

# Elektrische Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

Seminar für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik  
Berlin, 29.01.2009

**Dirk Uwe Sauer**

email: sr@isea.rwth-aachen.de

**Juniorprofessur für Elektrochemische Energiewandlung  
und Speichersystemtechnik**

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)  
Univ.-Prof. Dr. ir. Rik W. De Doncker

RWTH Aachen

## Motivation

- Hybrid für Ober- und Mittelklasse zur Leistungssteigerung und Emissionsreduzierung
- Konsequente Weiterentwicklung bis zum reinen Elektrofahrzeug
- Ankündigungen von allen namhaften Herstellern, teilweise früher als erwartet

ELEKTROAUTO-BOOM

Quelle: Spiegel Online

### Eine Branche unter Strom

Von *Thomas Hillenbrand*

VW, GM, Daimler - in der Autobranche ist ein Wettlauf um das erste Elektroauto ausgebrochen. Lange ignorierten die Konzerne den Ölpreis und hielten an ihren heißgeliebten Verbrennungsmotoren fest. Jetzt will keiner der letzte sein, der einen Stromer ins Rennen schickt.

ELEKTRO-SMART

Quelle: manager magazin

Spätestens in sechs Jahren

Der Autobauer Daimler reagiert auf die Klimadiskussion in der Autoindustrie und bringt seinen Kleinwagen Smart als reines Elektroauto auf den Markt. Innerhalb der nächsten sechs Jahre soll die Version in "nennenswerter Stückzahl" produziert werden, sagte der Umweltbevollmächtigte des Autoherstellers, Herbert Kohler.

Sevilla/Stuttgart - Das vollelektronische Fahrzeug soll mit Lithium-Ionen-Batterien betrieben werden, so Kohler am Mittwochabend in Sevilla. Daimler



rt: Seit 2007 in estbetrieb

Jahre geplant. auer als

n kommenden traßen



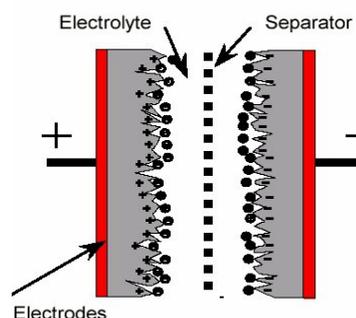
Quelle: Volvo

## Gliederung

- Aktuell verfügbare Speichertechnologien
- Lithium-Ionen-Batterietechnologie
  - Materialien, Zelltechnologien, Produkte
  - Kosten, Entwicklungsziele, Verfügbarkeit Lithium
- Plug-in Hybride vs. Elektrofahrzeuge
- Infrastrukturfragen zur Elektromobilität und Wechselwirkungen mit dem Netz
- Zusammenfassung

## Aktuell verfügbare Speichertechnologien - SuperCaps

- Supercaps für Start/Stopp-Technologie
  - geringe Energiedichte, hohe Leistung, nur drei Anbieter
  - ungeeignet für Elektrofahrzeuge
- „Wunder“-Kondensatoren sind angekündigt (basierend auf Barium-Titanat mit sehr hoher Dielektrizitätskonstante, EESTORE)
  - ➔ Technologie und Ökonomie in Bezug auf Elektrofahrzeuge unklar



Doppelschichtkondensatoren

## Aktuell verfügbare Speichertechnologien - NiMH

- NiMH für alle aktuellen Hybridfahrzeuge am Markt
  - technisch ausgereift, sicher
  - gute Lebensdauer im teilzyklischen Betrieb
  - Ausbau der Kapazitäten in Japan
  - bis 2012 steigender Absatz erwartet
  - geringes Potential für Kostensenkung und Erhöhung der Energiedichte
  - Keine nachhaltige Option für PHEV und EV



Quelle: Toyota



Quelle: Cobasys

## Aktuell verfügbare Speichertechnologien - Hochtemperatur

- ZEBRA-Batterie (NaNiCl) in vielen Elektrotraktionsanwendungen (aktuell meist verkaufte Batterie für Elektrofahrzeuge)
  - Kosten um 500 €/kWh im System
  - Produktionskapazitäten bei nur einem Hersteller sehr klein
  - Betriebstemperatur 300°C, thermische Verluste ca. 100 W
  - nicht optimal für Privatkunden wg. thermischen Verlusten, kein ernstes Problem im Flotteneinsatz



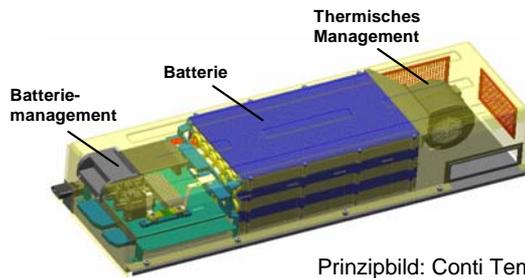
Quelle: NGK, MES-DEA

# Aktuell verfügbare Speichertechnologien – Lithium-Ionen

- Lithium-Ionen im Einsatz bei Hybridfahrzeugen erst ab 2009
- Großer Markt im Bereich tragbare Geräte, PowerTools, Elektrofahrzeuge, Gartengeräte, etc.



