

***15th Leibniz Conference of Advanced Science***  
**- Erneuerbare Energien 2013 –**

**Effiziente Nachnutzung von Traktionsbatterien  
als Pufferspeicher in Energieversorgungsnetzen**



**NEXT ENERGY**

EWE-Forschungszentrum für  
Energietechnologie e.V.

# Lithium-Ionen Batterien sind Bestandteil unserer Lebenswelt



Laptop



Mobiltelefon



Werkzeuge

...aber überwiegend in überschaubaren finanziellen Dimensionen.

# Diese Batterien waren nach Gebrauch zu entsorgen...



Kosten pro Batterie ca. 20 – 50€



## Die Traktionsbatterien passen nicht mehr in diese Kategorie:



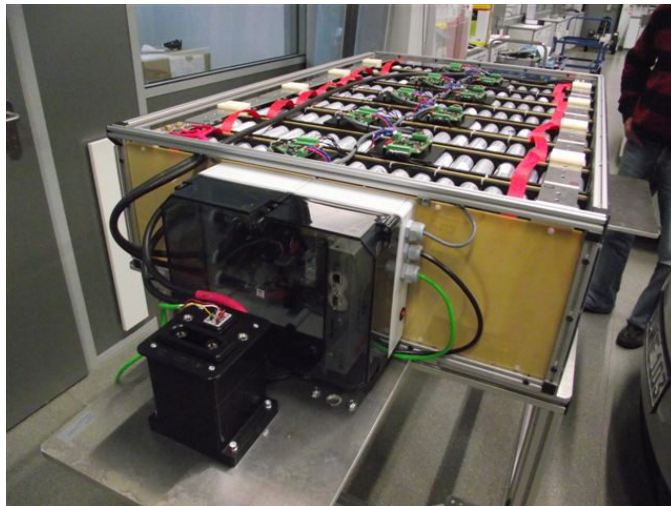
Batteriepack Opel Ampera



Kosten für einen montierten und mit Batteriemangement und Kühlung ausgestatteten Batteriepack:  
ca. 800€/kWh

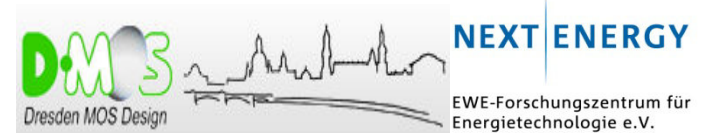
**Gesamtkosten (30kWh): 24.000€**

Batteriepack NEXT ENERGY



**Folge:**  
Die Batterien werden zum Investitionsgut.

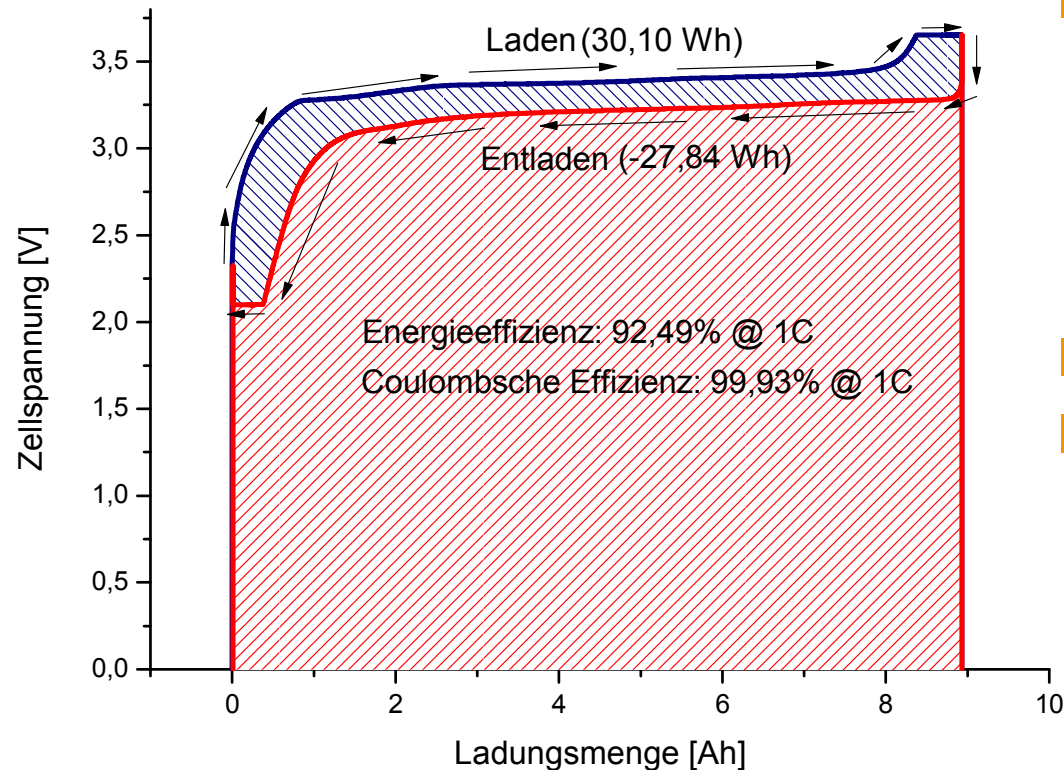
## Was ist dabei zu beachten ?



- | Die Lebensdauer der Batterie wird nun zum wirtschaftlichen Faktor:
  - » Die nutzbare Kapazität der Batterie ist begrenzt.
  - » Die Lebensdauer der Batterie ist auch bei Nichtbenutzung begrenzt.
  - » Die Lebensdauer der Batterie wird in Ladezyklen ausgedrückt, jedoch hängt die Anzahl der nutzbaren Ladezyklen von vielen Parametern ab.
  - » Es gibt lebensdauererlängernde und lebensdauerverkürzende Betriebsweisen für den Speicher.
  
- Traktionsbatterien können ihren Eigentümer vor dem Ende der Lebensdauer wechseln.
- Die Kenntnis des Restwerts ist grundlegender Bestandteil für einen funktionierenden Markt.
- Viele Finanzierungsprozesse können nur mit der Kenntnis des Restwertes gestaltet werden.

