

# SYSTEMANALYSE FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER

**ITAS-Workshop vom 14.-15.12.2009**

**am**

**Karlsruher Institut für Technologie**



# Einführung

Erklärtes Ziel der Bundesregierung ist es, die Umweltbelastungen, insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen, durch den Verbrauch fossiler Energieträger zu minimieren. Ansätze zur Reduzierung der Umweltbelastungen bestehen u.a. in der verstärkten Erzeugung von elektrischer Energie durch regenerative Energiequellen (z.B. Photovoltaik), aber auch in der Nutzung elektrischer Energie im Mobilitätssektor. Der elektrochemischen Energiespeicherung kommt in beiden Fällen eine besondere Bedeutung zu.

Elektrochemische Speicher werden deshalb als eine Schlüsselkomponente für zukünftige Energienetze und für die Elektromobilität angesehen. Dabei gibt es keine Zweifel mehr daran, dass die Elektromobilität der am stärksten wachsende Sektor für die Anwendung von elektrochemischen Speichern sein wird. Ferner soll der Energiespeicher in Fahrzeugen nicht nur für deren Antrieb sorgen, sondern auch (im Fall von Plug-In Hybridfahrzeugen und reinen Elektrofahrzeuge) als mobiler Speicher in Energie-Versorgungsnetzen genutzt werden, um Probleme beim Lastenausgleich in Energienetzen mit hohen Anteilen an regenerativen Energiequellen zu kompensieren.

Neue Anforderungen an die Entwicklung von Energiespeichern ergeben sich sowohl aus der multifunktionalen Nutzungsphase, als auch aus weiteren Aspekten entlang des gesamten Lebensweges. Ziel des Workshops war es sowohl die Chancen, als auch die Innovations-Risiken von elektrochemischen Speichern im Kontext der zukünftigen Nutzung in Energienetzen näher zu beleuchten.

Die Veranstaltung bietet für Technologieentwickler und Systemanalytiker im Bereich elektrochemischer Speicher eine Plattform, um ihre Standpunkte auszutauschen, diese intensiv zu diskutieren und daraus Erkenntnisse für die strategische Ausrichtung zukünftige Forschungsarbeiten abzuleiten.

Marcel Weil

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

## INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung.....	2
-----------------	---

### Vorträge

VORTRAG I	SYSTEMANALYSE FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER .....	5
-----------	---	---

AUTOR MARCEL WEIL

VORTRAG II	ROHSTOFFE FÜR ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN-BEHINDERT VERFÜGBARKEIT VON LITHIUM DEN AUSBAU DER ELEKTROMOBILITÄT? .....	19
------------	--	----

AUTOR GERHARD ANGERER

VORTRAG III	SYSTEMANALYSE FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER, ELEKTROMOBILITÄT DER ENBW.....	29
-------------	---	----

AUTOR ALOIS KESSLER

VORTRAG IV	ELEKTROMOBILITÄT – AUSWIRKUNGEN AUF DAS ENERGIESYSTEM .....	41
------------	---	----

AUTOR DOMINIK MÖST

VORTRAG V	STOFFLICHE VERWERTUNG MODERNER BATTERIESYSTEME.....	51
-----------	---	----

AUTOR REINER WEYHE

VORTRAG VI	IN SITU METHODEN ZUR UNTERSUCHUNG VON ALTERUNGSVORGÄNGEN IN LITHIUM-IONEN BATTERIEN.....	69
------------	---	----

AUTOR PASCAL MARIE

VORTRAG VII	UMWELTBEWERTUNG VON ELEKTROMOBILITÄT .....	89
-------------	--	----

AUTOR UDO LAMBRECHT

VORTRAG VIII	DIE ZUKUNFT FÄHRT ELEKTRISCH: ENTWICKLUNG EINER WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR ELEKTROMOBILITÄT ALS GRUND-LAGE FÜR EIN NEUES ENERGIE-PARADIGMA .....	91
--------------	--	----

AUTOR GUY FOURNIER

## WORKSHOPS

WORKSHOP 1 WELCHE IMPLIKATIONEN KÖNNEN RESSOURCENASPEKTE AUF DIE ENTWICKLUNG VON ELEKTROCHEMISCHEN SPEICHERN HABEN? .....	105
AUTOREN SASKIA ZIEMANN, MARCEL WEIL	
WORKSHOP 2 EINSATZBEREICHE VON ELEKTROCHEMISCHEN SPEICHERN IM NETZUMFELD.....	109
AUTOR THOMAS KASCHUB	
WORKSHOP 3 IST DIE ELEKTROMOBILITÄT EIN ENTWICKLUNGSPFAD DER VORBEHALTLOS, WELTWEIT NACHHALTIG (ÖKONOMISCH, ÖKOLOGISCH, SOZIAL) BESCHRITTEN UND EMPFOHLEN WERDEN KANN? .....	115
AUTOREN EVA ZSCHIESCHANG, UDO JESKE, THOMAS KATSCHUB	
WORKSHOP 4 NEUES FORSCHUNGSFRAGEN FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER DURCH SYSTEMISCHE BETRACHTUNGEN.....	119
AUTOR TORSTEN FLEISCHER	
PROGRAMM .....	123
LISTE MODERATOREN .....	125
DANKSAGUNG.....	126

## **VORTRAG I**

---

# **SYSTEMANALYSE FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER**

Dr. Marcel Weil

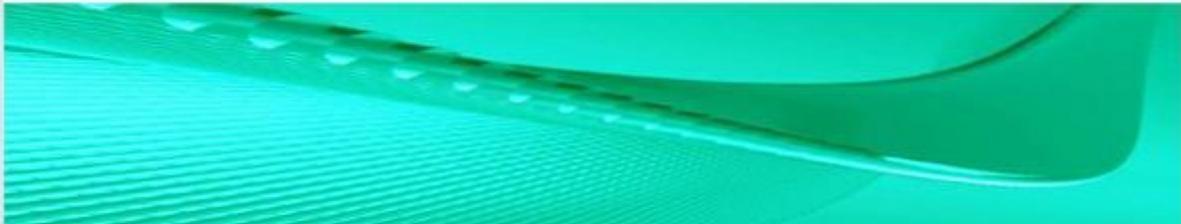
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse  
Karlsruher Institut für Technologie



**Systemanalyse für elektrochemische Speicher**

**14.-15.12.2009**

**Marcel Weil**



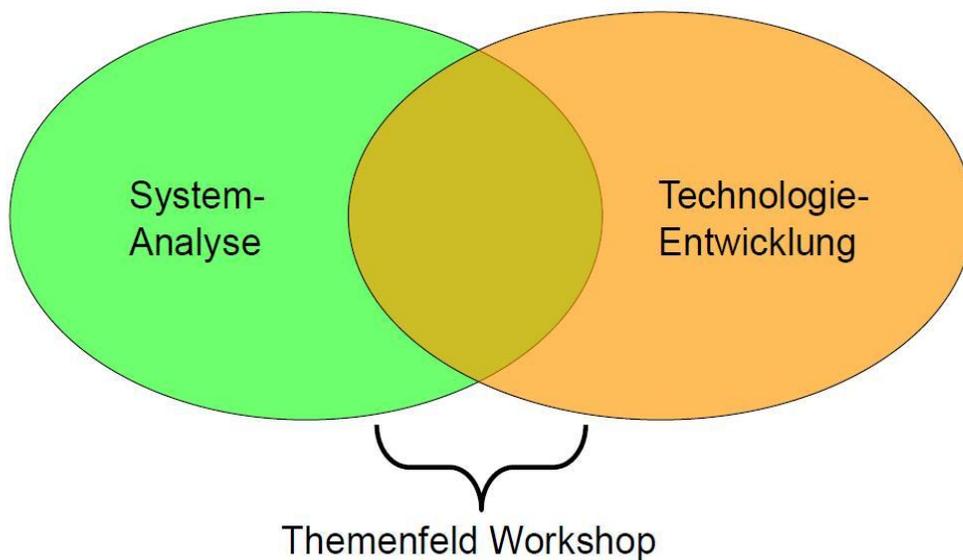
1 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



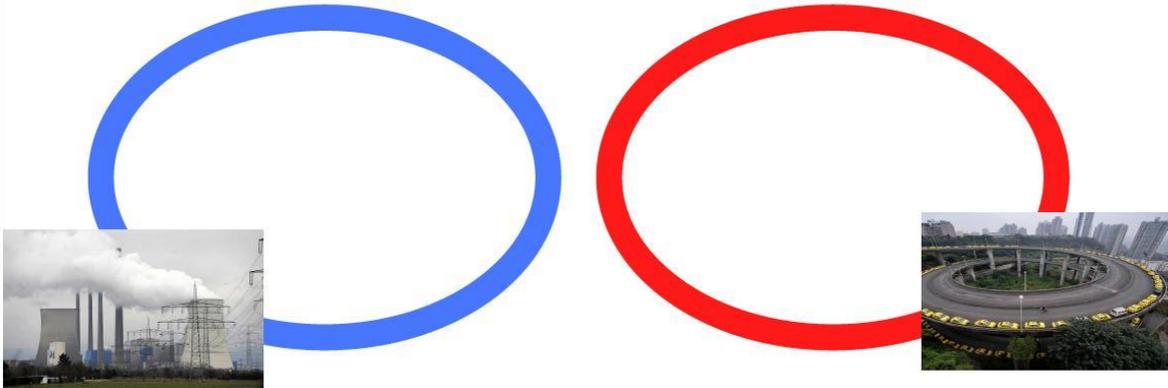


## Elektrochemische Speicher

  
Karlsruhe Institute of Technology

# E-Energienetze

# Verkehrsnetze



5 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

 HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

 Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

  
Karlsruhe Institute of Technology



6 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

 HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

 Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Verschmelzen der Energie- und Verkehrsnetze




7 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Verschmelzen der Energie- und Verkehrsnetze

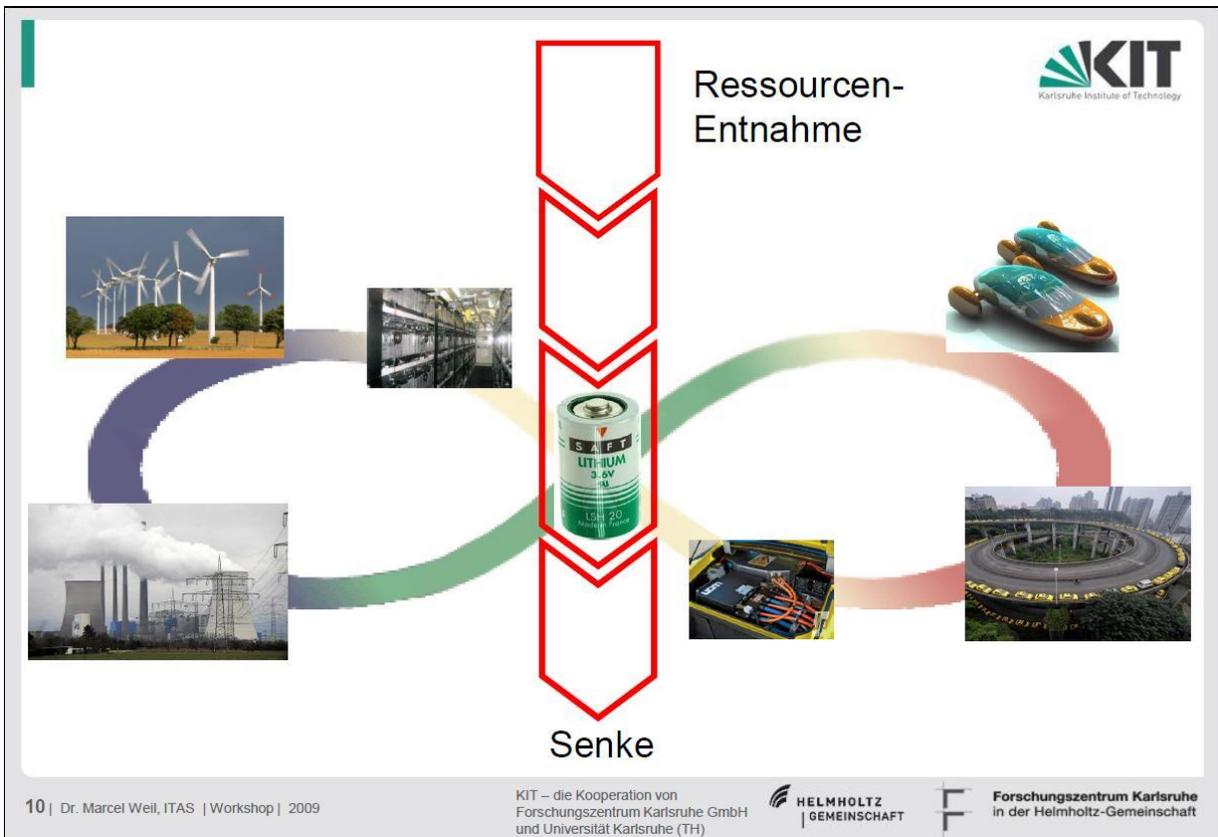
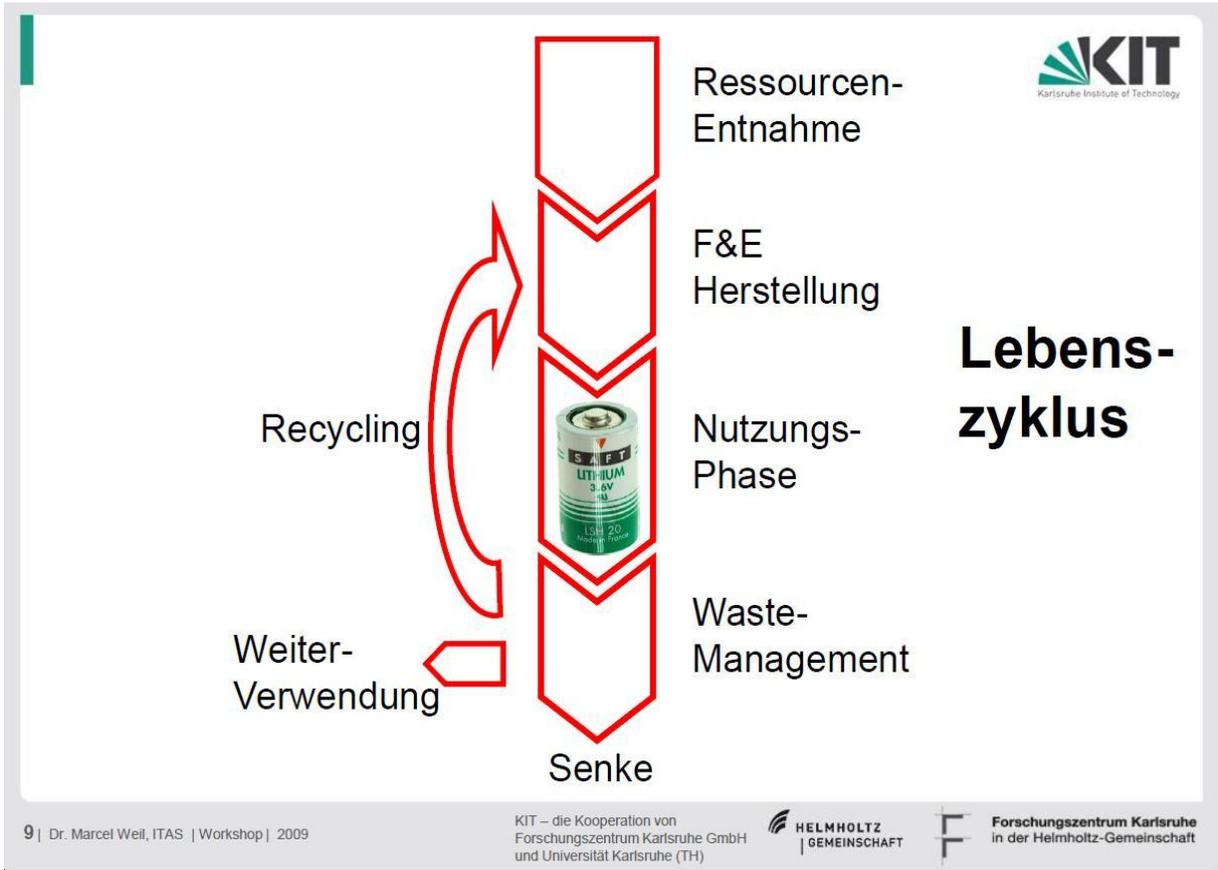



8 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Nachhaltiger Erfolg nur wenn:** Ressourcen-Entnahme



- **Technologisch**
- **Ökonomisch**
- **Ökologisch**
- **Sozial**
- **Regional/National/International**