Quelle: Daimler



Prinzipbild: Conti Temic

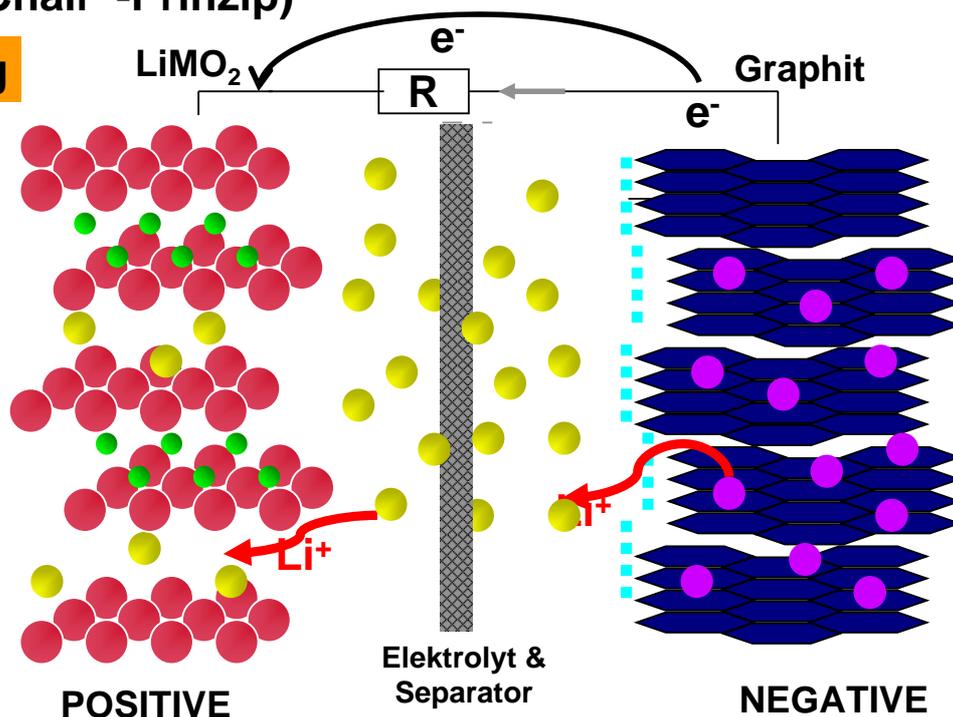


Quelle: Saft

## Das Lithium-Ionen System (Interkalationelektroden, „Rocking Chair“-Prinzip)

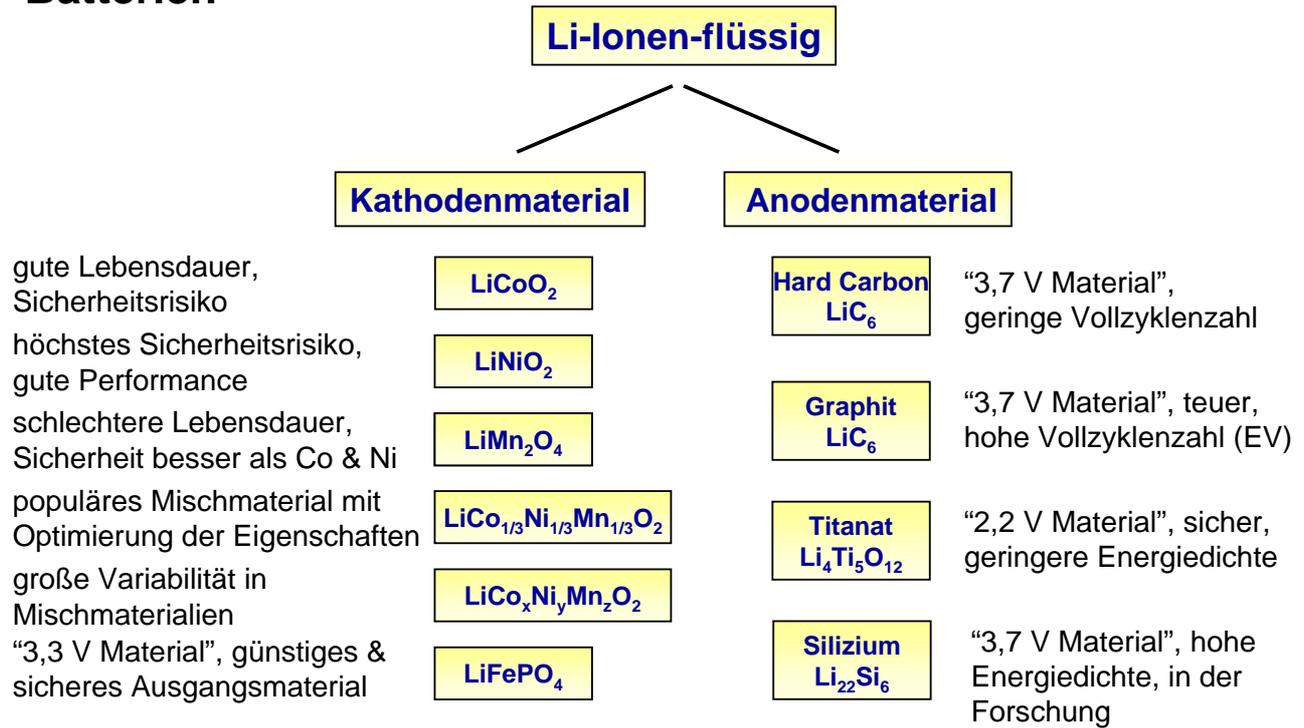
**Entladung**

- Sauerstoff
- $\text{Li}^+$     $\text{LiC}_6$
- Metall-Ion
- Graphit
- Separator

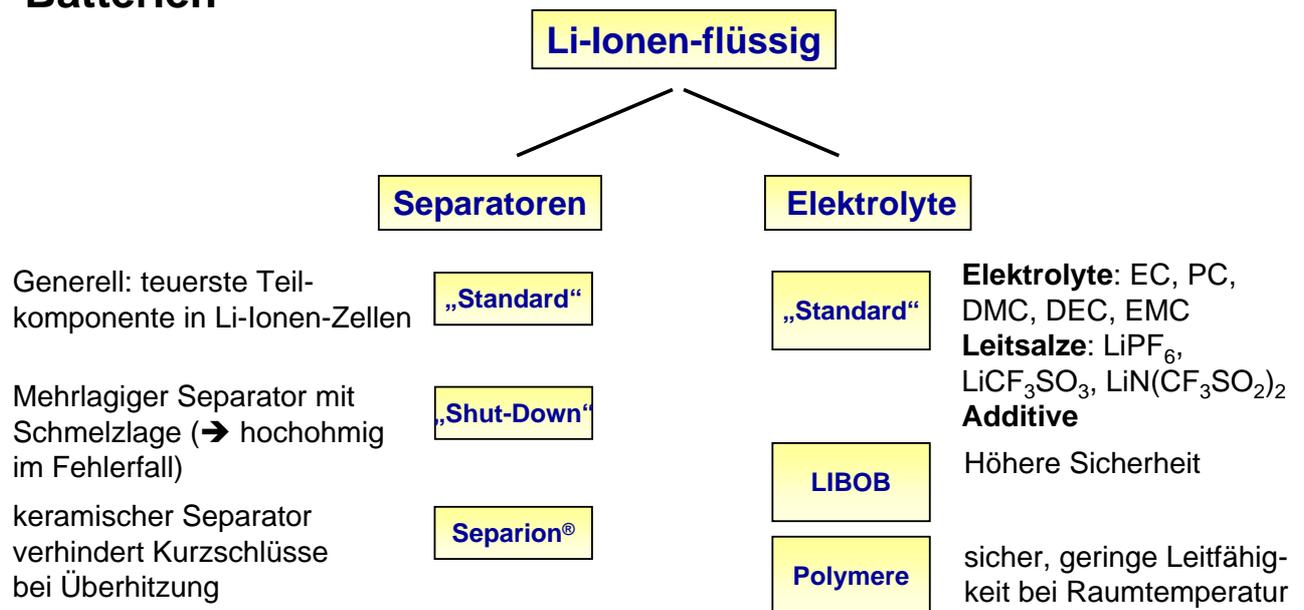


Graphik: Saft

# Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien



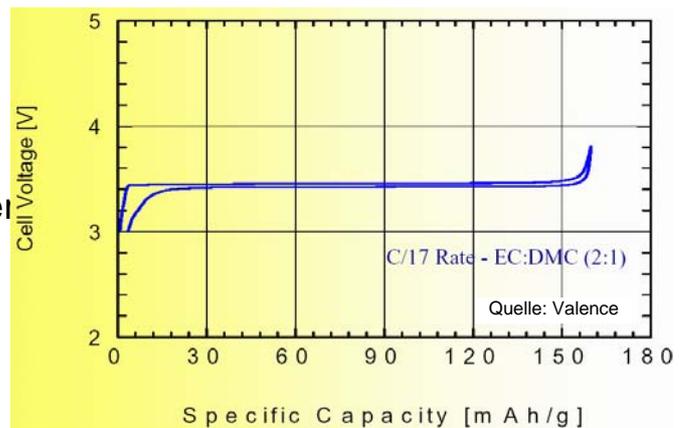
# Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien



Elektrolyte und Bindermaterialien gelten als zentrale Komponenten in Bezug auf Tieftemperaturverhalten und Lebensdauer.

## Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien

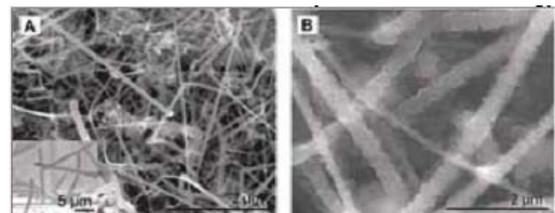
- $\text{LiFePO}_4$  sehr wahrscheinlich ein wichtiges Material
- Energiedichte etwa 10% geringer als Standardmaterialien
- Intrinsic sicheres Material
- Zyklenlebensdauer ist nachgewiesen
- Kalendarische Lebensdauer mit Fragezeichen
- Inzwischen eine Reihe von Herstellern



## Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien

Höhere Energiedichten möglich über

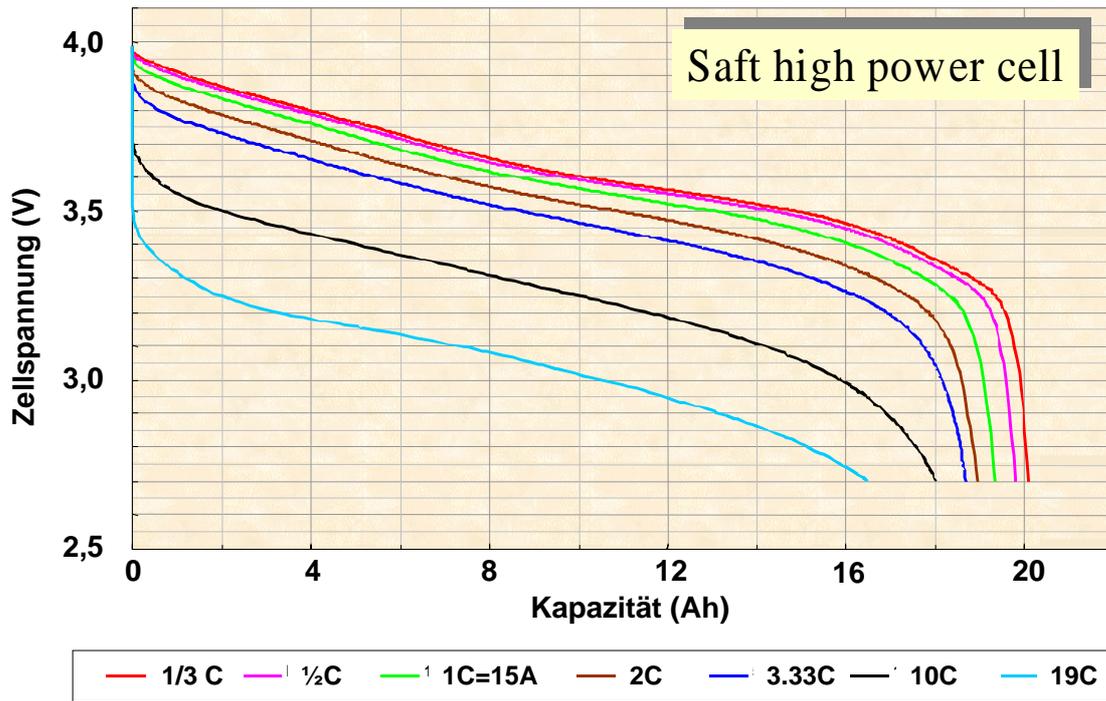
- „5-Volt“-Kathodenmaterial, z.B.  $\text{LiCoPO}_4$ ,  $\text{LiNiPO}_4$ 
  - Vorteil: hohes Potential, hohe Sicherheit
  - Nachteil: Kosten von Co-Material, Zyklenlebensdauer noch nicht gezeigt
- Silizium-Anodenmaterial ( $\text{LiSi}_5$ )
  - Vorteil: theo. 11x höhere Energiedichte der Anode verglichen mit Graphit
  - Nachteil: hoher Volumenausdehnungskoeffizient, Lebensdauer ungelöst