# Was ist Lebensdauer ?

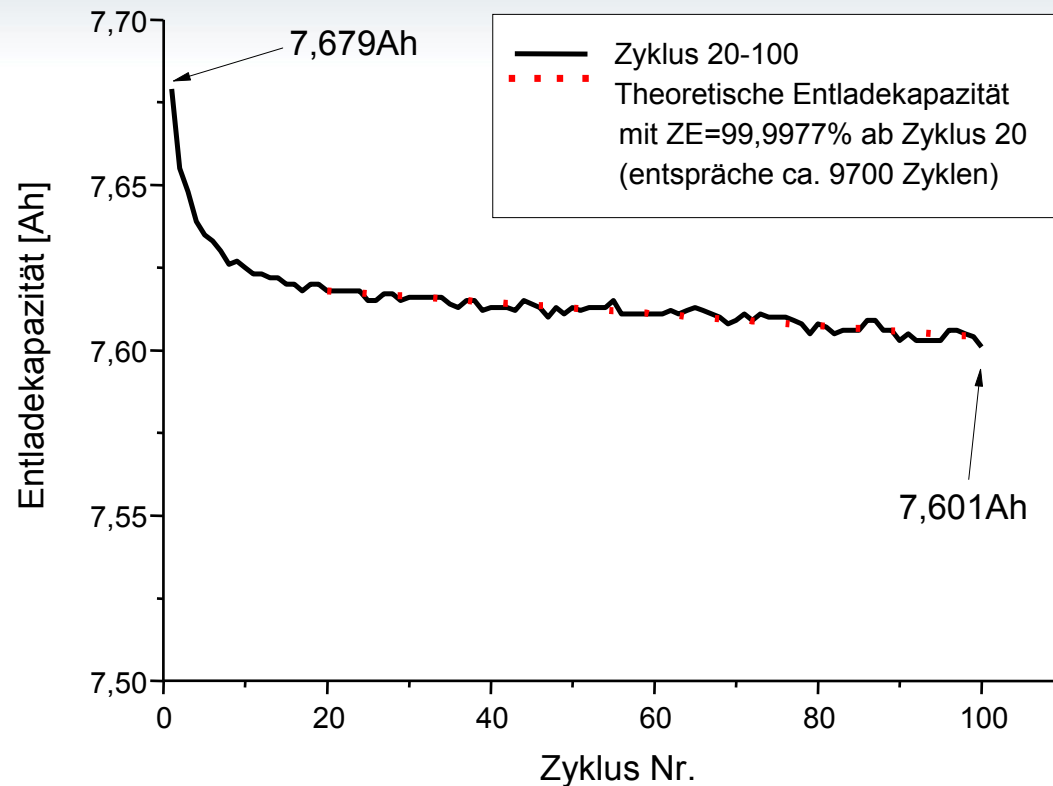
## Grundlagen der Zyklierung



### Beispiel eines Zyklus:

- Ladung (blau)
- Entladung (rot)
- Hoher Energiewirkungsgrad auf Grund von hohem Spannungsniveau:
- Energieeffizienz 92,5%
- Coulomb. Effizienz 99,93%

# Typischer Verlauf einer Zyklisierung mit Standardanforderungen



- LiFePo<sub>4</sub>-Zellchemie
- Nominale Kapazität 8Ah
- Constant current Laden und Entladen
- Spannungsgrenzen: 2.5V-3.6V
- Für 1C jeweils 100 Zyklen
- T<sub>amb</sub> = 25°C
- Hochrechnung

von Zyklus 20-100:

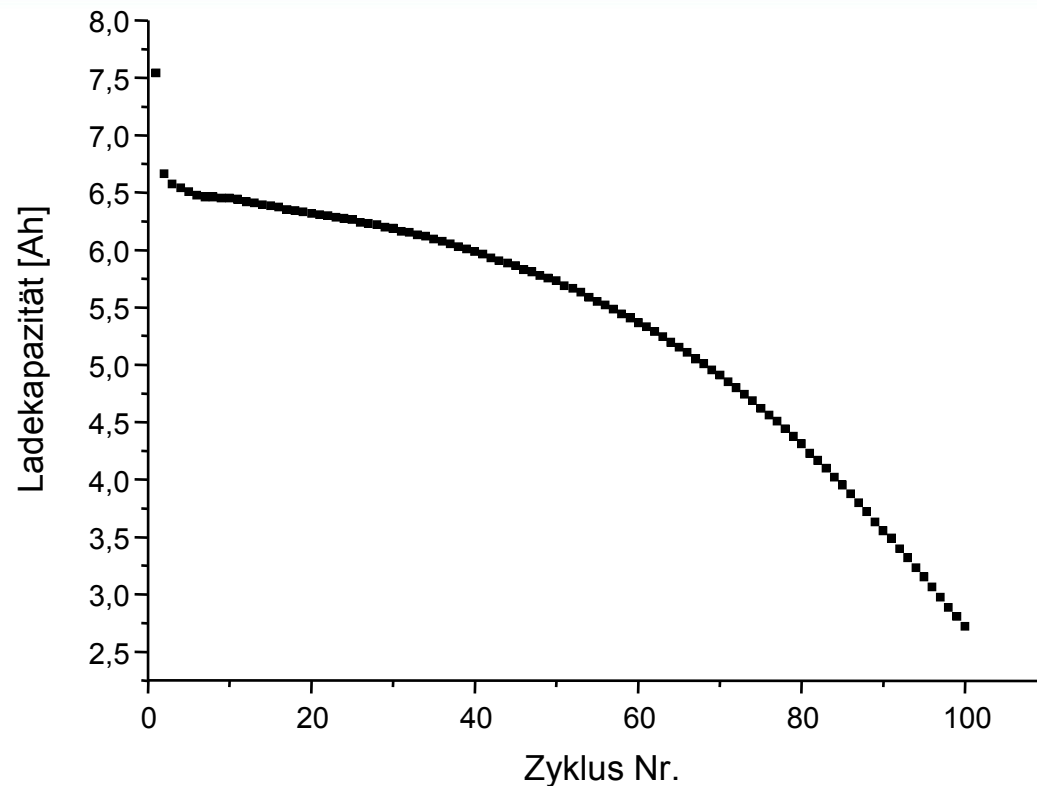
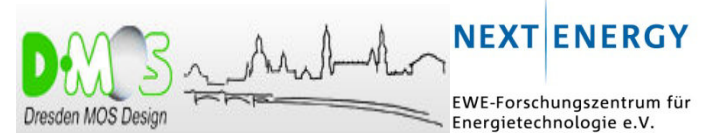
$$C_0 \cdot (ZE)^n = 0.8 \cdot C_0$$