Senke



11 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

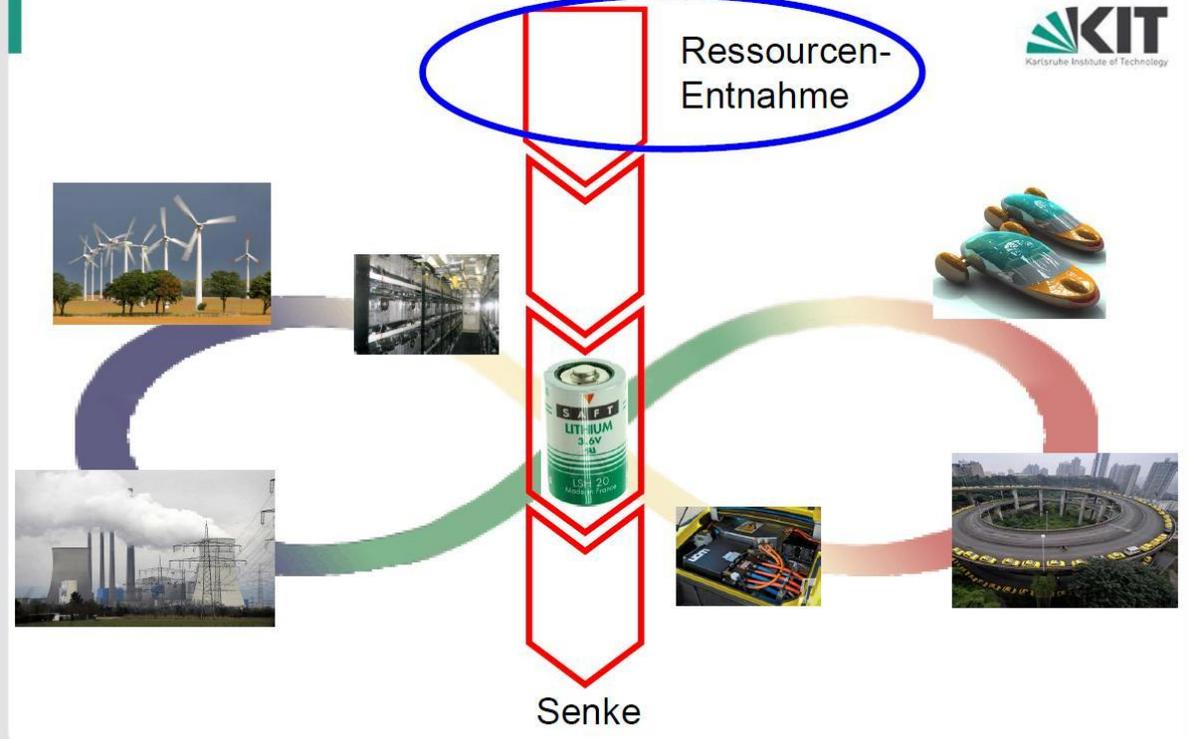
KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Ressourcen-Entnahme



Senke

12 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

## Programm Montag 14.12.2009



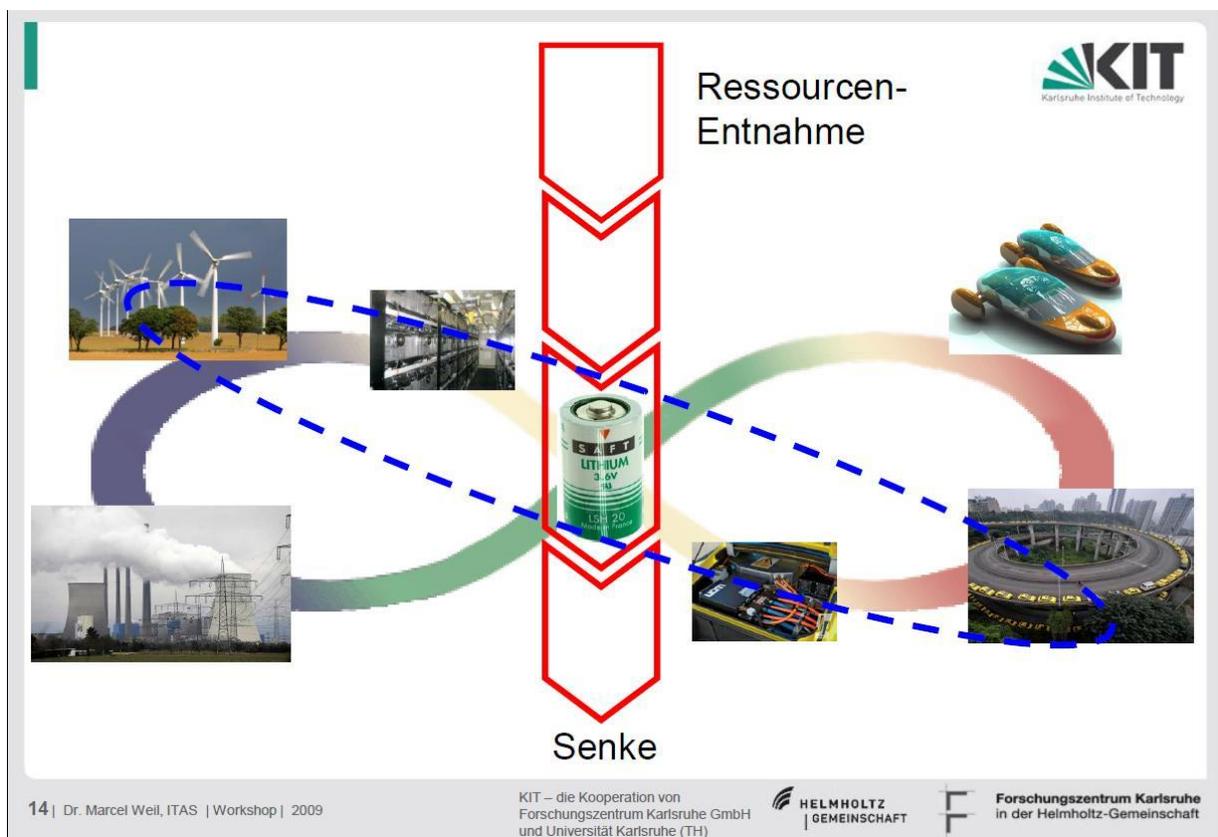
12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	

13 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



## Programm Montag 14.12.2009



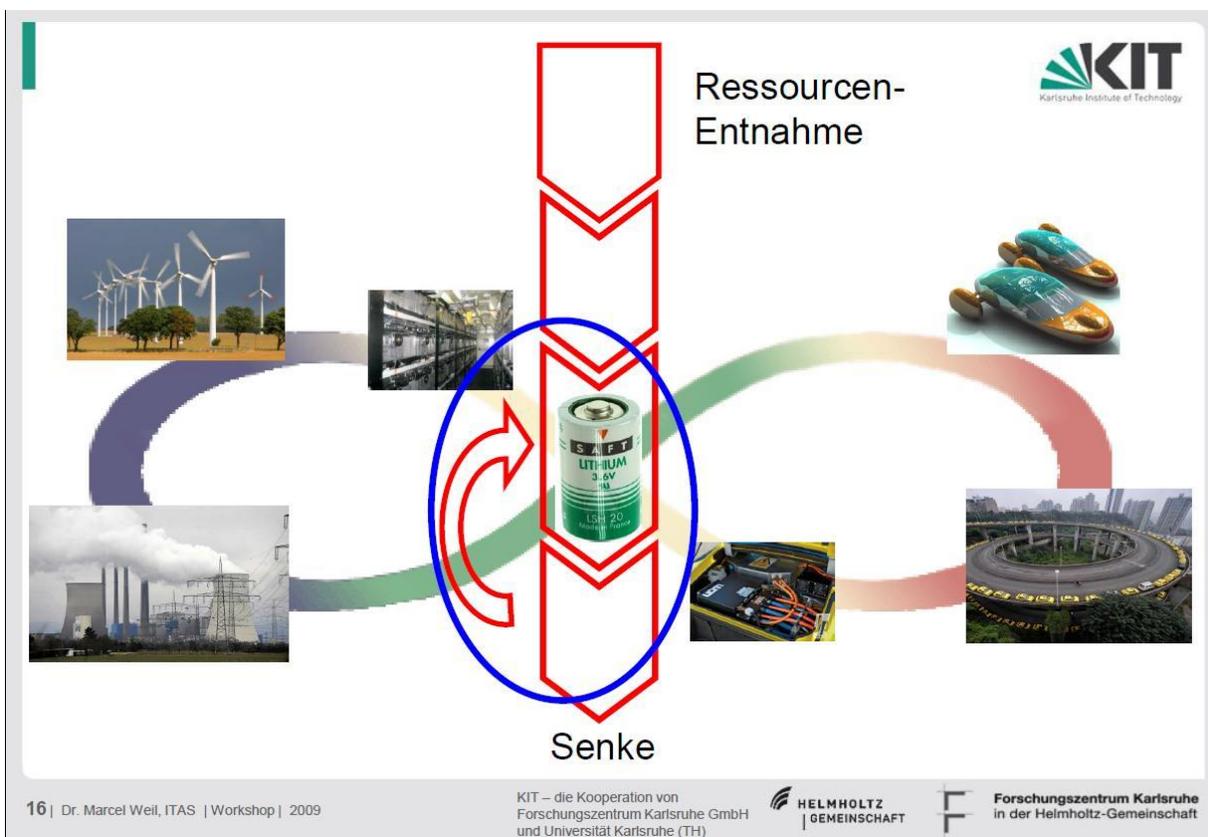
12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien –Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität*	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	

15 | Dr. Marcel Weil, ITAS | Workshop | 2009

KIT – die Kooperation von  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
und Universität Karlsruhe (TH)

HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

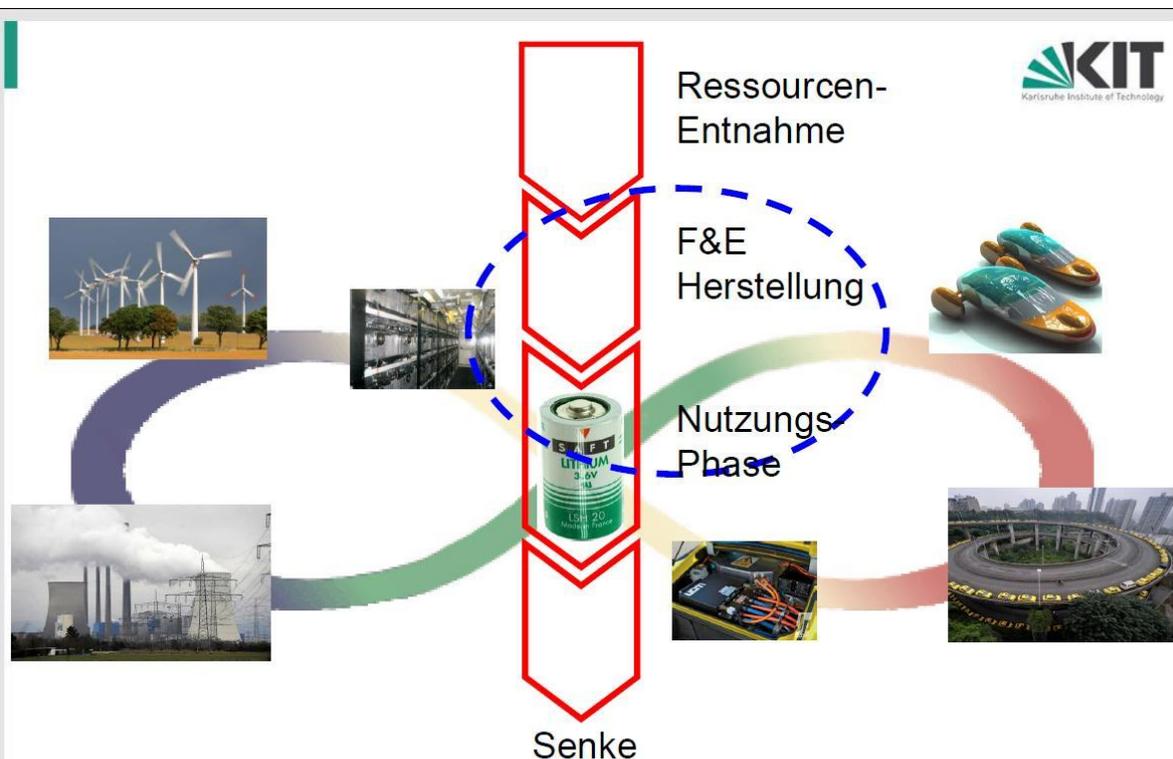
F  
Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



# Programm Montag 14.12.2009



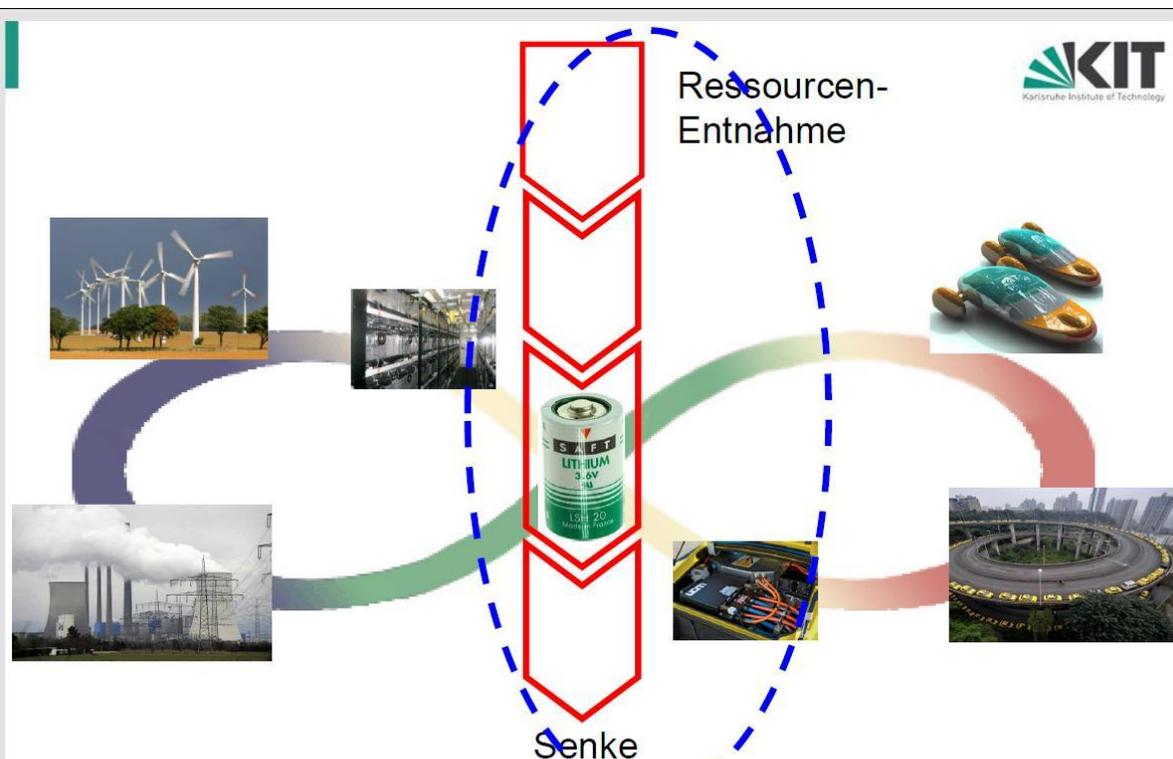
12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien –Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität“	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	



# Programm Montag 14.12.2009



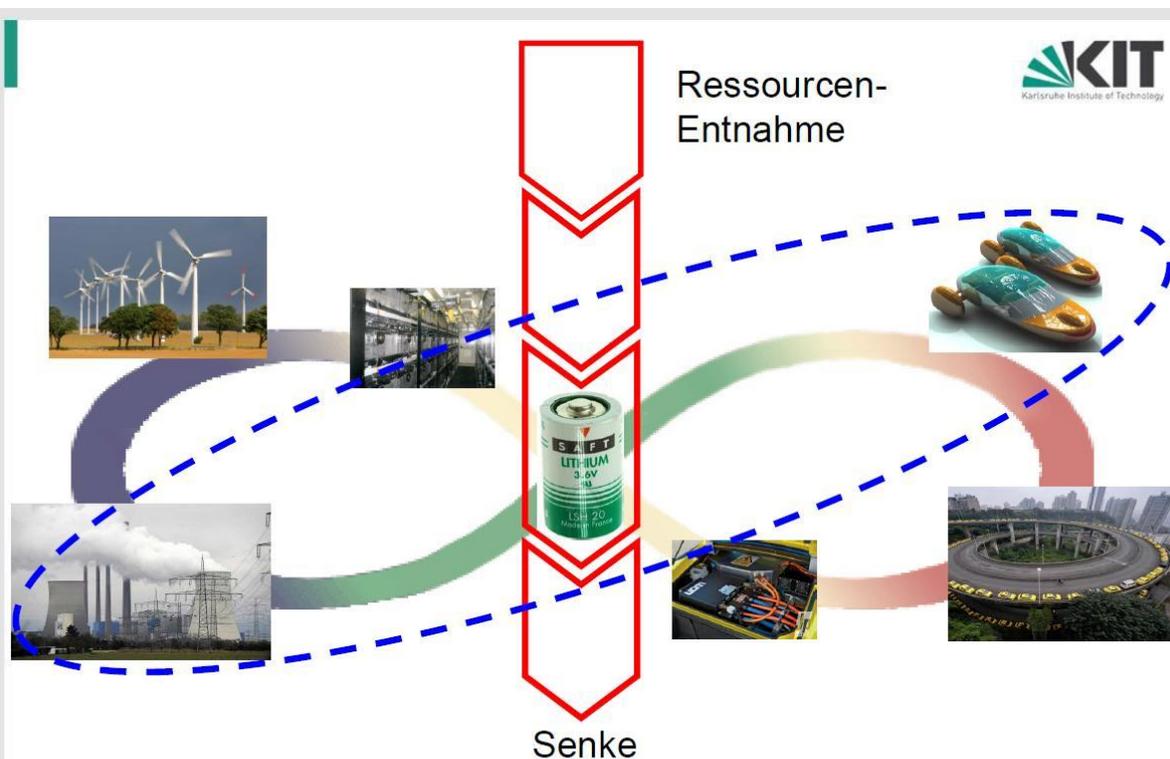
12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien –Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität*	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	



# Programm Montag 14.12.2009



12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität“	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	