Quelle: Stanford University – Silicon Nano Wires

- Energiedichten um 300 Wh/kg erscheinen möglich

## Entladecharakteristik von Li-Ionen „High Power“ Batterien



## Elektrische Leistungsfähigkeit (Zellen)

	Hochenergie	Hochleistung
• Leistungsdichte (25°C)	200 – 400 W/kg	2000 – 4000 W/kg
• Energiedichte	120 – 160 Wh/kg	70 – 100 Wh/kg
• Wirkungsgrad	~ 95%	~ 90%
• Selbstentladung	< 5%/Monat (25°C)	< 5%/Monat (25°C)
• Lebensdauer	bis 5000 Vollzyklen	10 <sup>6</sup> (3,3% DOD)

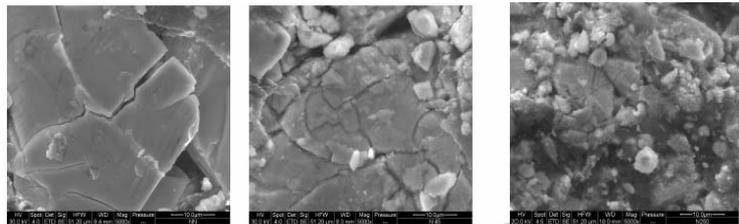
Serienreife einer Zelle muss mindestens drei Jahre vor Markteinführung im Fahrzeug erreicht sein.

# Elektrische Leistungsfähigkeit (Zellen)

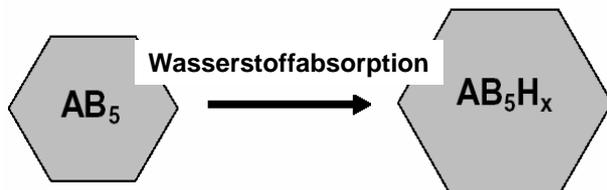
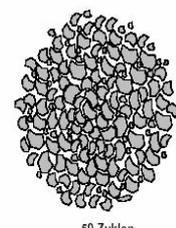
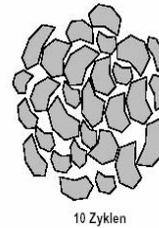
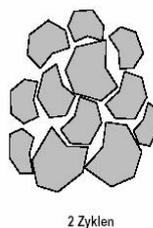
	Hochenergie	Hochleistung
• Leistungsdichte (25°C)	200 – 400 W/kg	2000 – 4000 W/kg
• Energiedichte	120 – 160 Wh/kg	70 – 100 Wh/kg
• Wirkungsgrad	~ 95%	~ 90%
• Selbstentladung	< 5%/Monat (25°C)	< 5%/Monat (25°C)
• Lebensdauer	bis 5000 Vollzyklen	10 <sup>6</sup> (3,3% DOD)

# Alterungseffekte durch Zyklisierung bei NiMH-Batterien

- Gitterausdehnung während der Wasserstoffeinlagerung führt zu mechanischem Streß und damit zur Zerstörung der Metallegierungskristalle

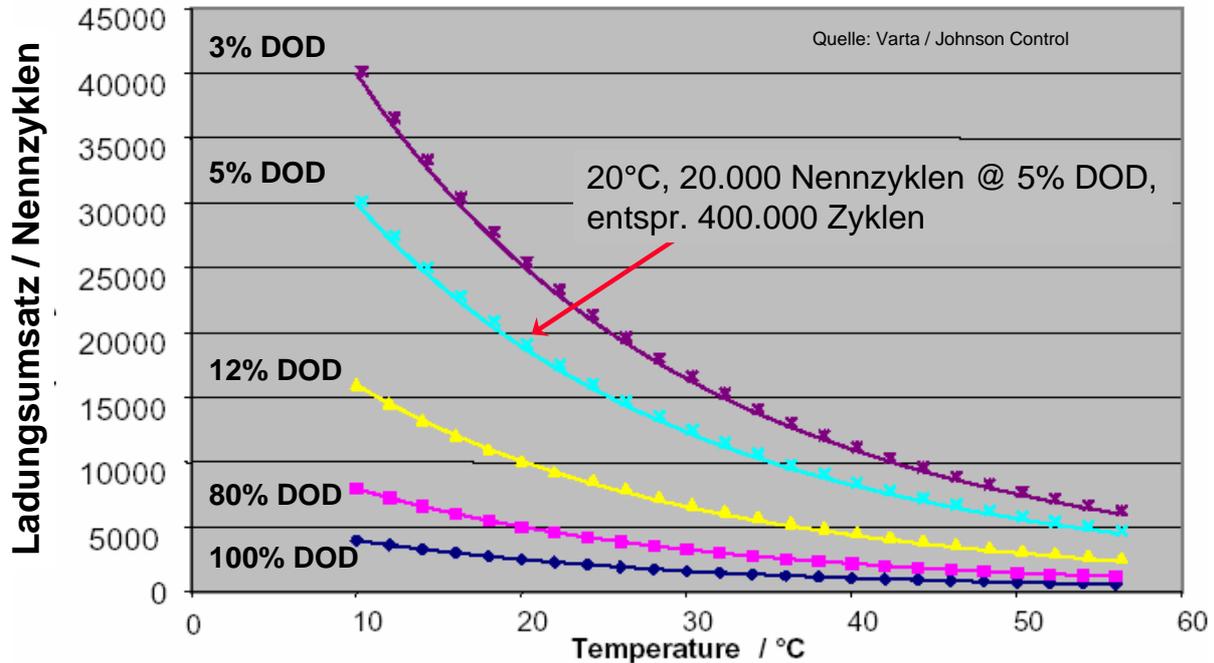


Volumenausdehnung:



## Lebensdauer als Funktion der Entladetiefe

(Beispiel: NiMH, prinzipiell gleich für Lithium-Ionen und Bleibatterien)



## Unterschiedliche Zellkonzepte



### Rundzelle

- Viel Erfahrung im Zelldesign
- Hohe Lebensdauererwartung
- Kühlung aufwändig
- Anbieter z.B. Saft, GAIA, A123, Sanyo

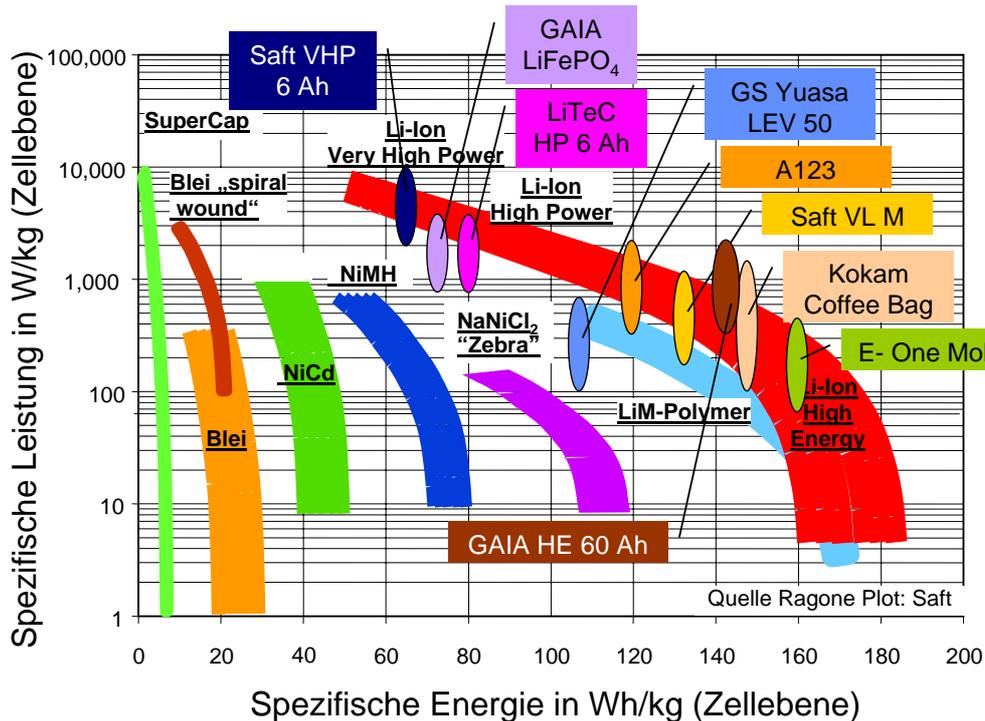


### „Coffee bag“-Zelle

- Sehr gute Kühleigenschaften
- Hohe Energiedichte
- Dichtigkeit der Folie zentrale Fragestellung
- Anbieter z.B. Kokam, LiTec (geplant), A123 (Prototypen)

