Landshuter Energiegespräche

Elektromobilität – Batteriedesign für zufriedene Kunden

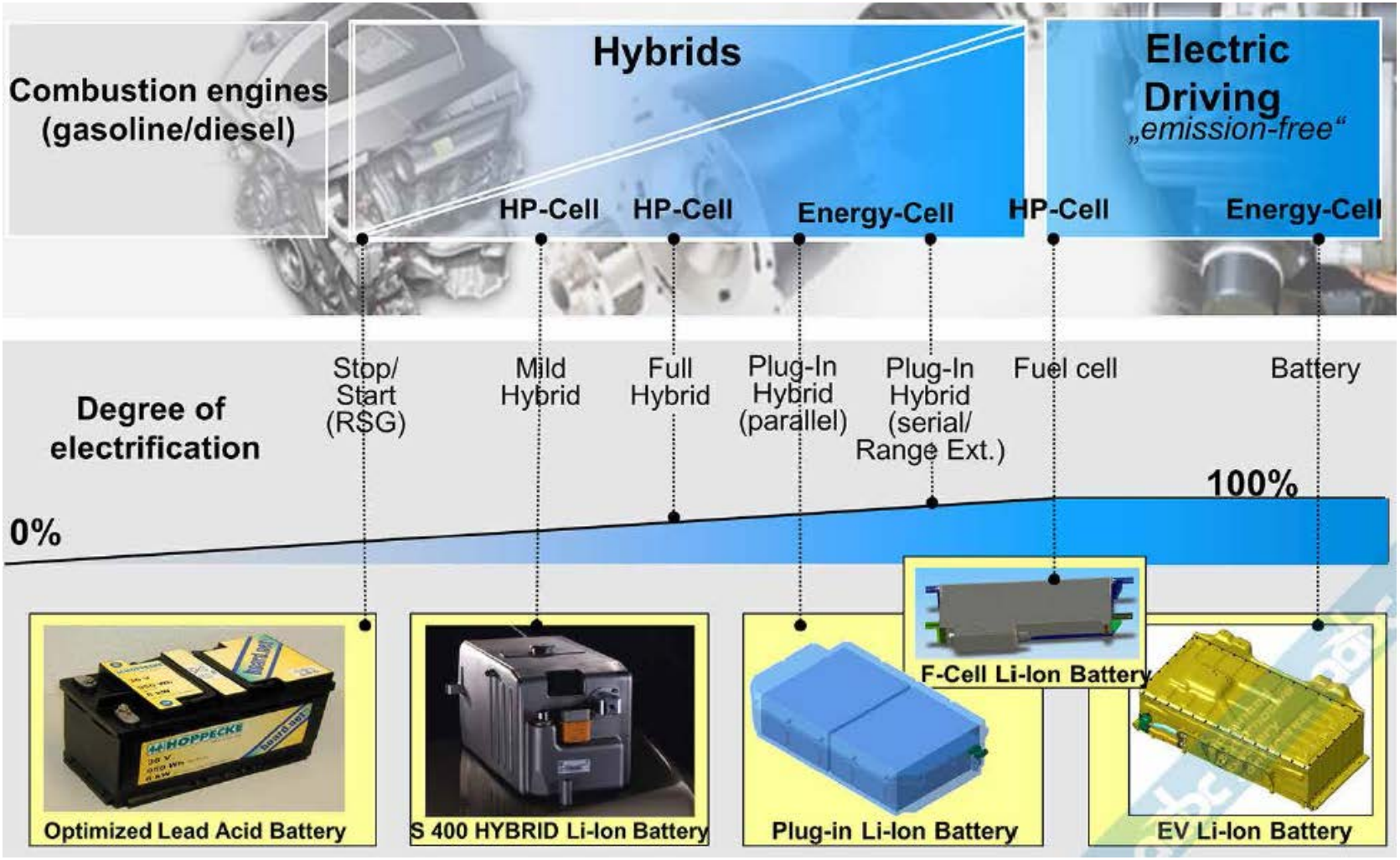
Dr. Klaus Brandt

13. Oktober 2014

EINLEITUNG

Dr. Klaus Brandt

Konzepte der Elektrifizierung



Lamm, Daimler, AABC 2013

PKWs mit reinem Elektroantrieb (BEV)

Nissan Leaf

Ford Focus

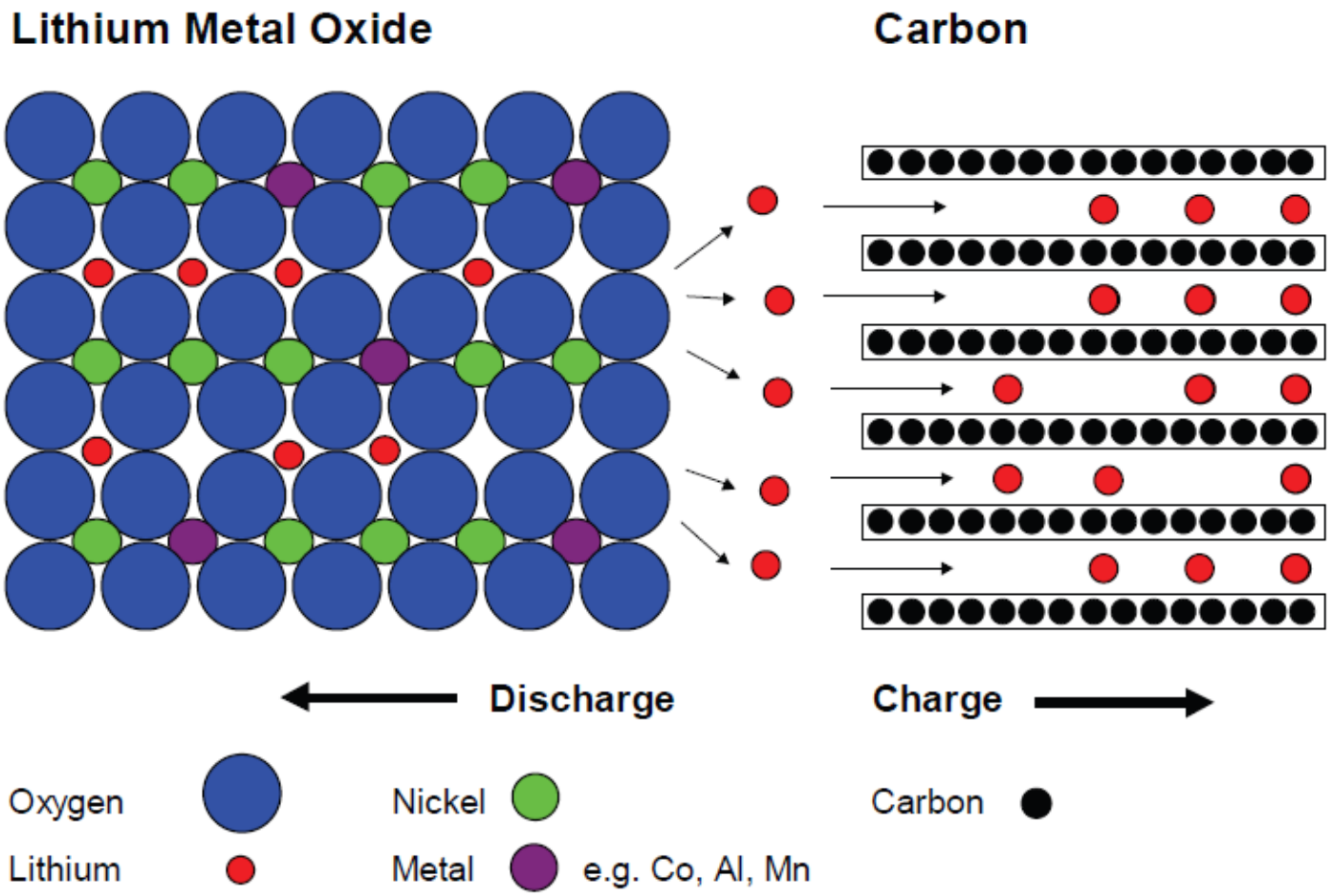
Mercedes B

BMW i3

Tesla Model S

Dr. Klaus Brandt

Lithium-Ionenbatterien (LIB) sind der Energiespeicher der Wahl



Dr. Klaus Brandt

Vielfalt der Elektrodenmaterialien für LIB

- Eine Vielfalt von Kathodenmaterialien steht zur Verfügung
- Die theoretischen spezifische Energien betragen von ca 550 bis 750 Wh/kg

Summary of parent cathode materials and blends* with their respective capacity, cell voltage and energy density (†cycle life is being targeted at present).

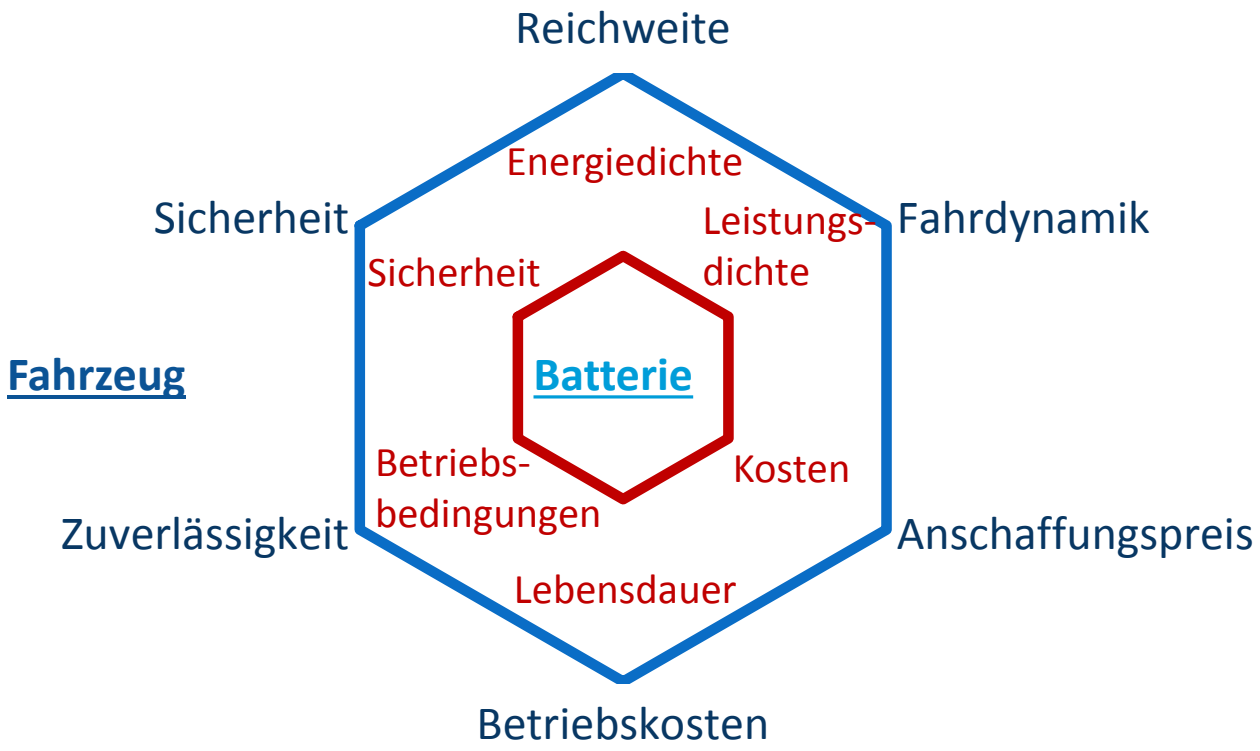
Parent cathode materials & blends*	Capacity mAh g^{-1}	Avg. voltage (V *vs* Li/Li^+)	Energy density	
			Wh kg^{-1}	Wh L^{-1}
$LiCoO_2$ [14]	151	4.00	602	3073
$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ (NCA) [14]	195	3.80	742	3784
$LiMn_2O_4$ (spinel) [14]	119	4.05	480	2065
$LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ (NMC 333) [14]	153	3.85	588	2912
$LiMn_xCo_yNi_zO_2$ (NMC non-stoichiometric) [14]	220	4.0	720	3600
$LiFePO_4$ (iron phosphate) [14]	161	3.40	549	1976
$xLi_2MnO_3 \cdot (1-x)LiMO_2$ [12]	250–280	~4.0	–	–
*$LiCoO_2 - LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ (7:3) [9]	180	~3.9	–	–
*$xLi_2MnO_3 \cdot (1-x)LiMO_2 - LiFePO_4$ [10]	220	~3.6	>890	–
*$Li[Li_{0.2}Mn_{0.54}Ni_{0.13}Co_{0.13}]O_2 - LiV_3O_8$ [3]	275	3.0–4.0	–	–
*$Li[Li_{0.2}Mn_{0.54}Ni_{0.13}C_{o0.13}]O_2 - Li_4Mn_5O_{12}$ [3]	250	3.0–4.0	–	–
*$Li[Li_{0.17}Mn_{0.58}Ni_{0.25}]O_2 - LiFePO_4$ [33]	~200	3.0–4.0	>700	–
Sulfur (in Li–sulfur system) [16]	~1000†	2.0–2.4	1550	–