$$n = \ln(0.8) / \ln(ZE)$$

$$n = 9700$$

C<sub>0</sub>: Anfangskapazität, ZE: Zykleneffizienz

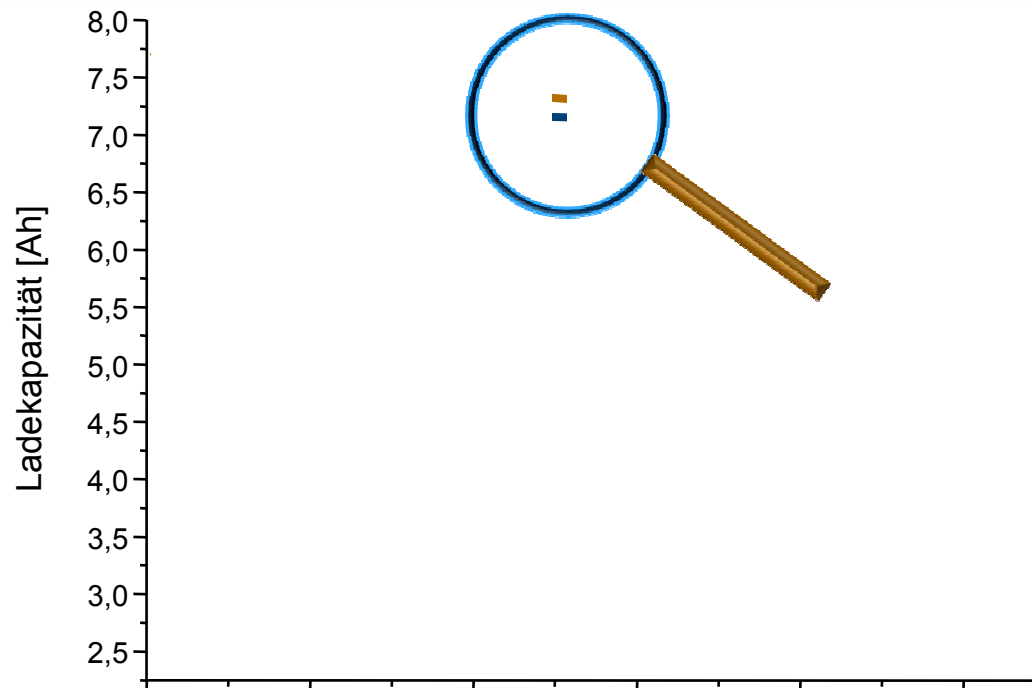
## Typischer Verlauf einer Zyklisierung mit erhöhten Anforderungen



- Laderate nun **5C**
- Ladekapazität sinkt zu Anfang deutlich
- Für etwa 40 Zyklen bleibt die Ladekapazität > 6Ah, bevor sie rapide abfällt
- Nach 100 Zyklen nur noch etwa 2,5Ah von ursprünglich ca. 6,5 Ah



## Wie bewerten Sie den Wert der 2 Batterien aus der Momentaufnahme?



Batterie 1:

Nominale Kapazität 8Ah

Aktuelle Kapazität 7,4Ah

Batterie 2:

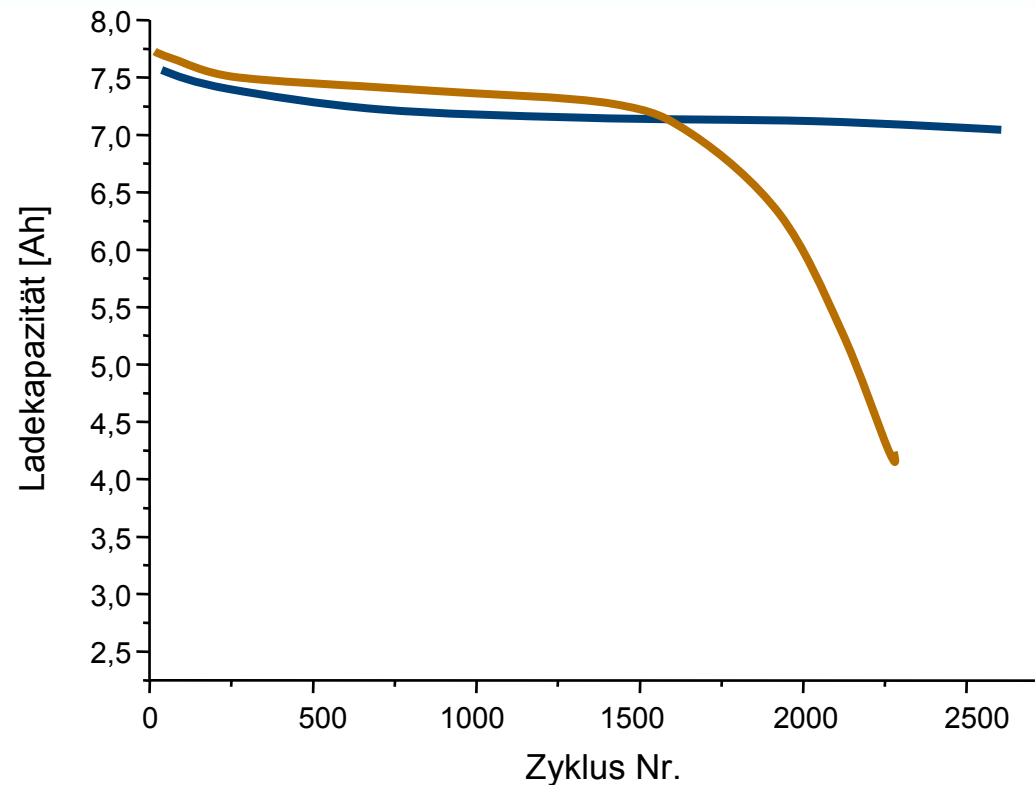
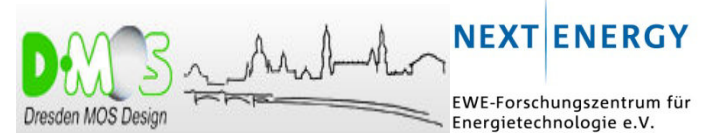
Nominale Kapazität 8 Ah

Aktuelle Kapazität 7,1 Ah

Weitere Daten sind nicht verfügbar.  
Der Verkäufer sagt „unfallfrei“...