## Gravimetrische Leistungsdichte vs. Energiedichte

(Leistungs- und Energiedichten spezifischer Produkte aus Datenblättern und eigenen Messungen)



## Kosten von Li-Ionen-Batterien

### heute

- Hochenergiebatterien bei ca. 1500 Euro / kWh (Kleinserie), aber Preisangaben sehr schwierig, da kein echter Markt existiert

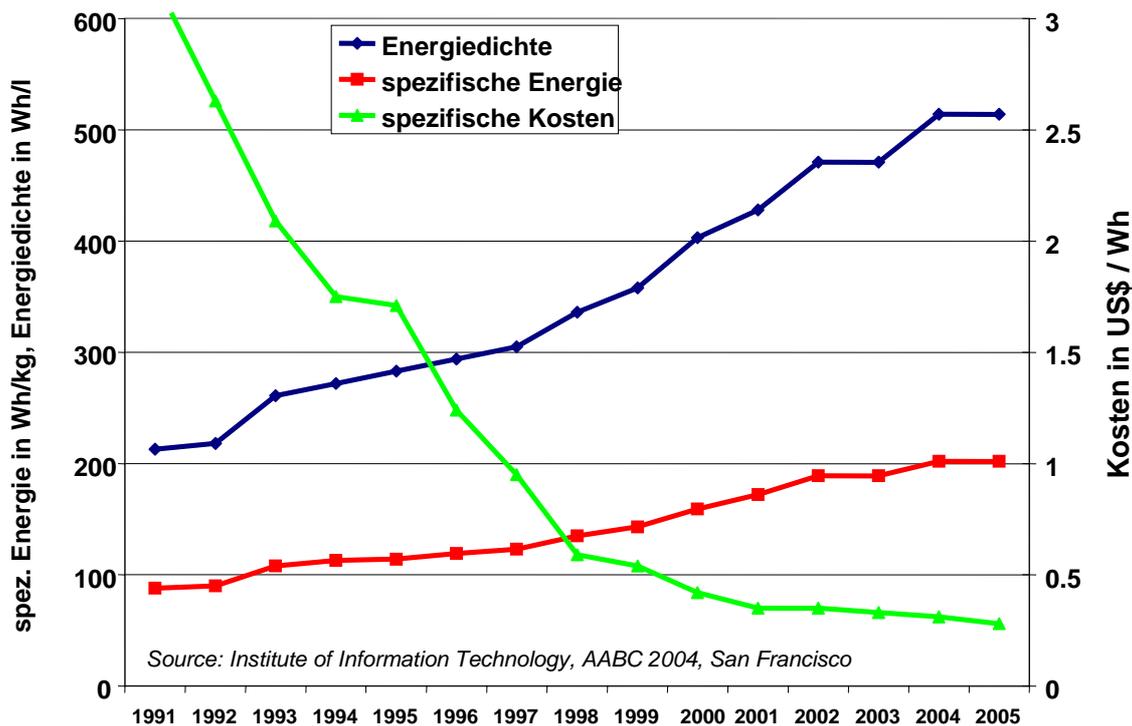
### Einschätzung bzw. Marktforderung der erreichbaren Kosten bei Massenproduktion:

- 500 €/kWh für Hochleistungsbatterien
- 300 €/kWh für Hochenergiebatterien (Schätzung aus Japan liegen bei 160 €/kWh)

### Warum?

- Kokam liefert heute bei großen Stückzahlen heute für < 500 €/kWh (HE)
- Hochenergiebatterien aus China heute schon für 300 €/kWh erhältlich (Markt für Elektrofahrräder), Qualität fraglich
- Laptop-Batterien heute bei 220 €/kWh, Kostenreduktion 1995 – 2005 etwa Faktor 5

## Kostenentwicklung Konsumerzellen der Bauart 18650 (Standard-Zelle z.B. in Akkus von Laptops)



## Warum sind langreichweitige reine Elektrofahrzeuge wirtschaftlich schwierig darzustellen?

Größe der Batterie für 200 km elektrische Reichweite: ca. 30 kWh  
(sehr sparende Stadtfahrzeuge ggf. 20 kWh, große Fahrzeuge eher 40 kWh)

Kosten der Batterie (nur Einkauf Batteriesystem durch Automobilhersteller):  
ca. 30 x 300 € = 9.000 €

➔ Mehr als Produktionskosten eines Mittelklassefahrzeugs

➔ Gewicht bei 100 Wh/kg ➔ 300 kg

Batterie ist nach 10 bis 15 Jahren kaputt, auch wenn sie nicht genutzt wird.

Bei mittlerer Nutzung von 37 km/Tag stehen sich 80% der Batterie im Wesentlichen kaputt.

Speicher für 50 km Reichweite ermöglichen Abdeckung von mehr als 63% der Fahrleistung in Deutschland ➔ **Plug-in Hybride mit 5 – 10 kWh Speicher**

## Wichtige Kostenreduktionspotentiale

- Kostenverteilung nach heutiger Abschätzung für :  
1/3 Materialien / 1/3 Produktion und Gehäuse / 1/3 allgemeiner Overhead

Reduktionspotentiale bei

- Kathodenmaterial – ca. 42% der Materialkosten
- Anodenmaterial – ca. 11% der Materialkosten
- Elektrolyt – ca. 13% der Materialkosten
- Separator – ca. 21% der Materialkosten
- Ableiterfolien – ca. 13% der Materialkosten
  
- Fertigungskosten – heute ca. 22% der Gesamtkosten
- Overhead geht proportional mit runter

## Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien

Maximierung der Sicherheit und Zuverlässigkeit

Reduktion der Kosten durch Materialauswahl und Economy of scale

Übertragung von Lebensdauerergebnissen aus dem Labor ins Feld

Erhöhung des nutzbaren Kapazitätsbereichs bei hoher Lebensdauer

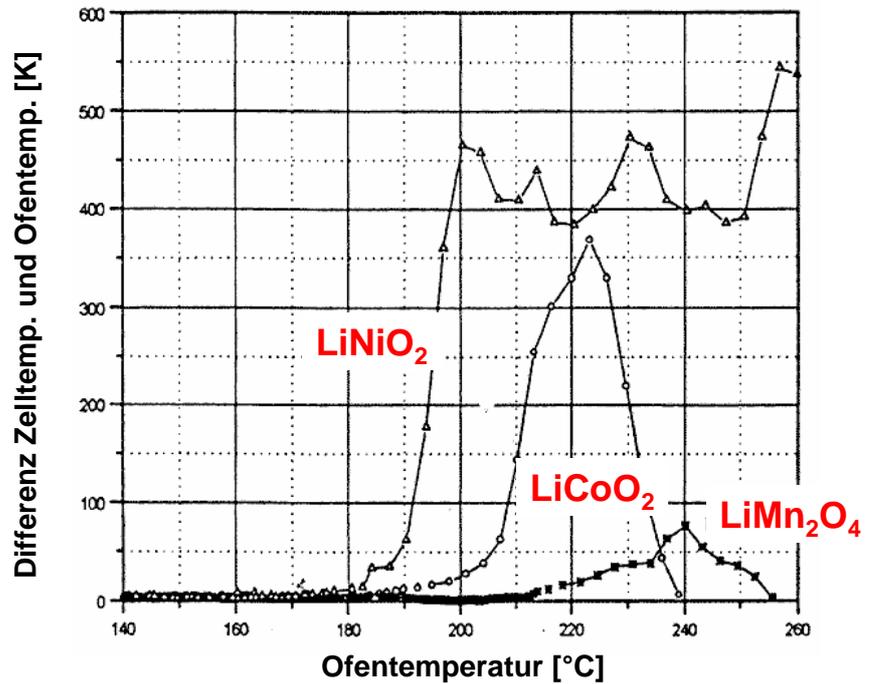
Optimierung der Systemtechnik (insb. Kosten)

Erhöhung der Energiedichte

**Im Vordergrund stehen die Konsolidierung der Technologie und die Überführung in Massenproduktion.** Die Erhöhung der Energiedichte verbessert die Markteintrittschancen nur geringfügig.

