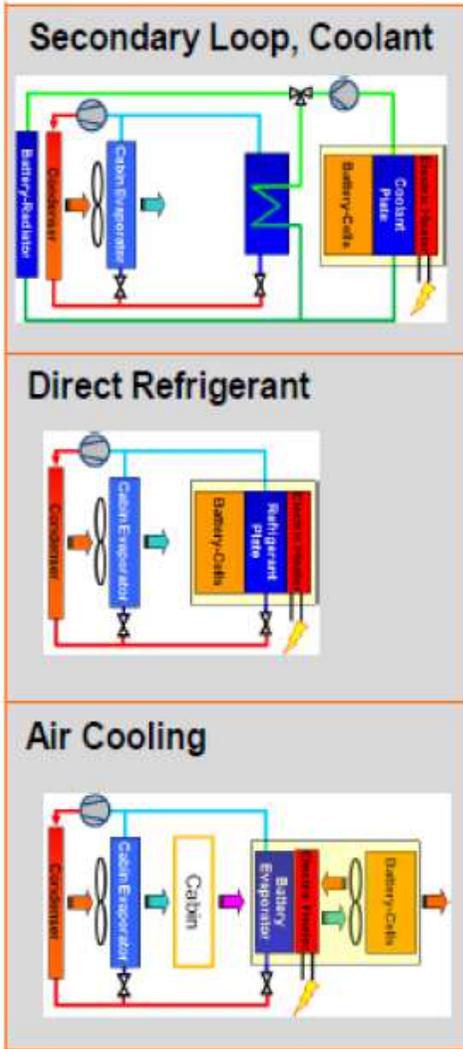
Energie: mind. 0,8 kWh

Kapazität: mind. 6,5 Ah

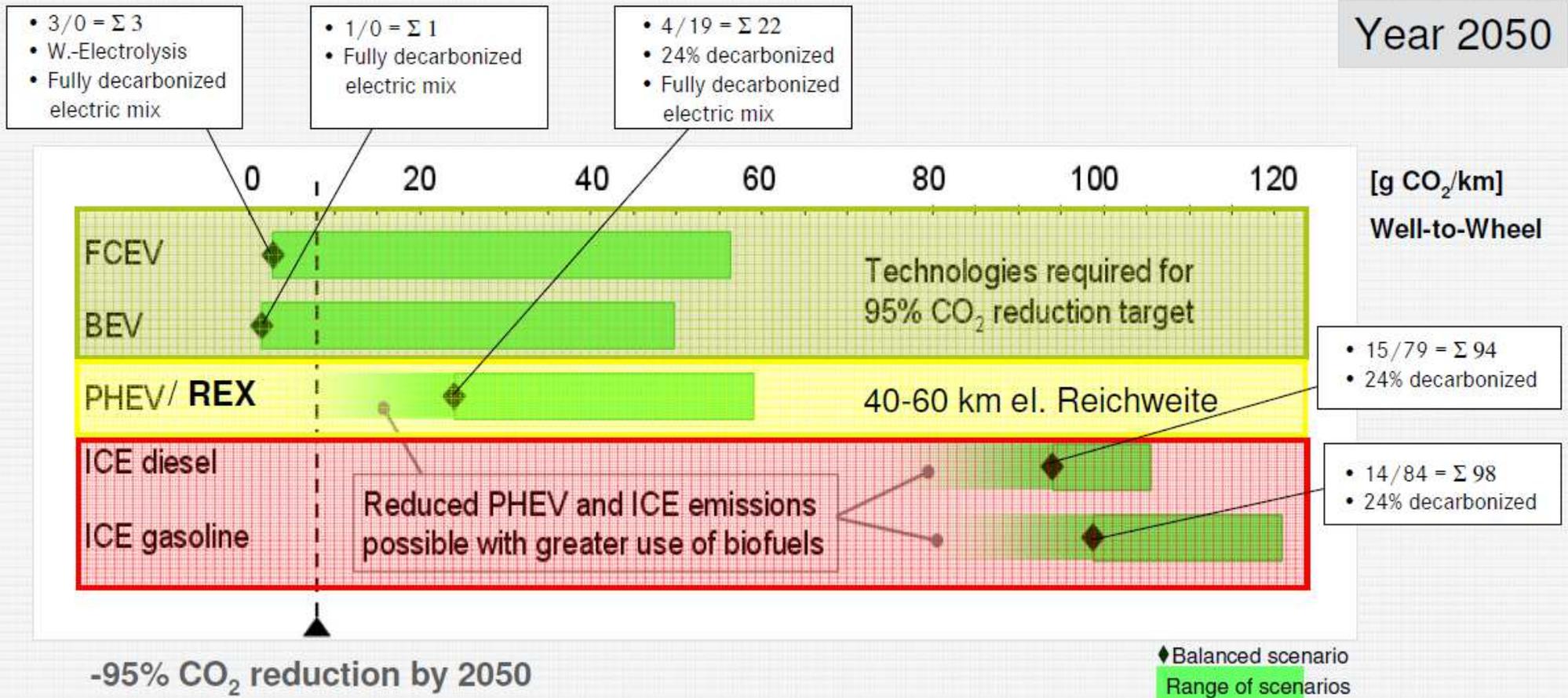
CO₂-Emissionen: 190 g/km

Lebensdauer: 10 Jahre (Ø Temp: 40°C)

Betriebstemperatur -25°C – +45°C



CO₂-Emmissions* for various Technologies

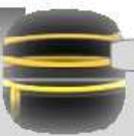
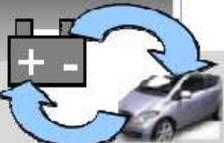


Source: „A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles“

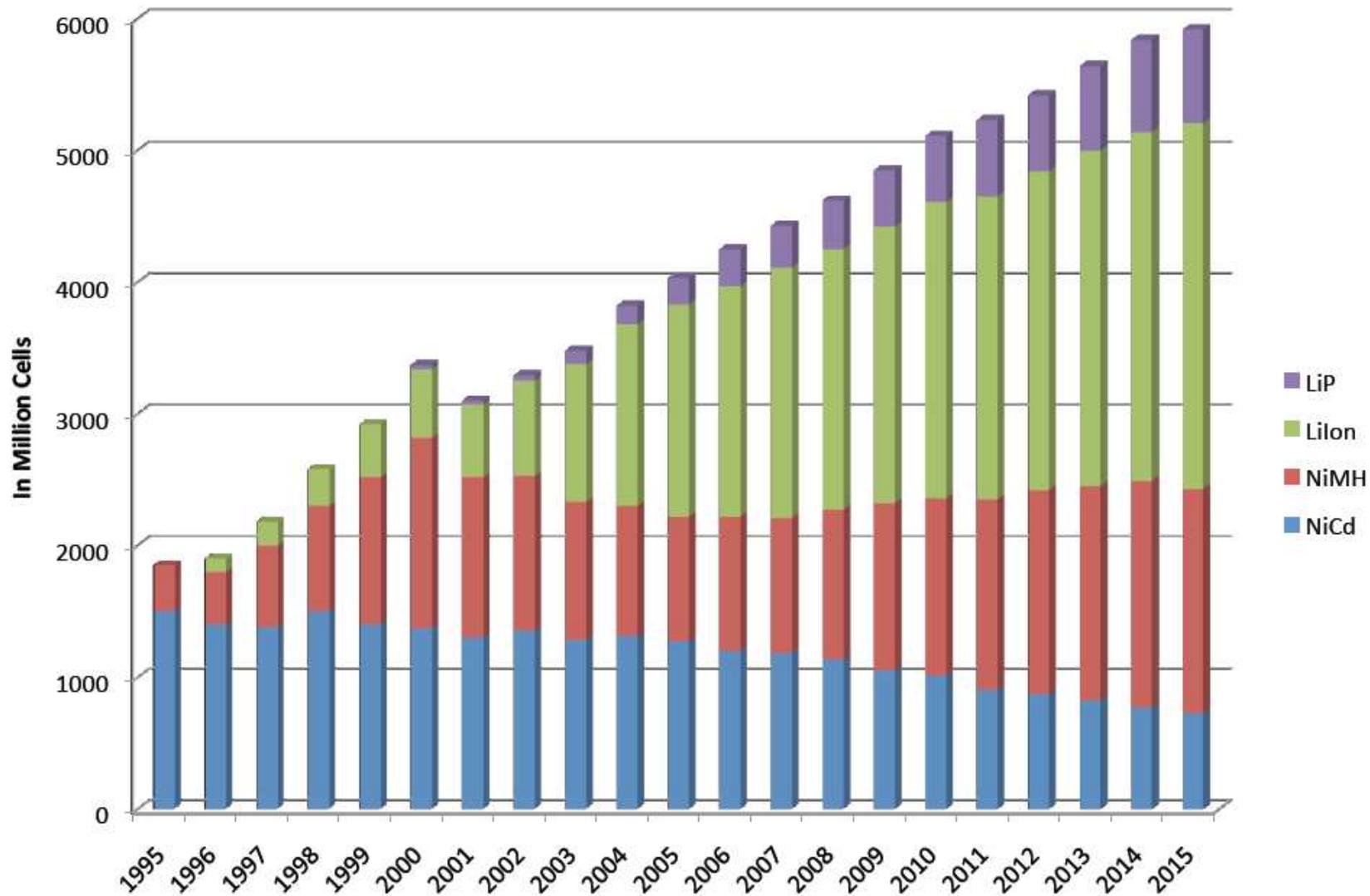
- PHEVs/REX are attractive solutions to act as bridging technologies
- In the long run FCEVs and BEVs are the most promising options to significantly reduce CO₂