## Programm Dienstag 15.12.2009

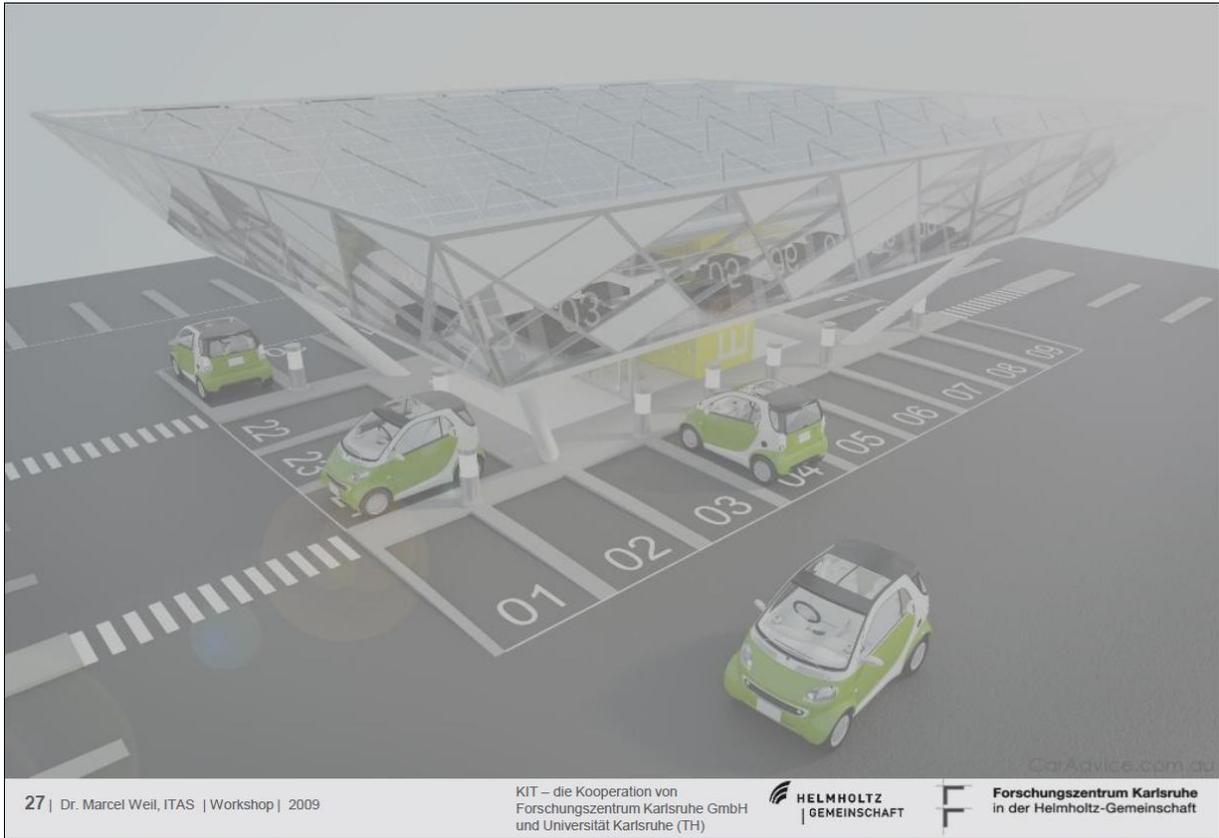


09.00 - 09.20	Registrierung/Kaffee Anmeldung für die Workshops	
09.20 - 09.25	Begrüßung	Dr. M. Weil
09.25 - 09.45	Impulsvortrag: Die Zukunft fährt elektrisch – Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Elektromobilität als Grundlage für ein neues Energie-Paradigma	Prof. Dr. G. Fournier
09.45 - 10.00	Moderierte Diskussion U. Jeske /M. Weil	
10.00 - 11.15	Parallele Workshops	
11.15 - 11.45	Pause/Imbiss	
11.45 - 13.00	Fortführung parallele Workshops	
13.00 - 13.30	Kurze Ergebnispräsentation aus den Workshops Vorstellung Netzwerk für elektrochemische Speicher	

## Programm Montag 14.12.2009



12.30 - 12.40	Begrüßung	Prof. M. Decker
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien –Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität*	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion M. Weil/ S. Ziemann	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler (L. Walch)
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion T. Fleischer/ M. Weil	
14.40 - 15.10	Pause/Kaffee	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion D. Szabo/ M. Weil	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion S. Indris/ M. Weil	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion J. Buchgeister/ M. Weil	



## **VORTRAG II**

---

# **ROHSTOFFE FÜR ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN- BEHINDERT DIE VERFÜGBARKEIT VON LITHIUM DEN AUSBAU DER ELEKTROMOBILITÄT?**

Dr. Gerhard Angerer

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung

Karlsruhe

KIT Campus Nord, 14. Dezember 2009

Systemanalyse für elektrochemische Speicher

**Rohstoffe für Zukunftstechnologien**

## **Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität?**

Gerhard Angerer

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Karlsruhe

09.12.2009



### **Rohstoffsicherheit**

- **Das Konzept, das gegenwärtig für die nachhaltige Fortentwicklung des Verkehrs und die Transformation in einen kohlenstoffarmen Sektor favorisiert wird, ist die Elektromobilität.**
- **Der hybride, aber insbesondere der elektrische Betrieb von Fahrzeugen benötigt hoch effiziente Elektrizitätsspeicher.**
- **Die gegenwärtig beste verfügbare Speichertechnik ist der Lithium-Ionen-Akkumulator.**
- **Ein massiver und weltweiter Ausbau der Elektromobilität steigert die Nachfrage nach Lithium dramatisch. Es erhebt sich die Frage, ob die geologischen Ressourcen der Erde ausreichen, diesen Ausbau zu ermöglichen.**

Seite 2



## The Meridian Report

Statements in “**The Trouble with Lithium 2**”, published May 2008

Page 53: “If all future  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  production increases are purified into battery grade material, it will only be sufficient in the most optimum scenario for at most 4 to 8 million GM Volt class vehicles worldwide per annum by 2015 – 2020”.

Page 2: “It is our conclusion that total Chemical Grade Lithium production is unlikely to exceed 200,000 tonnes per year (of carbonate = 38.000 t Li content) before 2015”.

The Trouble with  
Lithium 2  
Under the Microscope



Meridian Research Process  
100% Lithium  
100% Carbonate  
100% Pure  
Tel: +44 (0) 1223 323444  
Fax: +44 (0) 1223 323444  
www.meridian.com

The Meridian report raises doubt about the future success of the electric mobility, which presently is based on the lithium-ion battery technology.

The German magazine **SPIEGEL ONLINE** titles:

**“Lithium scarcity threaten the automotive revolution”**

Seite 3



## Lithium consumption 2008

Segment	Share	Function examples	Recycling potential
Glass + ceramics	37 %	Thermal shock resistance	No
Batteries	20 %	High energy density	Yes
Lubricating grease	11 %	Exceptional shear stability	No, dissipative
Aluminium smelting	7 %	Melting point reduction	No
Air conditioning	5 %	Dehumidification	Yes
Continuous casting	5 %	Mould fluxes	No
Rubbers + thermoplastics	3 %	Polymerisation initiator	No
Pharmaceuticals	2 %	Cancer, HIV, Alzheimer	No, dissipative
Others	10 %	Alloys, optics, military uses	No

Seite 4



## Lithium production

t/a of Lithium content	2008	2007	2006	2005
Chile	12,000			
Bolivia	0			
Australia	6,900			
China	3,500			
Argentina	3,200			
Other countries	1,800			
<b>World production</b>	<b>27,400</b>	<b>25,800</b>	<b>21,100</b>	<b>20,600</b>

Source USGS 2009

Concentration of production 2008 (Herfindahl index H) 0.29

Growth of world's production 2005 – 2008: 10 %/a

Price for battery grade lithium metal (99.9 % Li) I/2008: ~ 60 US \$/kg

$$H := \frac{\sum_{i=1}^N a_i^2}{(\sum_{i=1}^N a_i)^2}$$

Seite 5



## Lithium resources in the earth crust

Source ...		USGS 2009	Roskill 2009	Evans 2008	US NRC 1985
<b>Reserves</b>	million t Li	<b>4.1</b>			
Reserves-to-production ratio 2008	Years	150			
<b>Resources</b>	million t Li	<b>13.8</b>	27.8	29.9	28.5
Resources-to-production ratio 2008	Years	500	1,000	1,090	1,040
Concentration of resources (Herfindahl index)			0.19		

Lithium resources in the oceans are not considered

Seite 6



## World passenger vehicle fleet projection

DEDICATED TO PEOPLE & ENVIRONMENT

Mobility 2030: Meeting the challenges for sustainability



The Sustainable Mobility Project  
Full Report 2004

Source World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): „**Mobility 2030**“. Geneva, July 2004



Number of passenger vehicles	2008 million	2050 million	Growth rate %/a
Annual production	82.7	211.6	2.26
Fleet	797.5	1,970	2.18

Source WBCSD 2004

Seite 7



## Lithium content in electric vehicle propulsions

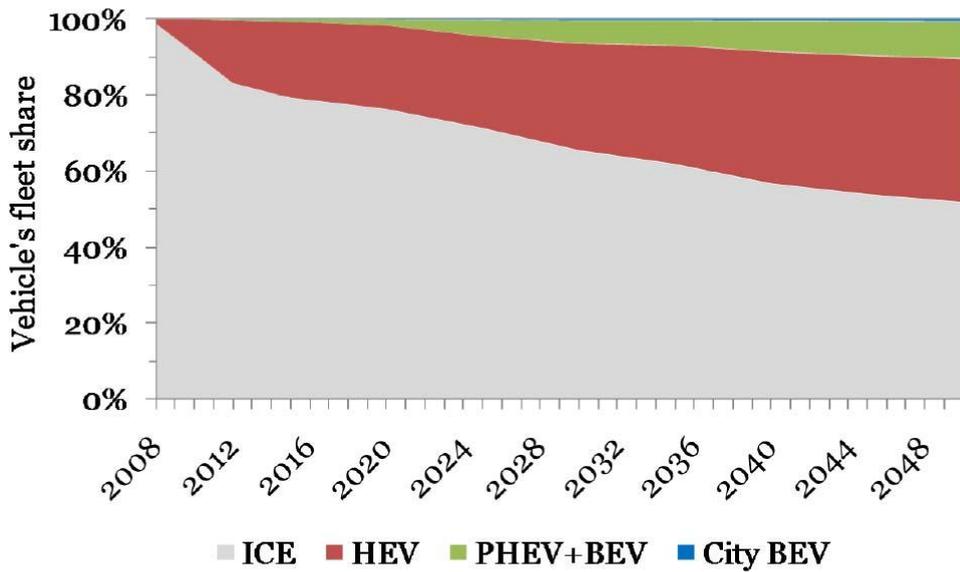
		HEV	PHEV	BEV
Battery capacity	kWh	1.4	20	20
Lithium content	g/kWh		150	

HEV Hybrid electric vehicle  
 PHEV Plug-in hybrid electric vehicle  
 BEV Battery electric vehicle

Seite 8



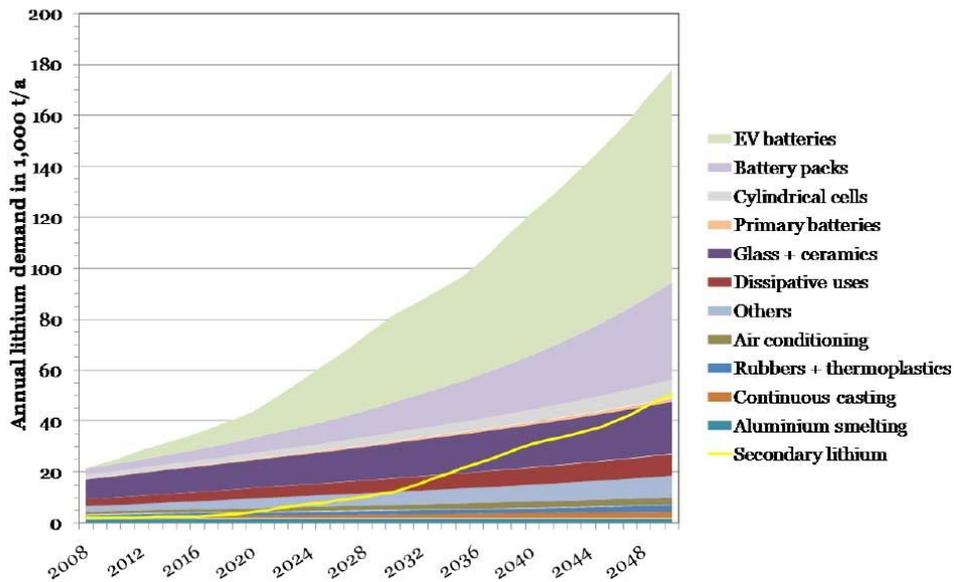
### EV market penetration – Pluralism scenario



Seite 9



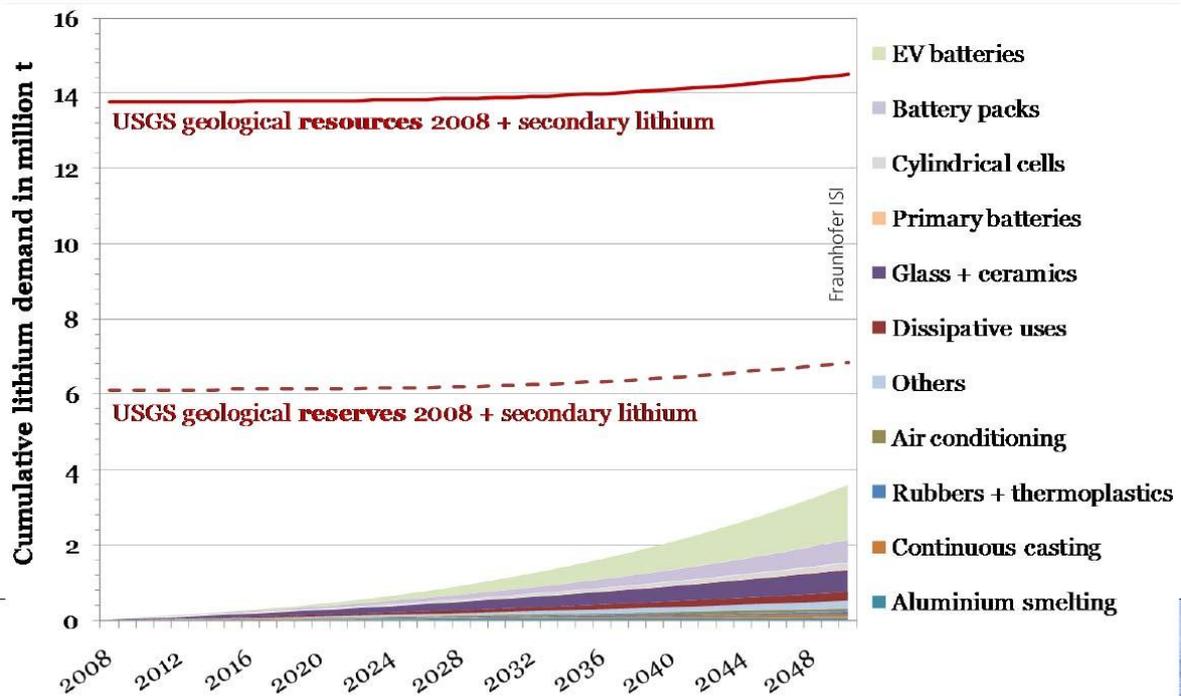
### Annual lithium demand – Pluralism scenario



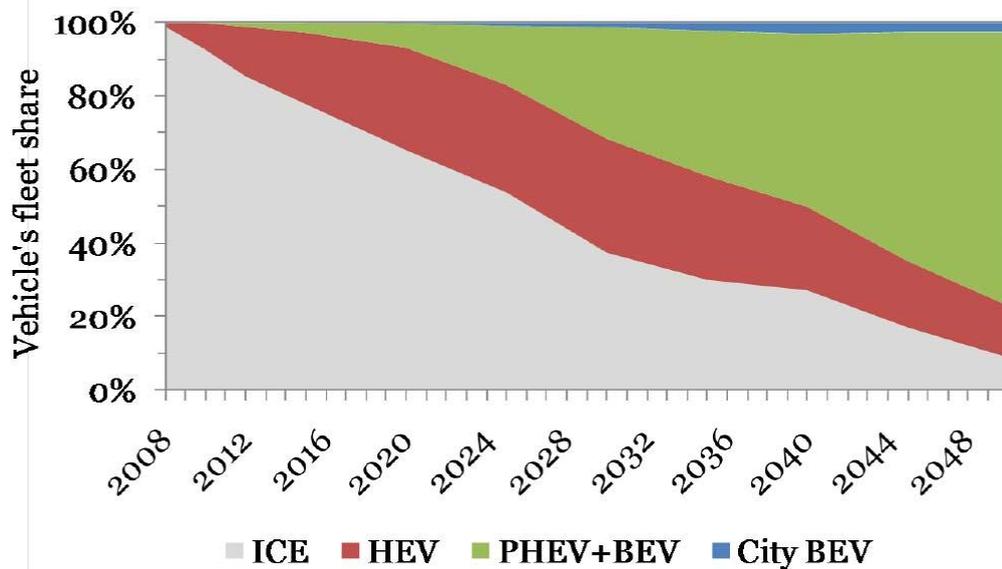
Seite 10



### Depletion of lithium resources – Pluralism scenario



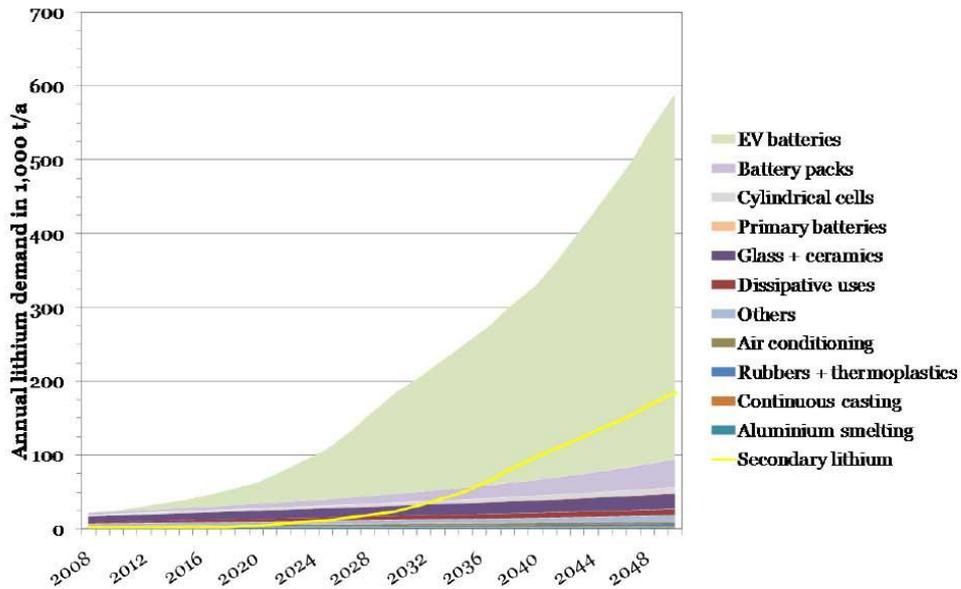
### EV market penetration – Dominance scenario