**Batterie 1** wertvoller als **Batterie 2**?

## Wie bewerten Sie den Wert der 2 Batterien aus der Sicht auf die Zyklen?



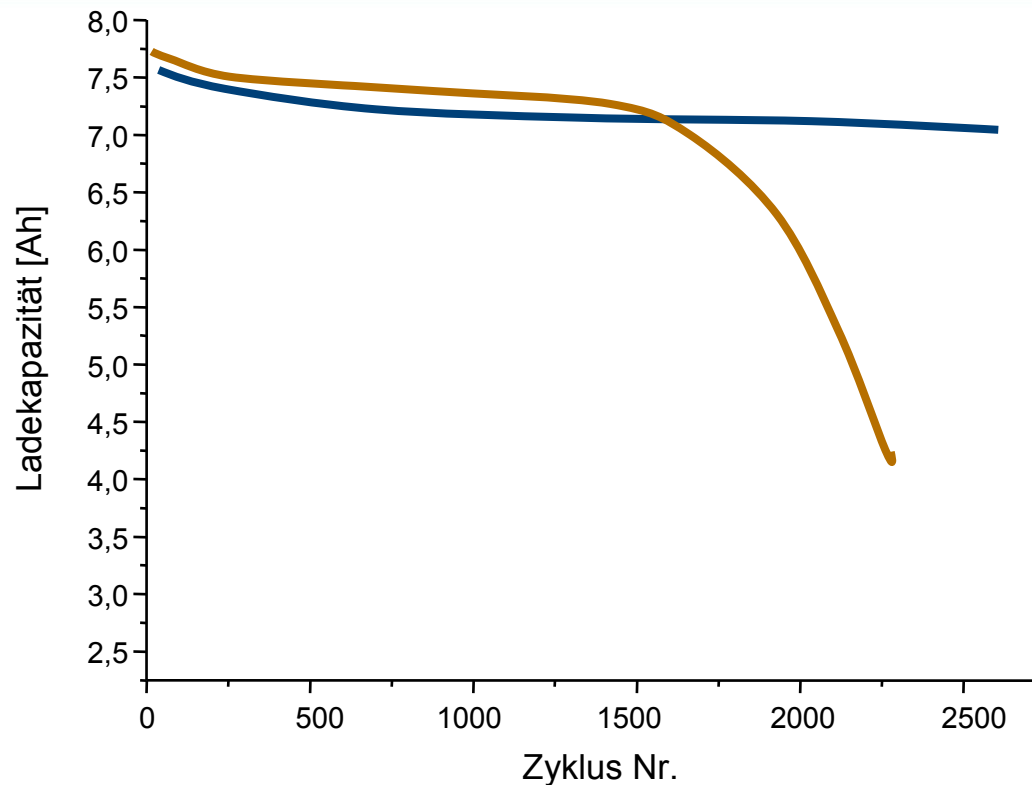
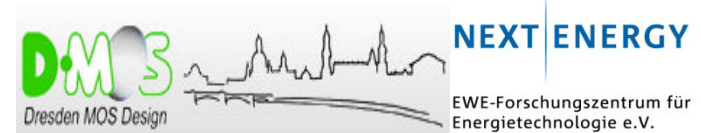
**Batterie 1:**  
Nominale Kapazität 8Ah  
Aktuelle Kapazität 7,4Ah

**Batterie 2:**  
Nominale Kapazität 8 Ah  
Aktuelle Kapazität 7,1 Ah

Mit Berücksichtigung der Historie ergibt sich ein besseres Bild.

**Batterie 1** wertvoller als **Batterie 2**?

## Wie bewerten Sie den Wert der 2 Batterien aus der Sicht auf die Zyklen?



**Batterie 1:**  
Nominale Kapazität 8Ah  
Aktuelle Kapazität 7,4Ah

**Batterie 2:**  
Nominale Kapazität 8 Ah  
Aktuelle Kapazität 7,1 Ah

Der komplette Zyklus zeigt jedoch ein anderes Bild...

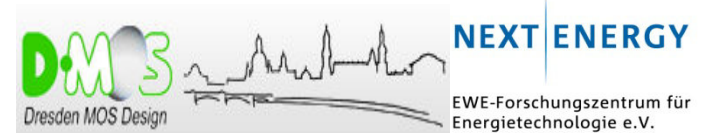
**Batterie 1** wertvoller als **Batterie 2**?

## Wie soll der Nutzungswert einer Gebrauchtbatterie beurteilt werden?



- | Aus einer Momentaufnahme, z.B. Innenwiderstand oder Kapazität lassen sich (zur Zeit) zu wenig Rückschlüsse ziehen.
- | Analytische Verfahren, wie die Impedanzspektroskopie, sind bei Batteriepacks im Zusammenbau nur noch unter hohem Aufwand möglich.
- | Die Kenntnis der Zyklenskurven (Kapazität über Zyklus) ist durch die ablesbaren Gradienten nützlich, jedoch liegt eine konstante Nutzung in der Praxis nur sehr selten vor.
- | Wichtig ist die Kenntnis der Historie und damit der bisherigen Arbeitsumgebung.