*well-to wheel, C-D-segment, NEDC)

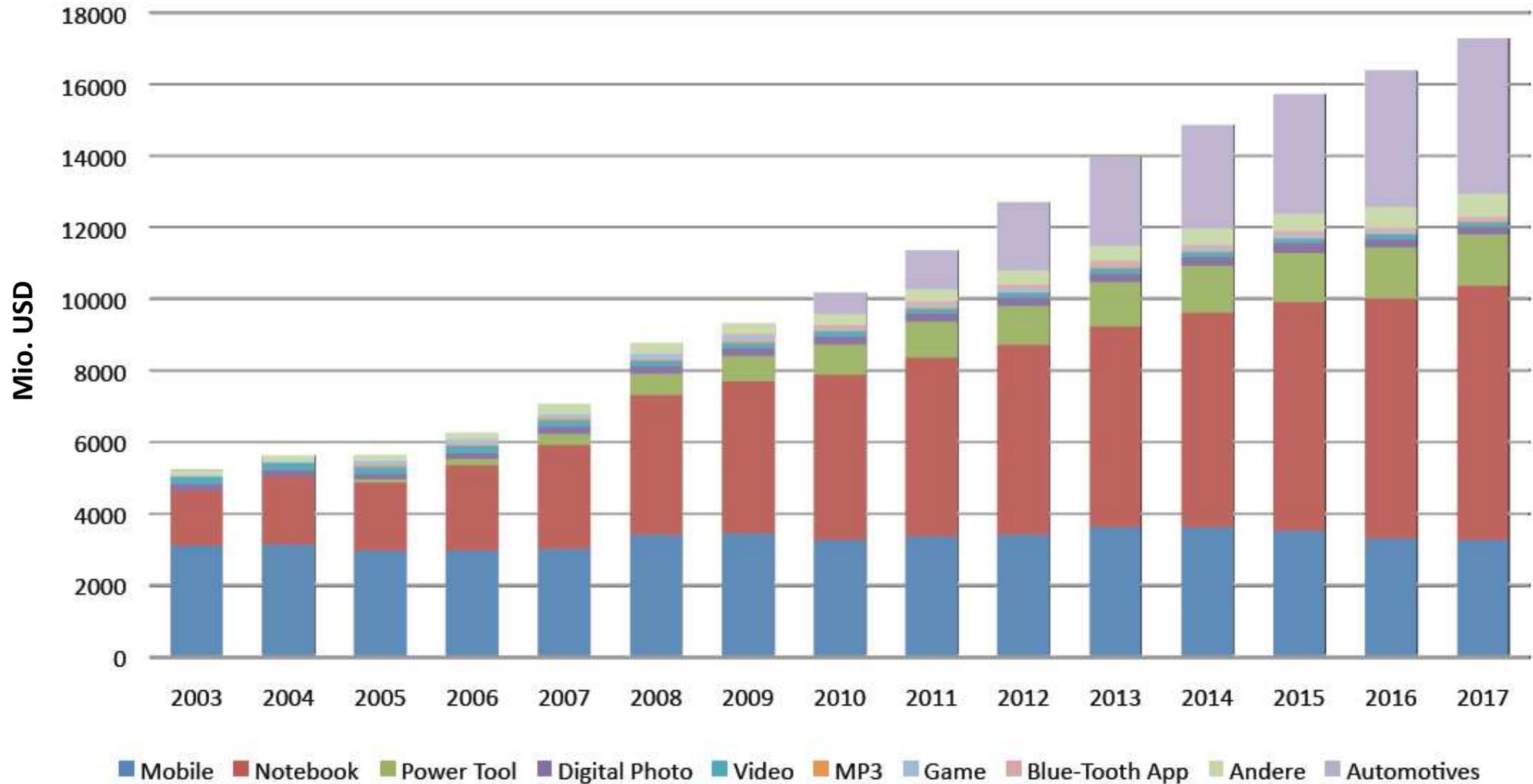
Charging Infrastructure

	Max. charging capacity	Charge time for 20 kWh	Features
Socket 	1-phase: 3.7 – 11 kW 3-phase: 3.7 – 11 kW	1.8 – 5.5 h	+ Simple handling installation costs are low to nothing, - Garage/bay required, no communication
Wall box 	1-phase: 3.7 – 22 kW 3-phase: 3.7 – 22 kW	0.9 – 5.5 h	+ Simple installation, optional: Measurement, communication and cost settlement software, - Generally limited protection from vandalism and access
Charging post 	1-phase: 3.7 – 44 kW 3-phase: 3.7 – 44 kW > 44 kW	0.5 – 5.5 h < 0.5 h	+ Function design same as for wall box. Requirements with respect to vandalism, access and cost settlement > 44 kW (AC) in 2014-2017, > 100 kW (DC) in 2020 - Increased installation and connection costs - High charging capacity has an impact of the service life of the battery
Induct. charging 	1-phase: 3.7 – 11 kW 3-phase: 3.7 – 11 kW	1.8 – 5.5 h	+ No user intervention, low wear, vandalism-safe - Charging capacity, efficiency, positioning, shielding
Battery replacement 	≈ 400 kW	0.05 hours (3 min.)	- Standards required for batteries, installation location, Determining the product liability, robust/durable connectors
For comparison: Conventional filling station (gasoline)			
	≈ 20,000 kW	20 kWh ≈ 2.2 l 3.4 sec	+ Approx. 14,800 in Germany with 88,000 fuel pumps (avg. 6/filling station) Avg. distance 16 km/filling station

Battery Market

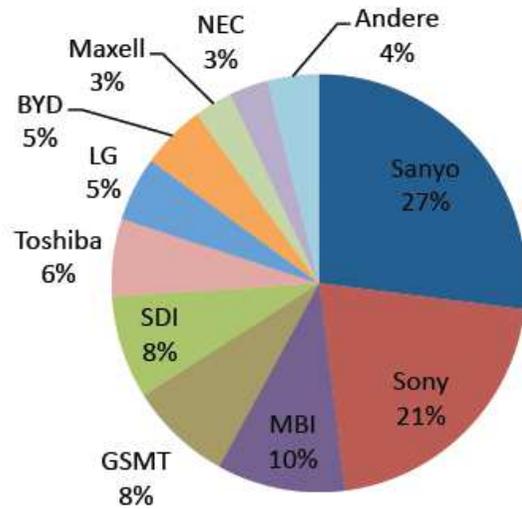


Battery Market Future LIB Packs

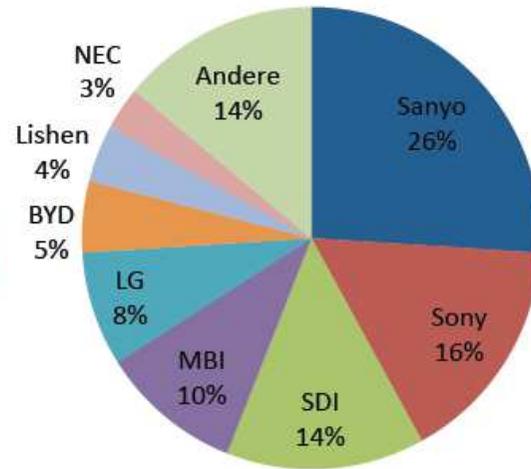


Battery Market Market Share

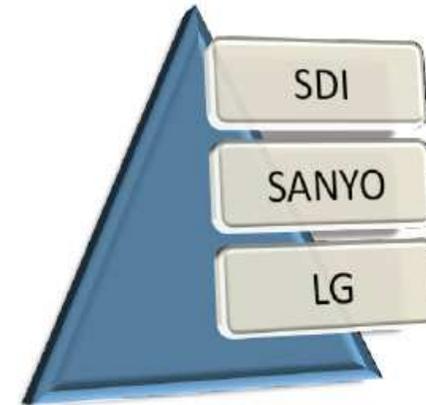
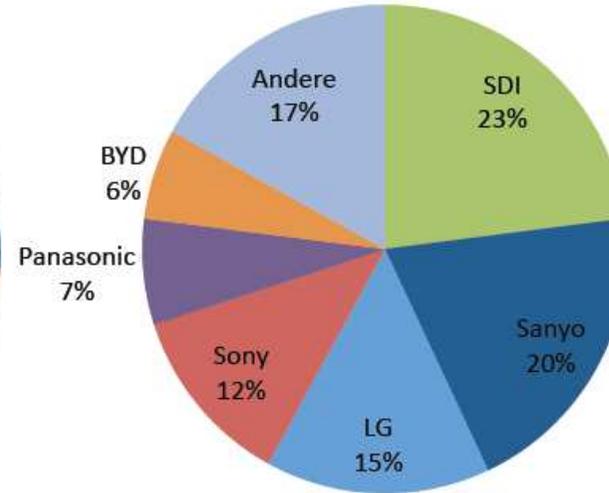
Market Share 2002



Market Share 2007



Market share 2011



Key Performance Parameters of Battery Systems

Volumetric Energy [Wh/ltr.]