Chikkannanavar; A review of blended cathode materials

Dr. Klaus Brandt

Abhängigkeit der Fahrzeugeigenschaften von den Batterieeigenschaften

Bei einem BEV dominieren die Eigenschaften der Batterie die Fahrzeugeigenschaften

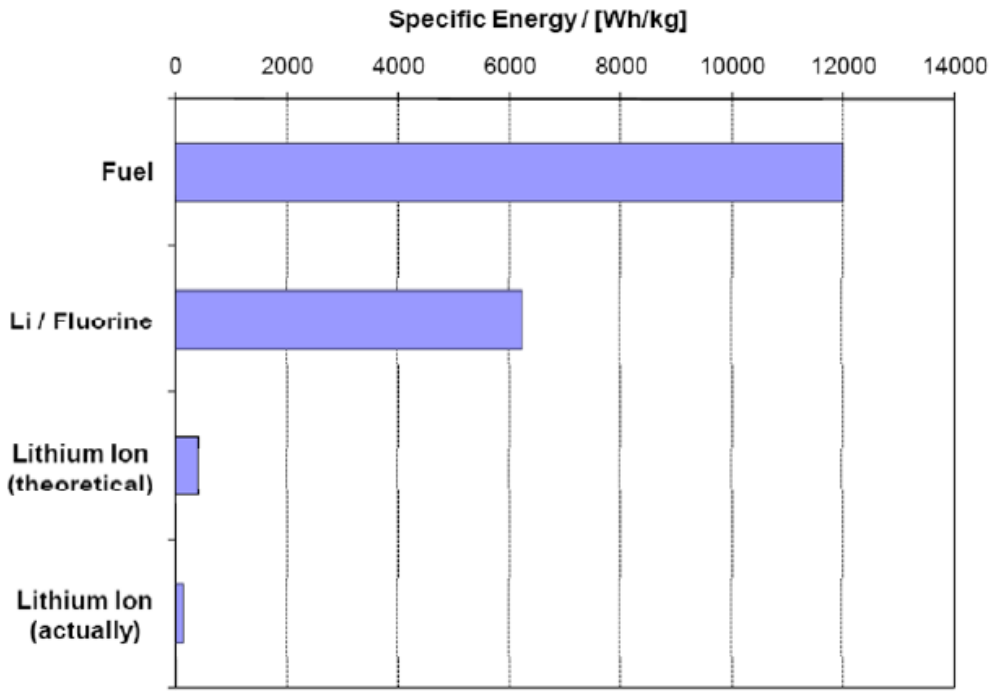


REICHWEITE - ENERGIEDICHTE

Dr. Klaus Brandt

Spezifische Energie

- Die theoretisch erreichbare spezifische Energie von LIB liegt mehr als eine Größenordnung unter der des Benzins
- Andere elektrochemische Systeme versprechen viel höhere Werte, sind aber weit von der Realisierung als Speicher für BEV entfernt



	Ah/kg	U/V	Wh/kg
$Li//O_2$	1.787	4,27	7.630
$Mg//O_2$	1.330	3,61	4.801
$Zn//O_2$	659	1,65	1.318
$Li//S_x$	1.165	2,56	2.982
$C_6//LiMO_2$	170	4,20	714

Kümpers, JCI: Neue Fahrzeugkonzepte

Dr. Klaus Brandt

Einsatz von LIB in Fahrzeugen

- Eine Vielzahl von LIB-Systemen finden sich den Fahrzeugen von heute
- Die Zellen haben eine spezifische Energie von 89 bis 233 Wh/kg
- Für die Batterien entspricht dies einer spezifische Energie von ca 70 bis zu 180 Wh/kg

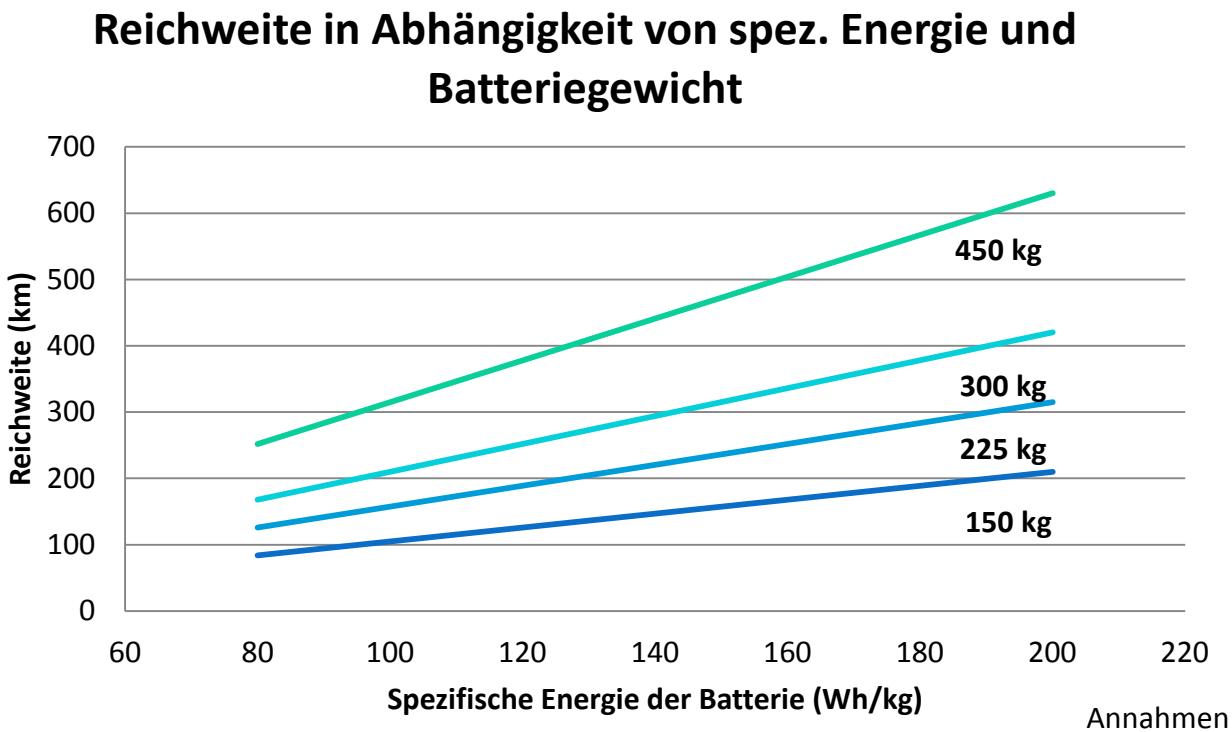
	Cell Maker	Chemistry	Capacity	Configuration	Voltage	Weight	Volume	Ener dens	Spec Ener	Used in:	
		Anode/Cathode	Ah		V	Kg	liter	Wh/liter	Wh/kg	Company	Model
1	AESC	G/LMO-NCA	33	Pouch	3.75	0.80	0.40	309	155	Nissan	Leaf
2	LG Chem	G/NMC-LMO	36	Pouch	3.75	0.86	0.49	275	157	Renault	Zoe
3	Li-Tec	G/NMC	52	Pouch	3.65	1.25	0.60	316	152	Daimler	Smart
4	Li Energy Japan	G/LMO-NMC	50	Prismatic	3.7	1.70	0.85	218	109	Mitsubishi	i-MiEV
5	Samsung	G/NMC-LMO	64	Prismatic	3.7	1.80	0.97	243	132	Fiat	500
6	Lishen Tianjin	G-LFP	16	Prismatic	3.25	0.45	0.23	226	116	Coda	EV
7	Toshiba	LTO-NMC	20	Prismatic	2.3	0.52	0.23	200	89	Honda	Fit
8	Panasonic	G/NCA	3.1	Cylindrical	3.6	0.048	0.018	630	233	Tesla	Model S

Source: Anderman, Advanced Automotive Batteries, AABC 2014
Anmerkung: Energiedichte bezieht sich auf die Zelle, Werte für Batterien 60-70% der Zelle, spezifische Energie 70-80%

Dr. Klaus Brandt

BEV Reichweite

Die Reichweite eines BEV hängt von der spezifischen Energie sowie von dem Anteil des Batteriegewichts am Gesamtgewicht des BEV ab