## Exkurs: Typische Degradationen



Zellkomponente	Alterung
Negative Elektrode	Die Anode ändert ihre Morphologie Die aktive Elektrodenoberfläche verringert sich. Das Bindemittel baut sich ab. Lithium lagert sich irreversibel im Graphit ab (Li-Plating)
Positive Elektrode	Die Kathode ändert ihre Morphologie. Die aktive Elektrodenoberfläche verringert sich. Das Bindemittel baut sich ab.
Elektrolyt	Das Leitsalz baut sich ab. Verunreinigungen im Elektrolyt führen zu Leistungsverlusten.
SEI-Schicht	Die SEI-Schichtdicke (an der Kathode) erhöht sich.
Stromkollektoren	Metallkorrosion, Dendritenbildung (Cu)
Separator	Verminderung der Porosität

# Welche Faktoren beeinflussen den Wert einer Gebrauchtbatterie?

## Überladung

- » Auch kurzzeitige und geringfügige Überladungen zerstören Teile der Zellchemie.
- » Sehr empfindlich reagieren  $\text{LiFePO}_4^-$  Zellen auf Überladung, hier wird sofort eine chemische Nebenreaktion in Gang gesetzt.

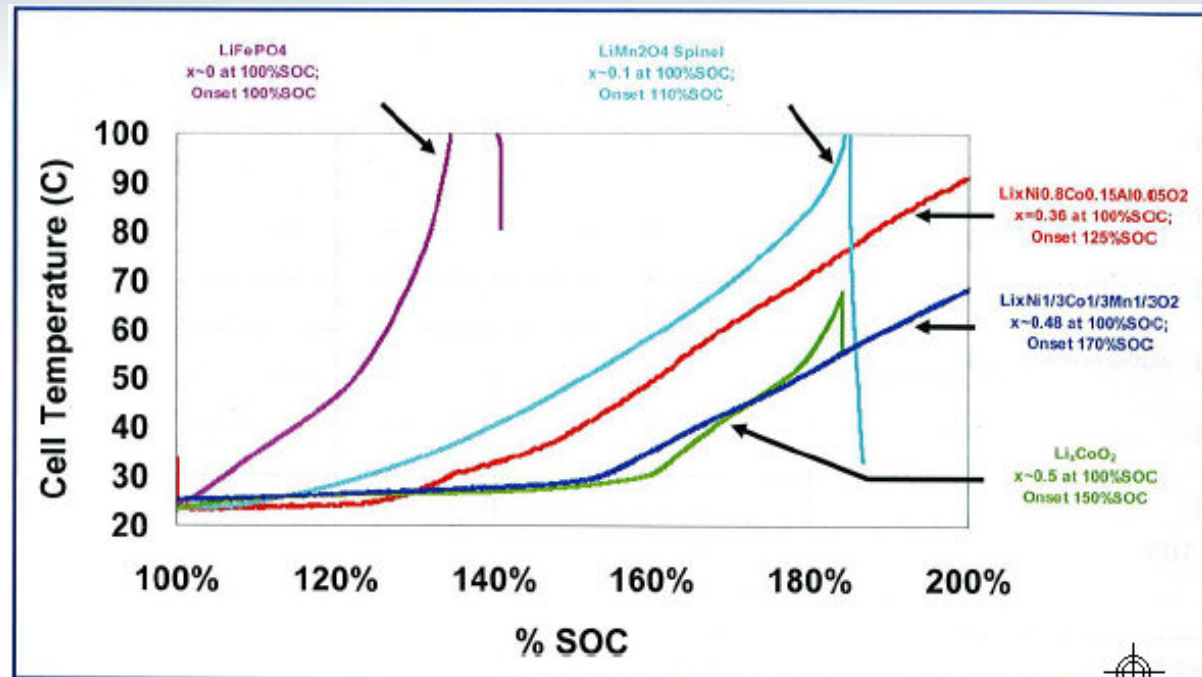


FIG. 5. Heat output during overcharge for different cathode oxide chemistries. There is a marked increase in heat output when final lithium is removed from cathode.

Quelle: Doughty and Roth, Electrochemical Society *Interfaces*, Summer 2012

# Welche Faktoren beeinflussen den Wert einer Gebrauchtbatterie?

## I Tiefentladung

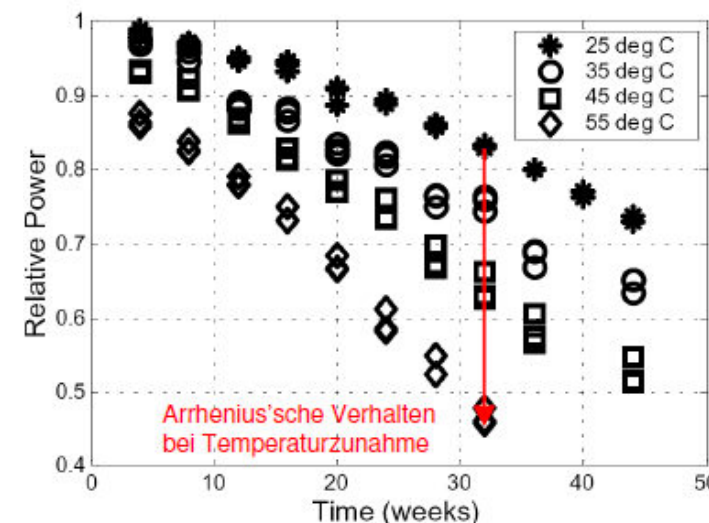
- » Bei Tiefentladung wird Kupfer aus dem Ableiter auf der Anode abgeschieden
- » Bei der Wiederaufladung kann sich eine Schicht aus reinem Li-Metall bilden



The anode of a repeatedly over-discharged cell coated with copper.

## I Umgebungstemperatur

- » Höhere Temperaturen beschleunigen die Korrosion der Materialien.
- » Die Leistungsfähigkeit sinkt, der Innenwiderstand steigt.