Gravimetric Energy [Wh/kg]

Peak-Power* [kW/ltr.]

3

Quality
[Failures in % as
Mean Value per
Year over 10 Years]

Safety
[EUCAR Level]

1

--- Targets HEV

--- Targets EV

Cost [EUR/kWh]

2

Cold Crank Power** [W/kg]

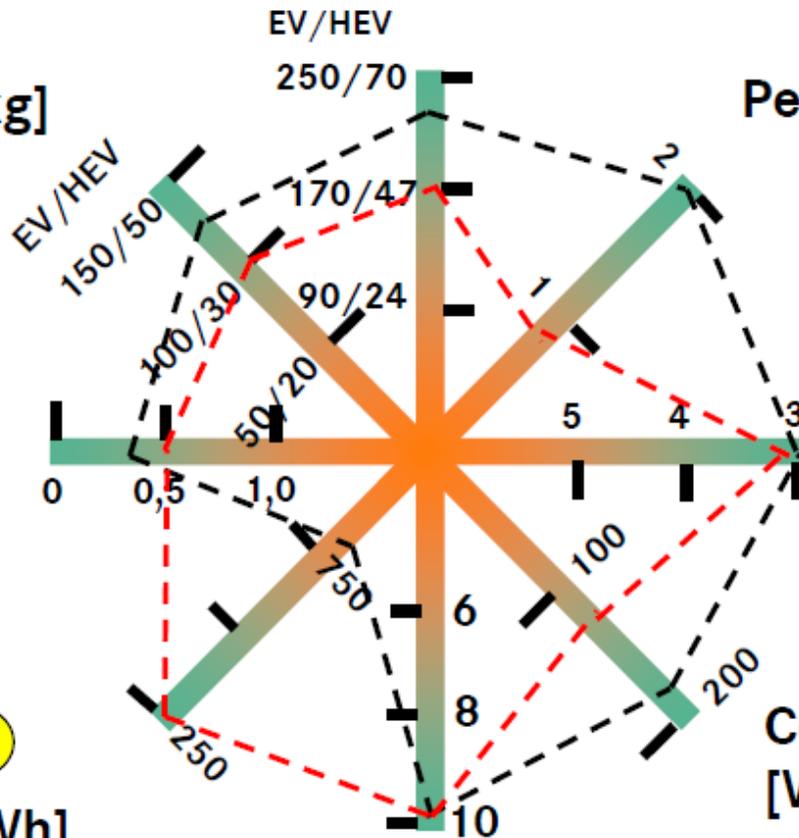
3

Lifetime [years]