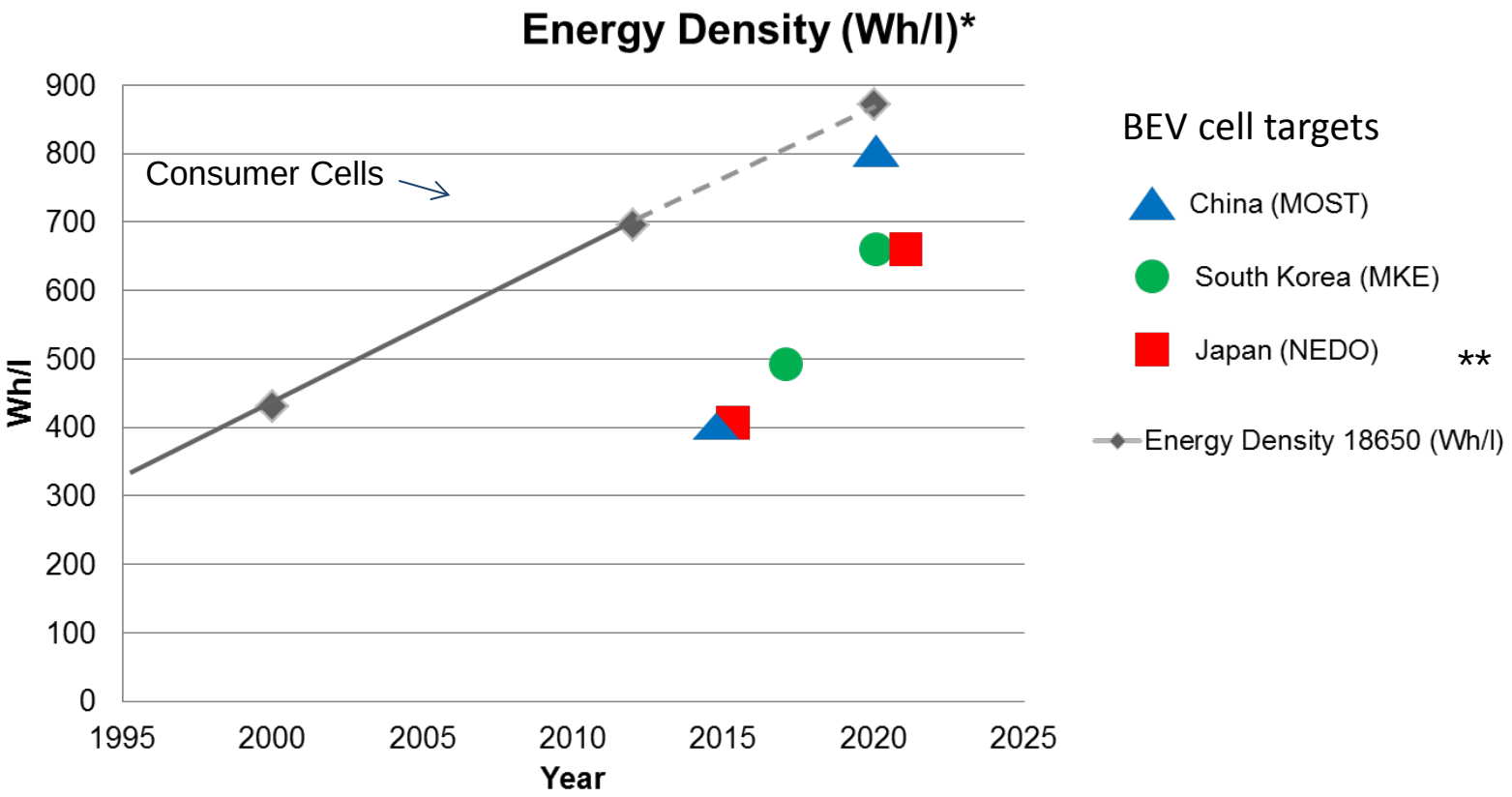


Annahmen:
Fahrzeuggewicht 1.500kg
Reichweite 7km pro 1kWh

Dr. Klaus Brandt

Energiedichte: Historische Entwicklung und Potential

- Die Energiedichte von Zellen für BEV liegt deutlich unter den Konsumerzellen
- Eine steile Lernkurve wird erwartet

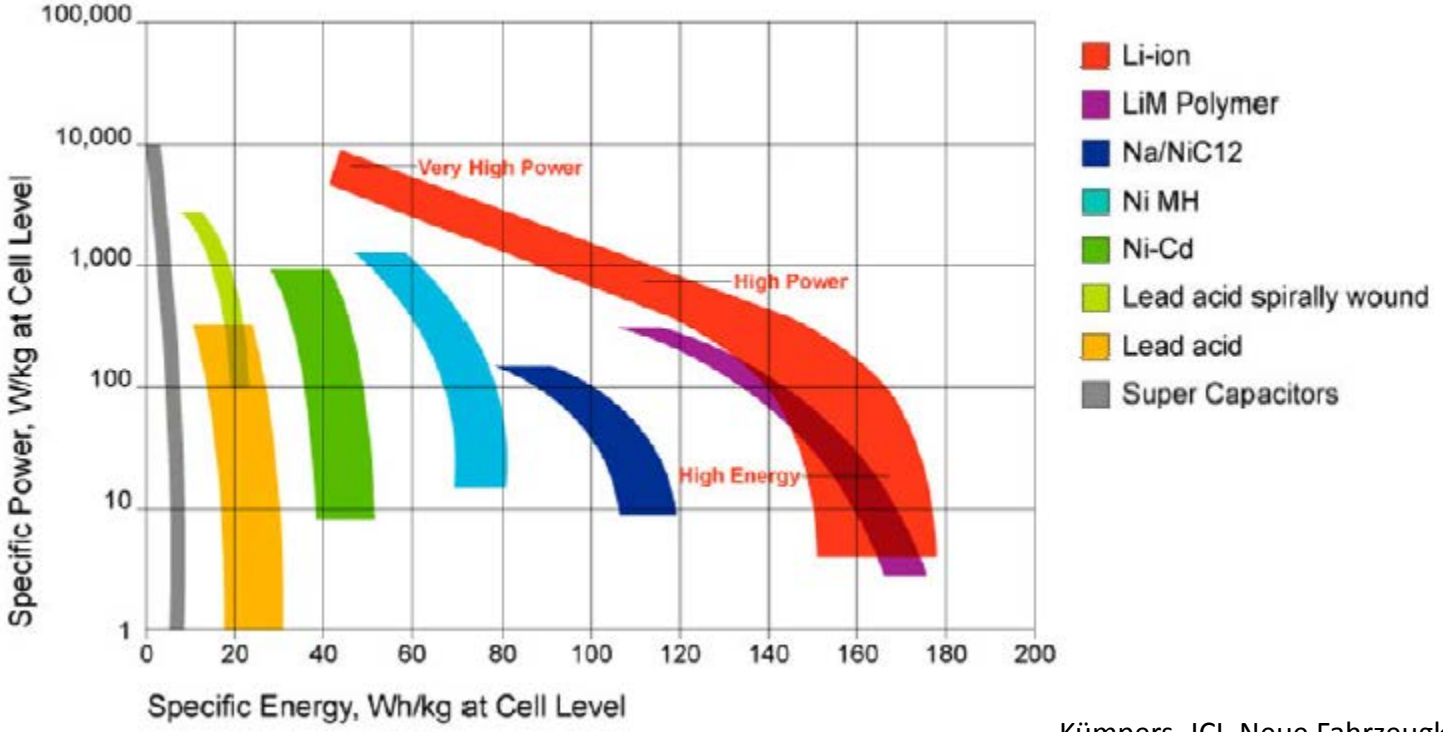


FAHRDYNAMIC - LEISTUNGSDICHTE

Dr. Klaus Brandt

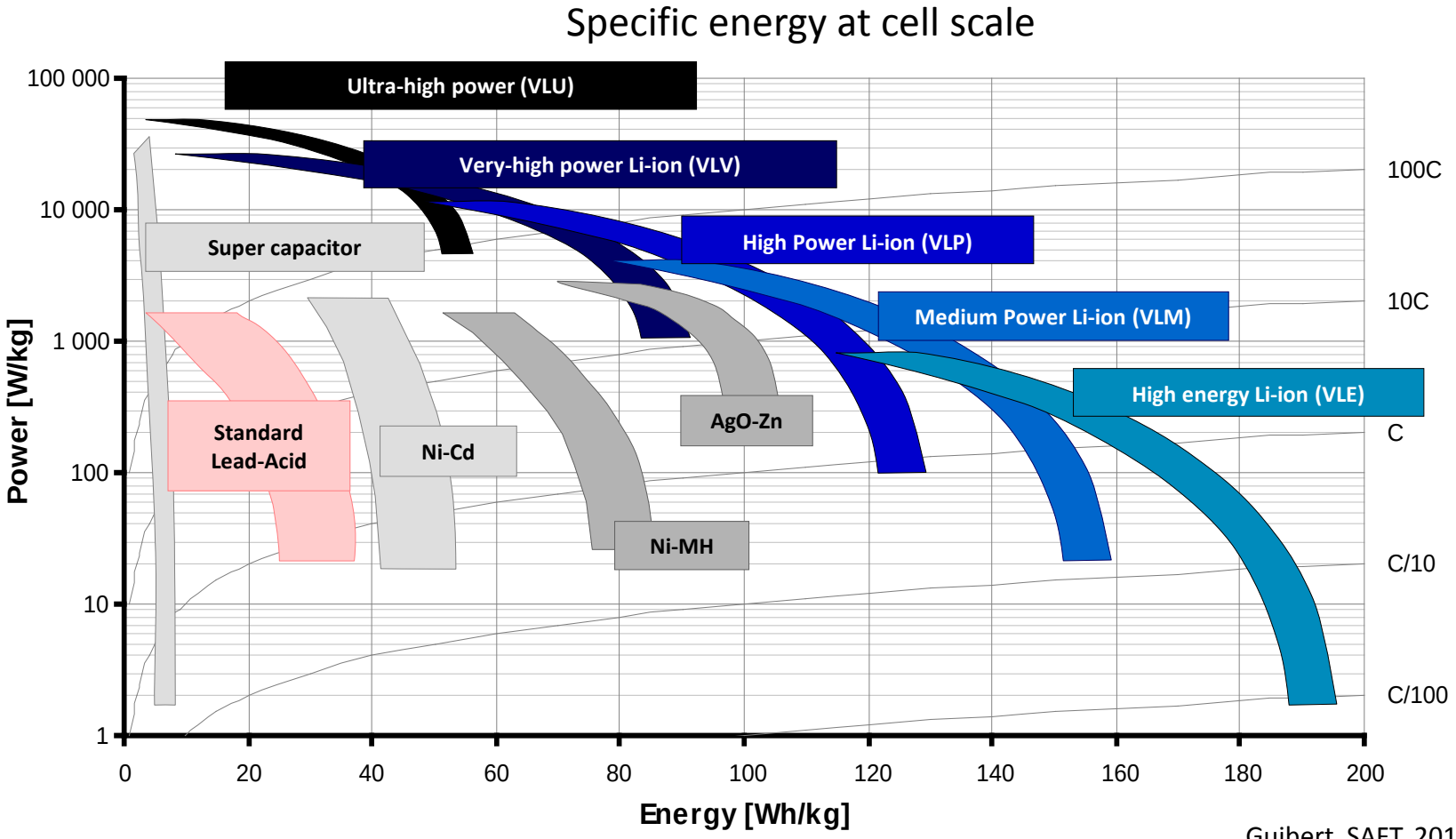
Zusammenhang zwischen Energie und Leistung

- Für elektrochemischen Speicher nimmt die entnehmbare Energie mit zunehmenden Leistungsanforderungen ab
- LIB erfüllt das breiteste Anforderungsspektrum



Kümpers, JCI, Neue Fahrzeugkonzepte

Zelldesigns optimiert für Energie oder Leistung



Guibert, SAFT, 2012

Abhängigkeit der Leistung vom Ladezustand

- Die zur Verfügung stehende Leistung sowie die Leistungsaufnahme (regeneratives Bremsen) hängen vom Ladezustand ab
- Um eine Veränderung der Fahreigenschaften zu verhindern, muss die Batterie überdimensioniert werden

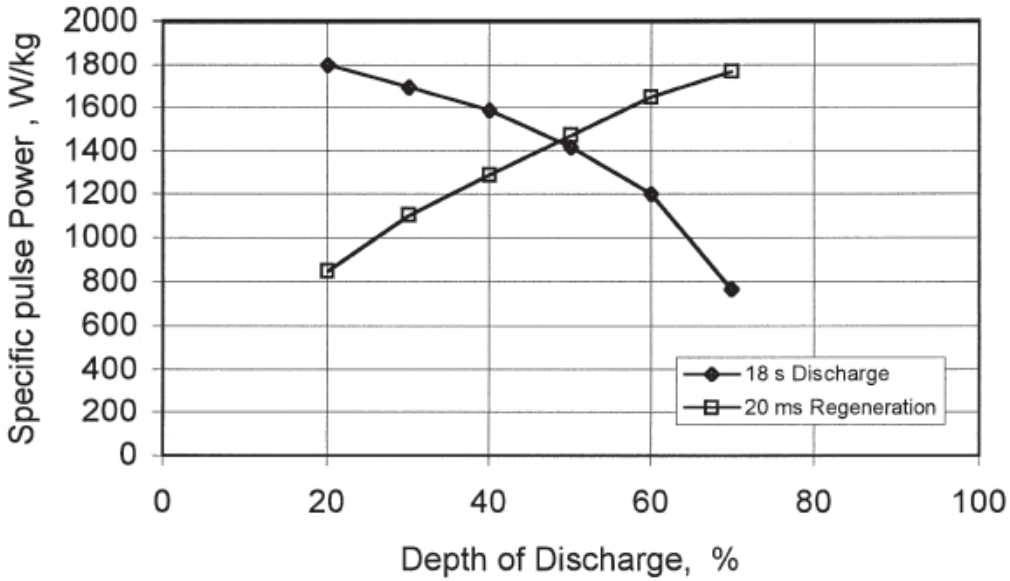


Fig. 6. Pulse power capability of a 12 Ah HEV Li ion cell, in function of depth of discharge.