# Thermal Runaway bei Li-Zellen - AA-Zellen im Ofen aufgeheizt mit 2,2 K/min

LiFePO<sub>4</sub> ohne Thermal Runaway



# Materialgehalt von LiCoO<sub>2</sub>-Zellen



**Anode:**  
Graphit auf Cu-Folie

**Kathode:**  
Li-Me-Mischoxid auf Al-Folie

Quelle: IME / RWTH Aachen

	Metallpreise (LME)
Co (59 u)	~ 95 US\$/kg
Ni (59 u)	~ 20 US\$/kg
Mn (55 u)	~ 3 US\$/kg
Fe (56 u)	~ 0,7 US\$/kg
Li (als Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) (7u)	~ 43 US\$/kg

	Materialgehalte in Massen-% (Consumerzellen)
Gehäuse	~ 25
LiCoO <sub>2</sub>	~ 20
Graphit	~ 20
Elektrolyt	~ 15
Cu-Folie	~ 9
Al-Folie	~ 5
Separator	~ 5

# Lithium-Verfügbarkeit

- Lithium nicht unbegrenzt verfügbar
  - Wirtschaftliche Verfügbarkeit ca. 6 Mill. Tonnen Lithium  
Reserven gut doppelt so viel (zusätzlich gelöstes Li in den Weltmeeren)
  - Bedarf bei 3,6 V-Technologie ca. 1 g Li für 4-5 Wh (konservativ)
    - ➔ 24 Milliarden kWh Batteriekapazität
    - ➔ z.B. 2,4 Milliarden PHEV mit 10 kWh
  - Aktuelle Produktion bei ca. 25.000 Tonnen
    - ➔ 8 Millionen PHEV mit 10 kWh
  - **Steigerung der Produktion schwierig, muss aber mittelfristig geplant werden**
  - Vollständiges Recycling von Beginn an erforderlich
  - Reserven stark konzentriert in Südamerika (75%)
    - ➔ hohe Abhängigkeit

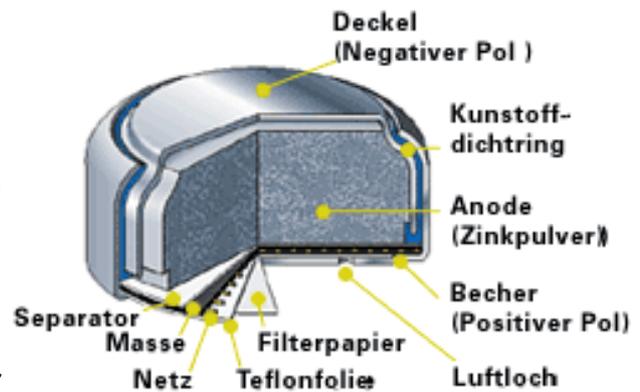
# Kooperationen rund um die Welt (unvollständig)

Batteriehersteller	Automobilhersteller und Zulieferer
A123 Systems (FePO <sub>4</sub> )	Busse, GM, Think (M)
AESC	Nissan, Sub
BYD	BYD ( <a href="http://www.byd.com.cn">www.byd.com.cn</a> )
Enax (NMC-Material)	
GS Yuasa	Daewoo, Mitsubishi (EV)
Hitachi	vor allem LKW
Johnson Matthey (NMC)	Daimler
JS Chem	GM
LiTec (NMC)	Entwicklungsprojekte mit GM (getrennte Projekte)
PEVE	Toyota
Samsung	Ford, VW
Sanyo	VW / Audi

- Weitere Batteriehersteller: Gaia (NMC, FePO<sub>4</sub>), Lishen, Matsushita (Japan), Optimum battery China (nur LiFePO<sub>4</sub>), Sk Corp., Valence

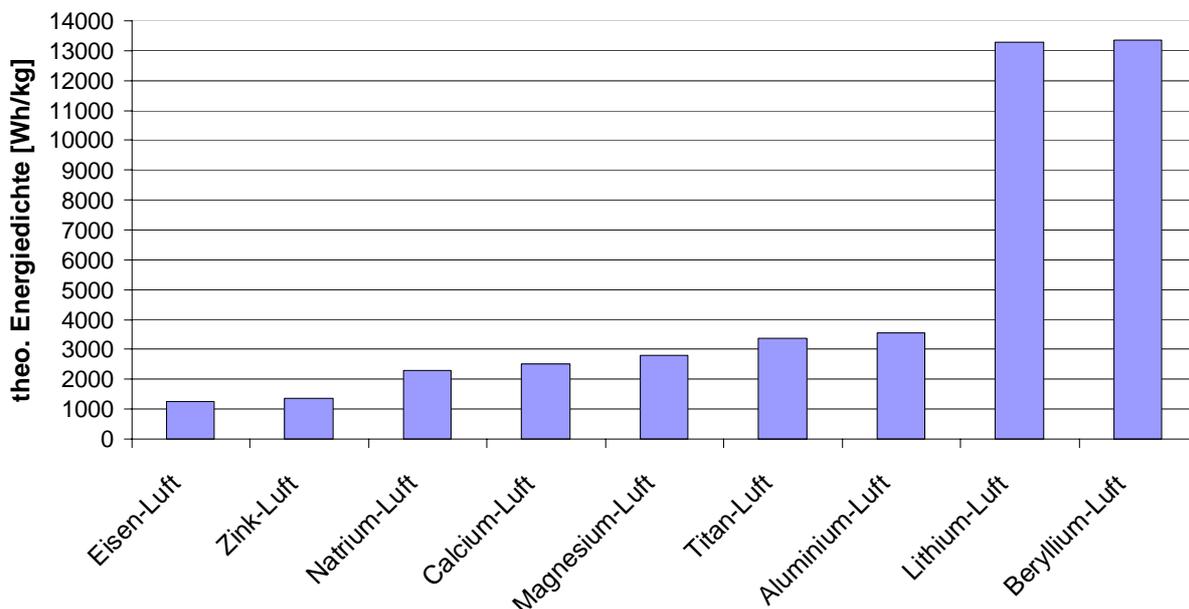
## Metall-Luft-Batterien

- Einzige theoretisch realistische Batterieoption für Energiedichten  $> 1000 \text{ Wh/kg}$
- Aber, als wiederaufladbare Batterie mit  $> 1000 \text{ Wh/kg}$  innerhalb von 10 Jahren sehr unwahrscheinlich
- Aber: Interessant möglicherweise als Austauschbatterien mit externer Regeneration an Tankstellen (siehe auch „Project Better Place“)



→ verändertes Konzept mit Auswirkungen auf Fahrzeugdesign und Nutzerverhalten

## Batterietechnologien mit sehr hohen Energiedichten - Theoretische Energiedichten von Metall-Luft-Batterien



## Kennzahlen von Mobilität und Stromversorgung in Deutschland

- 46 Millionen PKW
- Mittlere tägliche Fahrleistung: 37 km / Tag
- Mittlere jährliche Fahrleistung: 13.500 km / Tag
- Anteil der Gesamtfahrleistung von PKW (ohne Transportsektor) auf Strecken unter 50 km: ca. 63%
- Stromverbrauch in Deutschland etwa 600 TWh
- Primärenergiebedarf Verkehrssektor etwa 600 TWh
- 100% PKW rein elektrisch würden nur rund 100 TWh benötigen

## Gibt es langfristig eine Alternative zur Elektromobilität?

- Annahme: Öl-Reserven sind endlich & Emission von CO<sub>2</sub> muss dramatisch reduziert werden
- Strombedarf für alle PKW in D als Elektrofahrzeuge: ca. 100 TWh (derzeitiger Gesamtstromverbrauch in D ca. 600 TWh)
- Strombedarf bei Verwendung von CO<sub>2</sub>-freiem Wasserstoff für alle PKW in D: ca. 300 TWh
- Ertrag bei Treibstoff aus Biomasse durch BTL etwa 60.000 km / ha / Jahr
- Ertrag aus Photovoltaik in Deutschland etwa 1.000.000 km / ha / Jahr
- ➔ Mittelfristige Lösung für PKW-Verkehr mit großer Reichweite: Plug-in Hybrid (elektrische Reichweite 30-50 km mit Brennstoffzelle)
- ➔ Endenergie PKW insgesamt: 2/3 elektrische Energie, 1/3 Wasserstoff