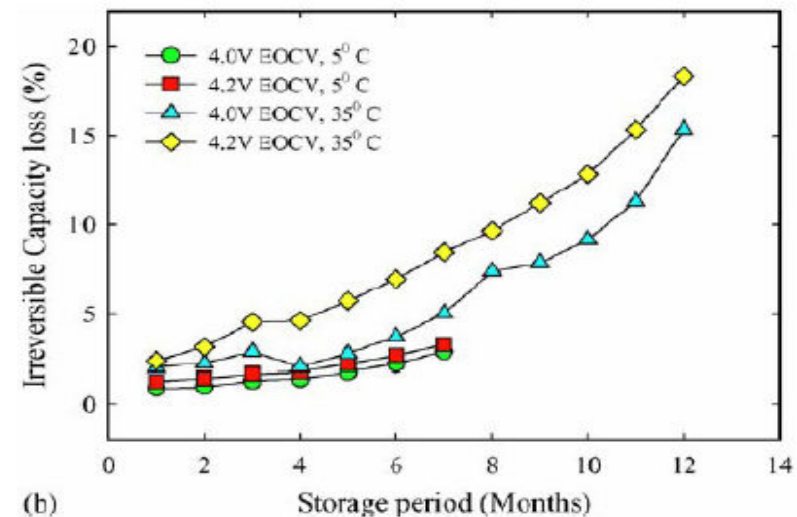
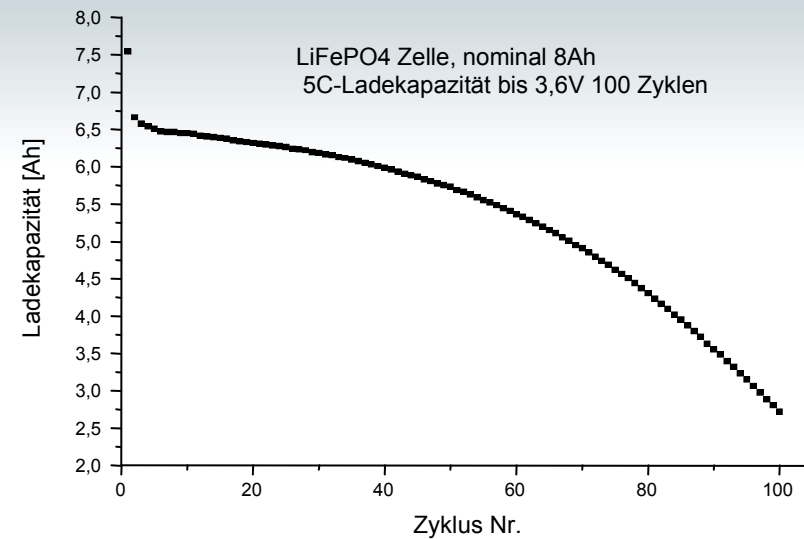
# Welche Faktoren beeinflussen den Wert einer Gebrauchtbatterie?

## Belastungshistorie (C-Rate)

- » Hohe C-Raten führen zu stark beschleunigter Alterung

## durchschnittlicher Ladezustand

- » Hoher Ladezustand führt zu erhöhter Alterung



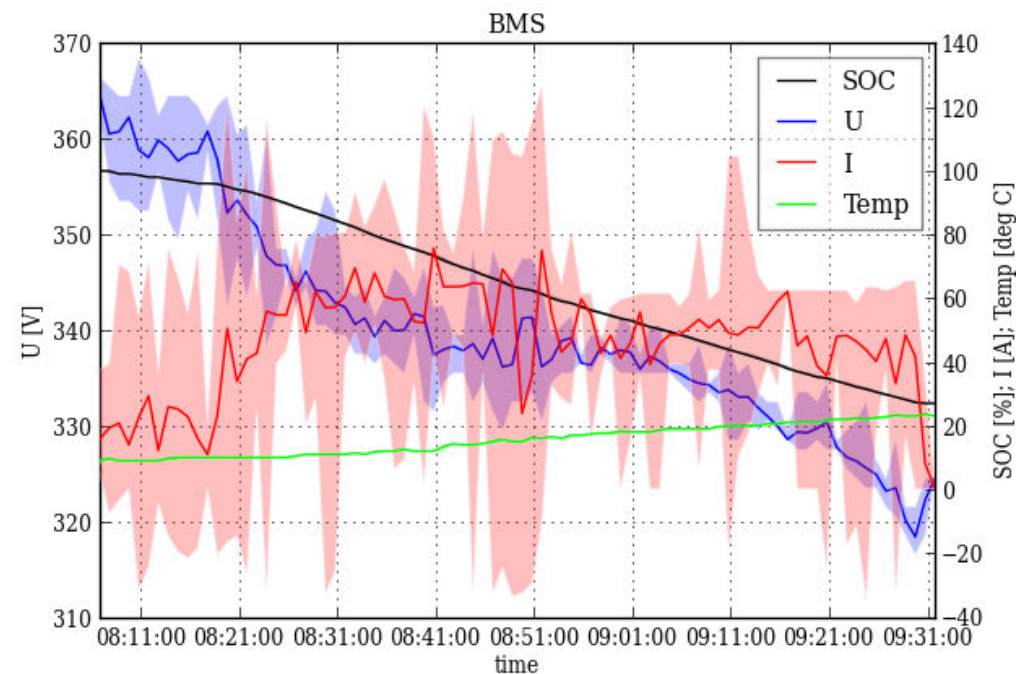
RAMARAJA P. RAMASAMY, RALPH E. WHITE, BRANKO N. POPOV: Calendar life performance of pouch lithium-ion cells. In: Journal of Power Sources, Vol. 141 (2005)