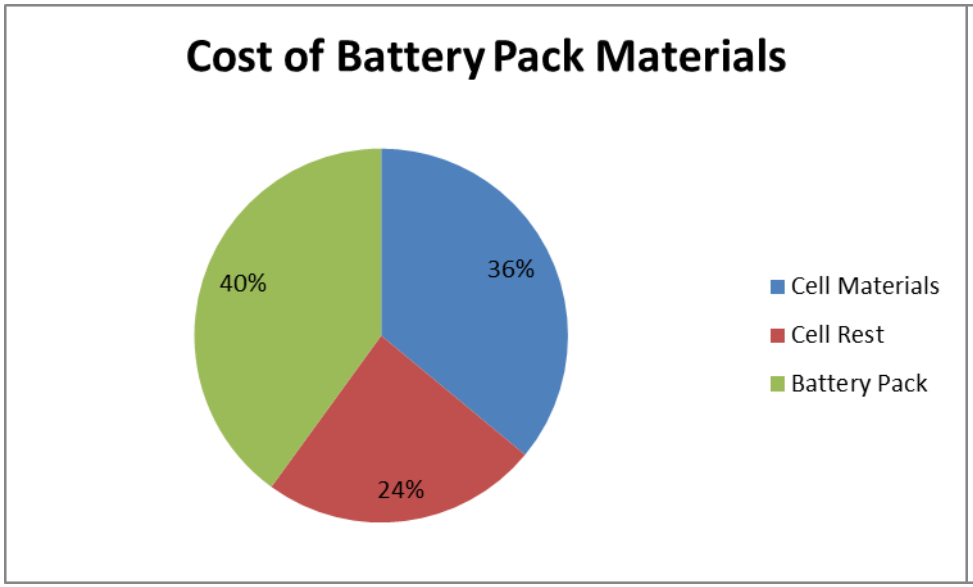
From: M. Broussely, J. Power Sources **81-82** (1999), 140-143

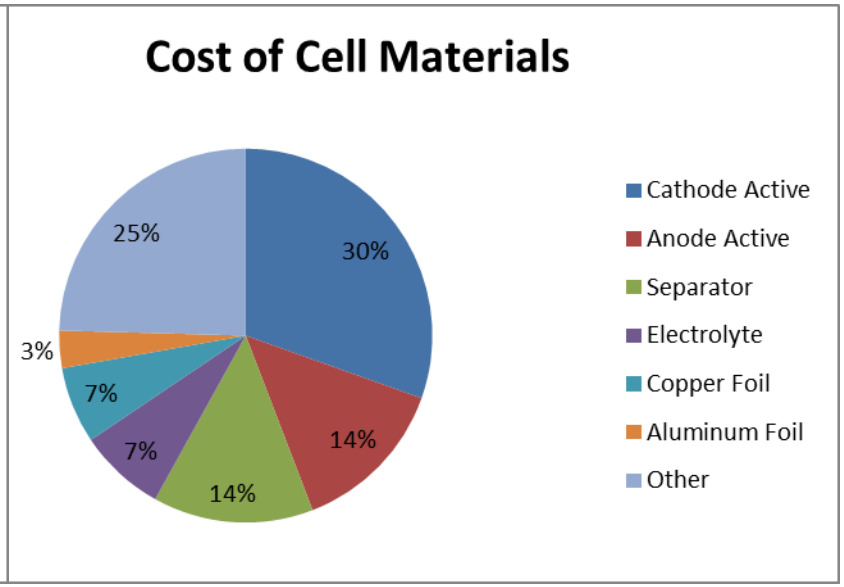
ANSCHAFFUNGSPREIS - BATTERIEKOSTEN

Dr. Klaus Brandt

Komponenten der Batteriekosten

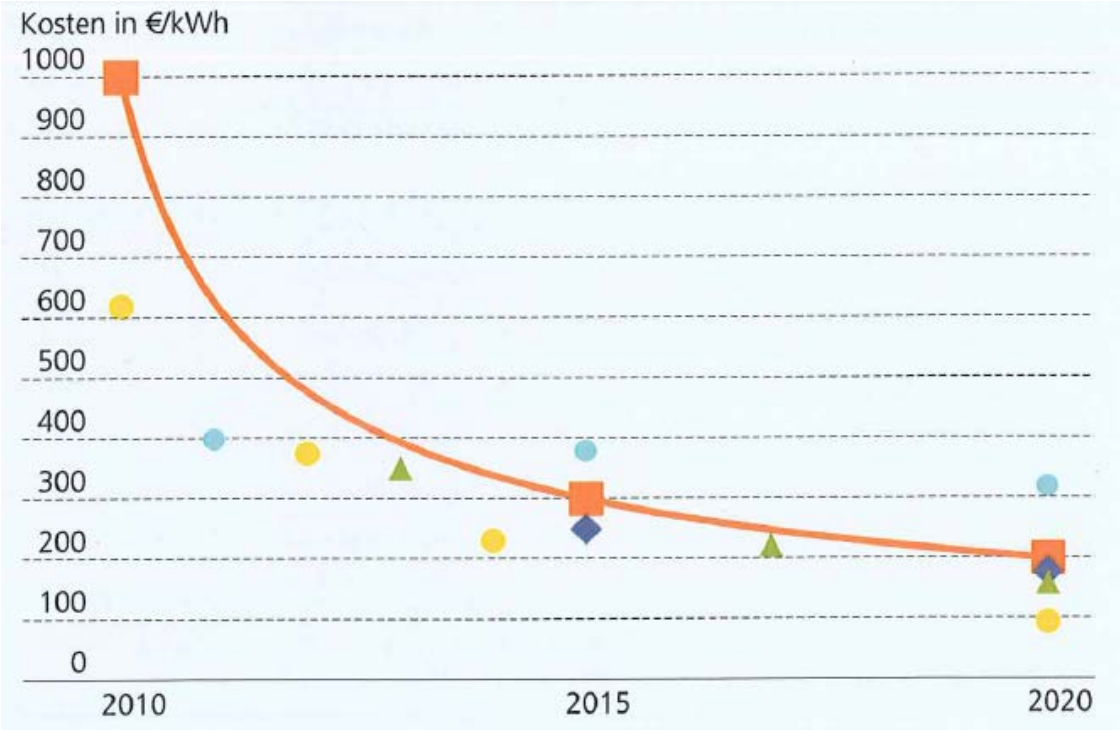
- Die Batterie besteht aus den Zellen, dem elektronischen Batteriemanagementsystem (BMS), einem thermischen Management und dem Gehäuse
- Die Zelle hat den größten Anteil an den Batteriekosten
- Zellkosten werden von den Materialkosten dominiert





Projektion der Zellkosten

- Zellkosten sind bereits stark gefallen und eine weitere Kostensenkung ist zu erwarten
- Wesentliche Faktoren sind die steigenden Produktionsmengen sowie die Lernkurve für großformatige Zellen



Möller, Fraunhofer: Technologie Roadmap

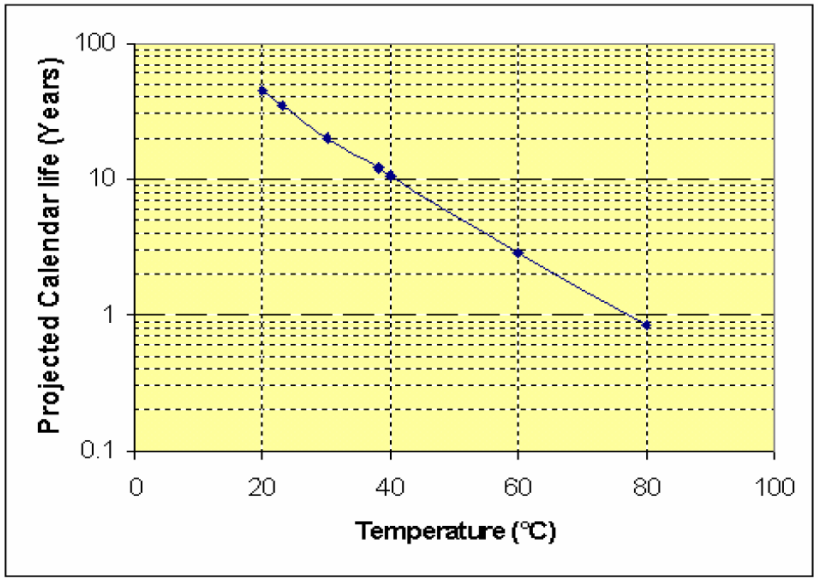
BETRIEBSKOSTEN - LEBENSDAUER

Dr. Klaus Brandt

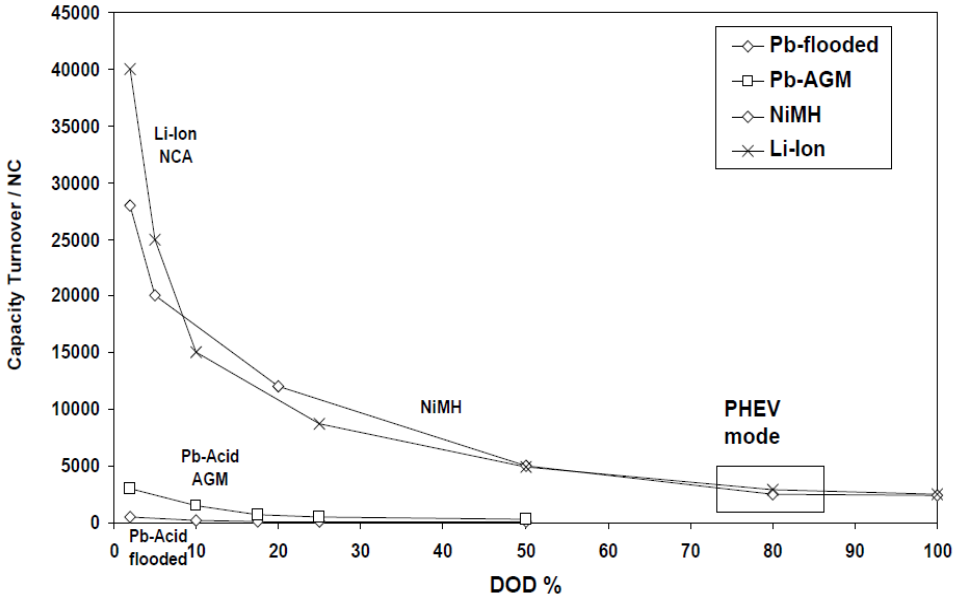
LIB Lebensdauer

- LIB altern sowohl durch den Gebrauch als auch über die Zeit
- Die Lebensdauer hängt von vielen Faktoren ab, exemplarisch sind hier die Temperatur und die Entladetiefe aufgeführt