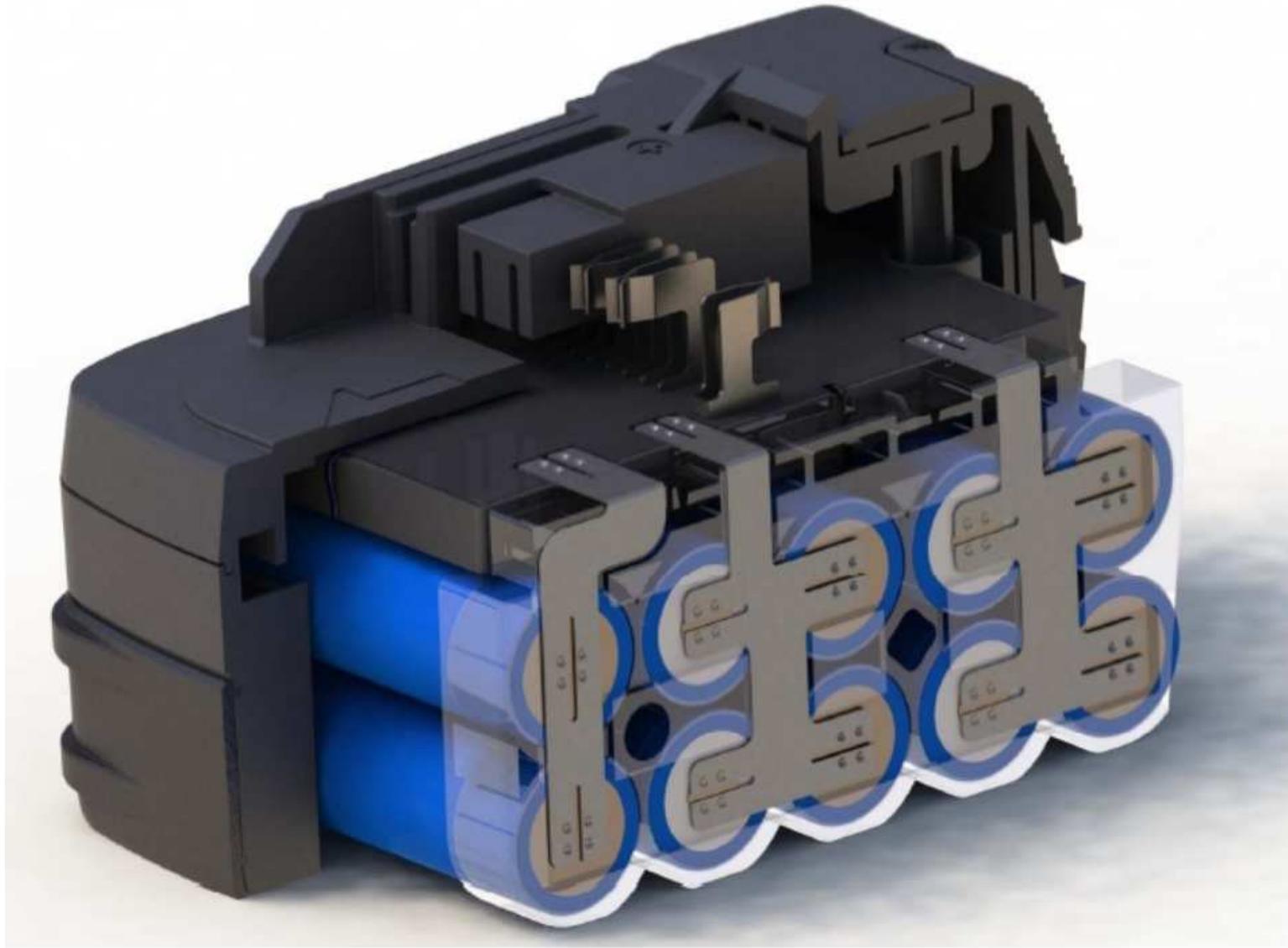
2

* @ BoL, 50% SoC, T = +25 °C, 10s

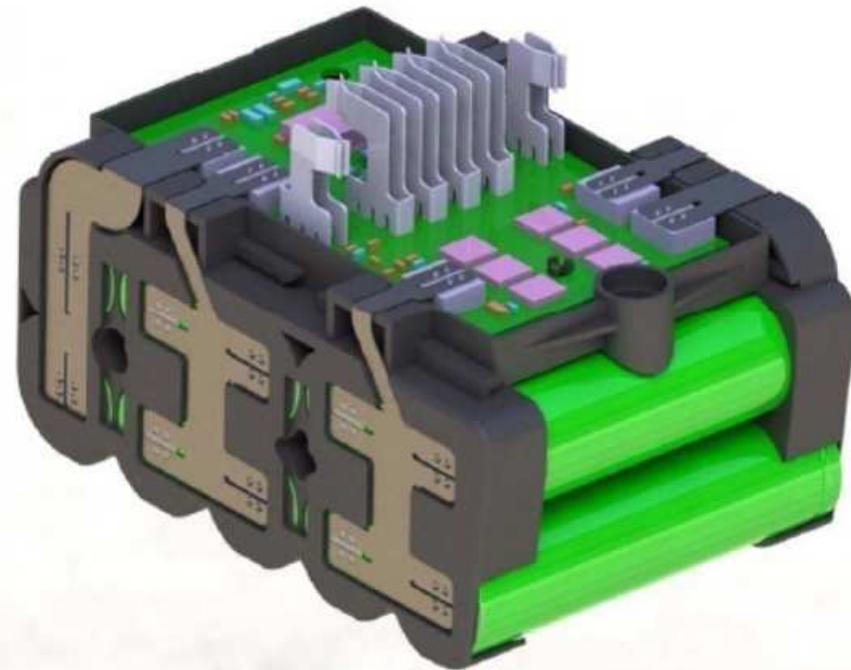
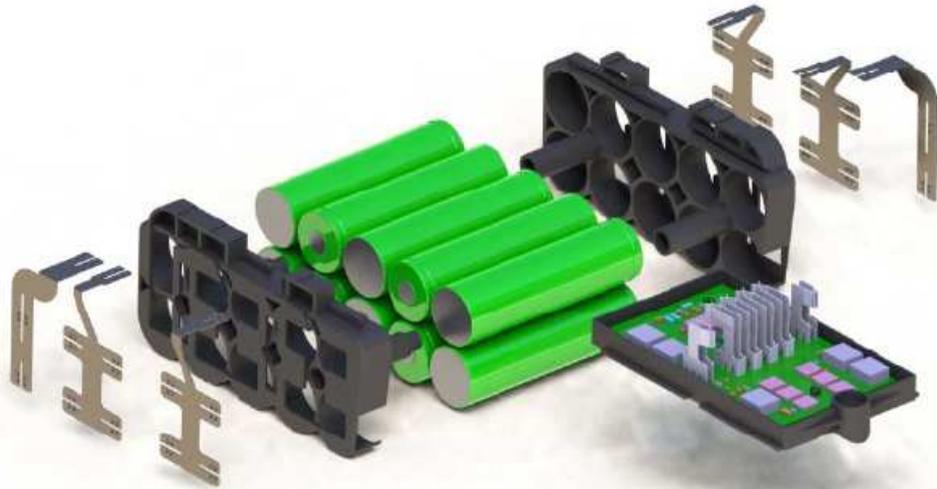
** @ BoL, 50% SoC, T = -25 °C