# Elektrifizierung des Individualverkehrs



## Hybridfahrzeug

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



## Plug-in Hybrid

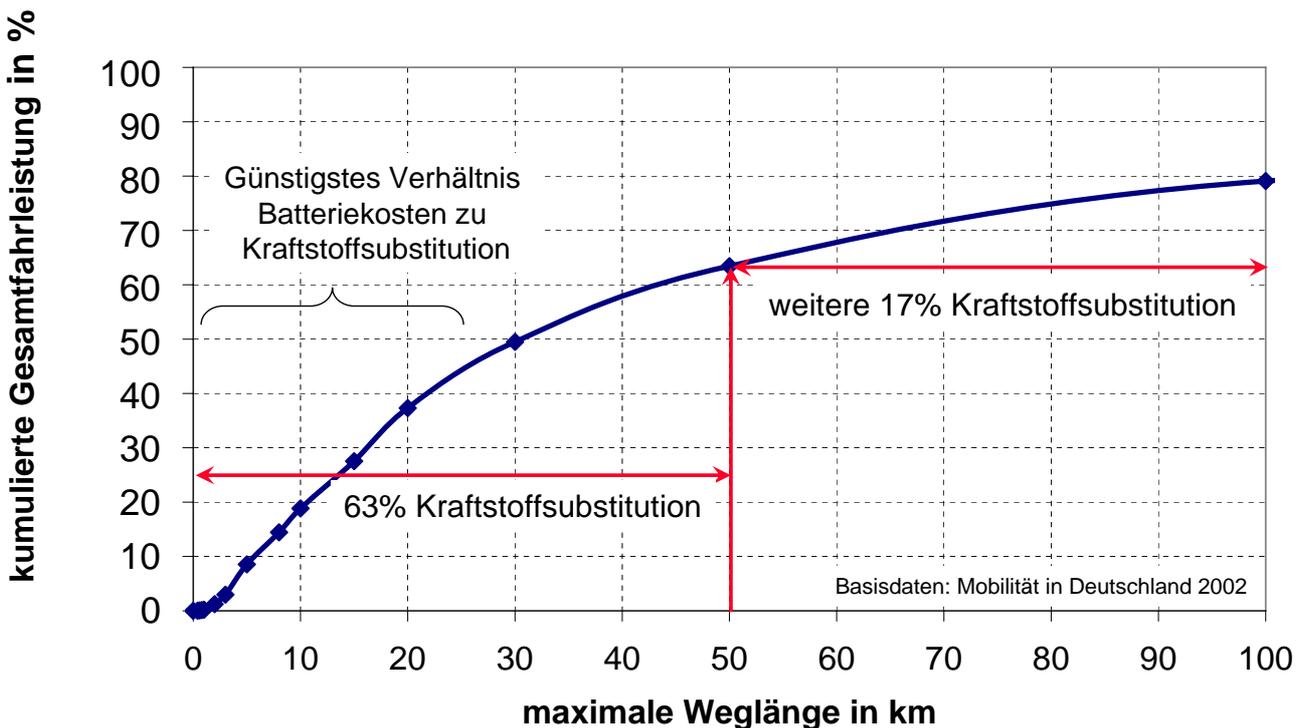
Speicher 5 – 10 kWh, Ladung aus dem Netz, 50 – 70 km Reichweite ohne Treibstoff, volle Reichweite, volle Leistungsfähigkeit



## Elektrofahrzeug

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

# Kumulierte Fahrleistung als Funktion der Wegstrecke



## Auslegung des Batteriespeichers – Plug-in Hybrid

### Grundsätzliche Frage: Maximierung der Wirtschaftlichkeit oder Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

(Weitere Betrachtungen beziehen sich auf wirtschaftliche Optimierung)

- Batterie sollte so ausgelegt werden, dass sie Kapazität möglichst häufig genutzt wird
- ➔ Konsequenz: relativ kleine Batterien für maximale elektrische Reichweiten von 30 bis 50 km

## Auslegung des Batteriespeichers – Elektroauto

### Größe der Batterie wird durch Kundenwunsch bestimmt

- Größe in Abhängigkeit des Energiebedarfs (typisch 10 bis 20 kWh/100km)
- Zusätzlich: Energiebedarf für Heizen oder Kühlen
- Wichtig: Wirtschaftlichkeit eines Elektroautos ergibt sich für den Kunden vor allem durch Einsparung von Benzin/Diesel und Substitution durch günstigeren Strom
- Wichtig: Batterien haben eine Zyklen- und eine kalendarische Lebensdauer. Damit sind Batterien auch nach z.B. 15 Jahren kaputt, wenn sie nicht genutzt wurden
- Modulare Batteriekonzepte, die es dem Kunden erlauben z.B. eine Batterie für 50, 100 oder 150 km zu kaufen sind interessant

## Auslegung des Batteriespeichers – Elektroauto

## Beispiel einer Auslegung

- **200 km elektrische Reichweite** bei 15 kWh<sub>el</sub>/100km (0,2 €/kWh), gleiches Fahrzeug 6 l/100 km Benzin (1,50 €/l)
- Mittlere Fahrleistung: 40 km/Tag (37 km im statistischen Mittel über alle Fahrzeuge in Deutschland)
- Kosten pro kWh Batteriespeicher: 300 Euro/kWh EK OEM, x 1.8 für Endkunden
- Lebensdauer 10 Jahre, 3000 Vollzyklen
- Annahme: Elektrofahrzeug ohne Batterie hat gleichen Preis wie Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
- Fahrleistung in 10 Jahren: 146.000 km
- 730 äquivalente Vollzyklen
- Benzinkosten wären 13.140 €, Stromkosten sind 4.380 €
- Batteriekosten: 30 kWh x 300 Euro/kWh x 1.8 = 16.300 €
- **Keine Wirtschaftlichkeit**

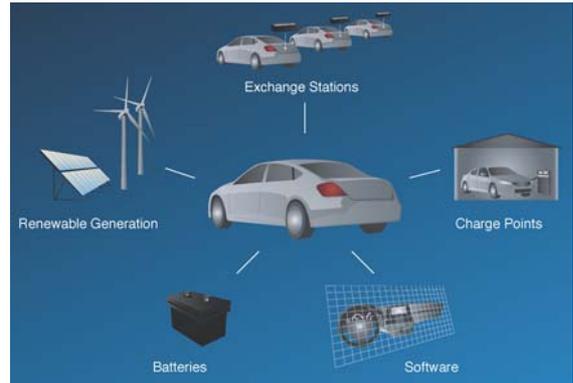
## Auslegung des Batteriespeichers – Elektroauto

## Beispiel einer Auslegung – Alternative

- **80 km elektrische Reichweite** bei 15 kWh<sub>el</sub>/100km (0,2 €/kWh), gleiches Fahrzeug 6 l/100 km Benzin (1,50 €/l)
- Mittlere Fahrleistung: 40 km/Tag (37 km im statistischen Mittel über alle Fahrzeuge in Deutschland)
- Kosten pro kWh Batteriespeicher: 300 Euro/kWh EK OEM, x 1.8 für Endkunden
- Lebensdauer 10 Jahre, 3000 Vollzyklen
- Annahme: Elektrofahrzeug ohne Batterie hat gleichen Preis wie Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
- Fahrleistung in 10 Jahren: 146.000 km
- 1825 äquivalente Vollzyklen
- Benzinkosten wären 13.140 €, Stromkosten sind 4.380 €
- Batteriekosten: 12 kWh x 300 Euro/kWh x 1.8 = 6.480 €
- **Unter idealen Annahmen wirtschaftlich**

## Intensive Diskussion über Infrastrukturfragen

- Wechselbatteriekonzepte mit standardisierten Batteriepacks (und Fahrzeugen?)
- Schnellladestationen für Reichweitenverlängerung?
- Ladegeräte (3 oder 5 kW) im Fahrzeug oder stationär?
- Lademöglichkeiten auch an Parkplätzen, öffentlichen Plätzen, etc.?



Quelle: Project Better Place

→ Antworten vielfach interessengetrieben ...