Seite 12



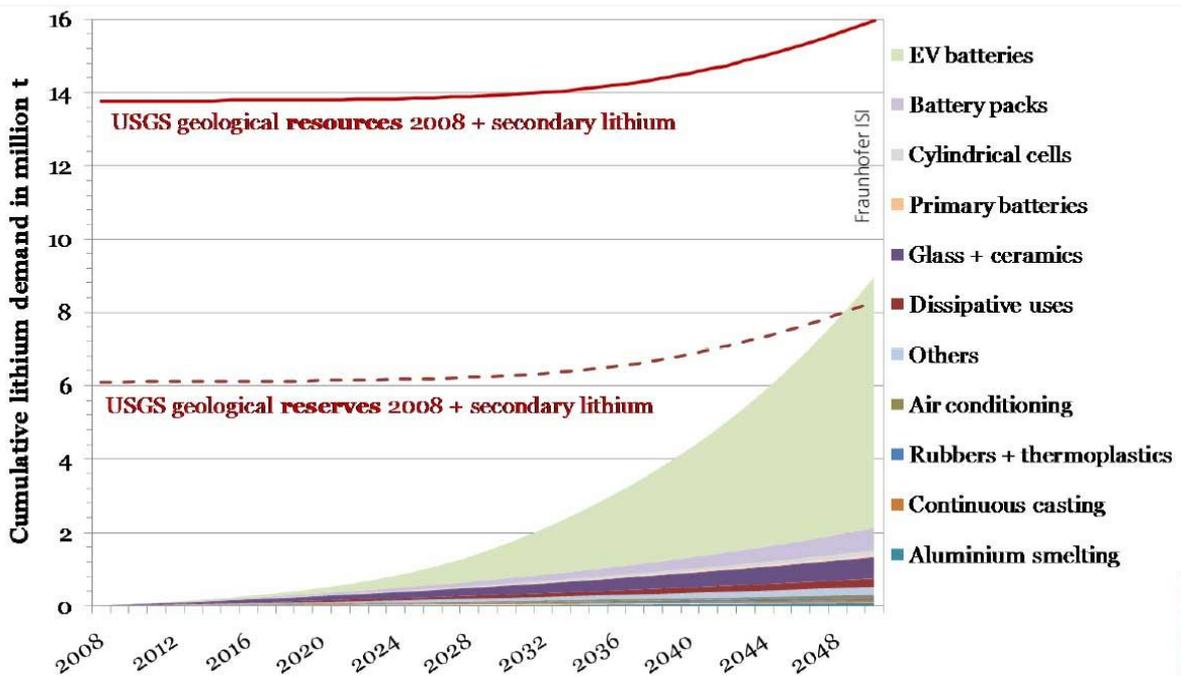
### Annual lithium demand – Dominance scenario



Seite 13



### Depletion of lithium resources – Dominance scenario



## Depletion of lithium resources – Dominance scenario+

Reference case –  
WBCSD projection

Quick growth –  
50 years history

Vehicles production growth 2008 – 2050		2.26 %/a	3.9 %/a
Vehicles production 2050	10 <sup>6</sup> #	211.6	412
Vehicles fleet 2050	10 <sup>6</sup> #	1,970	3,560
Cumulative lithium demand 2008 - 2050	10 <sup>6</sup> t	9.0	13.7
Geological Li resources 2008 - USGS	10 <sup>6</sup> t	13.8	13.8
Cumulative secondary lithium	10 <sup>6</sup> t	2.2	3.2
Cumulative total lithium resources	10 <sup>6</sup> t	16.0	17.0
Depleted geological lithium resources	%	49	76

Seite 15



## Fazit zur Sicherheit der Lithiumversorgung

- Selbst in einer voll entwickelten elektromobilen Zukunft und bei hohen Zuwachsraten der globalen Automobilproduktion reichen die geologischen Vorräte der Erde an Lithium für absehbare Zeit aus.**
- Die Nutzung von Sekundärlithium aus dem Recycling streckt die geologischen Ressourcen deutlich.**
- Produktion und Ressourcen von Lithium sind auf wenige Regionen der Erde konzentriert. Deshalb können Versorgungsstörungen trotz ausreichender geologischer Vorkommen nicht völlig ausgeschlossen werden.**
- Die Versorgungslage anderer Metalle könnte sich als kritischer herausstellen, bspw. von Kobalt, Neodym und Kupfer.**

Seite 16



An der Erarbeitung der Ergebnisse waren beteiligt  
Matthias Wendl, Gerhard Angerer, Martin Wietschel, Frank Marscheider-Weidemann

Der Bericht Lithium für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität kann aus dem Internetauftritt des Fraunhofer ISI <http://www.isi.fraunhofer.de> heruntergeladen werden

**End of presentation**

Seite 17

D:\doku\Pubikat\_Vorträge\KIT\_ITAS\_Workshop\_Speicher\_Dez09\Slides\Angerer.pptx



## **VORTRAG III**

---

# **SYSTEMANALYSE FÜR ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER**

## **E-Mobilitätsprojekte der EnBW**

Dr. Alois Kessler

EnBW AG, Bereich Forschung und Innovation

Karlsruhe

## KIT-Workshop: Systemanalyse für elektrochemische Speicher

### E-Mobilitätsprojekte der EnBW

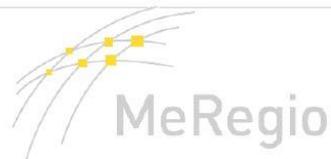
EnBW AG, Bereich Forschung und Innovation  
Dr. Alois Kessler  
14. Dez. 2009

 **EnBW**  
Energie  
braucht Impulse

#### Agenda

 **EnBW**

- Ausgangspunkt Projekt MeRegio
- Vorstellung E-Mobilitätsprojekte:
  - MeRegioMobil
  - Modellregion Stuttgart
  - HE-Lion
- Exkurs Wasserstoffwirtschaft:
  - H<sub>2</sub>Mobility



## MeRegio

### Übersicht und Hintergrundfakten



- **MeRegio** = Aufbruch zu **Minimum Emission Regions**
- **Projektkonsortium:** ABB, EnBW, IBM, KIT, SAP, systemplan
- **Initiator:** Förderprogramm E-Energy des BMWi  
Projektträger DLR
- **Beginn / Laufzeit :** seit 10.2008, 4 Jahre
- **Fördervolumen:** 60 Mio. € verteilt auf 6 Modellprojekte
- **web-Präsenz:** [www.meregio.de](http://www.meregio.de)



2

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## MeRegio

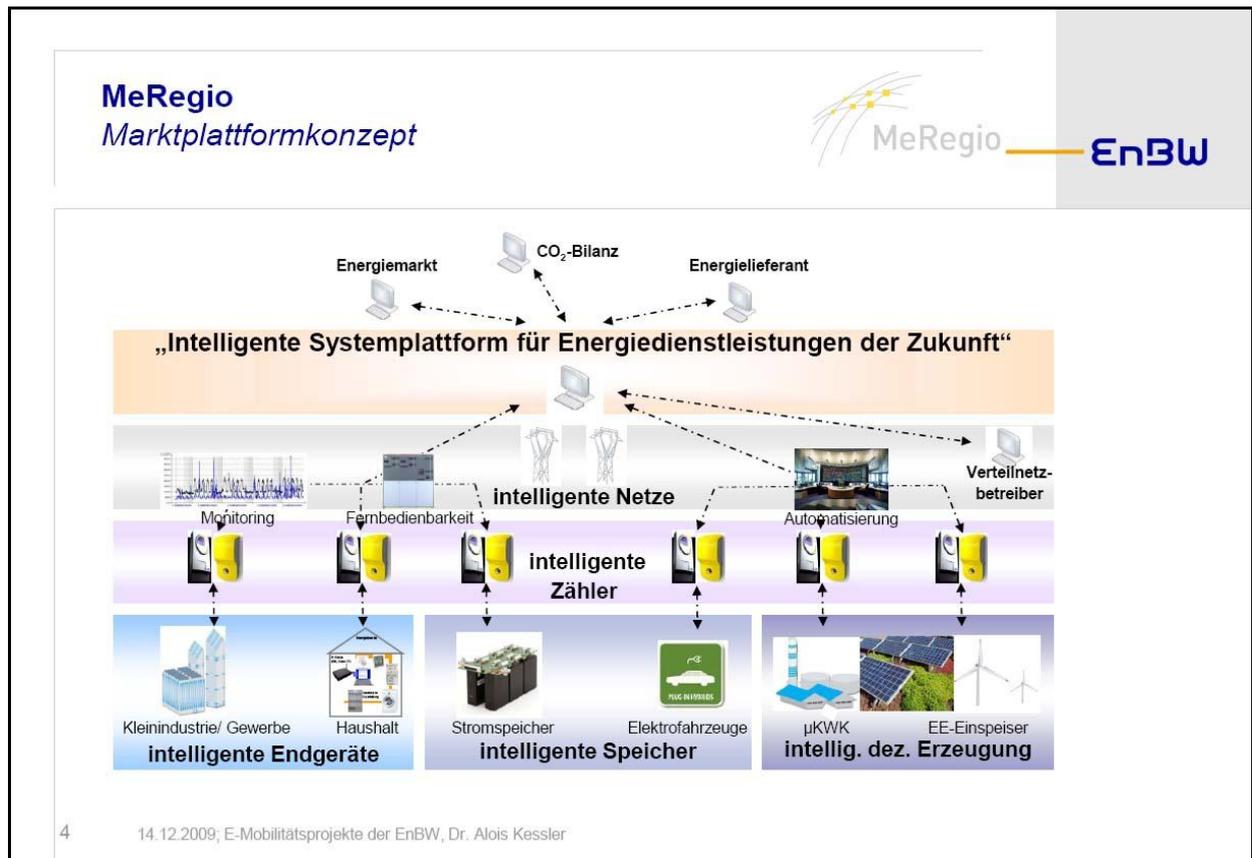
### Die wesentlichen Projektziele



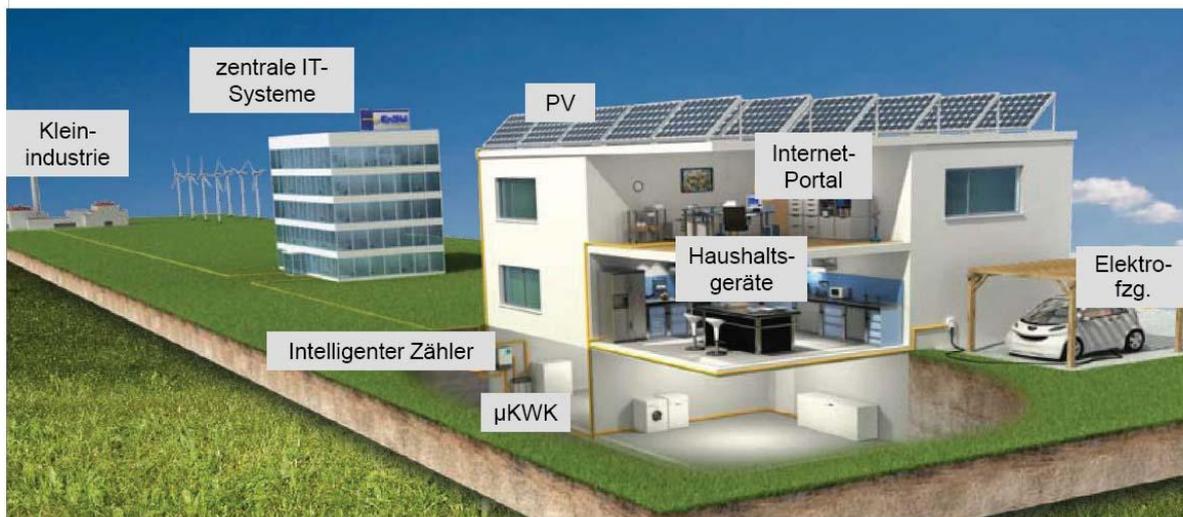
- Modellregion in Baden-Württemberg mit **Kopplung** von dezentralen Energieverbrauchern, -erzeugern und -speichern („**smart grid**“)
- Phase1 mit 100 Teilnehmern -> danach 1000 Teilnehmer
- Aufbau einer **Netzsimulation** zur Szenarioanalyse auf Basis der realen Daten aus der Modellregion
- Entwicklung einer **Marktplattform** für neue Energieprodukte & Dienstleistungen (inkl. **dynamischer Tarifierung** für Verbrauch und Einspeisung)
- Entwicklung von „Optimierungsalgorithmen“ zur **CO<sub>2</sub>-Reduktion** innerhalb der vernetzten Modellregion (Simulation)
- Analyse politischer/rechtlicher **Rahmenbedingungen**
- Identifikation neuer Geschäftsmodelle auf Basis der Marktplattform
- Entwicklung einer Zertifizierung für die Energieeffizienz einer Region

3

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler



## MeRegio → MeRegioMobil Weiteentwicklung des Konzepts



→ der „smart home“ Ansatz des Projektes MeRegio wird durch MeRegioMobil ergänzt.

6

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## E-Mobilitäts-Forschungsprojekte Überblick



- › Konsortialführer F&E Projekt MeRegioMobil  
Entwicklung und Ausbau der Ladeinfrastruktur (Ladestationen, Abrechnungssysteme, Lademanagement) im Raum Stuttgart, Karlsruhe und Strasbourg/Kehl



- › Partner der Modellregion Stuttgart im nationalen E-Mobilitätsplan  
Region Stuttgart als E-Mobilitätslabor mit integrativem urbanem Ansatz. Umfassender Einsatz von Elektro-2-Rädern, 700 E-Roller & Ladestationen in den Straßen von Stuttgart



- › Partner von H<sub>2</sub>Mobility  
Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, Pilot-H<sub>2</sub>-Tankstellen in Baden-Württemberg

7

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

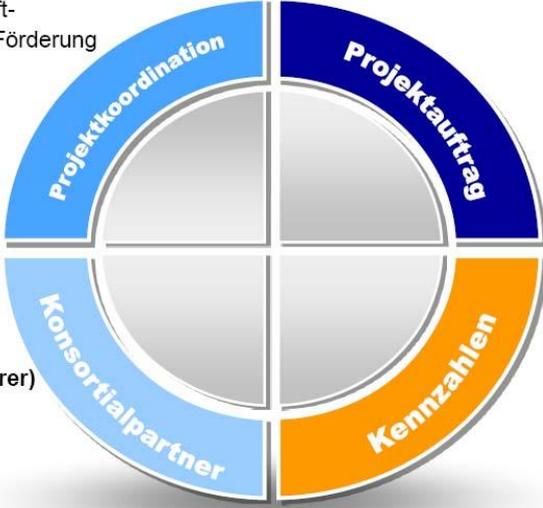
## MeRegioMobil

### Projekteckdaten





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Förderung durch das BMWi



IKT-basierte Elektromobilitäts-Schlüsseltechnologien und Dienste für die bestehenden Energie- und Verkehrsnetze in BaWü entwickeln und erproben

---

Adam Opel GmbH  
Daimler AG  
**EnBW AG (Konsortialführer)**  
KIT  
Fraunhofer Institut ISI  
SAP AG  
Robert Bosch GmbH  
Stadtwerke Karlsruhe GmbH