Temperaturabhängigkeit der kalendarischen Lebensdauer



Zyklenlebensdauer in Abhängigkeit von der Entladetiefe



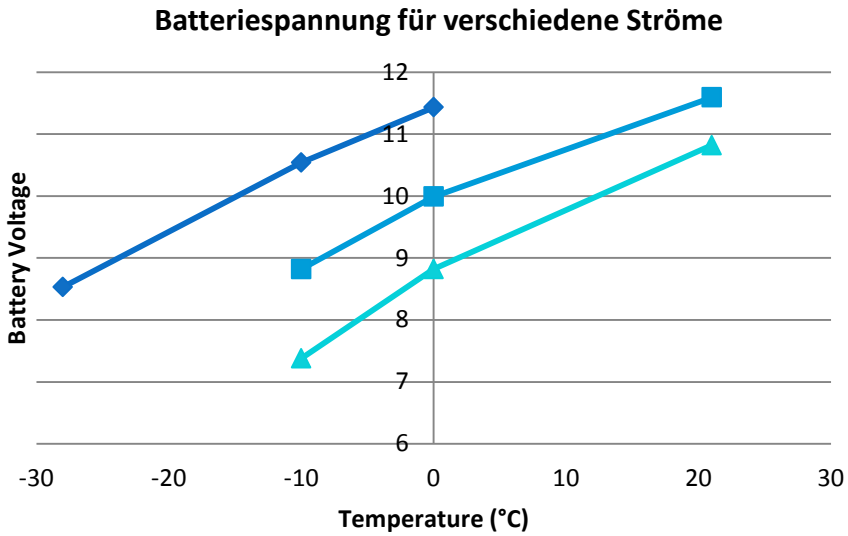
Rosenkranz, JCI– SAFT, Modern Battery Systems for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (2007)

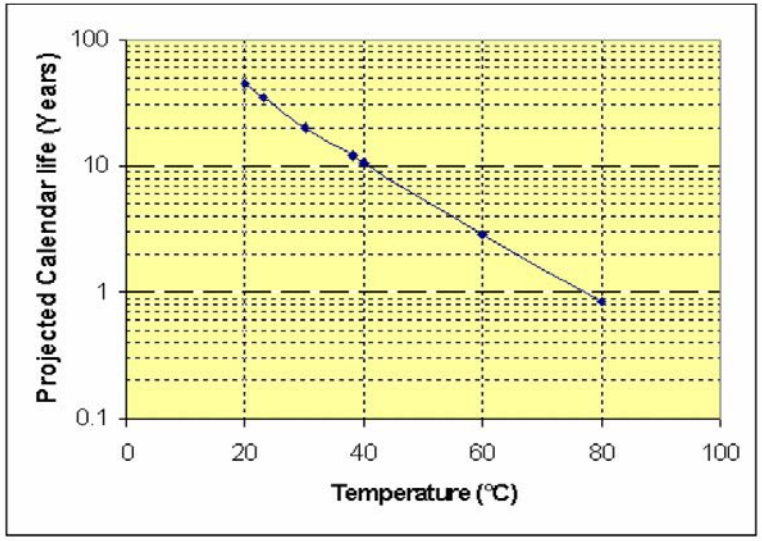
ZUVERLÄSSIGKEIT - BETRIEBSBEDINGUNGEN

Dr. Klaus Brandt

Temperaturabhängigkeit der LIB-Eigenschaften

- Hohe Temperaturen verringern die Lebensdauer der LIB
- Niedrigere Temperaturen begrenzen die Leistung

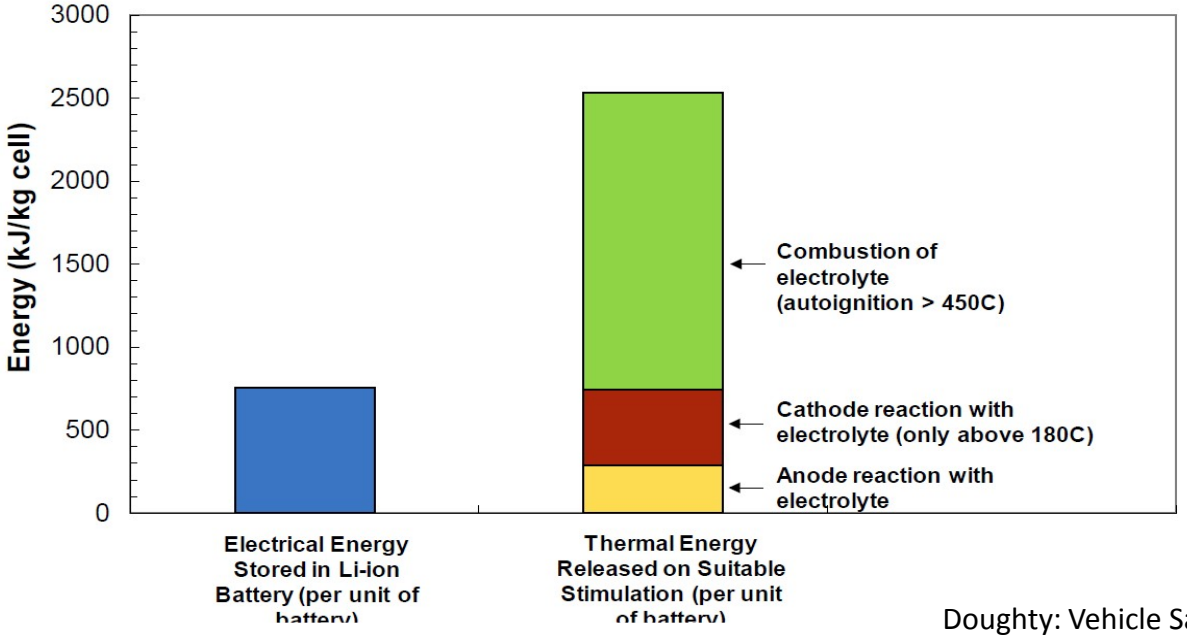




SICHERHEIT - SICHERHEIT

LIB Sicherheit

- LIB speichern große Energiemengen pro Gewicht
- Kommt es zum Öffnen der Zelle können große Wärmemengen durch Verbrennung des organischen Elektrolyten an Luft frei werden
- Die Sicherheit der Batterie wird durch einen einheitlichen Ansatz gewährleistet
  - Zelldesign und Materialwahl
  - Elektrisches und thermisches Management der Batterie
  - Einbau der Batterie im Fahrzeug



Doughty: Vehicle Safety Roadmap

“Thermal Runaway”

- Bei hohen Temperaturen kommt es innerhalb der Zelle zu exothermen Reaktionen, die sich aufschaukeln (Thermal Runaway)
- Daran sind sowohl die Reaktion der Anode mit dem Elektrolyten als auch die Kathode mit dem Elektrolyten beteiligt

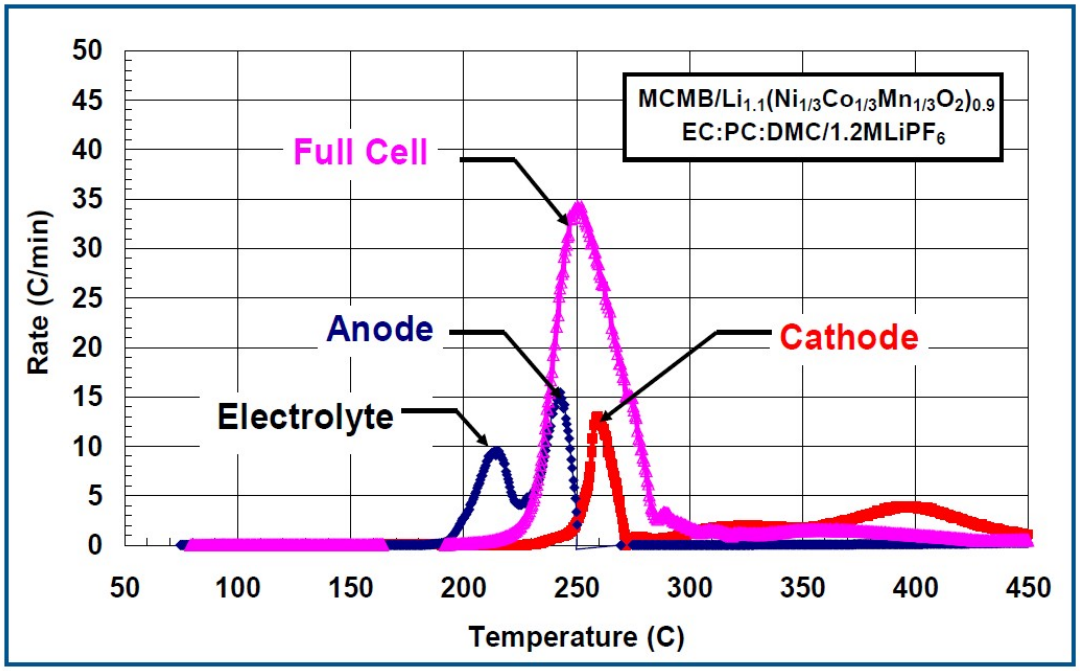


Fig. 10. *ARC profiles of anode and cathode electrodes in electrolyte compared to full cell response.*

Doughty, A general discussion of lithium ion battery safety

Einfluss des Kathodenmaterials

- Die Kathodenmaterialien unterscheiden sich sowohl in der Anfangstemperatur der Reaktion als auch in der freigesetzten Energie
- Nur bei Lithium-Eisenphosphat findet keine Reaktion mit dem Elektrolyten statt