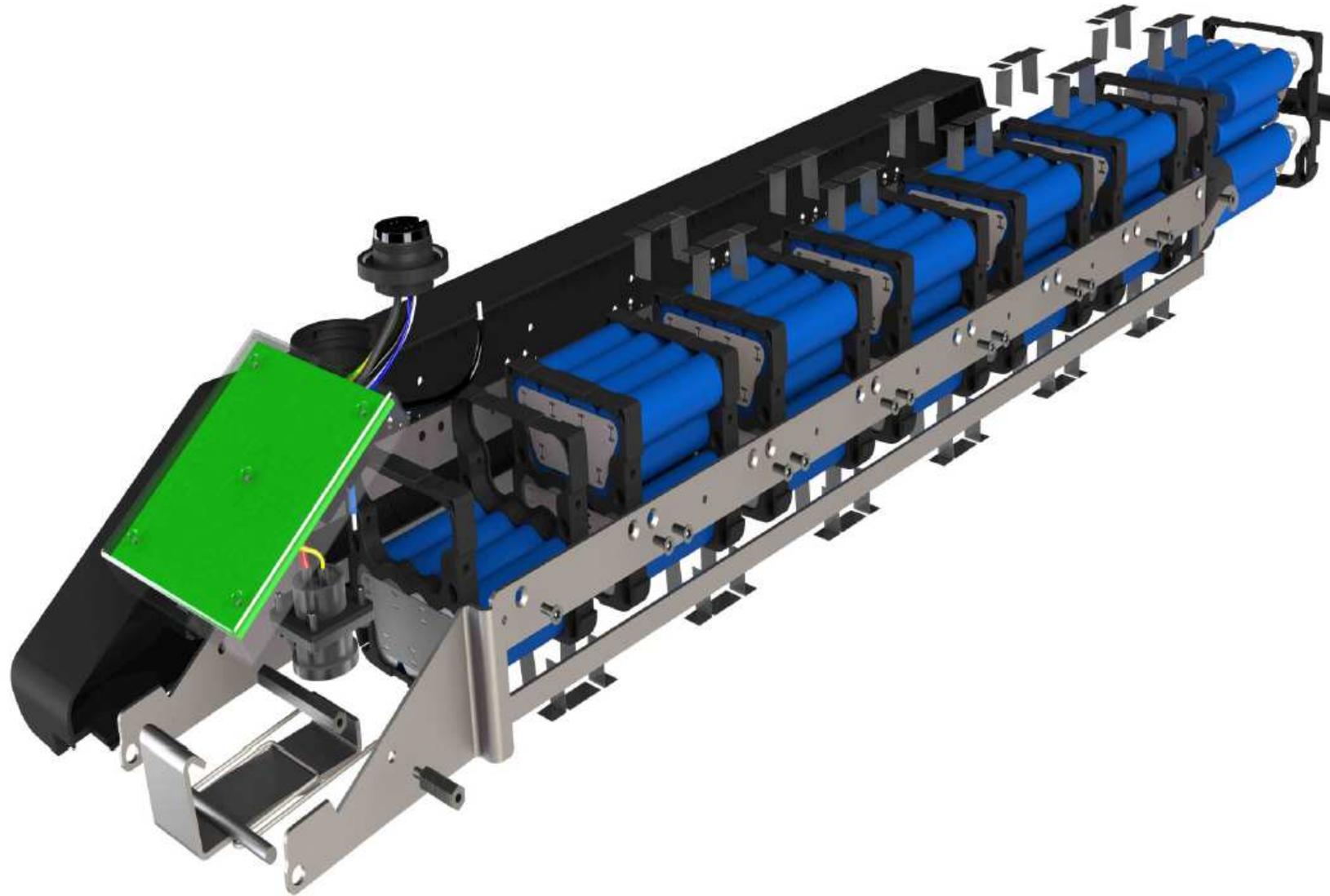
Battery System Designs

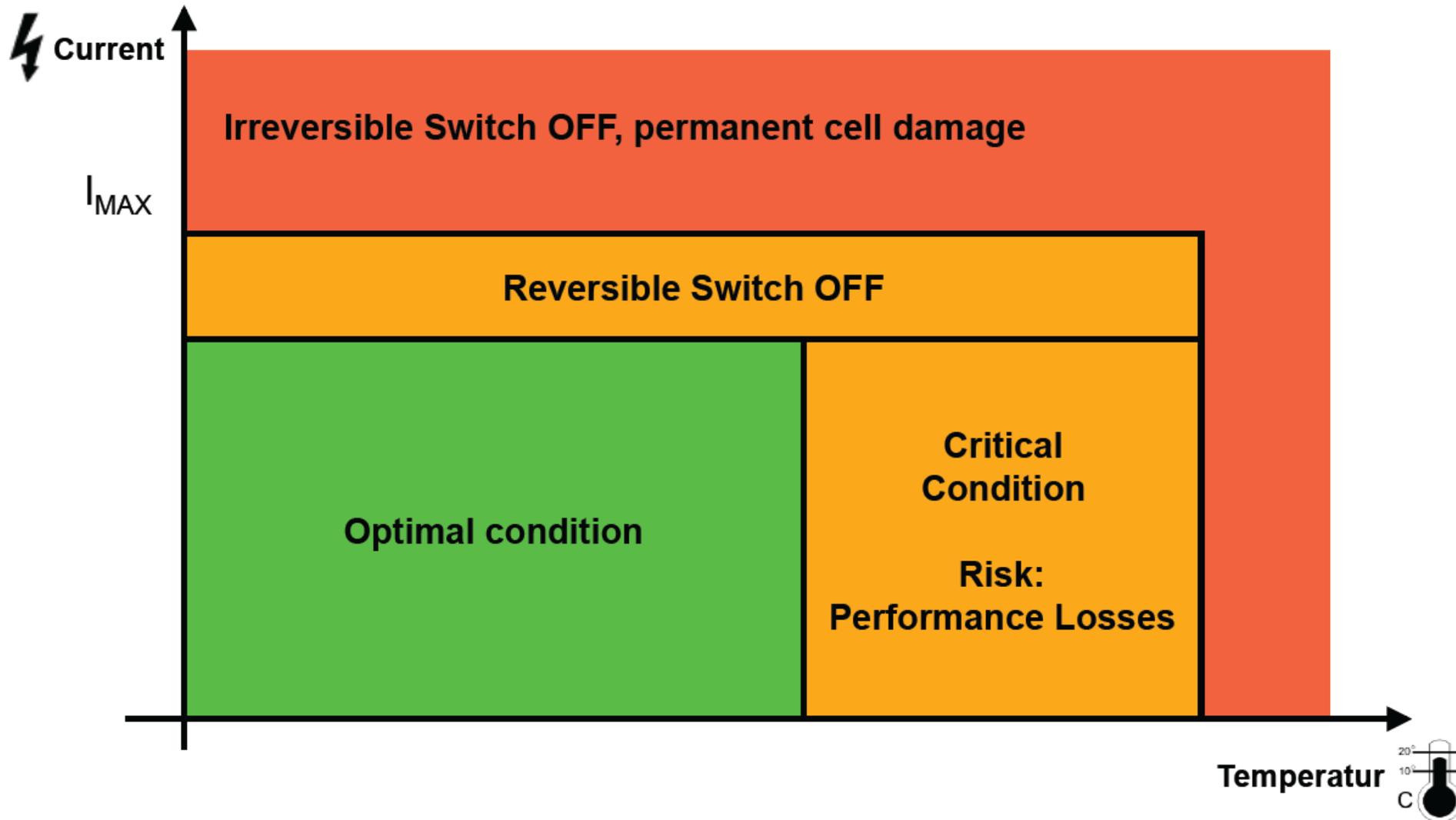


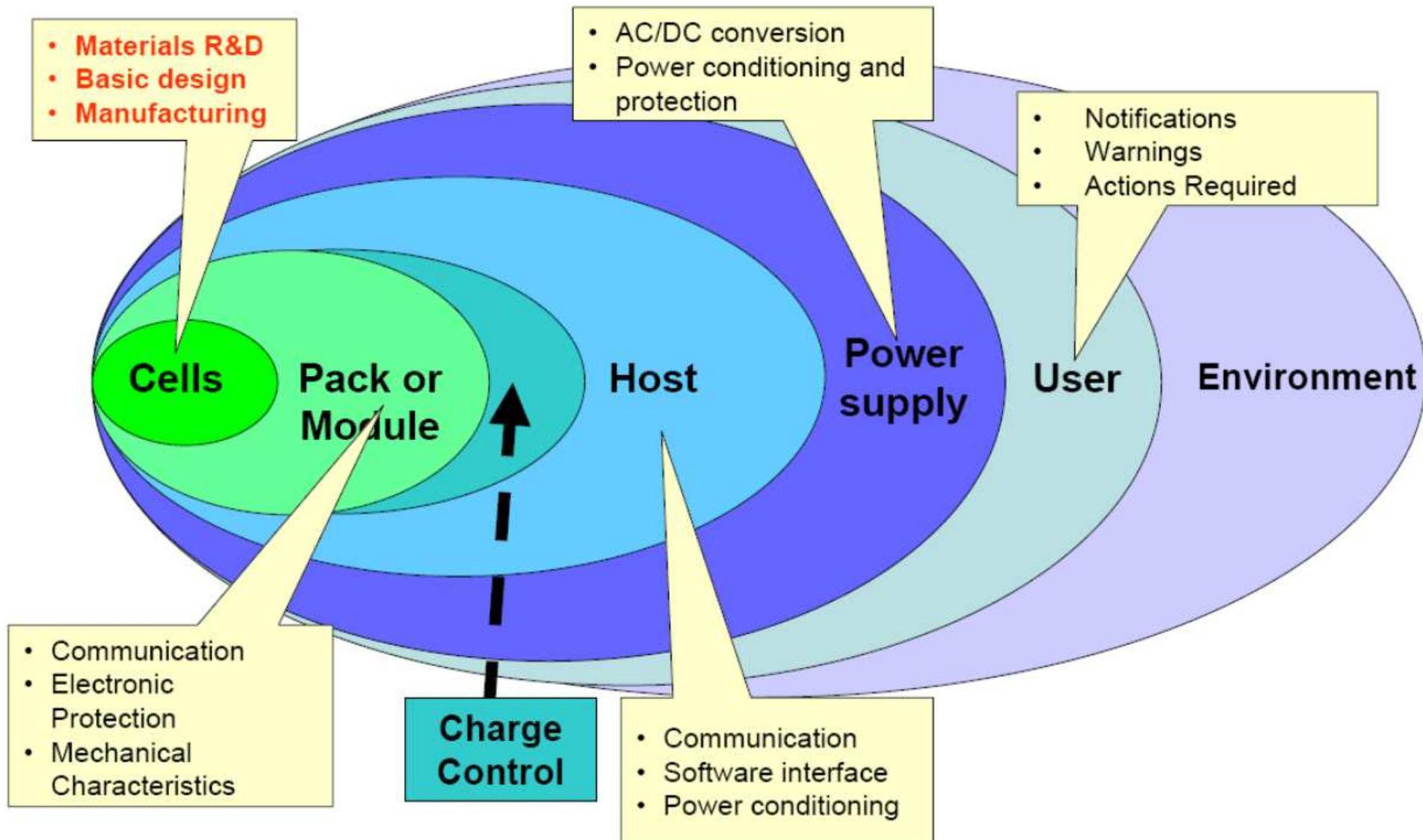
Battery System Designs



Battery System Designs

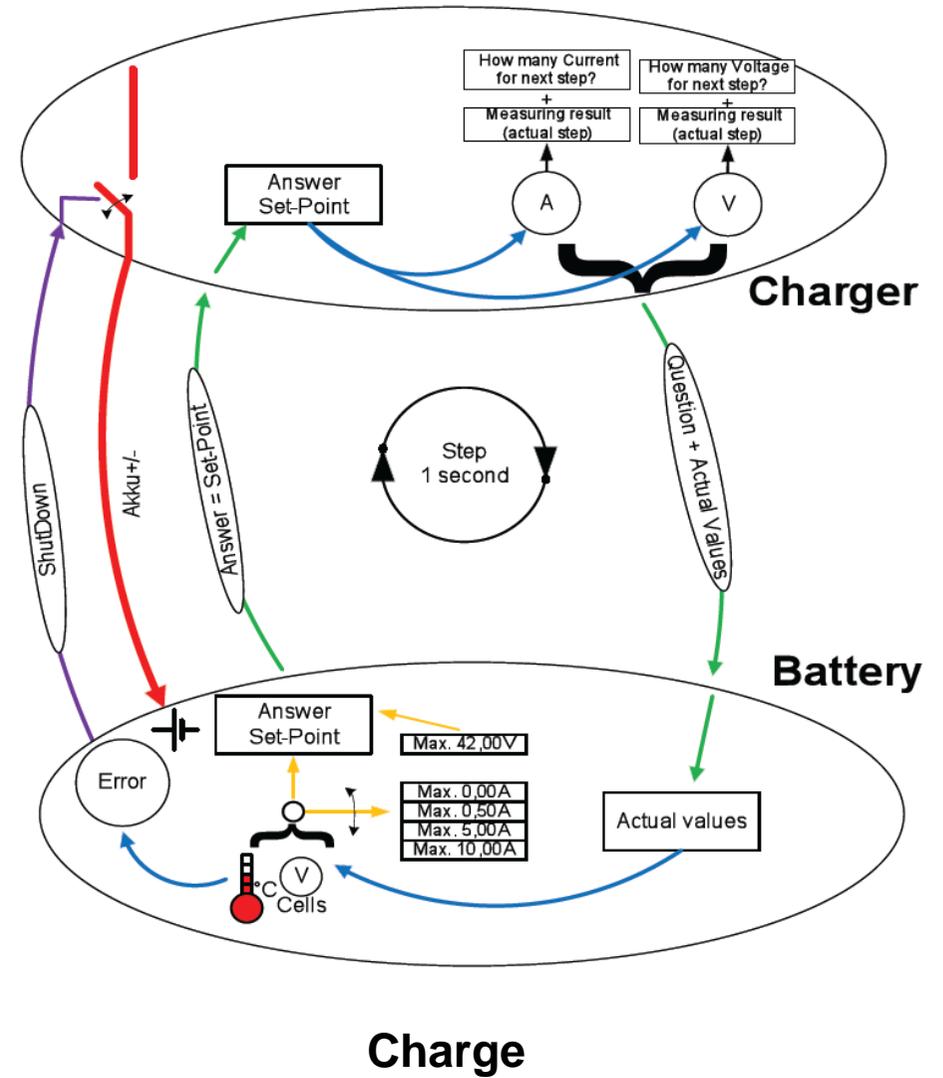
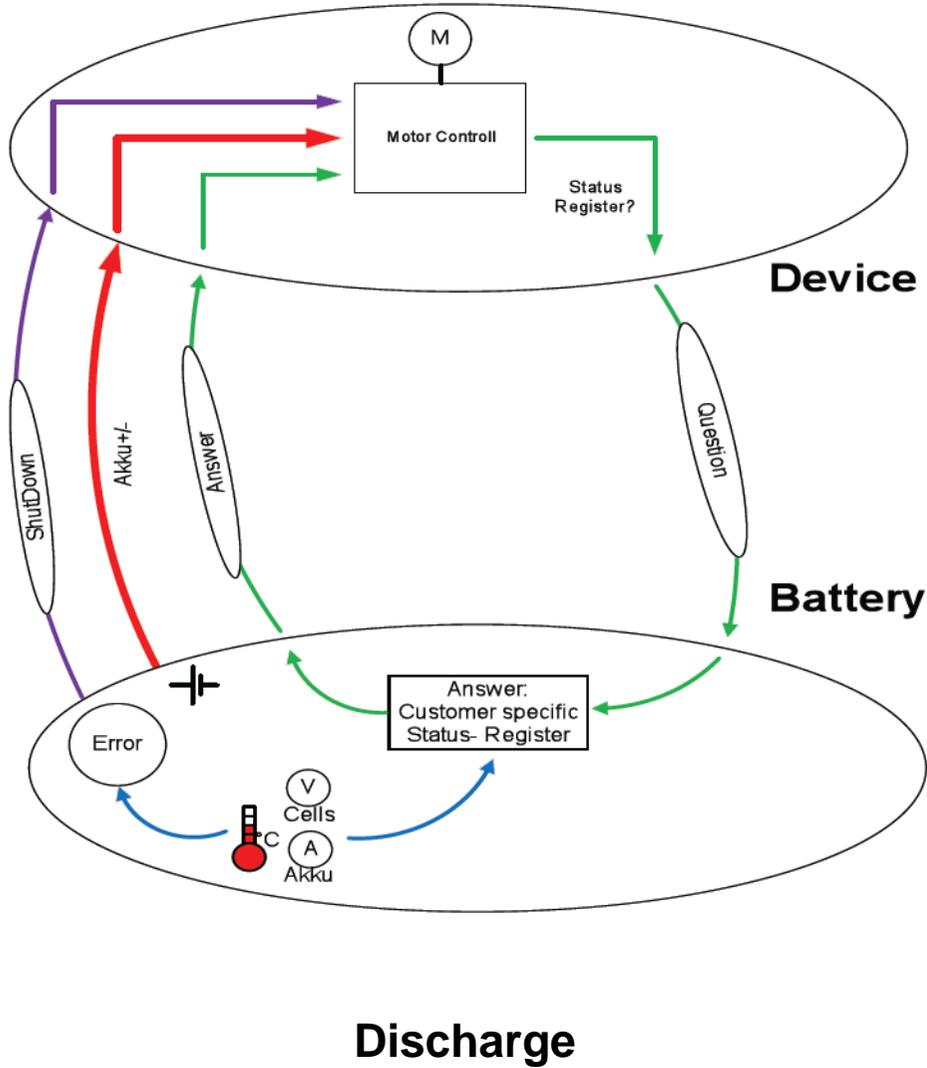