Projektlaufzeit: 07/09 – 09/11

**→ MeRegioMobil entwickelt die technische Plattform für E-Mobilität in Deutschland**

8
14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

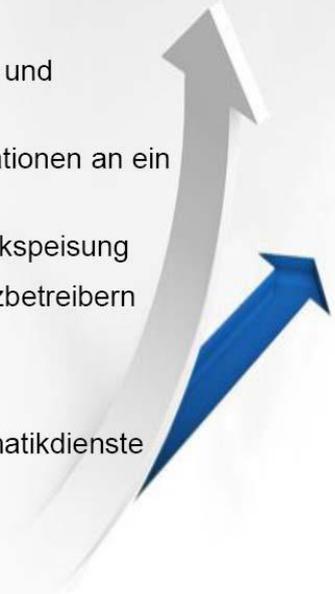
## MeRegioMobil

### Projektziele



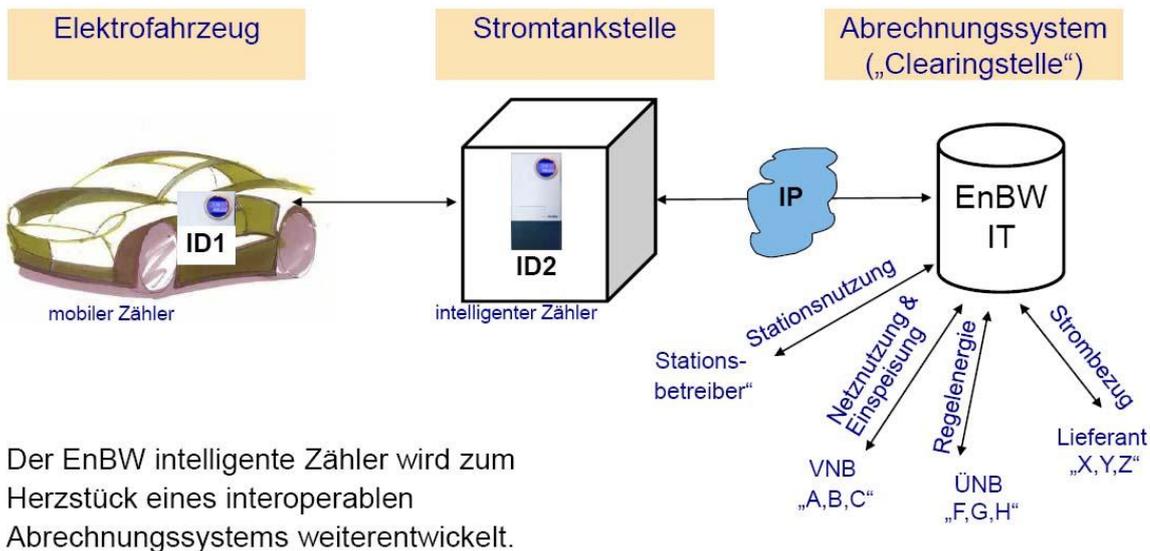


- Konzeption und Umsetzung einer Elektromobilitätsinfrastruktur in Baden-Württemberg bis 2011
- Schaffung von Akzeptanz für Elektromobilität durch Aufbau und Erprobung intelligenter Ladestationen
- Anbindung von Elektrofahrzeugen über intelligente Ladestationen an ein Hausenergiemanagementsystem („Smart Home“)
- Intelligente Steuerung von Ladungsphasen und Energierückspeisung
- Interoperable Abrechnung zw. versch. Lieferanten und Netzbetreibern
- Grenzüberschreitendes Roaming (Projekt Klébér der ES)
- Demonstrationslabor am KIT
- Konzeption und Erprobung neuartiger ortsbezogener Telematikdienste



9
14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## MeRegioMobil Interoperables Lade- & Abrechnungssystem (schematisch)



10

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

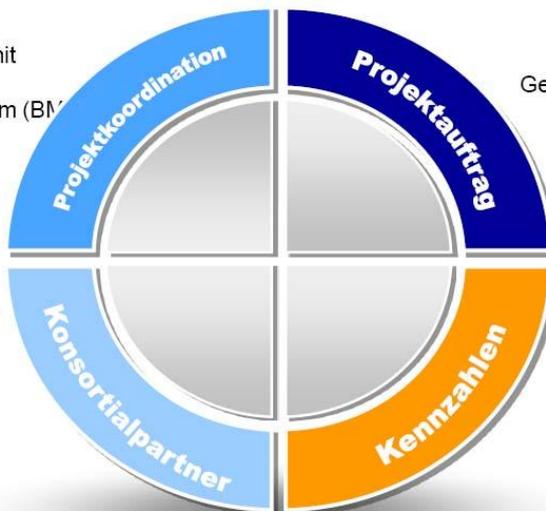
## Modellregion Stuttgart Projektedaten „e-Scooter“



„Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH“ mit Förderung durch das Bundesverkehrsministerium (BMVBS)

Erprobung der Aspekte E-Fzg., regionale Infrastruktur, Geschäftsmodelle und intermodale Mobilitätskonzepte als Marktvorbereitung

Wirtschaftsförderung Stgt.  
Kommunen und Verkehrsbetriebe  
SSB  
Daimler AG  
EnBW AG  
Robert Bosch GmbH  
Fraunhofer Institut  
mittelständische Unternehmen



Projektlaufzeit: 08/09 – 09/11

➔ Modellregion Stuttgart baut auf der Infrastruktur von MeRegioMobil auf

11

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## Modellregion Stuttgart

### Projektziele „eScooter“




- Vergabe 500 EnBW-E-Roller an E-Mobilitäts-Pioniere
- Einsatz 200 EnBW-E-Roller in kommunalen Mobilitätsprojekten
- Einsatz weiterer E-Fahrzeuge von Daimler in Planung
- 500 private und 100 kommunale und 100 öffentliche Ladestationen für E-Roller
- Aufbau EnBW-E-Mobilitätsportal
- Installation eines Kompetenzzentrums Elektromobilität
- Entwicklung von Referenzmodellen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse
- Integration von Regionalplanern, Kommunen, Infrastrukturbetreibern, Herstellern, Nutzern und Dienstleistern in gemeinsame Mobilitätskonzepte



12
14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, C

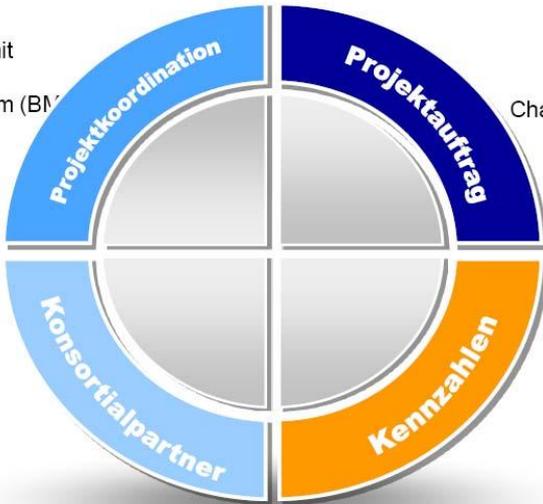
## Modellregion Stuttgart

### Projektedaten „e-Vitos“




„Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH“ mit Förderung durch das Bundesverkehrsministerium (BMVBS)

Erprobung der Aspekte E-Fzg., Akzeptanz im Flotteneinsatz, lokale Infrastruktur, Charging Infrastrukture Rolloutplan 2020



Wirtschaftsförderung Stgt.  
Daimler AG  
EnBW AG  
Fraunhofer IAO  
TÜV Süd

Projektlaufzeit: 01/10 – 06/11

➔ **Modellregion Stuttgart baut auf der Infrastruktur von MeRegioMobil auf**

13
14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## Modellregion Stuttgart

### Projektziele „e-Vitos“



EnBW

- 50 el. Vito-Kastenwagen Daimler „e-Cell“ an ca. 10 Flottenkunden
- Infrastructure Rollout Plan 2020
- Akzeptanz von Geschäftsmodellen.
- Entwicklung von Referenzmodellen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse
- Integration von Regionalplanern, Kommunen, Infrastrukturbetreibern, Herstellern, Nutzern und Dienstleistern in gemeinsame Mobilitätskonzepte



14

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, C

## H<sub>2</sub>Mobility

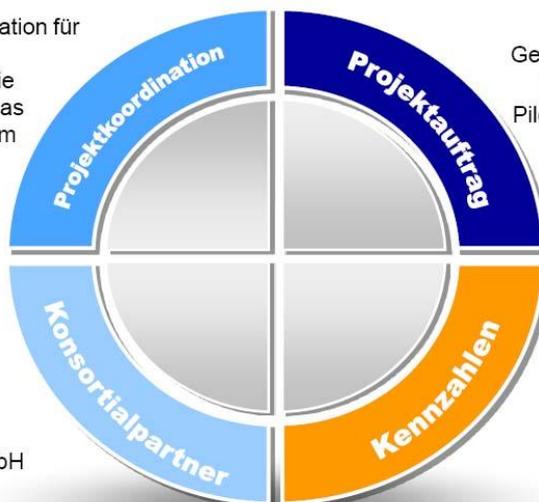
### Projekteckdaten

## H<sub>2</sub>Mobility

EnBW

NOW – Nationale Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH, Förderung durch das Bundesverkehrsministerium (BMVBS)

Gemeinsame Entwicklung von Geschäftsmodellen für Wasserstoff Infrastruktur und Aufbau von H<sub>2</sub>-Pilot-Tankstellen bis Ende 2011 als Vorbereitung für flächendeckenden Aufbau.



NOW  
Daimler AG  
Linde AG  
EnBW AG  
Vattenfall AG  
Shell Deutschland Oil GmbH  
Total Deutschland GmbH  
OMV GmbH

Projektlaufzeit: 09/09 – 12/11

→ H<sub>2</sub> Mobility schafft in D die Basis für CO<sub>2</sub>-neutrale E-Mobilität mit Brennstoffzellen.

15

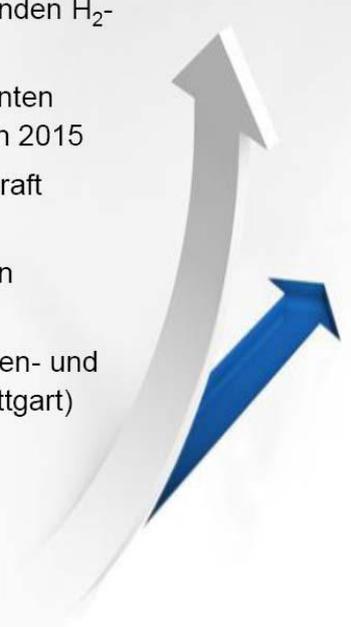
14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## H<sub>2</sub>Mobility

### EnBW-Projektziele

H<sub>2</sub>Mobility — EnBW

- **Wirtschaftlichkeitanalyse** bzgl. eines flächendeckenden H<sub>2</sub>-Tankstellennetzes in Deutschland bis 2020
- Verknüpfung des H<sub>2</sub>-Tankstellennetzes mit der geplanten Markteinführungen der Brennstoffzellen-Fahrzeuge in 2015
- **Wasserstoffbereitstellung** auf der Basis von Windkraft und Elektrolyse → MeRegio Lastmanagement
- Reduzierung der Schadstoffemission in der gesamten automobilen Energiekette
- Realisierung von **Synergien** zwischen Brennstoffzellen- und Elektrofahrzeugen (MeRegioMobil, Modellregion Stuttgart) sowie stationären Brennstoffzellen (CALLUX)



16

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, C

## HE-Lion

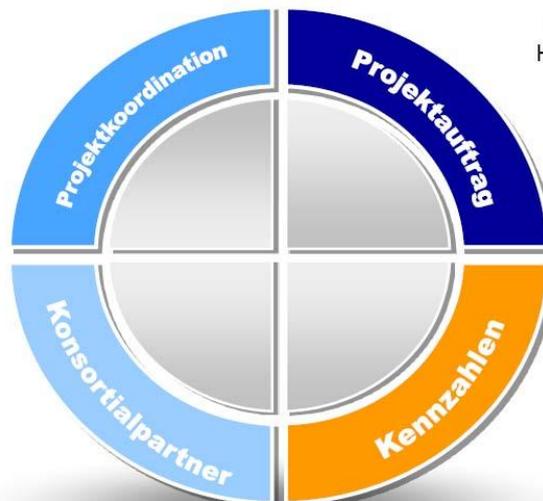
### Projektedaten

— EnBW

Projektträger Jülich  
Förderung durch das  
Bundesministerium für  
Bildung und Forschung  
(BMBF)

Entwicklung und Einsatz von Li-  
Hochenergie-Akkus der 3. und 4.  
Generation, Optimierung von  
Anode, Elektrolyt und Kathode

BASF  
Bosch  
EnBW mit TUB und TUD  
Freudenberg  
Fraunhofer ICT, ISIT, ISC  
GAIA  
Leclanche  
SGL  
Volkswagen  
Universitäten Berlin, Bonn, Clausthal, Dresden, Giesen, Hannover, Münster, PSI (CH)



Projektlaufzeit: 02/09 – 01/13

→ **Speicher als Basistechnologie der E-Mobilität müssen verstanden werden**

17

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, Dr. Alois Kessler

## HE-Lion

### EnBW-Projektziele



- Entwicklung und Implementierung von Lade- und Abrechnungsinfrastruktur
- Analyse der Auswirkungen von E-Mobilität auf das Verteilnetz (Prof. Balzer, TUD im Auftrag der EnBW)
- Lokale agentenbasierter Energiemarktplatz zur Verknüpfung von „smart grid“ und „smart home“ (Prof. Albayrak, DAI-Labor der TUB im Auftrag der EnBW)



18

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, I

## E-Mobilität bei der EnBW

### Ausblick



- Standardisierung
- Integration weiterer Fahrzeuge
- Internationales Roaming (-> d-f-Feldtest)
- Implementierung multimodaler Verkehrskonzepte



19

14.12.2009; E-Mobilitätsprojekte der EnBW, I

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**

EnBW AG, Bereich Forschung und Innovation  
Dr. Alois Kessler  
14. Dez. 2009

 **EnBW**  
Energie  
braucht Impulse

## **VORTRAG IV**

---

# **ELEKTROMOBILITÄT - AUSWIRKUNGEN AUF DAS ENERGIESYSTEM**

Dr. Dominik Möst

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle  
Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie

# Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energiesystem

Dr. Dominik Möst, Heidi Gerbracht

INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION (IIP)  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft (Prof. Fichtner)



KIT – die Kooperation von Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH)

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

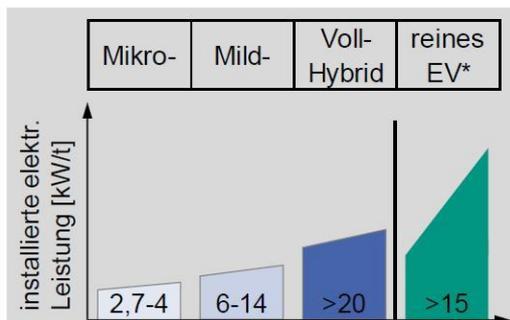
## Übersicht

- Einführung in die Elektromobilität
  
- Energiebetrachtung
- Leistungsbetrachtung
- Netzbetrachtung
- CO<sub>2</sub>-Emissionen
  
- Zusammenfassung & Handlungsoptionen

# Elektromobilität - Antriebsstrang



- Klassifizierung von Elektrofahrzeugen nach:
  - installierter elektr. Leistung oder
  - Aufbau des Antriebsstrangs



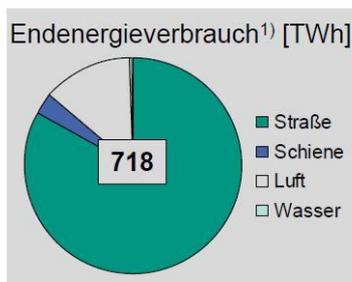
**Nur plug-in-fähige Elektro-Fahrzeuge für das Energiesysteme relevant**

Funktionen	Mikro-	Mild-	Voll-Hybrid	reines EV*
Start-Stopp	✓	✓	✓	✓
Rekuperation	(✓)	✓	✓	✓
Boosten		✓	✓	✓
rein elektr. Fahren			✓	✓
Plug-In			✓	✓

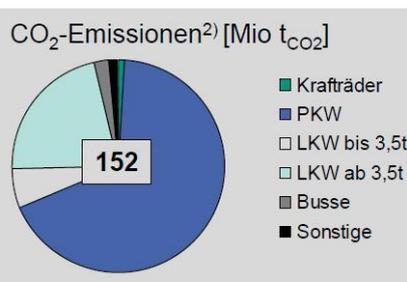
\* EV: Elektrofahrzeug

Quellen: Nautin, Voß, Schäfer

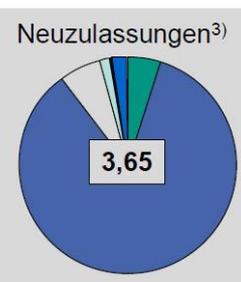
# Elektromobilität – Verkehrssektor



■ Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in 2005 in DE = 718 TWh, davon 82,8% im Straßenverkehr.



■ deutschlandweite CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 in DE = 877 Mio t<sub>CO2</sub>, davon ca. 1/6<sup>+</sup> (~19%) im Straßenverkehr



■ Pro Jahr werden ~7% des Fahrzeugbestands (≅ 49 Mio<sub>gesamt</sub>) erneuert.  
■ Erneuerungsrate bei LKWs < 3,5 t ~10%

**Elektromobilität im PKW- und LKW < 3,5 t-Sektor hat das größte Einflußpotential für das Energiesystem**

1) & 2) in 2005, 3) in 2008, 1) bis 3) für DE

Quellen: BMVBS, BMU, KBA, AG Energiebil.