# Belastungsprofil einer Traktionsbatterie

## Audi A2 mit einer 40kWh-Li-Ion-Batterie

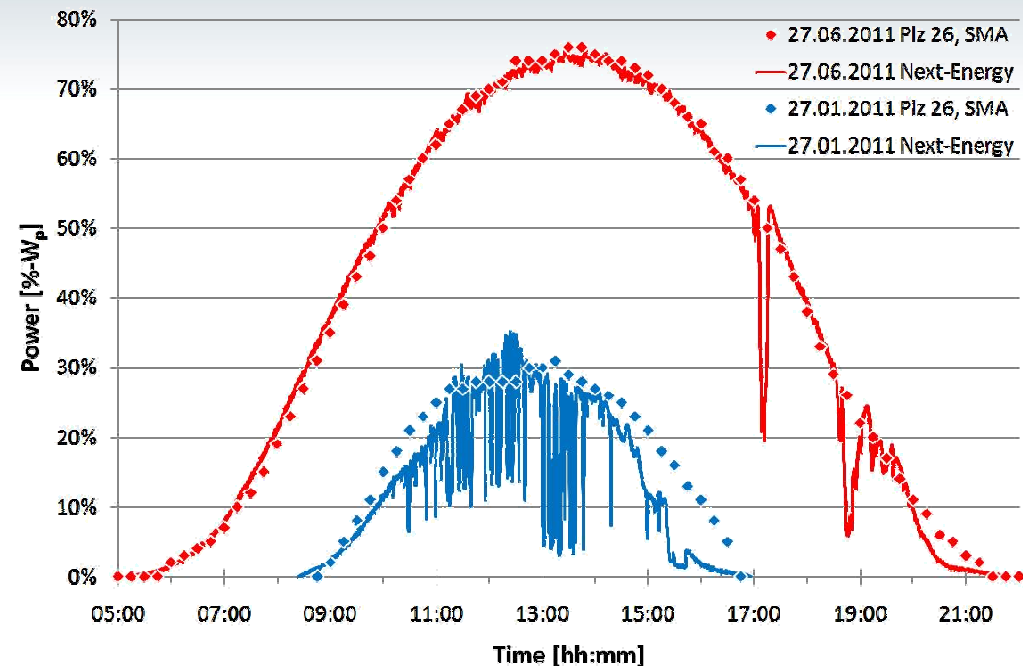
- » Lastspitzen bis zu 4C (120A)
- » Hohe Last-Dynamik
- » Rekuperation mit 1C
- » Erweiterter Temperaturbereich



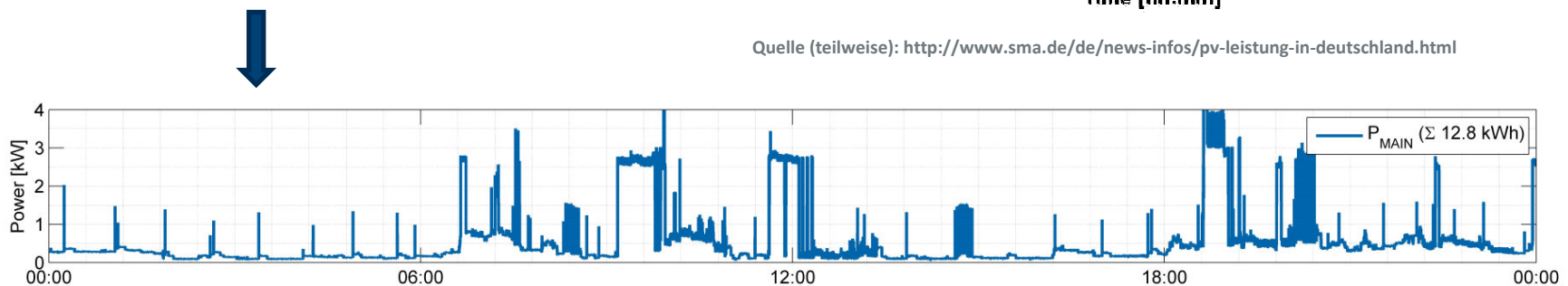
# Belastungsprofil eines Hausenergiespeichers

Beispiel PV-Einspeisung bei NEXT ENERGY in Juni und November 2011

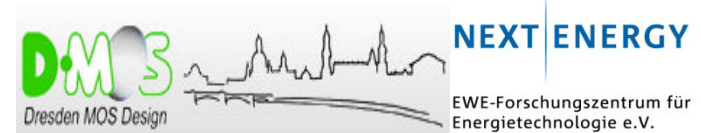
Realprofil eines 4-Personenhaushaltes an einem Dezembertag (Energiebedarf Strom)



Quelle (teilweise): <http://www.sma.de/de/news-infos/pv-leistung-in-deutschland.html>



## Belastungsprofil eines Hausenergiespeichers



- | Typischerweise 1 Lade/Entladezyklus pro Tag
- | Geringe Dynamik, geringe Temperaturbelastung
- | C-Raten können auf  $<1$  beschränkt werden.
- | Maximal 365 Vollzyklen pro Jahr
- | In der Praxis ergeben sich jedoch deutlich weniger Vollzyklen (ca. 120) durch Schlechtwetter und Wintertage.
- | Durchschnitts-SOC kann durch optimierte Betriebsführung gesenkt werden.

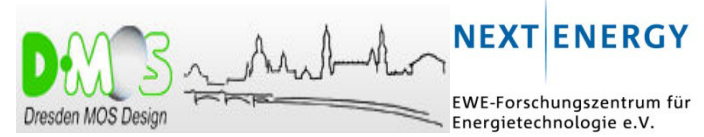
## Wertermittlung benötigt genaue Kenntnis der Batterie Vergangenheit



- | Viele Effekte beeinflussen die Batterieleistung und -lebensdauer
- | Nur die Kenntnis der Historie bietet (zur Zeit) einen brauchbaren Bewertungsansatz zur Batterie.
- | Ohne eine faire Bewertungsmöglichkeit wird es keinen funktionierenden Markt geben.
- | Leasingfirmen, Versicherer, Kontraktoren u.v.a. benötigen die Daten für ihre Geschäftsmodelle.

Schlussfolgerung: wir brauchen die Historie und diese muss manipulationssicher sein.

## Umsetzung der Idee



Konzept Next Energy / DMOS

# Infrastruktur 2013

viel direkte Sonnenenergie : wenig CO2 & wenig Risiko



wenig Netze



viel Komfort / wenig Einschränkung



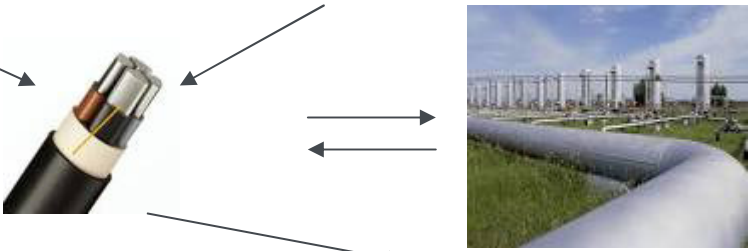
# Infrastruktur > 2025



netzintegrierte  
mobile Speicher



hybride Netze



# Nachnutzung EV Speicher > 2025

## mobiler E-Speicher



Ausbau  
→

Restwert ?



Nachfrage ?