LiB Safety

Communication to and from Battery



LiB Safety

Mechanical Safety on Module Level

Coolant outlet

Negative terminal

BMS CAN connection

Positive terminal

Coolant inlet

Robust housing



The module integrates 12 pouch cells with

- cooling structure (liquid cooling)
- Power connectors
- BMS (voltage, temperature and impedance measurement, balancing, communication on CAN)

to an easily manageable unit.

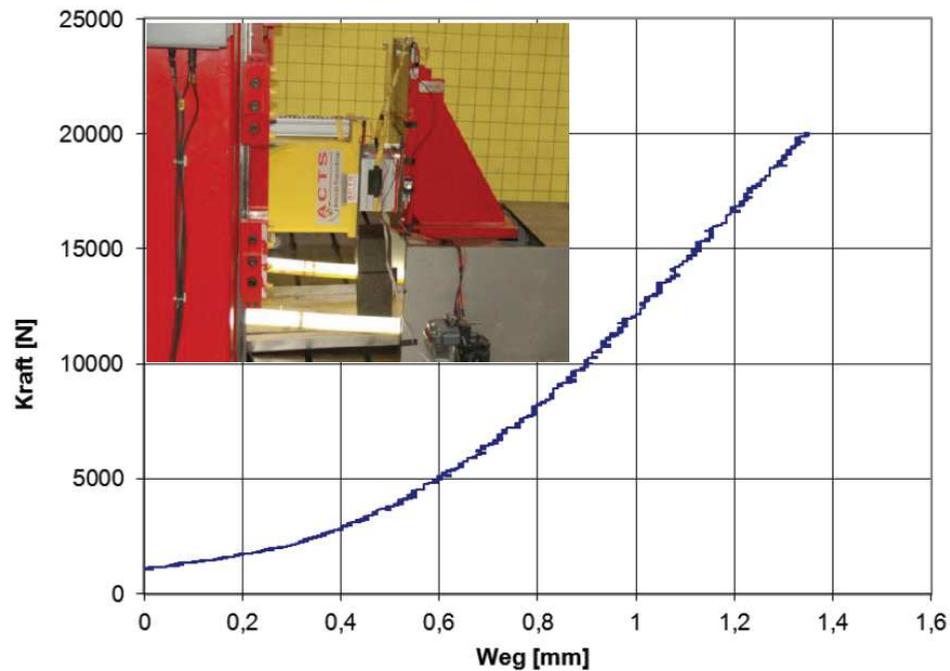
Technical Data:

Energy:	2.3 kWh
Weight:	17.5kg
Energy density:	134Wh/kg
Chemistry:	NMC
Power:	18kW
Dimensions:	260*230*170mm