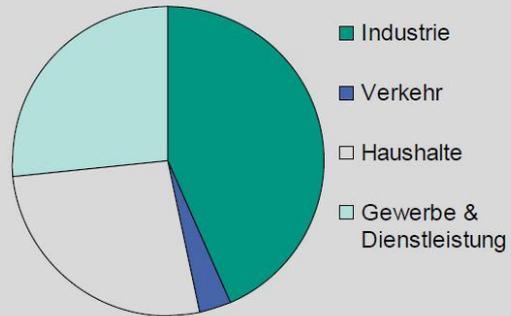
# Energiebetrachtung



- Derzeitiger Anteil des Verkehrssektors am Stromverbrauch ca. 3% (haupts. Schienenverkehr)
- Im Folgenden Betrachtung von 5 Szenarien:
  - Vollpenetration
  - 100% Neuzulassungen

- 
- Ziele des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität
  - Dominanz-Szenario\*
  - Pluralismus-Szenario\*  
\* ISI Penetrationsszenarien

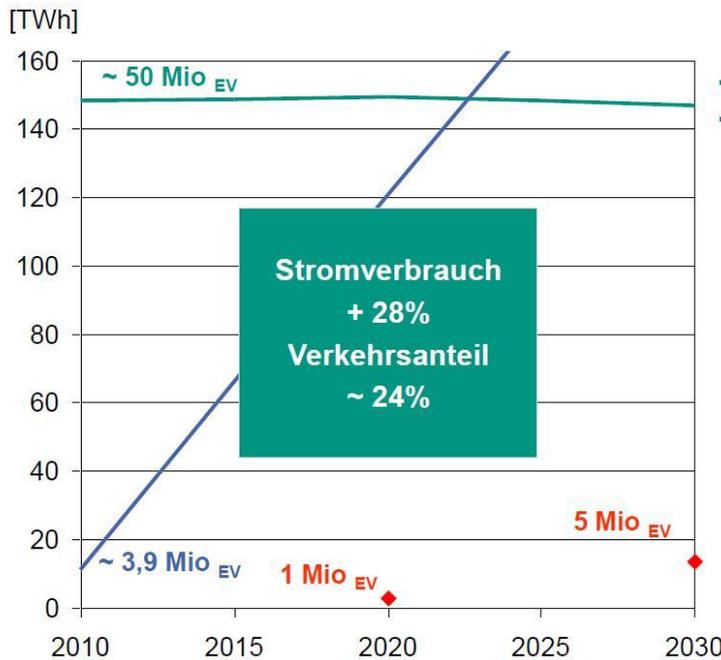
## Stromverbrauch 2006 in DE



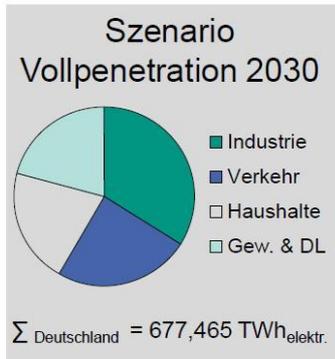
Σ Deutschland = 528,024 TWh<sub>elektr.</sub>

Quelle: Eurostat, ISI

# Energiebetrachtung – Szenarien I



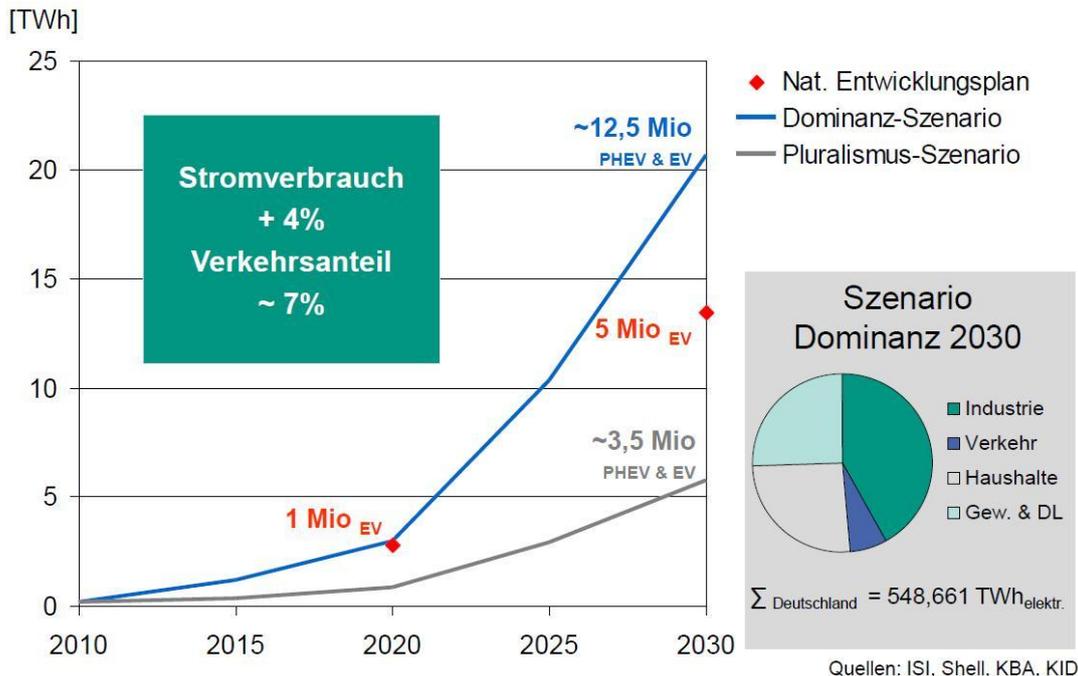
**Stromverbrauch + 28%  
Verkehrsanteil ~ 24%**



Σ Deutschland = 677,465 TWh<sub>elektr.</sub>

Quellen: ISI, Shell, KBA, KID

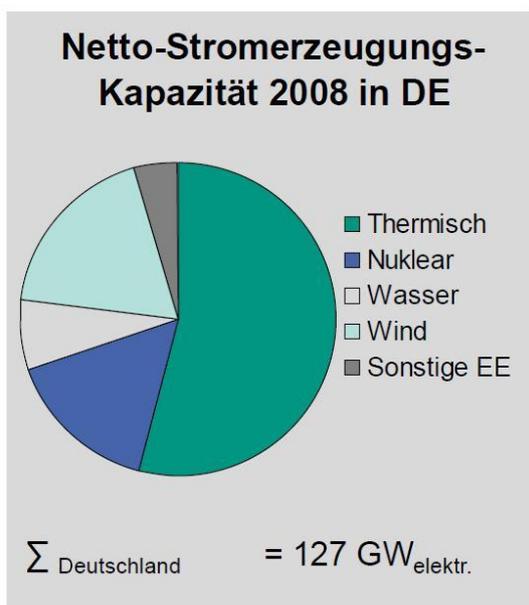
# Energiebetrachtung – Szenarien II



# Kapazitätsbetrachtung - Status



- **Frei Restkapazität (für Ladeleistung) = Netto-Erzeugungs-Kapazität**
  - nicht verfügbare Kapazitäten
  - Sicherheitsreserven
  - stündliche Last
- **Leistung von Ladestationen:**
  - Haushalt(ssteckdose): 3,68 kW
  - Schnellladestationen: 15-30 kW
- **Betrachtung von 2 Szenarien:**
  - Dominanz
  - Pluralismus

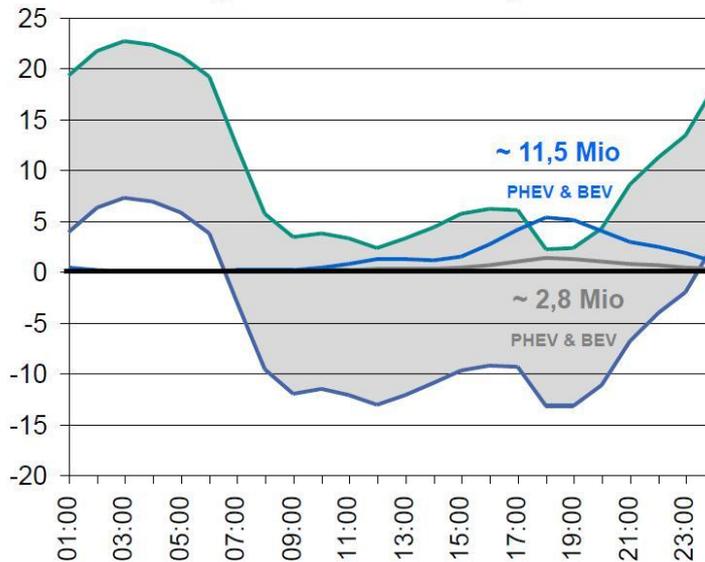


Quelle: UCTE

## Kapazitätsbetrachtung – Freie Restkapazität

[GW]

typischer Winterwochentag 2008



- Freie Restkapazität
- Freie Grundlastkapazität
- Pluralismus-Szen. 2030
- Dominanz-Szen. 2030

- ungesteuertes Laden: direktes Laden nach „Heimkehr“
- Ladeleistung: 3,68 kW
- bei höherer Ladeleistung noch höhere Spitzen

**Mit steigender Penetration erhöhen sich die Anforderungen an die Ladesteuerung!**

Quellen: UCTE, Eurostat, ISI, MiD

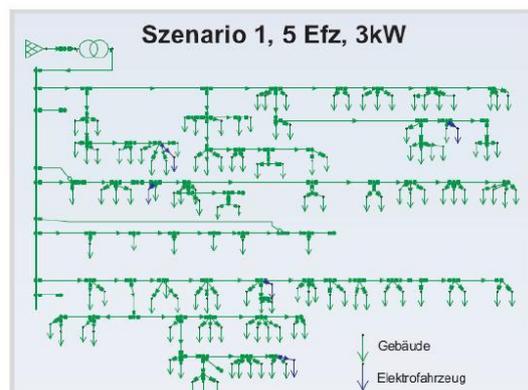
9 Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energiesystem – Dominik Möst, Heidi Gerbracht –14.12.2009  
 KIT – die Kooperation von Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH)

Prof. Fichtner, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP

## Netzbetrachtung - Verteilnetze

- Statische Lastflussanalyse anhand eines beispielhaften Verteilnetzes
- 2 Hauptengpassstellen:
  - Transformator zum MS-Netz
  - Leitungen mit hoher Haushaltsanschlußrate
- 3 Szenarien:
  - 1 Mio, 5 Mio und 10 Mio Elektrofahrzeuge

**Ungesteuert bei einem normalem Hausanschluss/Ladeleistung kommt es erst bei sehr hohen Penetrationen (>10Mio) zu Überlastungen.**



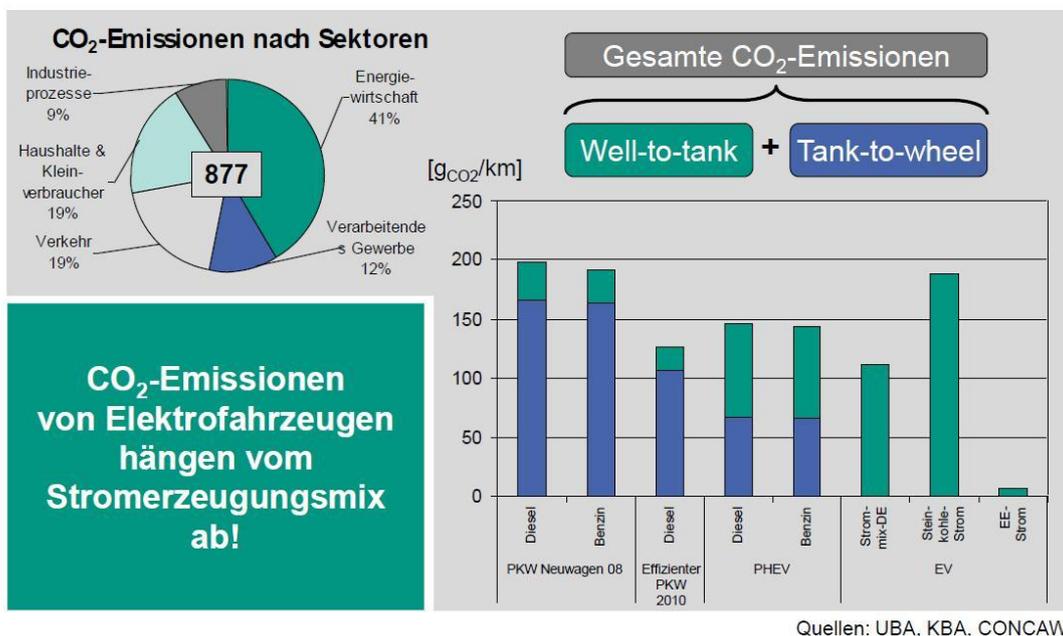
- Normalverteilte Disaggregation der Elektromobilität auf die Haushalte
  - ➔ 5 EHz im Verteilnetz entsprechen 1 Mio Gesamt-EHz.

Quelle: Bärwaldt

10 Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energiesystem – Dominik Möst, Heidi Gerbracht –14.12.2009  
 KIT – die Kooperation von Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH)

Prof. Fichtner, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP

## CO<sub>2</sub>-Emissionen - Status



**CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektrofahrzeugen hängen vom Stromerzeugungsmix ab!**

## CO<sub>2</sub>-Emissionen – Auswirkungen

- Bei 1 Millionen Elektrofahrzeugen (s. Nat. Entwicklungsplan Elektromobilität für 2020)
- ausreichend **zusätzliches** EE\*-Potential für Fahrstrom vorhanden

### Einsparungen

**1,17 Mio t** jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung (DE-Strommix<sup>1)</sup>)  
**2,68 Mio t** jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung (EE-Strommix<sup>2)</sup>)

- 1) 575 g CO<sub>2</sub>/kWh;  
2) 30 g CO<sub>2</sub>/kWh;

\* Erneuerbare Energien  
Quellen: BMU, Engel08, EWI/Prognos08

### Sektorverschiebungen

← Verkehrssektor:  
**2,76 Mio t** jährliche CO<sub>2</sub>-Verschiebung

→ Energiesektor:  
**1,59 Mio t** jährliche CO<sub>2</sub>-Verschiebung (DE-Strommix<sup>1)</sup>)  
**0,082 Mio t** jährliche CO<sub>2</sub>-Verschiebung (EE-Strommix<sup>2)</sup>)

→ **Sektorverschiebung muss bei Zuteilungsmengen und –regeln Berücksichtigung finden.**

## Zusammenfassung / Handlungsoptionen



- Energiebedarf
  - ➔ **Zusätzliche** Kraftwerkszubauten werden erst in den nächsten Jahrzehnten notwendig.
- Kapazitätsbedarf
  - ➔ Ladesteuerung kann den Ausbau verzögern, insbesondere bei hohen Penetrationen.
- Netzkapazitäten
  - ➔ Ebenfalls durch Ladesteuerung bessere Auslastung erreichbar.
- CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - ➔ Ladestrom aus Erneuerbaren Energien ist unter CO<sub>2</sub>-Aspekten zu bevorzugen.

**Detaillierte Analysen der Entwicklung des Energiesystems unter Berücksichtigung von Elektromobilität und Erprobung geeigneter Infrastrukturen (z.B. Smart Meter) notwendig.**

## Elektromobilitätsprojekte am IIP



- **Flottenversuch Elektromobilität**  
**Detaillierte Analysen der Entwicklung des Energiesystems unter Berücksichtigung von Elektromobilität und Erprobung geeigneter Infrastrukturen notwendig.**
  - Welche Auswirkungen hat Elektromobilität auf den Kraftwerkspark?
  - Welchen Einfluss hat Elektromobilität auf Netzengpässe und Spitzenlasten?
  - Welchen Beitrag kann Elektromobilität zur Integration von Erneuerbaren Energien leisten?
- **MeRegioMobil**  
**Konzeption, Simulation und Evaluation von neuartigen Geschäftsmodellen und Diensten im Bereich Elektromobilität**
  - Welche Auswirkungen hat Elektromobilität auf regionale Energiesysteme?
  - Welche neuen Geschäftsmodelle und Anreizsysteme sind unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll?
  - Wie ist die Akzeptanz der verschiedenen Nutzergruppen dieser entwickelten Geschäfts- und Tarifmodelle?

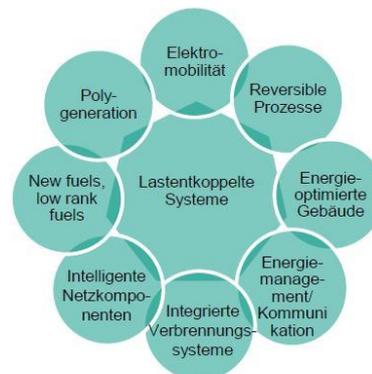


## Vernetzte Forschung am IIP



### ■ Lastenkoppelte Energiesysteme

- Wie sehen mögliche Energiezukünfte aus?
- Welche Implikationen ergeben sich dadurch auf das Energiesystem?
- Wie können die Kompetenzen am KIT vernetzt und ausgebaut werden?
- Welche Schwerpunkte sollen zukünftig erforscht werden?



### ■ Neue Arbeitsgruppe **Transport und Energie**

- Gruppenleiter: Dr. Patrick Jochem
- Aufbauen auf Kompetenzen der Energiesystemanalyse
- Verknüpfen von Verkehr- und Energiesektor
- Erweitern und verknüpfen der Untersuchungsfelder mit techno-ökonomischem Schwerpunkt

15

Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energiesystem – Dominik Möst, Heidi Gerbracht – 14.12.2009  
 KIT – die Kooperation von Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH)

Prof. Fichtner, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP



## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Weitere Informationen und Kontakt:

[Dominik.Moest@kit.edu](mailto:Dominik.Moest@kit.edu)

INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION (IIP)  
 Lehrstuhl für Energiewirtschaft (Prof. Fichtner)



KIT – die Kooperation von Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und Universität Karlsruhe (TH)

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)



## VORTRAG V

---

### **STOFFLICHE VERWERTUNG MODERNER BATTERIESYSTEME**

Dr. Ing. Reiner Weyhe  
ACCUREC Recycling GmbH,  
Mülheim an der Ruhr

## **1 Abstract**

Accurec ist ein mittelständisches, konzernunabhängiges Recyclingunternehmen, das sich seit 1996 zum Ziel gesetzt hat, für alle gängigen, modernen Batteriesysteme ein optimiertes Verwertungskonzept zu entwickeln und zu betreiben. In diesem Zusammenhang sind Recyclingverfahren für Nickel-Cadmium-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien, Primär-Gerätebatterien und Li-Ion-Gerätebatterien entstanden, die zum überwiegenden Teil bereits im industriellen Maßstab installiert wurden. Einige dieser Verfahren konnten gemeinsam mit der RWTH Aachen, am IME Institut für Metallhüttenkunde entwickelt werden und spiegeln den Status der BAT - Best Available Technology wieder. Diese systematische Forschung und ihre konsequente Umsetzung ist 2008 mit dem Kaiserpfalzpreis der deutschen Metallurgieindustrie gewürdigt worden. Aktuell treiben IME und Accurec im Rahmen der Forschungsinitiative LiB2015 (Li-Ion Batterien 2015) in einem dreijährigen Projekt das Thema „Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion basierten Automobil-Batterien“ voran.