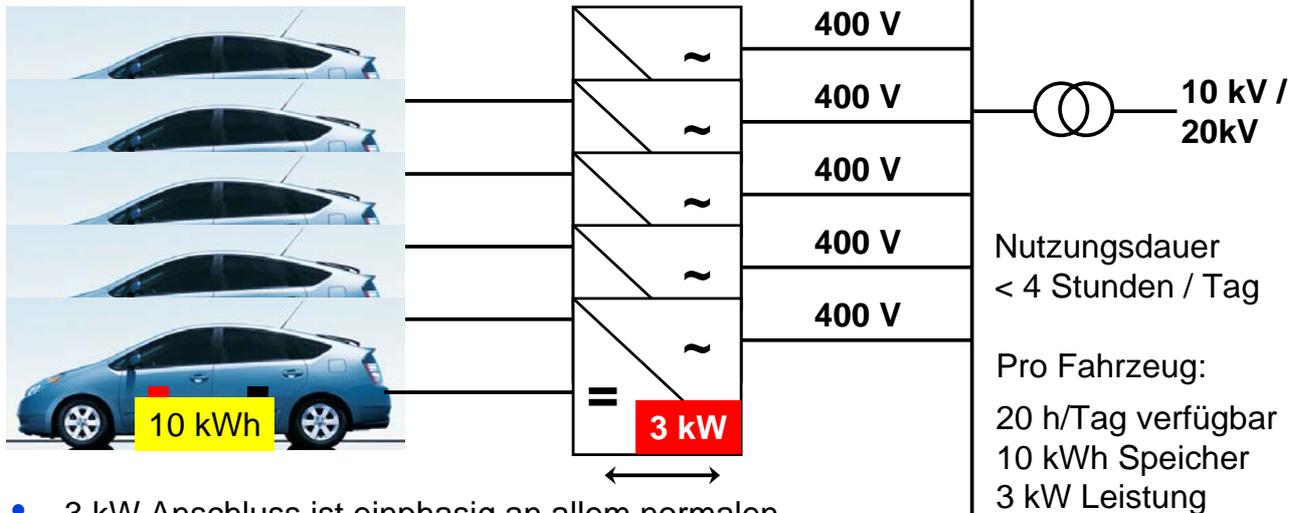


Quelle: NEC/AESC

## Schnellladung – macht das Sinn?

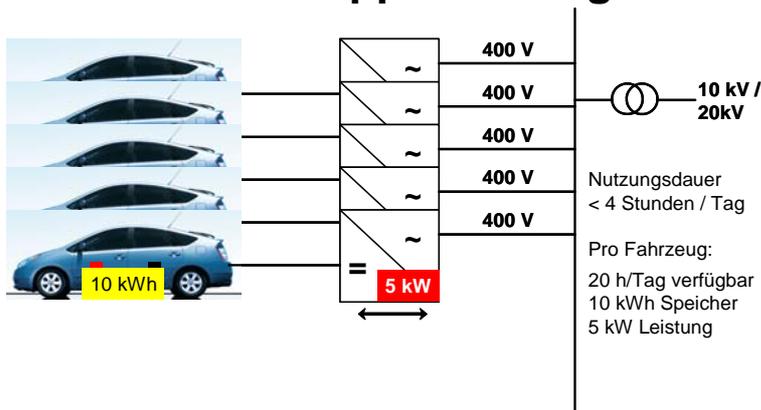
- Vorteile: Fahrzeug kann nach kurzer Zeit wieder benutzt werden
- Nachteile:
  - Hohe Ladeleistung notwendig (Netzanschlüsse werden kritisch)
  - hohe Kosten für Ladegeräte
  - nur an zentralen Punkten und nicht an jedem Haus möglich
  - hohe Belastung der Batterie durch Erwärmung
  - erhöhte Kosten für Batteriepackdesign (Kühlsystem, Auslegung der Zellen)
- Beispiel für Schnellladung:  
Aufladung von 30 kWh (ca. 200 km Reichweite), Nachladung in 6 min → Ladeleistung mind. 300 kW, Anschlussleistung ~ 330 kW, dazu müssen ca. 30 kW Kühlleistung abgeführt werden

## Chancen der Doppelnutzung von Infrastruktur für Stromversorgung und Mobilität



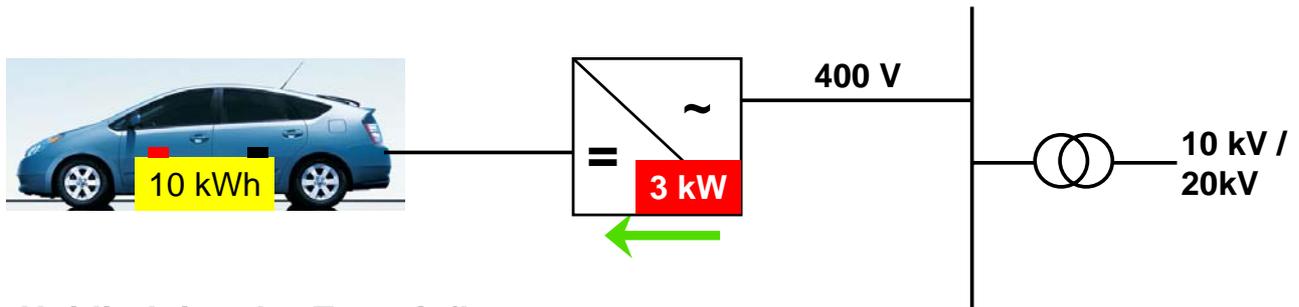
- 3 kW Anschluss ist einphasig an allem normalen Haussicherung möglich
- Durchschnittliche Fahrleistung von 37 km/Tag verlangt durchschnittlich 2,5 Stunden Ladezeit pro Tag benötigt bei einen 3 kW Anschluss.
- Pro zu fahrendem km werden 3 bis 4 Minuten zur Nachladung benötigt.

## Chancen der Doppelnutzung von Infrastruktur



- Derzeit in Deutschland ca. 46 Mill. Kraftfahrzeuge
- 4 Millionen Fahrzeuge (< 10%) als bidirektionale Plug-in Hybride ergeben
  - 20 GW Anschlussleistung für 2 Stunden
  - oder 8 Stunden mit 5 GW Leistung (entspricht in etwa der Leistung der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland)
- 40% der Fahrzeuge decken die mittlere elektrische Last in Deutschland für drei Stunden zu 100%

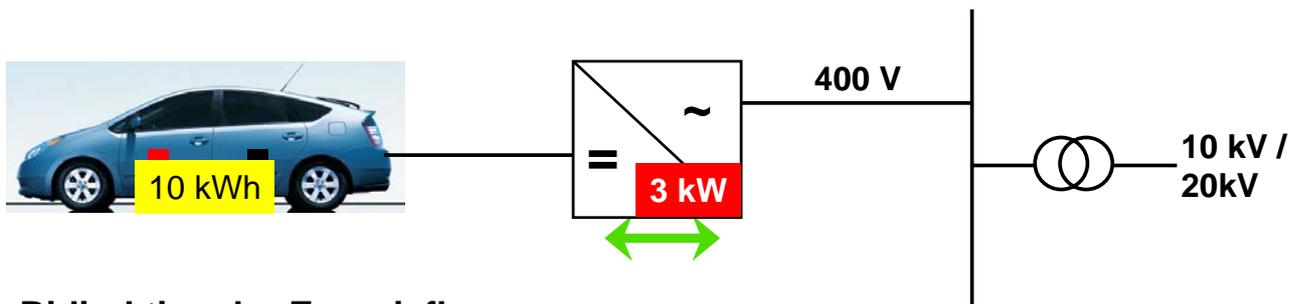
## Optionen der Fahrzeuge als Regelelemente des Netzes



## Unidirektionaler Energiefluss

- Positive Regelleistung und negative Regelleistung möglich
  - ➔ Positive Regelleistung entsteht beim Stoppen des Ladevorgangs. Aus Sicht der Netzstabilität ist eine Verringerung der Last gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Erzeugungskapazität.
  - ➔ Negative Regelleistung entsteht beim Einschalten des Ladevorgangs bei entsprechender Anforderung des Netzes.
- **Vorteile:** geringer Aufwand am Ladegerät (reiner Gleichrichter), keine Zusatzbelastung der Batterie durch Teilnahme am Regelmarkt

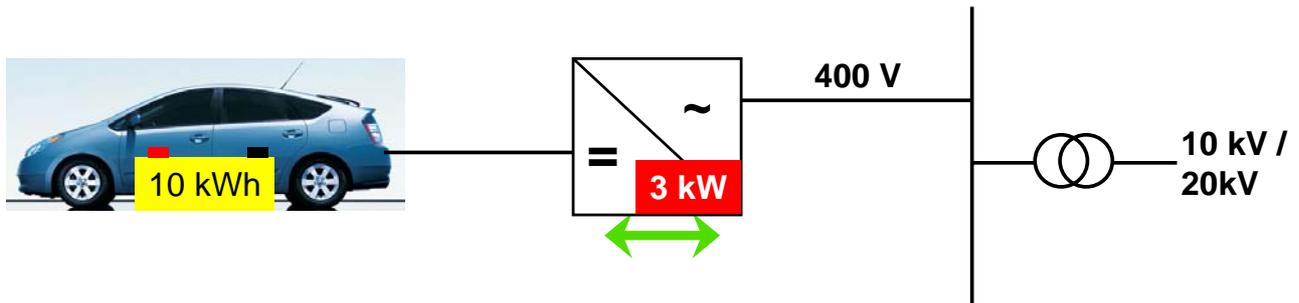
## Optionen der Fahrzeuge als Regelelemente des Netzes



## Bidirektionaler Energiefluss

- Positive Regelleistung und negative Regelleistung möglich
  - ➔ Positive Regelleistung kann durch Stoppen des Ladevorgangs oder durch aktive Einspeisung von Energie aus der Batterie in Netz erfolgen. Dadurch kann sich die pos. Regelleistung verdoppelt, bzw. sie kann auch bereit gestellt werden, wenn die Batterie bereits vollgeladen ist.
  - ➔ Negative Regelleistung entsteht beim Einschalten des Ladevorgangs bei entsprechender Anforderung des Netzes.
- **Nachteile:** höherer Aufwand für Ladegerät, Zusatzbelastung der Batterie durch zusätzliche Zyklisierung