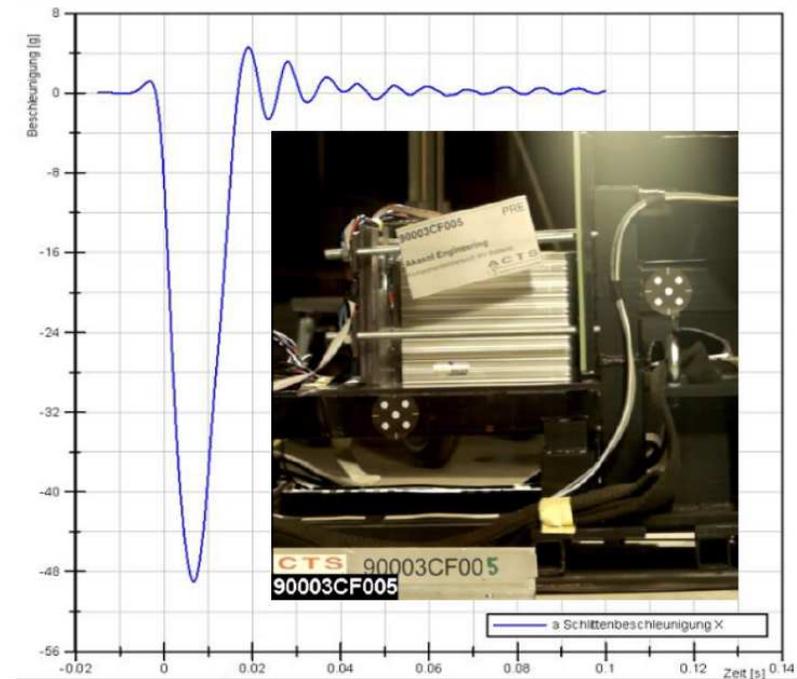
LiB Safety

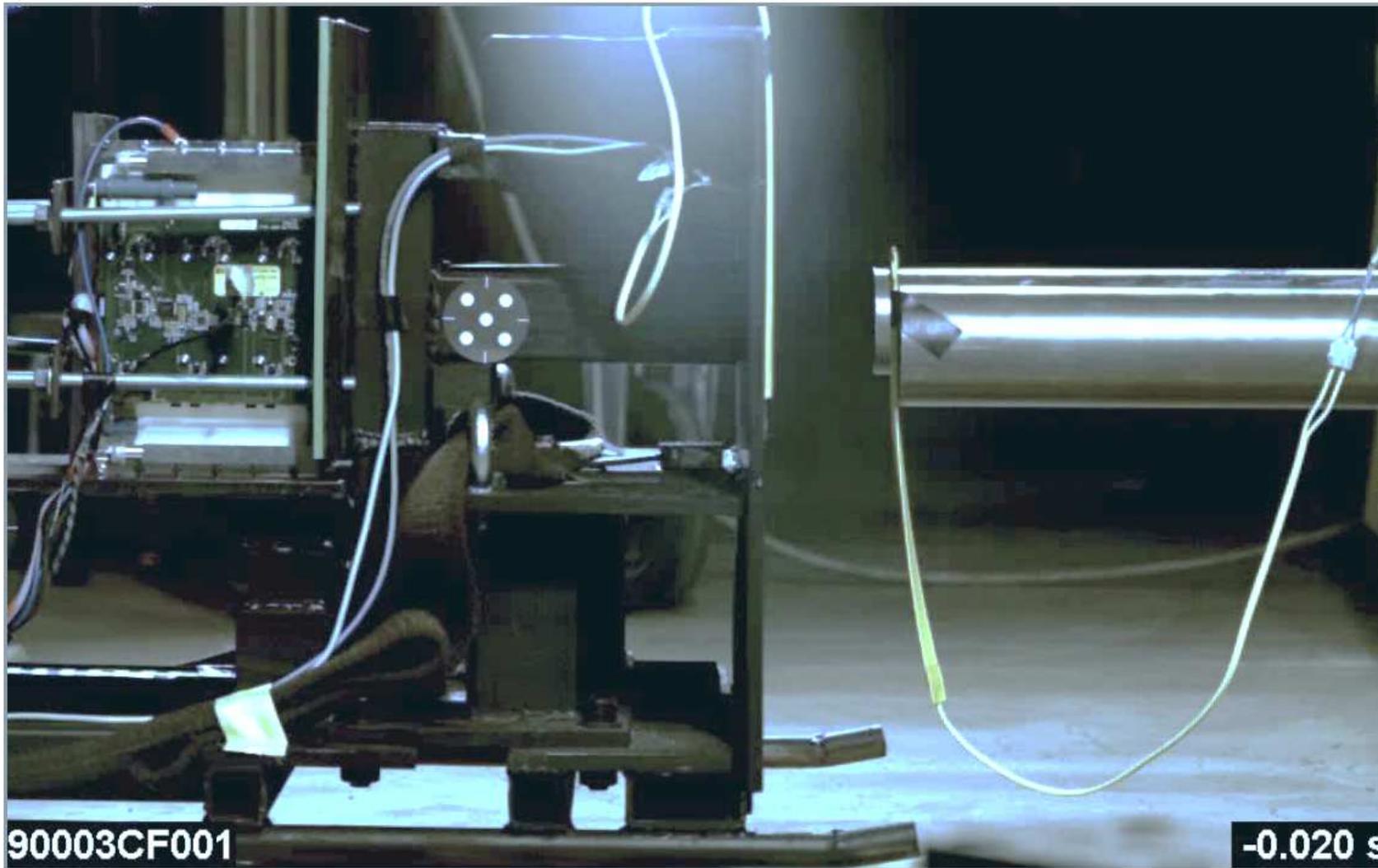
Mechanical Safety – Static and Dynamic Crash Tests

Requirements of Akasol Engineering:
20 kN all axes.



Requirements of Akasol Engineering:
50 g / 11 ms all axes.



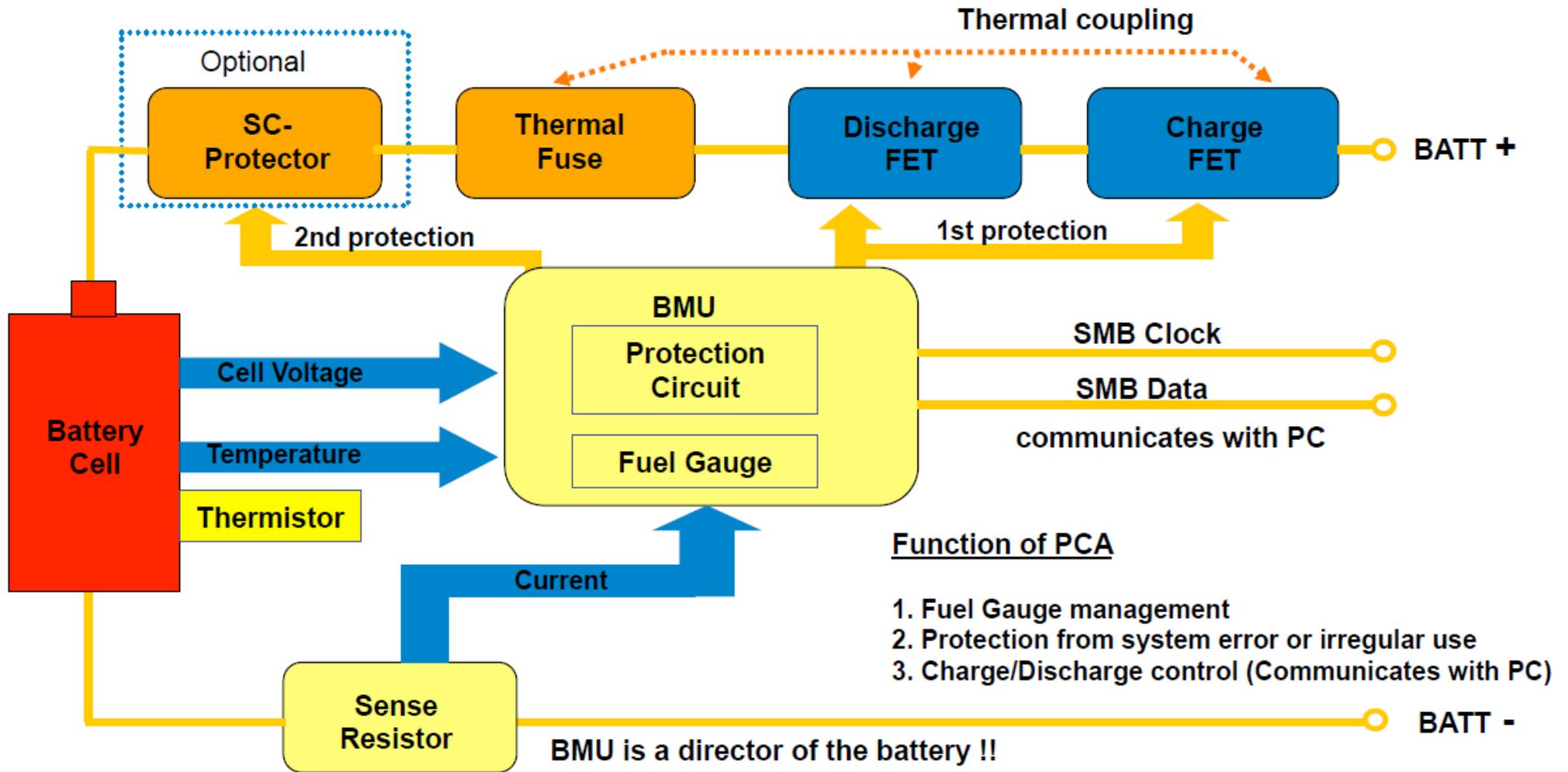


LiB Safety

Electrical Safety – Isolation

- Redundant electrical insulation on relevant locations
- Observation of the insulation resistance
- Checking of terminal voltage and leakage current before closing the contactors





Safety and Misuse Tests

Mechanical Abuse Test

- Controlled Crush (15%/50%)
- Penetration
- Drop Test

- Immersion
- Roll Over Simulation
- Mechanical Shock

Thermal Abuse Tests

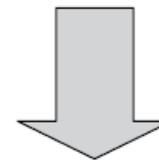
- Thermal Stability Test
- Simulated Fuel Fire
- Elevated Temperature Storage
- Rapid Charge/Discharge
- Thermal Shock Cycling

Electrical Abuse Tests

- Overcharge/Overvoltage
- Short Circuit
- Overdischarge/Voltage Reversal
- Partial Short Circuit Test

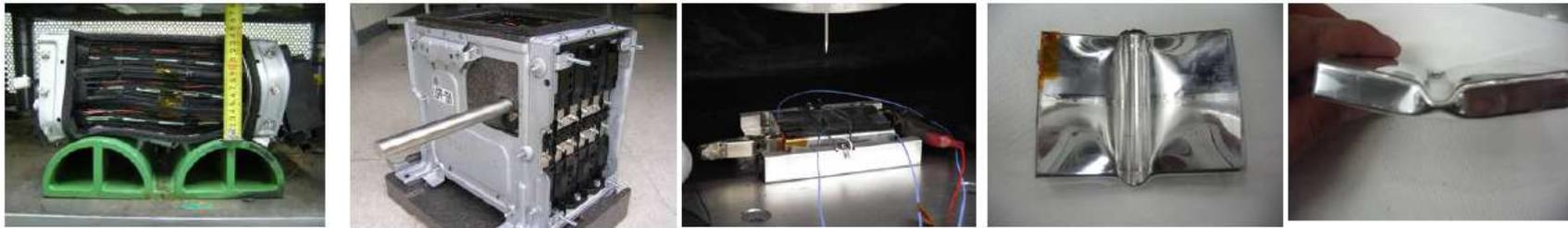
Regarding Crush/Penetration/Drop-Tests:

- Test standards predominantly applicable for cell and module level
- Low realistic approach of test standards in regard to vehicle accident loads (e.g. Penetration test, Compression degree of 15/50%)
- No correlation of crash load to battery weight in vehicles
- Hazard level requirements insufficient for automotive standards



**Requirements SAE J2929, ECE R-100-2
for automotive batteries (system and vehicle level)**

LiB Safety Tests



	UN 38.3	EN 62133	UL 2054	UL 1642
Height simulation	X			X
Thermo test (Temperature cycle)	X	X	X	X
Vibration test	X	X	X	X
Shock test	X	X	X	X
Short Circuit with increased Temperature	X	X	X	X
Short Circuit at room Temperature		X	X	X
Free fall		X	X	
Thermo overload		X	X	
Overload			X	
Squeeze test			X	X
Crush test			X	X
Wrong charging			X	X
Overcharging			X	
Forced charging			X	X
Limited power source test			X	
Battery pack temperature test			X	
250 N steady force test			X	
Projectile test			X	X
Temperature increase test			X	X



EUROPEAN SAFETY STANDARD FOR LITHIUM-ION BATTERIES



Introduction of a European safety standard for Li-Ion batteries

- to guarantee and ensure your customer the highest possible safety level according to the current quality standards
- to minimize your liability risks
- to have an competitive advantage over your competitors (→ marketing tool)

EUROPEAN SAFETY STANDARD FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Standard and safety label:

UN Transport Test

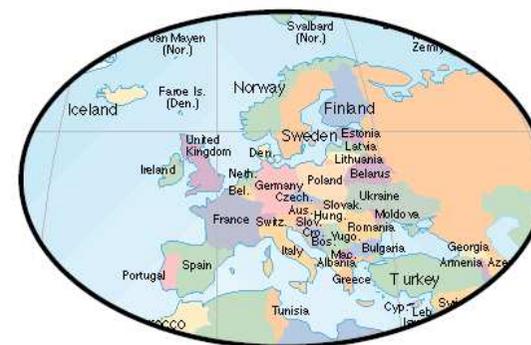
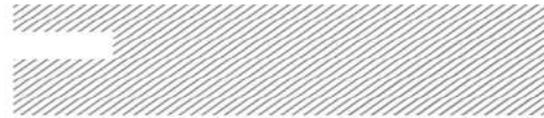
- mandatory for lithium batteries worldwide
- UN Manual „Tests and Criteria“, Part III, section 38.3
- precondition for the transportation of lithium batteries by road, rail, air or sea!

→ ensures the safety of the battery during transportation

EN 62133

- European Standard „Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications“
- derived from the worldwide recommended safety standard IEC 62133

→ ensures the safety during daily usage



BMZ
THE BATTERY EXPERTS

SAFETY STANDARD FOR LITHIUM-ION

Tests:

	UN 38.3	EN 62133
Altitude simulation	X	
Thermal test (temperature cycles)	X	X
Vibration	X	X
Shock	X	X
Short circuit at elevated temperature	X	X
Short circuit at room temperature		X
Free fall		X
Thermal abuse		X
Overcharge	X	



- tests PCB under ambient conditions
- simulates careless handling
- tests foreseeable misuse

- minimal number of samples
 - UN 38.3: 8 Li-Ion batteries (with PCB)
 - EN 62133: 18 Li-Ion batteries
 - in combination: 21 Li-Ion batteries
- duration 6-8 weeks
- costs approx. 13.000 €

UN-Test # 1: ALTITUDE SIMULATION Höhensimulation

Parameter

Druck:	11.6kPa (115mbar–50.000ft)
Temperatur:	20 ±5 °C
Testdauer:	6 h
Prüflingsanzahl:	16
Kriterien:	kein Massenverlust, kein Leck, keine Entlüftung, keine Zerlegung, kein Aufbrechen, kein Feuer, nach Test Leerlauf- spannung mind. 90% der Anfangsspannung

Diese Prüfung simuliert den Lufttransport unter Niedrigdruckbedingungen.



UN-Test # 2: THERMIC TEST Thermischer Test

Parameter

Temperaturen:	+75 ± 5°C / - 40 ± 5°C
Testverweildauer bei jeder Ecktemperaturdauer:	12h bei Batteriemassen >500g 6h bei Batteriemassen <500g
Änderungszeit bei Temperaturwechsel:	max. 30 Minuten
Gesamttestzeit:	250h bei Batteriemassen >500g 130h bei Batteriemassen <500g
Überwachungszeit nach Test:	24h
Anzahl Zyklen:	10
Prüflingsanzahl:	16
Kriterien:	kein Massenverlust, kein Leck, keine Entlüftung, keine Zerlegung, kein Aufbrechen, kein Feuer, nach Test Leerlaufspannung mind. 90% der Anfangsspannung

Diese Prüfung beurteilt bei Zellen und Batterien die Unversehrtheit der Dichtung und die internen elektrischen Verbindungen. Die Prüfung wird unter Anwendung von schnellen und extremen Temperaturänderungen durchgeführt.

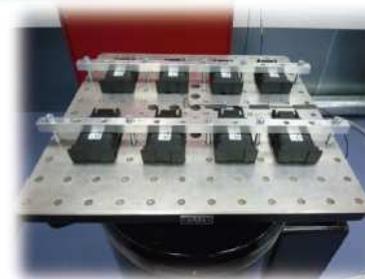


UN-Test # 3: VIBRATIONS TEST Vibrationstest

Parameter

Frequenzbereich:	7–200Hz
Profil:	Amplitude 7 - 18Hz 1g 18 - 50Hz 1.6 mm _{pp} 50 - 200Hz 8g
Durchlaufgeschwindigkeit:	0.645 Okt. / Min.
Anzahl der Durchläufe:	24 (12 nach oben und 12 nach unten)
Gesamtprüfzeit je Achse:	3h
Achsen:	X; Y; Z
Prüflingsanzahl:	16
Testbedingung:	Raumtemperatur
Kriterien:	kein Massenverlust, kein Leck, keine Entlüftung, keine Zerlegung, kein Aufbrechen, kein Feuer, nach Test, Leerlaufspannung mind. 90% der Anfangsspannung

Diese Prüfung simuliert die Schwingung während des Transports.



UN-Test # 4: SHOCK TEST Stoßtest

Parameter

Schockform:	Halbsinus
Beschleunigungsamplitude/ Einwirkzeit:	150g / 6ms (Masse <500g) 50g / 11ms (Masse >500g)
AnzahlStöße/Halbachse:	3
Anzahl Halbachsen:	$\pm X$; $\pm Y$; $\pm Z$
Gesamtzahl Stöße:	18
Prüflingsanzahl:	16
Prüflingsanzahl:	16
Testbedingung:	Raumtemperatur
Kriterien:	kein Massenverlust, kein Leck, keine Entlüftung, keine Zerlegung, kein Aufbrechen, kein Feuer, nach Test , Leerlaufspannung mind. 90% der Anfangsspannung

Diese Prüfung simuliert mögliche
Stöße während des Transports.



UN-Test # 5: EXTERNAL SHORTCUTTEST Externer Kurzschluss-Test

Parameter

Prüftemperatur:	+ 55°C ± 2°C
Gesamtaußenwiderstand:	< 0,1 Ω
Testdauer:	1 h
Überwachungszeit nach Test:	6 h
Prüflingsanzahl:	16
Kriterien:	Kein Übersteigen der Temperatur von 170°C, keine Zerlegung, kein Bruch, kein Feuer.

Diese Prüfung simuliert einen externen Kurzschluss.



UN-Test # 6: OVERCHARGE Überlasttest

Parameter

Prüftemperatur:	+ 23°C ± 2°C
Ladestrom:	2-fach so groß wie empfohlener Ladestrom
Ladespannung:	a) empfohlene Ladespannung < 18 V: min. Prüfspannung 2-fache der max. Ladespannung oder 22V b) empfohlene Ladespannung > 18 V: min. Prüfspannung 1,2-fache der max. Ladespannung
Testdauer:	24 h
Überwachungszeit nach Test:	7Tage
Prüflingsanzahl:	8 aus vorherigen Tests oder separate Batterien
Kriterien:	Kein Aufgehen, kein Feuer innerhalb von 7 Tagen

Diese Prüfung beurteilt die Fähigkeit einer wiederaufladbaren Batterie, Überladungsbedingungen zu widerstehen



Lifetime Aspects