In diesem Beitrag werden die Grundzüge der entwickelten Verfahren dargestellt, ein Überblick über die Marktsituation verkaufter und dem Recycling zur Verfügung stehender gesammelter Altbatterien gegeben, sowie ihre nationalen und europäischen gesetzlichen Rahmenbedingungen beleuchtet. Abschließend wird ein Ausblick auf die aktuellen Forschungsprojekte insbesondere zum Recycling von Li-Ion Batterien aus elektrifizierten Fahrzeugen (EV / HEV) gegeben.

## **2 Einleitung**

Mit der Einführung der Batterie Verordnung (BattV) im Oktober 1998 wurden erstmals die Batteriehersteller und -händler verpflichtete Altbatterien kostenfrei zurückzunehmen und einer Entsorgung zuzuführen [1], [2]. Um dieser Verpflichtung nachzukommen wurde die Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS) im selben Jahr von führenden Batterieherstellern sowie dem Zentralverband Elektrotechnik und

Elektronikindustrie gegründet. Die GRS stellt seitdem eine einheitliche und flächendeckende Rücknahme gebrauchter Batterien in Deutschland und deren Recycling sicher [3].

Im September 2006 konnte mit der EU-Direktive 2006/66/EC eine zukunftsweisende Neuregelung verabschiedet werden, die u.a. erstmals eine Verwertungspflicht sowie Mindestanforderungen für Batterierecycling-Prozesse vorschreibt. Diese erforderliche Recyclingeffizienz ist abhängig vom Batteriesystem und definiert mindestens 65 Gew.% für Blei- bzw. 75 % für Nickel-Cadmium Batterien, sowie 50 % für alle weiteren Batteriesysteme. Die EU-Direktive wurde mit der Verabschiedung des Batteriegesetzes (BattG) im Juni 2009 in nationales Recht umgesetzt und ist seit dem 1. Dezember 2009 in Kraft [5].

### **3 Wiederaufladbare Batteriesysteme**

#### **3.1 Industrial Rechargeable Batteries**

Industriell genutzte Batterien basieren bis auf wenige exotische Ausnahmen auf der klassischen Blei-Säure oder der Nickel-Cadmium Technologie. Die Auswahl des Systems richtet sich überwiegend an den Anforderungen der Applikation aus. Während die Bleibatterie, auch durch ihren Masseneinsatz bedingt, signifikante Kostenvorteile aufweist, werden NC-Akkus i.d.R. als mobile und stationäre Notstromversorgungsbatterien bevorzugt in Anwendungen mit gesonderten technischen Anforderungen (Klima, Leistungsdichte, Ladungsperformance, etc.) eingesetzt.

#### **3.2 Portable Rechargeable Batteries**

Wiederaufladbare Batterien für haushaltsübliche Anwendungen untergliedern sich seit gut einer Dekade nach NiCd, Nickel-Metallhydrid und Li-Ion Akkumulatoren. Sowohl der relative Anteil am Gesamtbatteriemarkt, als auch die absolute Menge verkaufter Akkuzellen

hat sich in den letzten 10 Jahren kontinuierlich vergrößert. Während wiederaufladbare NiCd-Akkus in Menge und Anwendungsbreite im vorangegangenen Jahrzehnt noch dominiert haben, werden diese heute immer häufiger durch das Li-Ion System ersetzt. NiMH-Akkumulatoren sind in ihrer Marktpenetration und technischen Performance eher als transitorische Technologie anzusehen. Ihre unterschiedlichen Eigenschaften kommen in den folgenden Spidergrams zum Ausdruck. NiCd-Akkus werden bevorzugt für robuste, kostengünstige Anwendungen mit hohem Strombedarf und Fähigkeit für schnelles Wiederaufladen eingesetzt. Demgegenüber bieten Li-Ion Akkus insbesondere höchste Energiedichten, wodurch sie bevorzugt über die Einsatzgebiete Mobilfunk und LapTops ihren Einzug in den Konsumermarkt fanden.

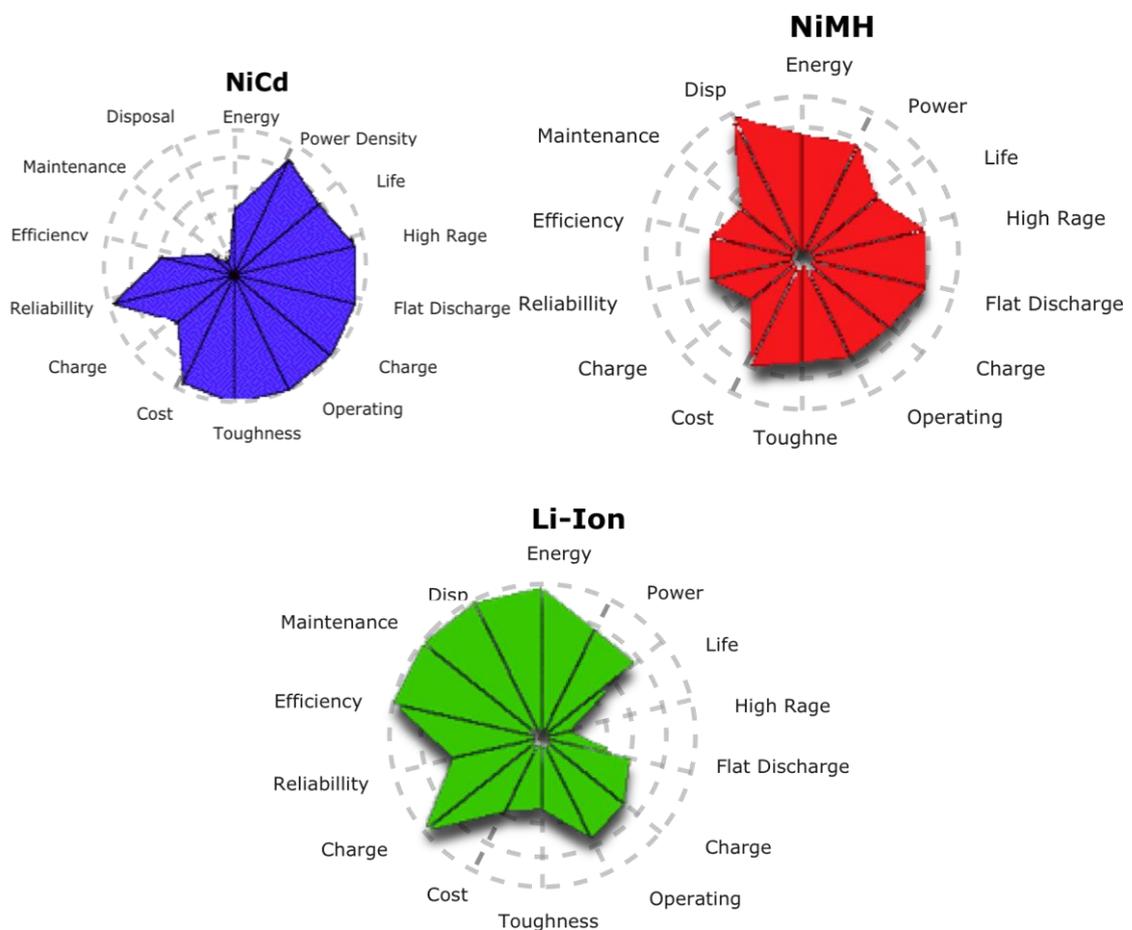


Abb. 1: Spidergram: Performance moderner Akkumulatorensysteme

## 4 Recyclingverfahren

Das Recycling der vorgenannten Akkusysteme ist zunächst erst mit der Einführung der 1. Batterieverordnung 1998 systematisch erforderlich geworden. Die Verfahrensentwicklung insbesondere für NiMH und Li-Ion Batterien wurde damit erst Gegenstand der unmittelbaren jüngeren Vergangenheit, und führt teilweise zu unterschiedlichsten Verfahrensansätzen deren Marktfähigkeit und Umweltverträglichkeit gegenwärtig noch nicht verifiziert sind.

### 4.1 Nickel-Cadmium-Batterien

NiCd-Batterien stellten von vornherein aufgrund der umweltsensiblen Schwermetalle Nickel und Cadmiums besondere Anforderungen an ein Recyclingverfahren, insbesondere im Hinblick auf den Emissionsschutz und die tägliche Arbeitssicherheit. Als Verfahrensansatz kam deshalb die Vakuumtechnologie zum Einsatz, mit der Accurec in der metallurgischen Recyclingtechnik Neuland betrat. Durch die Vakuumtechnologie wurde ein abgas- und abwasserfreies Verfahren ermöglicht, das gleichzeitig durch die *hermetisch* abgeschlossene Konstruktion diffuse Cd-Emissionen verhindert und somit ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleistet. Weitere Verfahrensvorteile finden sich darin, dass NiCd-Zellen ohne weitere emissions-trächtige Vorbehandlung in einem einzigen Schritt recycelt werden können. Zunächst werden sie batchweise in einen induktiv beheizbaren Vakuumbehälter gefüllt. Dieser kann bis auf einen Enddruck von 1 mbar evakuiert und stufenweise auf max. 850 °C erhitzt werden. Bei einer Temperatur von 200-400 °C erfolgt die Pyrolyse und Verdampfung der organischen Bestandteile (Elektrolyt, Kunststoffe, etc). Nach Erreichen der Zieltemperatur von 850 °C wird das Cadmiumhydroxid in den Batterien dehydratisiert, und anschließend CdO durch den vorhandenen Kohlenstoff zu metallischem Cadmium reduziert. Das metallische Cadmium verdampft und wird in einem nachgeschalteten Kondensator gesammelt. Zurück bleibt ein Ni/Fe-Schrott mit Cd Restgehalten unter 50 ppm, der in der Stahlindustrie als Legierungszusatz Verwendung findet. Das kondensierte Cadmium verfügt

über eine Reinheit von 99,9 % und wird dem „closed-loop“ Konzept entsprechend der Batterie-Industrie wieder zurückgeführt.

Das VTR (Vacuum-Thermal-Recycling) Konzept verbindet damit nachfolgende Verfahrensvorteile [2], [6]:

- einstufiges Verfahren: Einsparung von Aufbereitungsschritten und Handlingsaufwand, Vermeidung von Zwischenemissionen
- reduzierter spezifischen Energieverbrauch von ca. 0,15 kWh el pro kg recyceltem Cadmium gegenüber 2-3 kWh pro kg Primärcadmium
- Einsparung von Abgas- und -Abwasserreinigung
- quasi Cd-emissionsfrei
- hoher Automatisierungsgrad, hohe Energieeffizienz
- hohe Betriebssicherheit

und stellte damit eine richtungweisende Erfahrungsgrundlage für weitere Verfahrensentwicklungen im Batterierecyclingsektor dar.



Abb. 2: links: Behandlungsanlagen, rechts: Prozessschema

Das von Accurec entwickelte und geschützte Verfahren ist bisher ausschließlich im Stammwerk Mülheim a.d.R. installiert und hat seit dem Ursprungsjahr 1998 mehr als 20 Mio. kg NiCd-Batterien verarbeitet. Aufgrund seiner behördlich festgestellten geringen Emissionen ist es als Best Available Technologie (BAT) eingestuft. Hinsichtlich der durch die EU-Directive [4] geforderten Recycling Effizienz (RE) übertrifft das Verfahren die geforderten minimalen 75% RE. Pro Tonne NiCd-Batterien werden ca. 150 kg Cd, ca. 630 kg FeNi-Konzentrat als marktkonforme Produkte wiedergewonnen. Zusätzlich nutzt das Verfahren einen signifikanten Anteil der Kunststoffe als Reduktionsmittel und führt das rekondensierte Wasser nach chemisch-physikalischer Behandlung wieder dem

Wasserkreislauf zu. Dem ausdrücklich in der Richtlinie geforderte Höchstmaß an zurückgewonnenem Cadmium kann dank verfahrensbedingter Vermeidung diffuser Cd-Emissionen erstmals entsprochen werden.

#### 4.2 Nickel-Metallhydrid-Batterien

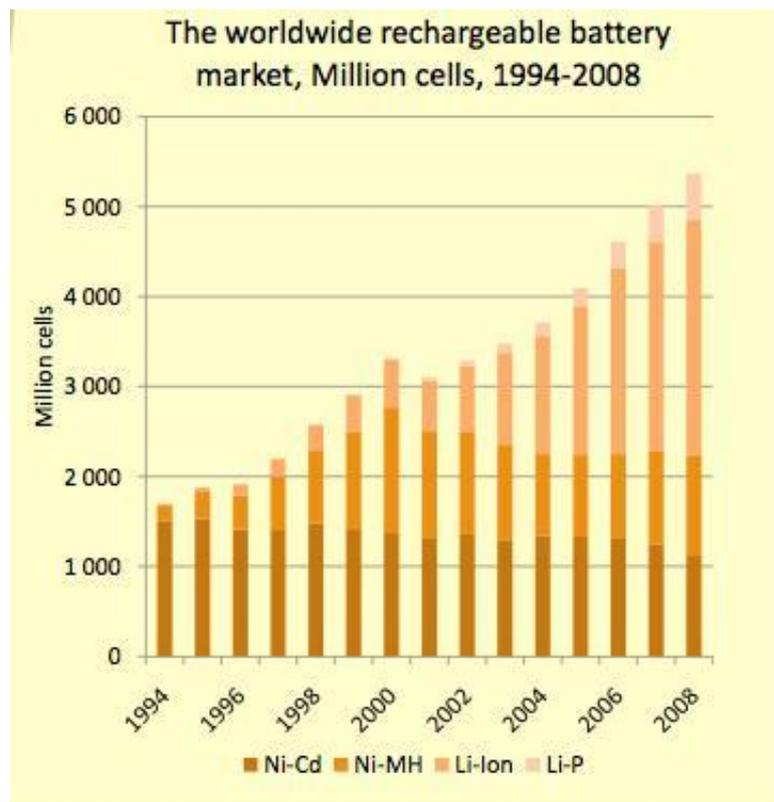


Abb. 3: Verkauf wiederaufladbarer Batterien, weltweit (Stk/a)

Seit seiner Markteinführung Mitte der 90er Jahre hat sich das Batteriesystem NiMH exponentiell verbreitet und begonnen das traditionelle NiCd-System zu ersetzen. Grafik 3 verdeutlicht, dass sich mit der Asienkrise Anfang des Jahrhunderts eine scheinbare Marktsättigung eingestellt hat. Bei näherer Betrachtung untermauert die Marktanalyse in Grafik 4 a) jedoch, dass bereits einerseits in Anwendungen der Konsumerelektronik ein Austausch gegen Li-Ion stattgefunden hat. Andererseits konnte der Marktverlust mit Einführung der ersten NiMH-basierten HEV-Hybrid Automobilen überkompensiert werden.

Diese industrielle Anwendung wird die Markt- Verbreitung der NiMH-Batterien in den kommenden Jahren maßgeblich bestimmen. Die NiMH-Zelle war technisch gesehen als leistungstärkeres und Cd-freies Nachfolgemodell der NiCd-Zelle geplant. In Massenanwendungen wie schnurlosen Werkzeugen oder Notstrombeleuchtungen konnte sie aber aufgrund der unzureichenden Schnellladefähigkeit und ihrer stark von der Temperatur abhängigen Leistungsperformance eine Verdrängung nicht bewirken. Ihre typische Materialzusammensetzung gibt Tabelle 5 wieder. Bis auf die Wasserstoffspeicherlegierung, die auf seltenene Erden basiert, sind die Basiskomponenten einer NiMH der NiCd-Zelle vergleichbar, was eine Adaption der VTR-Recyclingtechnik nahe legte. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Metallhüttenkunde der RWTH Aachen entstand innerhalb eines Forschungsprojektes des BMBF zwischen 2001 und 2004 ein Recyclingkonzept, dass bei Accurec weitestgehend umgesetzt werden konnte.