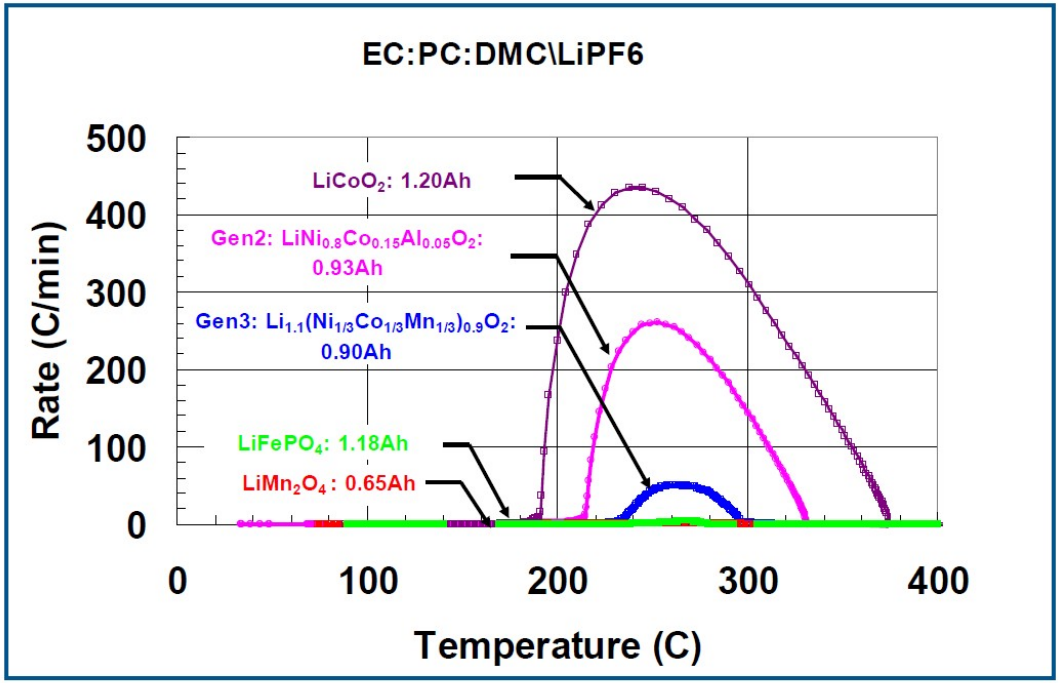


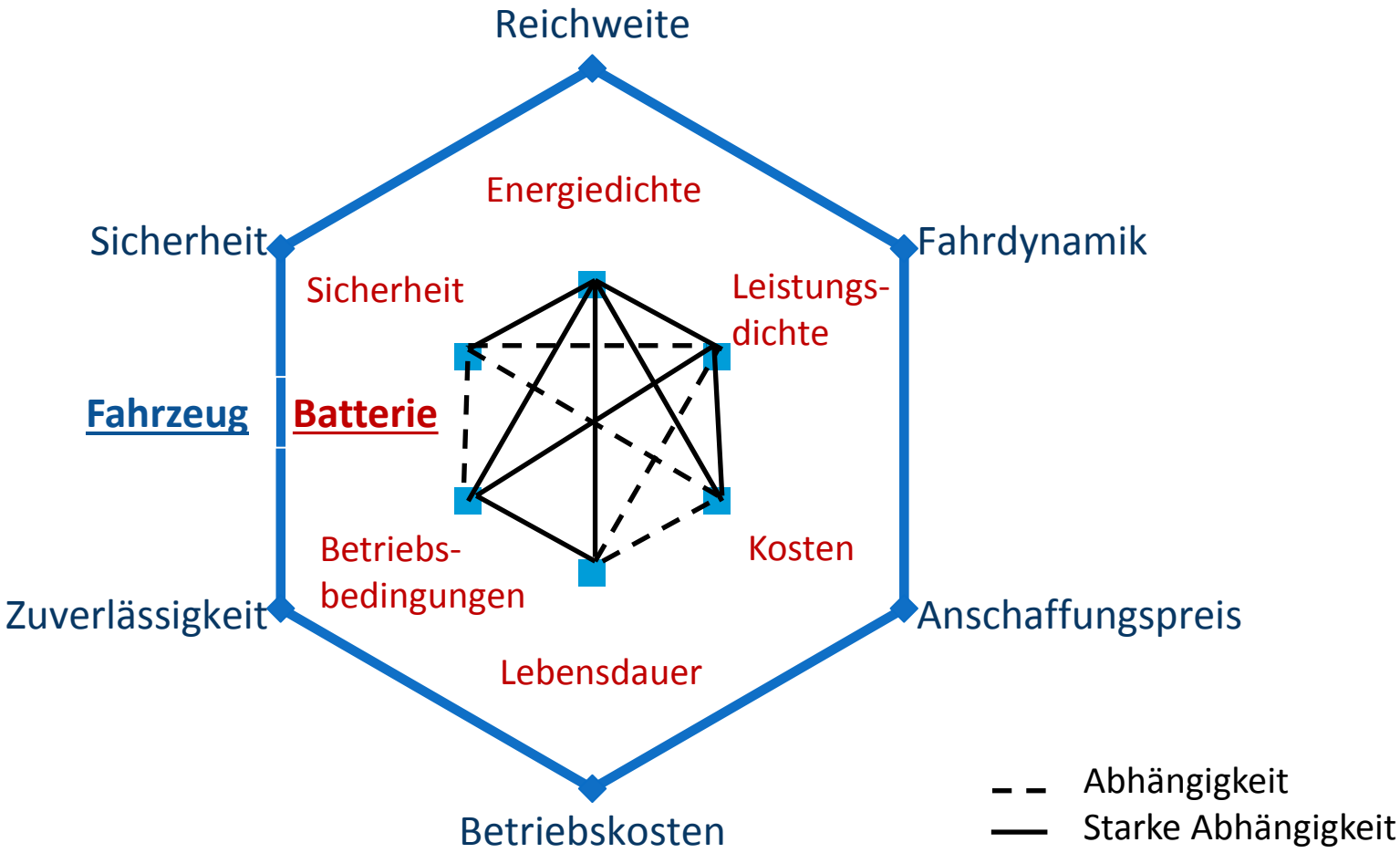
Fig. 6. *Self-heating rate of 18650 full cell measured by ARC. Improved cathode stability results in higher thermal runaway temperature (increased stability) and reduced peak heating rate. (From Ref. 24)*

Doughty, A general discussion of lithium ion battery safety

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dr. Klaus Brandt

Wechselwirkung zwischen Batterieeigenschaften



Zusammenfassung

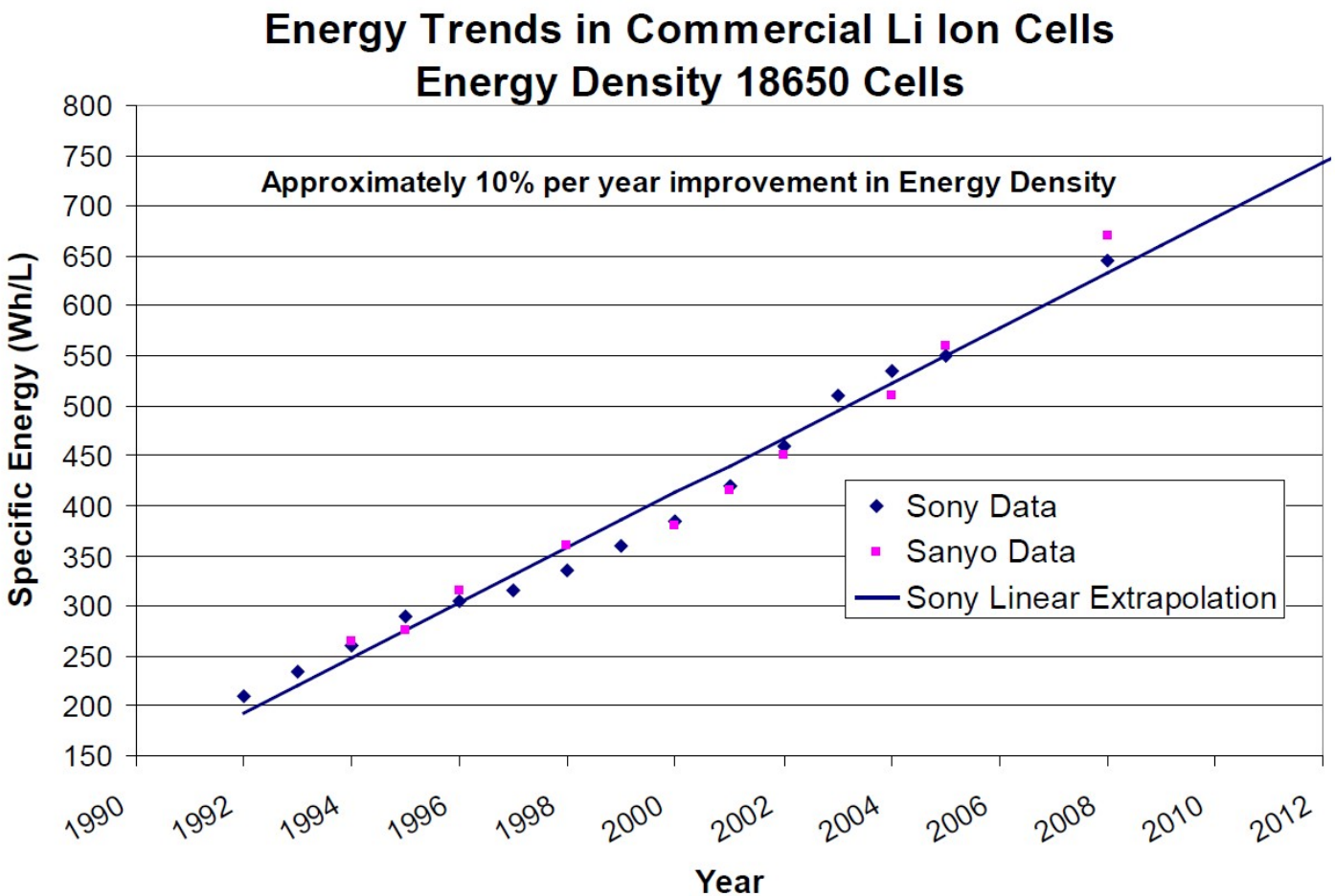
- Die Automobilindustrie bringt eine Vielzahl von Fahrzeugen mit teilweise oder ganz elektrifiziertem Antrieb (BEV) auf den Markt
- BEVs nutzen ausschließlich LIB als Speicher, allerdings mit einer Vielzahl von Zelltypen und Chemien
- Der im Vergleich zum Benzin viel niedrigere Energieinhalt begrenzt die Reichweite. Fahrzeuge mit großer Reichweite benötigen einen großen Speicher
- LIB sind je nach Zelldesign in der Lage große Leistungen zu liefern, was für gute Fahrdynamik spricht. Dies geht allerdings auf Kosten der Energiedichte
- Die Kosten der Batterie stellen einen großen Anteil an den Fahrzeugkosten dar
- Die Umweltbedingungen beeinflussen stark die Performance der Batterie
- Eine Anzahl von Maßnahmen auf Zell-, Batterie- und Fahrzeugebene muss getroffen werden, um ein Batteriefeuer zu vermeiden
- Eine Optimierung der LIB ist komplex, da alle Batterieeigenschaften miteinander in Wechselwirkung stehen

Ausblick

- Große LIB für BEV-Anwendungen haben die Energiedichte von Konsumerzellen noch nicht erreicht und haben noch erhebliches Entwicklungspotential
- Neue Materialien für höhere Energiedichten befinden sich in der Entwicklung
- Langfristig (>10 Jahre) können andere elektrochemische Energiespeicher mit erheblich größerer Energiedichte zum Einsatz kommen
- Die LIB-Kosten fallen kontinuierlich entlang der Lernkurve mit größeren Stückzahlen
- Die Lebensdauer der LIB wird ebenfalls kontinuierlich gesteigert werden
- Neue Materialien wie nicht-brennbare Elektrolyte können zu einer eigensicheren Zelle führen und damit die Komplexität und Kosten der Sicherheitsmaßnahmen verringern