## Optionen der Fahrzeuge als Regelelemente des Netzes



### Fahrzeuge wirken aus Netzsicht als statistisches Ensemble

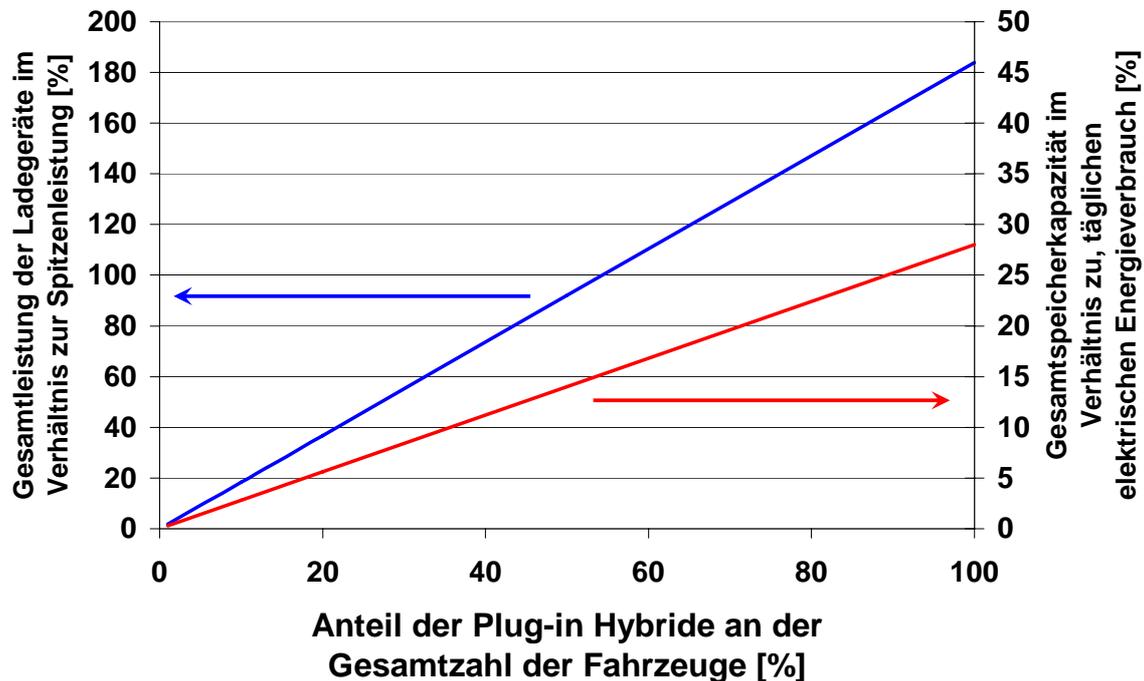
- Es ist nicht von Relevanz, ob ein einzelnes Fahrzeug gerade für die Regelleistung bereitsteht oder nicht.
- Wie beim Verbrauch insgesamt kommt es nur auf das statistische Mittel aller Fahrzeuge an.
- Es ist nicht notwendig, dass das Netz über den Zustand jeden einzelnen Fahrzeugs bescheid weiß.
- Prognosen über die Regelfähigkeit des Fahrzeugparks werden in gleicher Weise erstellt werden können, wie es für die Lasten heute der Fall ist.

## Was können Elektrofahrzeuge für das Netz tun?

- Fahrzeuge können positive und negative Regelleistung bereitstellen
  - durch gezieltes Ein- und Ausschalten des Ladevorgangs
  - durch Rückspeisung von Energie in Netz
- Umrichter können zusätzlich Systemdienstleistungen erbringen
  - Bereitstellung von Blindleistung
  - Phasensymmetrierung
  - Flickerkompensation
  - Oberwellenkompensation
- Fahrzeuge können alle Speicheraufgaben im Netz auf der Zeitskala zwischen msec und einem Tag lösen.
- Derzeit wird abgeschätzt, dass zwischen 100 und 300 €/Jahr seitens des Netzes für die Bereitstellung von Regelleistung erwirtschaftet werden können (200 € entsprechen 1000 kWh oder 6666 km elektrische Reichweite)

## Was Plug-in Hybride für die Stabilisierung des Netzes tun können ...

Annahmen: 10 kWh Kapazität und 3 kW Ladeleistung pro Fahrzeug (in Deutschland)



## Management und Regelstrategien für V2G-Konzepte

### Anforderungen und Ziele von Fahrzeugführer und Netzbetreiber

#### Fahrzeugführer

- Batterie soll immer vollgeladen sein, wenn das Fahrzeug benötigt wird (auch bei spontaner Nutzung)
- Die Stromkosten fürs Aufladen sollen minimiert werden.
- Die Lebensdauer der Batterie soll nicht so stark beeinflusst werden, dass die geplante Lebensdauer der Batterie im Fahrzeug erreicht wird.
- Die Batterie soll an jedem Ort nachladbar sein.
- Der Fahrzeugführer erwartet eine zentrale Abrechnung, unabhängig davon, wo geladen worden ist.

#### Netzbetreiber

- Die Batterien sollen dann aufgeladen werden, wenn aus Sicht des Netzes Überschussleistung oder kostengünstige Leistung zur Verfügung steht.
- Die zu vergütenden Kosten für die aktive Nutzung des Fahrzeugspeichers sollen so gering wie möglich sein.
- Die Fahrzeuge sollen nicht zu einer lokalen Überlastung der Netze führen, so dass möglichst ein Ausbau der Verteilnetze vermieden werden kann.

## Management und Regelstrategien für V2G-Konzepte

### Gestaffeltes Energiemanagementsystem – 3-Ebenen-Modell

1. Ebene: Energiemanagement, das die Interessen des Fahrzeugführers vertritt
2. Ebene: Regelsysteme, das eine Überlastung des lokalen Verteilnetzes vermeidet
3. Ebene: Energiemanagement, das die Interessen des Übertragungsnetzes wahrnimmt (beinhaltet u.a. konventionelle Kraftwerke, Windparks und Strombörse)

## Management und Regelstrategien für V2G-Konzepte

### 3-Ebenen-Modell – 1. Ebene: Energiemanagement, das die Interessen des Fahrzeugführers vertritt

- Managementsystem weiß, wann die Batterie wieder vollgeladen sein muss, um für die nächste Fahrt bereit zu stehen.
  1. Möglichkeit: Selbstlernende Algorithmen erkennen das typische Nutzungsprofil und arbeiten danach
  2. Fahrzeugführer teilt dem Fahrzeug beim Verlassen mit, wann die nächste Fahrt ansteht und welche Distanz gefahren werden soll
- Managementsystem erhält die Vorhersage der zu erwartenden Strompreise jeweils 24 Stunden im voraus und wird im zur Verfügung stehenden Zeitraum bis zur nächsten Fahrt den Speicher zu geringst möglichen Kosten aufladen
- Managementsystem entscheidet bei einem spontanen Regelbedarf des Netzes, ob das Fahrzeug aktiv in die Regelung einsteigt

## Management und Regelstrategien für V2G-Konzepte

### 3-Ebenen-Modell – 2. Ebene: Regelsystem, das eine Überlastung des lokalen Verteilnetzes vermeidet

- Rückspeisung könnte zu einer Erhöhung der Spannungslage im lokalen Verteilnetz und damit zu Störungen führen.
- Regelsystem des bidirektionalen Umrichters überwacht daher, dass nur dann Leistung eingespeist wird, wenn die zulässigen Spannungsgrenzen nicht überschritten werden (auch wenn es eine globale Anforderung nach Leistungsbereitstellung gibt)
- System kann auch zur aktiven Stabilisierung des lokalen Verteilnetzes genutzt werden, in dem die lokale Power Quality stetig überwacht wird und im Rahmen der technischen Möglichkeiten die Power Quality verbessert wird (Spannungshaltung, Blindleistungskompensation, Phasensymmetrierung, Flickerausgleich, ...)

## Management und Regelstrategien für V2G-Konzepte

### 3-Ebenen-Modell – 3. Ebene: Energiemanagement, das die Interessen des Übertragungsnetzes wahrnimmt

- Energiemanagement des Übertragungsnetzes erstellt Leistungsbedarfsprognose und tageszeitabhängige Preisprognose und übermittelt die der 1. Ebene des Managementsystems (Vorausplanung)
- Ermittelt aktuellen positiven und negativen Regelleistungsbedarf und übermittelt den dezentrale Einheiten den Bedarf
- 1. Ebene des Managementsystems entscheidet dann über die Erfüllung der Nachfrage

## Zusammenfassung

- In den kommenden 5 Jahren NiMH für Hybridfahrzeuge noch zunehmend, serienreife ist nachgewiesen
- Lithium-Ionen-Batterietechnologie ist aus technischer Sicht für den Markteinstieg verfügbar.
- Vielfalt der Materialien führt zu hoher Entwicklungsdynamik und kontinuierlichen Verbesserungen
- Lithium-Ionen-Technologie ist die wahrscheinliche Technologie für alle PHEVs und EVs in den kommenden 10 Jahren.
- Gefahr: Es gibt aktuell keine echte „Rückfalltechnologie“
- Sicherheit, Zuverlässigkeit und Kosten sind die Hauptentwicklungsziele
- Preise werden nur durch Massenproduktion sinken, nicht durch warten
- Reine EVs mit Reichweiten größer 100 km wirtschaftlich kaum denkbar
- Einsatz der Fahrzeuge für die Netzregelung ist sehr attraktiv und technisch möglich

# Elektrische Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

Seminar für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik  
Berlin, 29.01.2009

**Dirk Uwe Sauer**

email: [sr@isea.rwth-aachen.de](mailto:sr@isea.rwth-aachen.de)

**Juniorprofessur für Elektrochemische Energiewandlung  
und Speichersystemtechnik**

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)  
Univ.-Prof. Dr. ir. Rik W. De Doncker

RWTH Aachen