Marktwert



Nachnutzung Pufferspeicher

## immobiler E-Speicher



# EV Speicher für Nachnutzung

## mobiler E-Speicher



### Restwert ? :

- Aufzeichnung der Zellbelastung von Anbeginn notwendig
- nicht manipulierbare Datenerfassung (Tachorückdrehen)
- Bewertungsalgorithmen noch zu erforschen



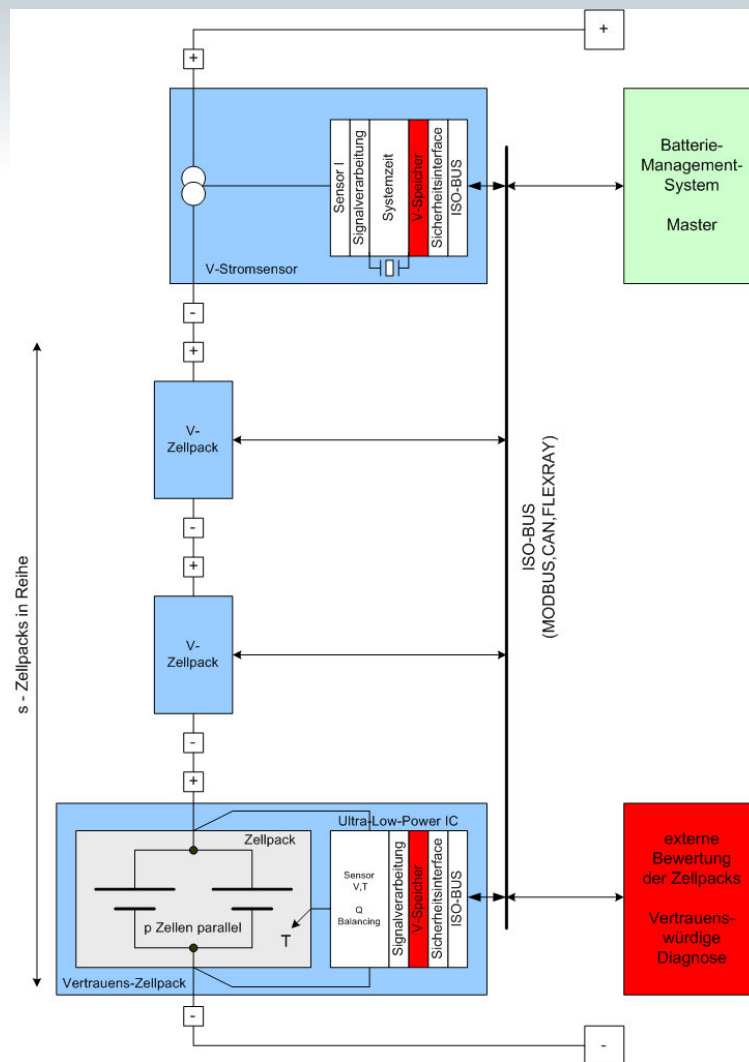
### Netzintegration ✓ :

- am besten als Pufferspeicher an vorhandene Ladestationen integrieren
- kein gesondertes BMS notwendig
- Powermanagement = Software Thema
- könnte sich also „nebenbei“ mit entwickeln



## immobiler E-Speicher

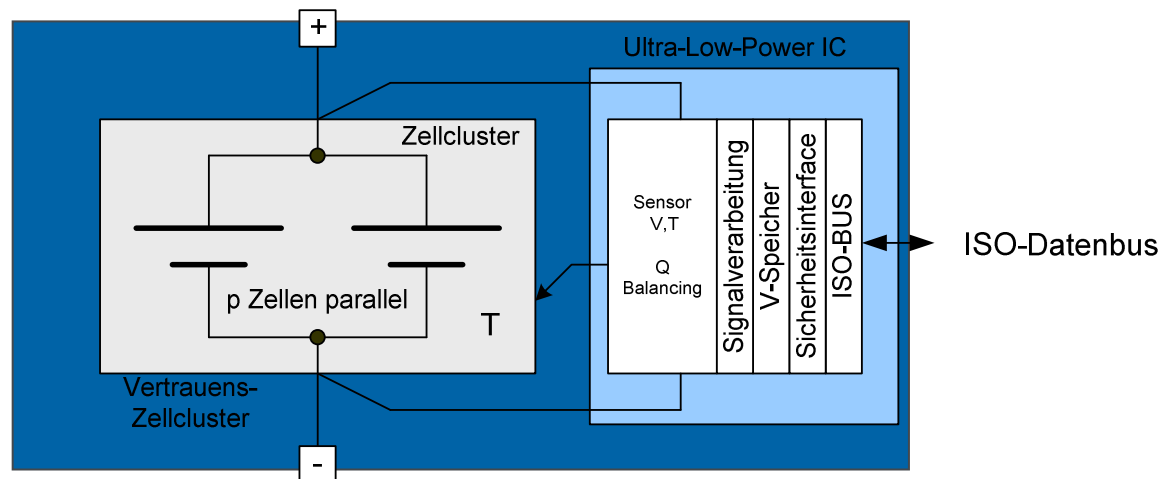
# Vertrauensspeicher



- | Vertrauenspeicher zur Ermittlung des SOH
  - » voll integriert als SOC System
  - » eingebettet in den Zellpack
  - » nicht manipulierbar
  - » Read-Only-Schnittstelle (ISO)
  - » Erfassung der Belastung V,I,T und Q über die Zeit (Historie)
- | SOH Bewertung
  - » bisher gibt es kein Standardverfahren
  - » Forschungsgegenstand der nächsten Dekade
  - » mit Kenntnis der Historie Bewertungsverfahren verbesserbar

# Vertrauenspeicher

## V-Speicher: Investition in die Nachnutzung



### Kosten:

- » ca. 5€ pro Pack
- » bei 100 Packs in einer Batterie ca. 500€
- » übernimmt Funktionen der BMS Systeme

## Zusammenfassung



- | Traktionsbatterien sind ein Investitionsgut
- | Second Life als Pufferspeicher ökonomisch sinnvoll
- | Restwertschätzung notwendig
  - » Vertrauensspeicher zeichnet manipulationssicher die Historie auf
  - » Secure Hardware am Zellpack notwendig
- | Bewertungsverfahren zur SOH Schätzung sind zu erforschen
  - » Lernen aus dem Feld