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

BACKUP

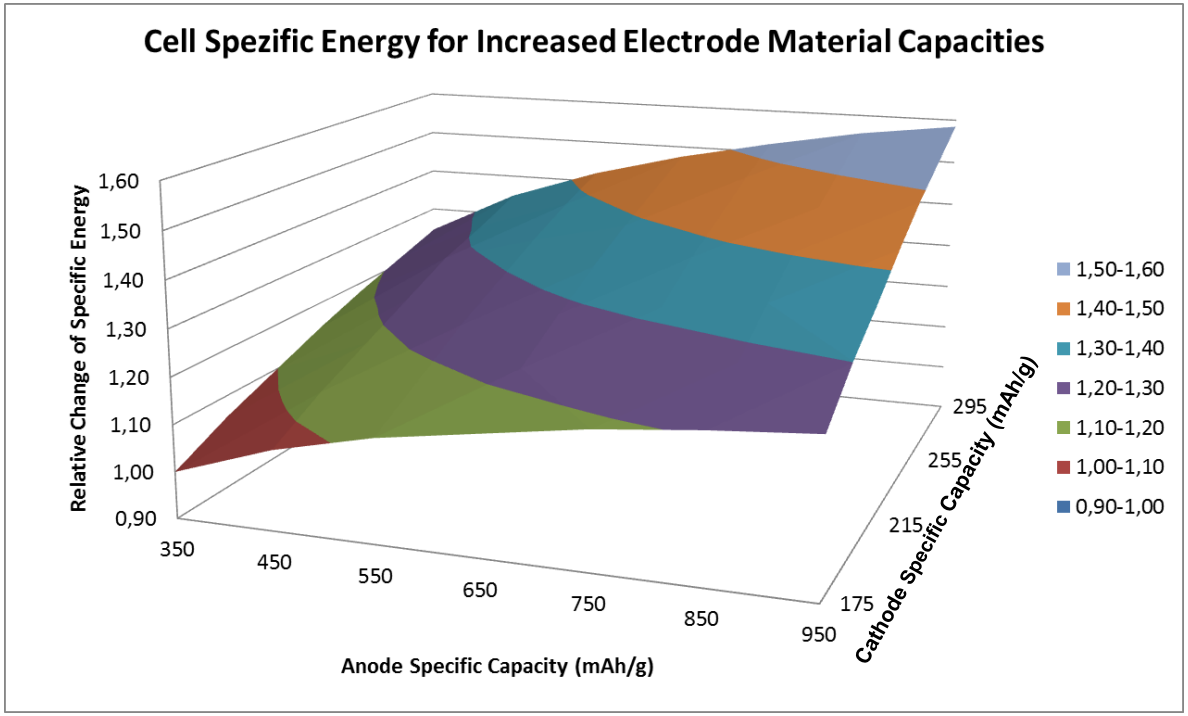


Doughty: Vehicle Battery Safety Roadmap

Möller, Fraunhofer: Technologie Roadmap

Increase of the Specific Capacity of Anode and Cathode Materials 1/2

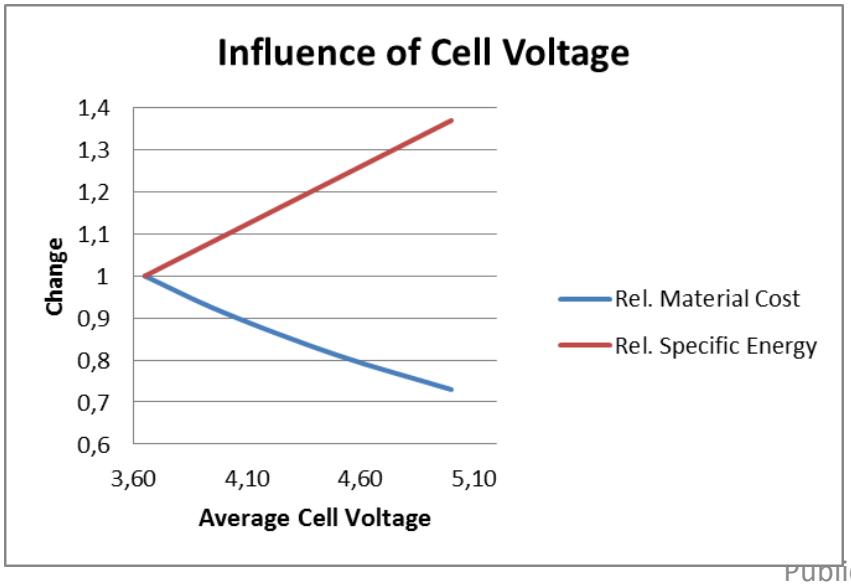
- A major part of the material development is focusing on increasing the specific capacity (mAh/g). Especially the anode material has a large upside potential
- Analysis shows that the best results can be achieved by increasing the capacity of both materials. Increasing only one shows diminishing returns

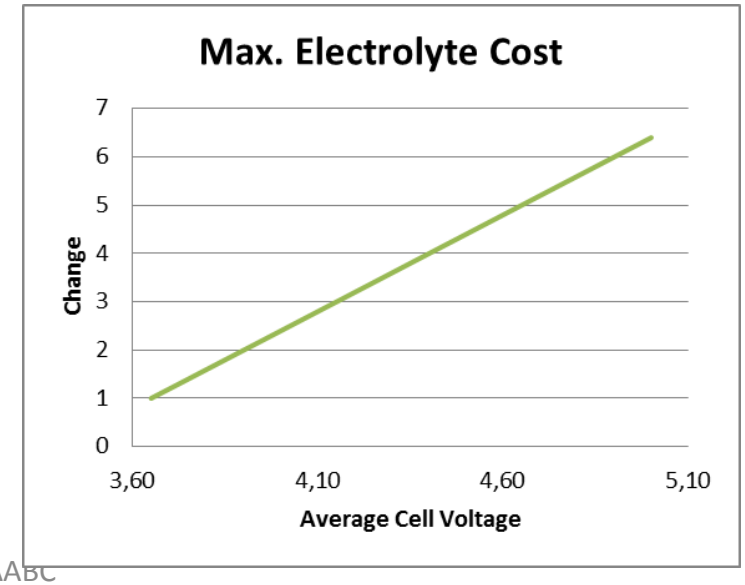


In these model calculations, the capacity per unit electrode area was kept constant. With increasing specific capacity the thickness of the electrodes is reduced which will maintain the cell P/E ratio, potentially even improving on it.

Increase of the Average Cell Voltage

- Present commercial cells have an average cell voltage below 4V. The use of high voltage cathode materials (5V materials) directly translates into
  - Increase of the energy density directly proportional to the increase in voltage
  - Corresponding decrease of the material cost
  - Lower battery pack cost as a lower number of cells is used for the same pack voltage
- However, conventional electrolytes and other cell components are not stable at cell voltages close to 5V. Due to the large positive cost impact of high voltage cathode materials, there is considerable room for new higher cost materials such as electrolytes

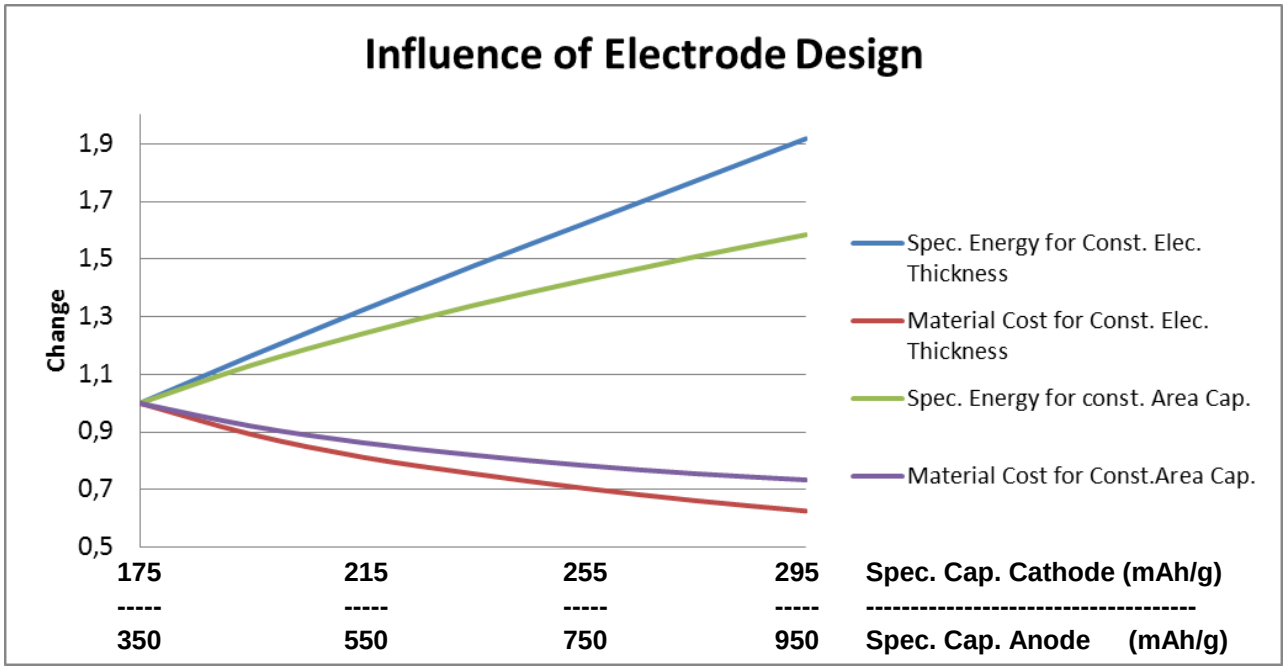




Public AABC

Influence of Electrode Design: Area Capacity

- The reduction of cell cost and the increase of the specific energy depend also on the electrode design
  - Keeping the electrode thickness constant when the specific capacity of the electrode materials increases will provide more benefits than a constant area capacity
  - The higher area capacity leads to higher current density for the same rates and therefore to a reduction of the P/E



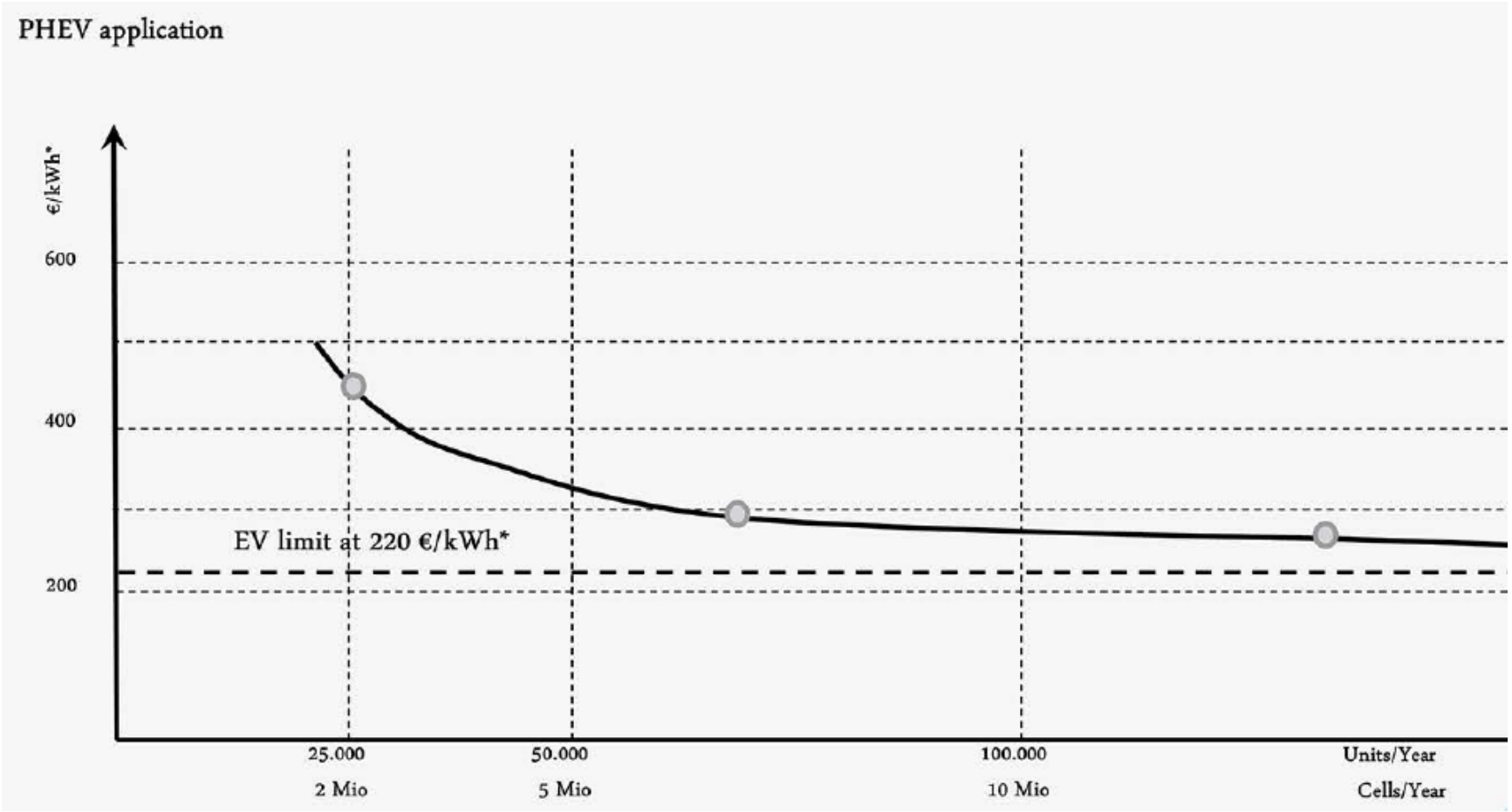
Diameter 54 mm / Energy-Power Applications EV or PHEV

	VL45E	VL41M	VL22M	VL30P
Capacity (Ah) C/3 @ 4V	45	41	22	30
Dia. (mm)	54	54	54	54
Length (mm)	222	222	145	222
Weight (kg)	1.07	1.07	0.65	1.1
Volume (dm^3)	0.51	0.51	0.33	0.51
Energy (Wh)	160	146	78	107
Power (W) Current limit (A)	710 250	850 300	700 300	1520 500
Power (W) V limit, 2.5 V				2300
	30s – 50%SOC			10s – 50%SOC

- Note: characteristics at 25°C

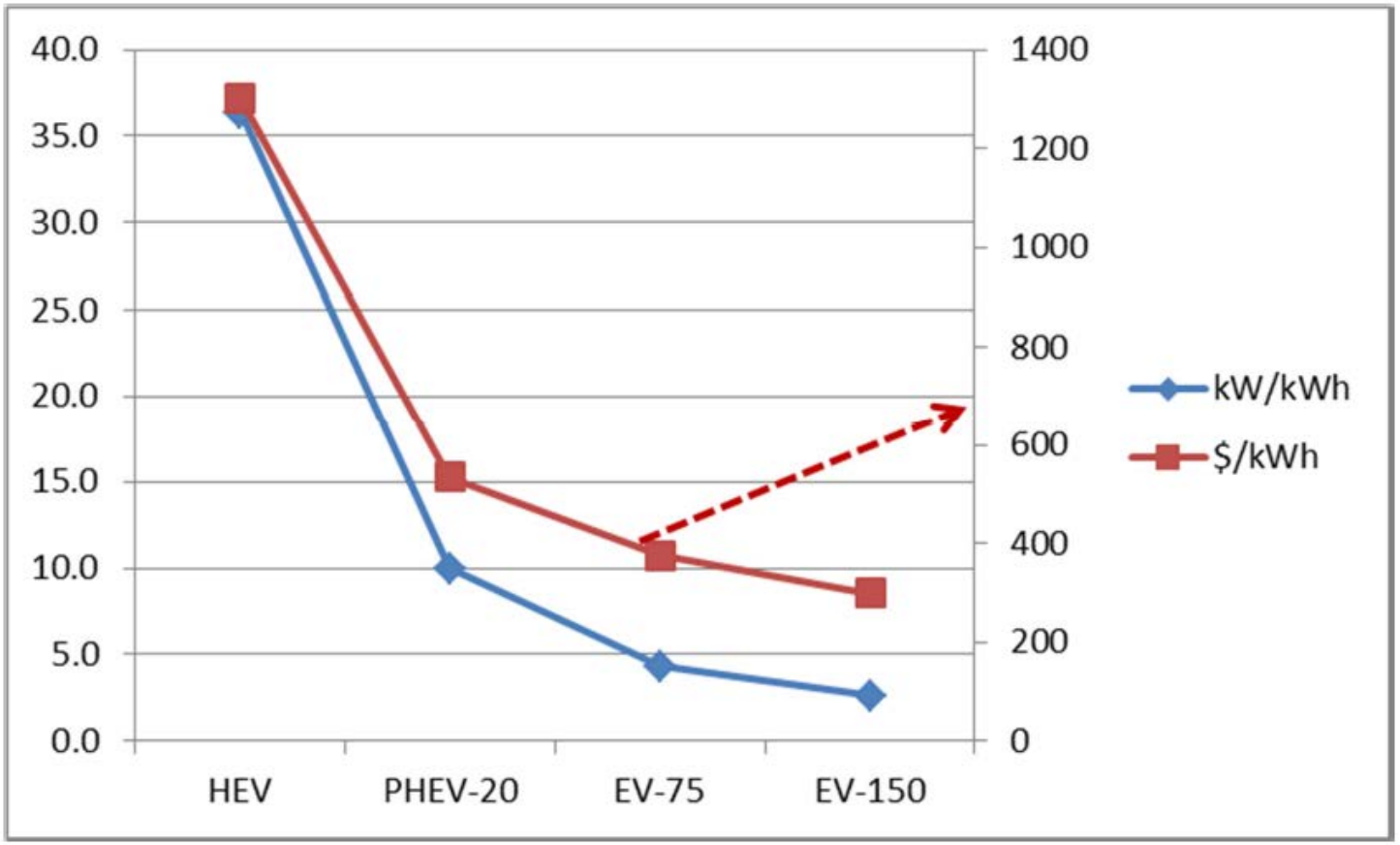
- Standard mechanical parts
- Standard chemistry (NCA/Graphite)
- Standard assembly processes
- Flexible height to various capacities
- 3 different electrodes types "E" / "M" / "P" for various Power to Energy ratios

Kümpers, JCI: Neue Fahrzeugkonzepte

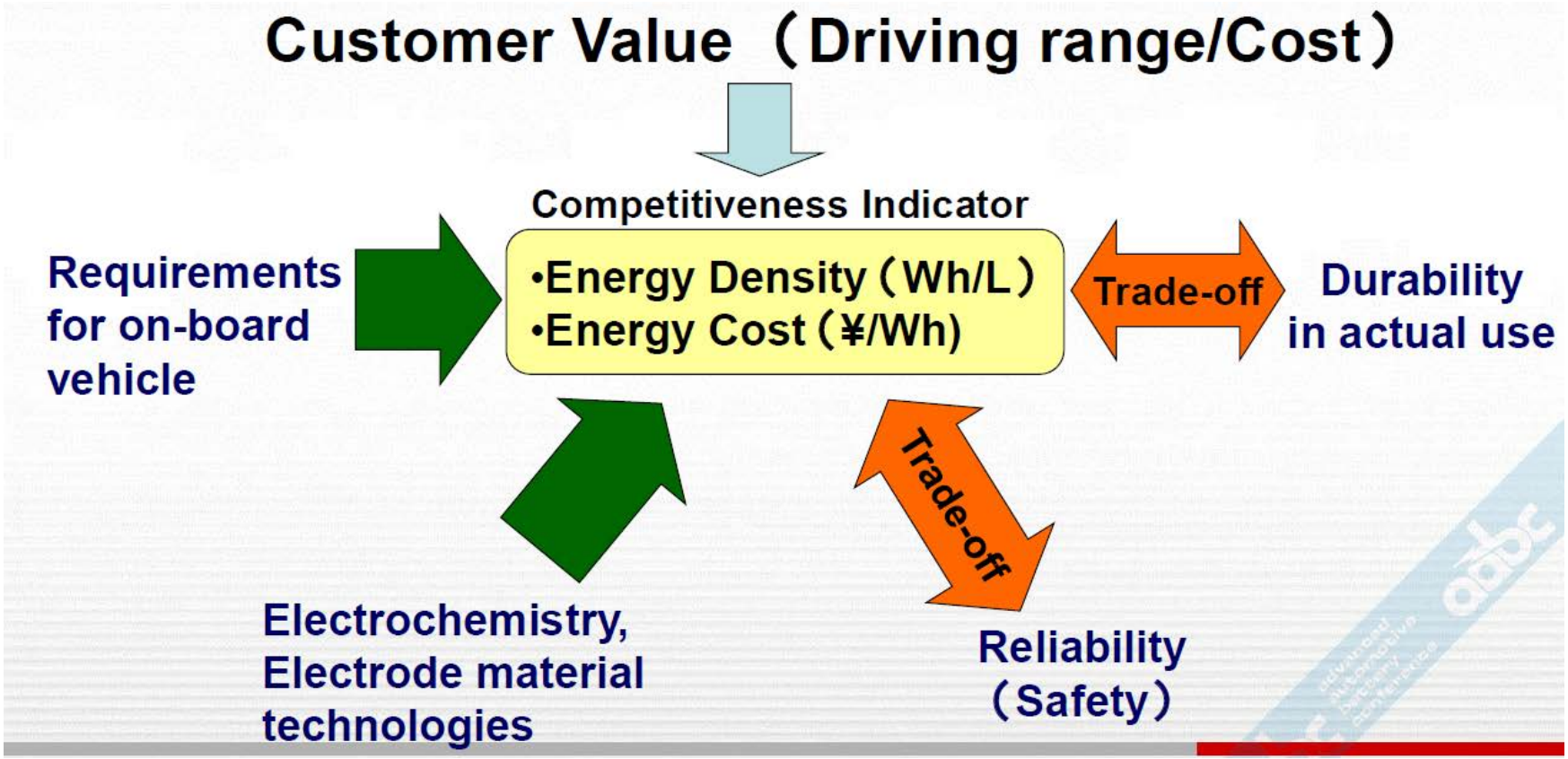


Lamm, Daimler, AABC 2013

xEV Battery Cost vs. Power Level



Anderman, AABC 2014



Miyamoto, Nissan, AABC 2014

- An ICE-equivalent 600-km EV would require a **110-kWh** battery…
  - With today's technology, this means a battery with the following: **1,200 kg - 40 cu. Ft - $50,000**
- How about a 150-km EV?
  - This will require a **27-kWh** battery. Today this translates to: **300 kg - 10 cu. Ft - $12,000**
- How about a 150-km EV in 2020?
  - This will still require a **25-kWh** battery. Likely parameters: **220 kg - 7 cu. Ft - $7,500**

Andermann, AABC 2013