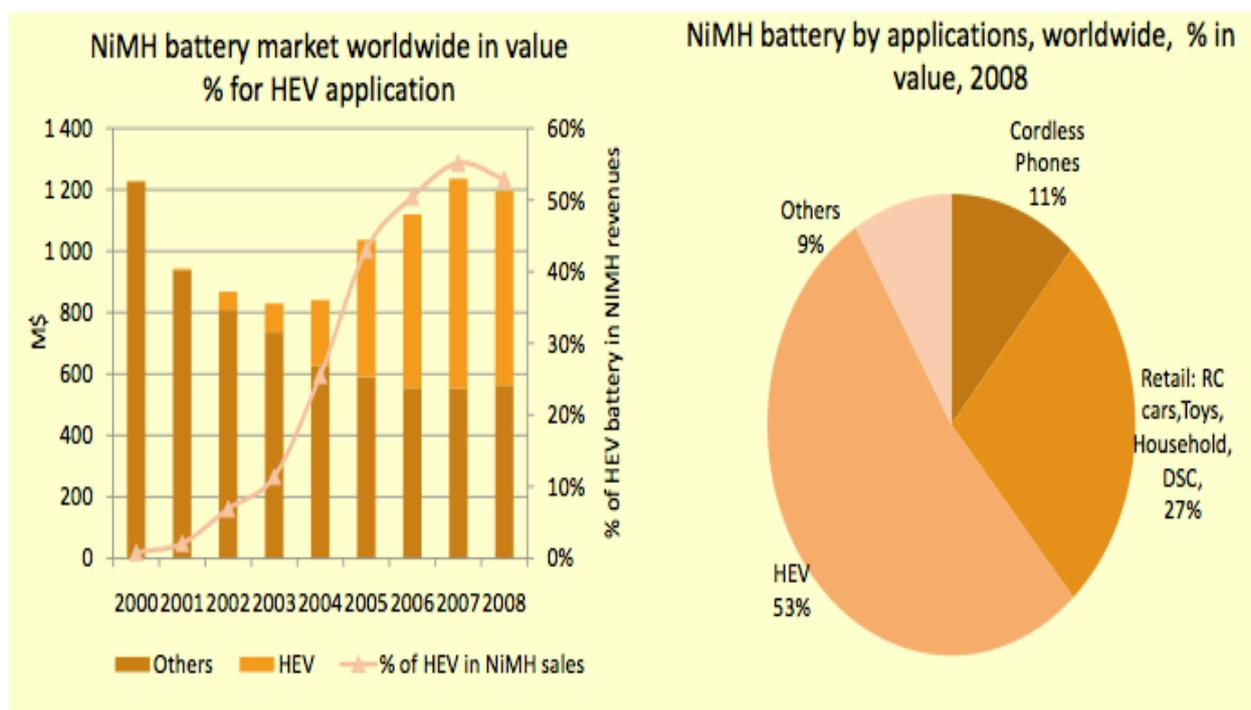


Abb. 4: Marktvolumen NiMH Batterien weltweit

Element	Mass percentage		
	Button Cell	Cyl. Cell	Prismatic Cell
Nickel	29-39	36-42	38-40
Iron	31-47	22-25	6-9
Cobalt	2-3	3-4	2-3
La, Ce, Nd, Pr	6-8	8-10	7-8
Graphite	2-3	< 1	< 1
Plastics (F)	1-2	3-4	16-19
Potassium	1-2	1-2	3-4
Hydrogen, oxygen	8-10	15-17	16-18
Other	2-3	2-3	3-4

Abb.5: Typische Zusammensetzung von NiMH - Batterie Bauformen

Trotz der fehlenden Präsenz des Schwermetalls Cadmium kommt es auch hier auf die emissions- und sicherheitsorientierte Gestaltung des Verfahrens an. Zum einen geben teilgeladene NiMH-Zellen bei mechanischer oder thermischer Behandlung große Mengen Wasserstoff ab, der insbesondere in geschlossenen, atmosphärischen Behandlungsräumen zu Knallgasdetonationen führen kann. Zum anderen enthalten NiMH-Batterien Fluor-basierte Kunststoffe, deren Zersetzung/Verbrennung in Sauerstoffatmosphären eine hocheffiziente Abgasreinigung notwendig machen, da es zur Dioxin-/Furan-Bildung kommt.

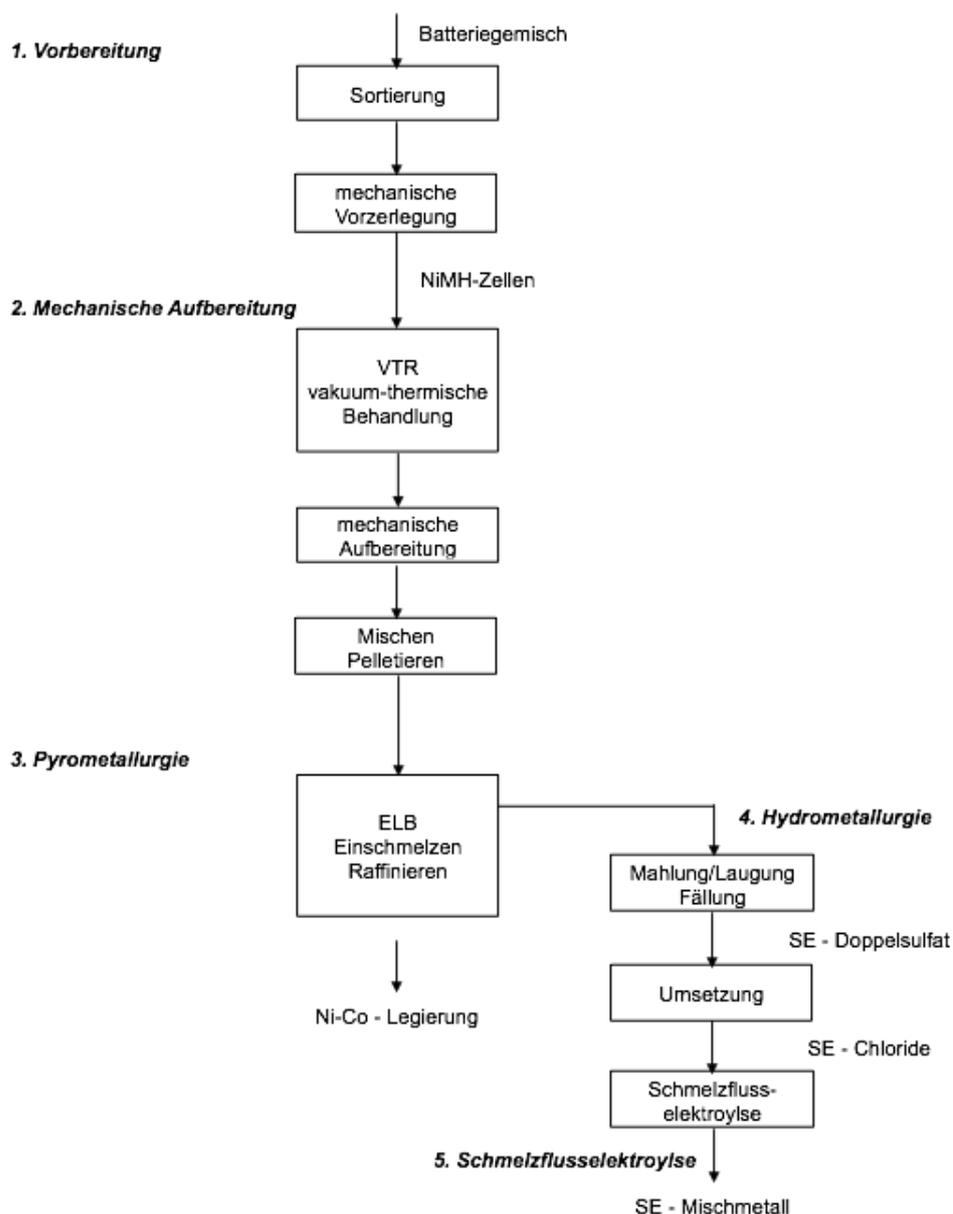


Abb. 6: Verfahrensfließschema: Recycling von NiMH - Batterien

Schematisch gibt das Fließbild in Grafik 6 den Aufarbeitungsweg wieder. Nach einer Qualitäts sichernden, manuellen Sortierung werden die Kunststoffgehäuse von Akkupacks zerstörungsfrei entfernt. Die verbleibenden Zellen werden der VTR-Behandlung unterzogen. Sie ermöglicht den Wasserstoff kontrolliert zu desorbieren und mit den Kunststoffen einschließlich der Fluor-organischen Verbindungen als Reduktionsmittel zu dienen. Überschüssige Kohlenwasserstoffe werden innerhalb des Vakuumsystems kondensiert. Anschließend können die groben, meist Stahl-basierten Komponenten mechanisch getrennt

und das verbleibende NiCoSE-Konzentrat mit notwendigen Schlackezuschlagstoffen agglomeriert werden. Mittels Lichtbogenofen LBO werden somit nachfolgend die dominierenden Wertkomponenten Nickel und Cobalt verlustarm in den Stoffkreislauf wieder eingebracht. Mangels marktverfügbarer Mengen gesammelter NiMH-Schrotte konnten die Verfahrensschritte 4 und 5 (Hydrometallurgie und Schmelzflusselektrolyse) zur Rückgewinnung der Seltenen Erden noch nicht in den Produktionsmaßstab umgesetzt werden. Während in ganz Europa im Jahr 2008 lediglich 880t NiMH-Altzellen gesammelt und recycelt wurden, ist eine Wirtschaftlichkeitschwelle für die Rückgewinnung von Seltene Erden bei mindestens 5.000 t/a Altzellen anzusetzen.

### 4.3 Li-Ion-Batterien

Illustriert durch die Angabe in D gefertigter und verkaufter Li-Ion Batterien in Grafik 7 wird die sprunghafte Marktverbreitung des Systems augenfällig. Diese erfolgreiche Verbreitung schlägt sich in den statistischen Angaben Konsum starker Länder vergleichbar signifikant nieder. Der jährliche Verbrauch ist damit innerhalb von 7 Jahren um mehr als 800% gestiegen.

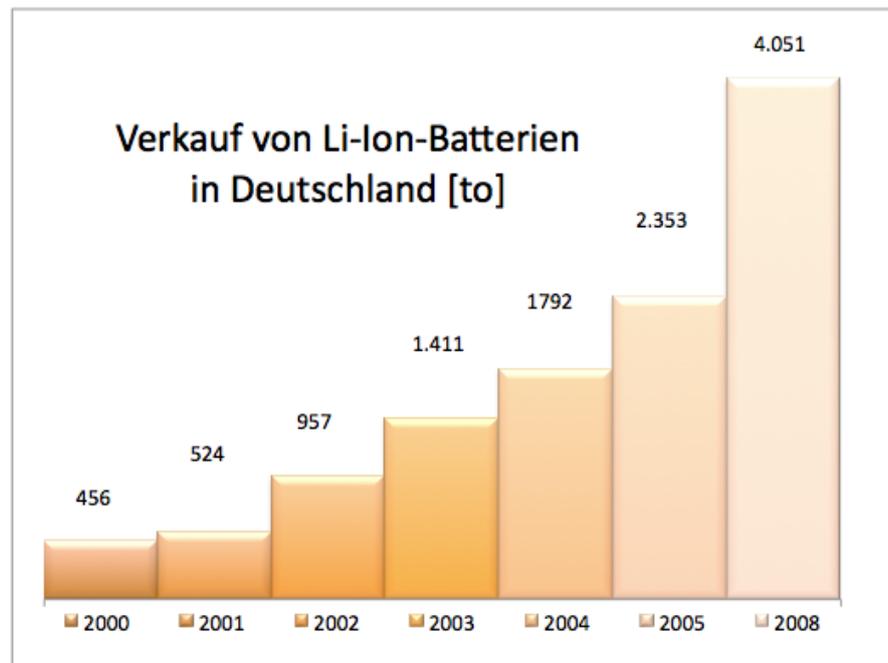


Abb. 7: Verkaufte Menge (t) Li-Ion Batterien in Deutschland 2000 - 2008

Bedingt durch die Anwendungsart und ihre technische Langlebigkeit betrug die Menge gesammelter und dem Recycling zugeführter Li-Ion Batterien demgegenüber im Jahr 2008 lediglich nur 90 t. Die Zuführung der Batterien zum Recycling wird auch dadurch erschwert, dass sie mit ihren verbundenen elektronischen Gerät (z.B. LapTop, Handy, etc.) gemeinsam über die Sammlung des Elektroschrottes rückgeführt, jedoch nicht zuverlässig aus dem Stoffstrom aussortiert werden. Die prozentual ähnlich niedrige Sammelquote auf europäischer Ebene führt dazu, dass trotz vielzähligen Ankündigungen bisher noch keine Recyclinganlage für Li-Ion Akkumulatoren in Europa den Technikumsmaßstab verlassen hat. Tabelle 8 verdeutlicht mit der Auflistung der weltweiten Aktivitäten, dass:

nennenswerte Kapazitäten nur für unspezifische Aufbereitungsanlagen existieren

in Europa noch keine industriellen Kapazitäten zur Verfügung stehen

keine der Verwertungs- und Testanlagen das Wirkungsmetall Lithium rezyklieren kann.

<b>Company</b>	<b>Location</b>	<b>Process</b>	<b>Capacity dedicated</b>		<b>Comments</b>
<b>XSTRATA Nickel Corp.</b>	Canada (Ontario)	Pyrolisation and Smelting with subsequent Hydrometallurgy	> 2000 t/a	No	no dedicated treatment, recovery together with Co/Ni ores and residues
<b>UMICORE S.A.</b>	Sweden (Hofers)	Smelting with subsequent Hydrometallurgy	< 500 t/a > 5000 t/a	No	direct melting in shaft furnace, Ni and Co recovery together with Co/Ni residues
<b>BATREC Ind. AG</b>	Schweiz (Wimmis)	Mechanical Pretreatment: Granulation / Sieving	< 300 t/a	Yes	pilot plant for pretreatment
<b>RECUPLY S.A.</b>	Frankreich (Grenoble)	Mechanical Pretreatment: Granulation / Sieving	< 300 t/a	Yes	pilot plant for pretreatment
<b>TOXCO Inc.</b>	Canada (B.C.)	Granulation/Sieving, Neutralisation	unkmown	Yes	no information available
<b>ACCUREC Recycling GmbH</b>	Germany (Mülheim/R)	Mechanical Pretreatment	< 300 t/a	Yes	full process in development

Abb. 8: Li-Ion Batterie Recycling: Verfügbare Technologien / industrielle Aktivitäten, ww

Neben ausbleibenden Sammelmengen für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Aufarbeitungs-anlage kommt in Zukunft noch erschwerend die steigende Anzahl von Li-Ion Subsystemen hinzu.

Cathode	Status Quo	Vor-/Nachteil
<i>LiCoO</i>	<i>zZ. marktführendes System</i>	<i>ausgereift, technischer Kompromiss, teuer</i>
<i>Li[NixCozMn]O</i>	<i>Markteinführungsphase</i>	
<i>LiMnO</i>	<i>Markteinführungsphase</i>	
<i>LiFePO</i>	<i>Markteinführungsphase</i>	<i>vermeintl. sicherer, Kosteneinsparung unklar</i>
<i>Li[NixMn]O</i>	<i>Markteinführungsphase</i>	
<i>LiTiO</i>	<i>Entwicklungsphase</i>	
<i>LiVO</i>	<i>Entwicklungsphase</i>	

*Abb. 9: Bekannte Li-Ion Kathoden Technologien [8]*

Das bisher gängigste Li-Ion System basierte auf einer Kobaltoxid-Elektrode, die einen weithin akzeptierten Kompromiss zwischen Sicherheitsaspekten, Zuverlässigkeit und Leistungsperformance darstellte. Der durch OEM's induzierte, zunehmende Kostendruck veranlasste eine beschleunigte Entwicklung alternativer Systeme, da der Kostenanteil des hoch-volatilen Kobaltoxids zwischen 10 und 20% der Batterie-Fertigungskosten einnimmt [9]. Diese, z.T. Kobalt - freien Systeme, durchdringen mittlerweile den Markt in einer schnell wachsenden Anzahl von Anwendungen, und bilden sich ebenso bereits ansatzweise im Gemisch verbrauchter Li-Ion Zellen ab. Für die Recyclingtechnik ist dabei bedeutend, dass sich die Li-Ion Batteriesysteme nicht nach äußeren Kennzeichen oder messtechnischen Größen unterscheiden lassen. Es ist damit anzunehmen, das heute tätige Recyclingunternehmen, die die verbrauchten Zellen wegen ihres wertbestimmenden Cobalt-Gehaltes recyceln, in mittelbarer Zukunft an wertarmen Altbatterien, die ggfs. sogar Stahlschädlinge wie Phosphor enthalten, kein Interesse mehr zeigen, und ihre Aufarbeitungskapazitäten dem Markt entziehen. Berücksichtigt man zudem, dass der

Masseneinsatz von Li-Ion Akkus in automobilen Hybridfahrzeugen bevorsteht, so wird erkennbar, dass zukunftsfähige Recyclingkonzepte mit unterschiedlichsten Stoffkomponenten, Bauformen und durch ihre Energiedichte/Kapazität bedingten Sicherheitsaspekten umgehen können müssen.

Über seine bestehenden Verwertungsaktivitäten hinaus, entwickelt Accurec z.Z. in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen (IME) ein multifunktionelles Verwertungsverfahren. Es ist im folgendem Fließschema 10 wiedergegeben, und soll an dieser Stelle nur kurz umrissen werden.

Im Anschluss an eine Eingangskontrolle werden Zelltypen aus Modulen über eine Expertdatenbank identifiziert und inhaltsbezogen batchweise behandelt. Konsumerzellen werden zunächst entladen, vom Kunststoffmantel befreit und einer vakuum-thermischen Vorbehandlung zugeführt. Es folgt ein mechanischer Aufschluss mit Klassierung und Abtrennung von NE- bzw. FE-basierten Metallrückständen. Das Konzentrat aus aktiver Elektrodenmasse durchläuft zunächst eine naßchemische Laugung, die einerseits den Mangangehalt senkt und andererseits die Lithiumverbindungen in Lösung bringt. Der Ni-Co-Fraktion wird abschließend im Pyrometallurgischen Prozess in hochwertige Produkte integriert.

Die erweiterte Behandlungstiefe erhöht die Anzahl und Qualität der marktgängigen Produkte, und könnte damit die für Li-Ion Akkus die bisher verfehlte, aber gesetzlich erforderliche Rückgewinnungsquote von > 50% nunmehr erfüllen.

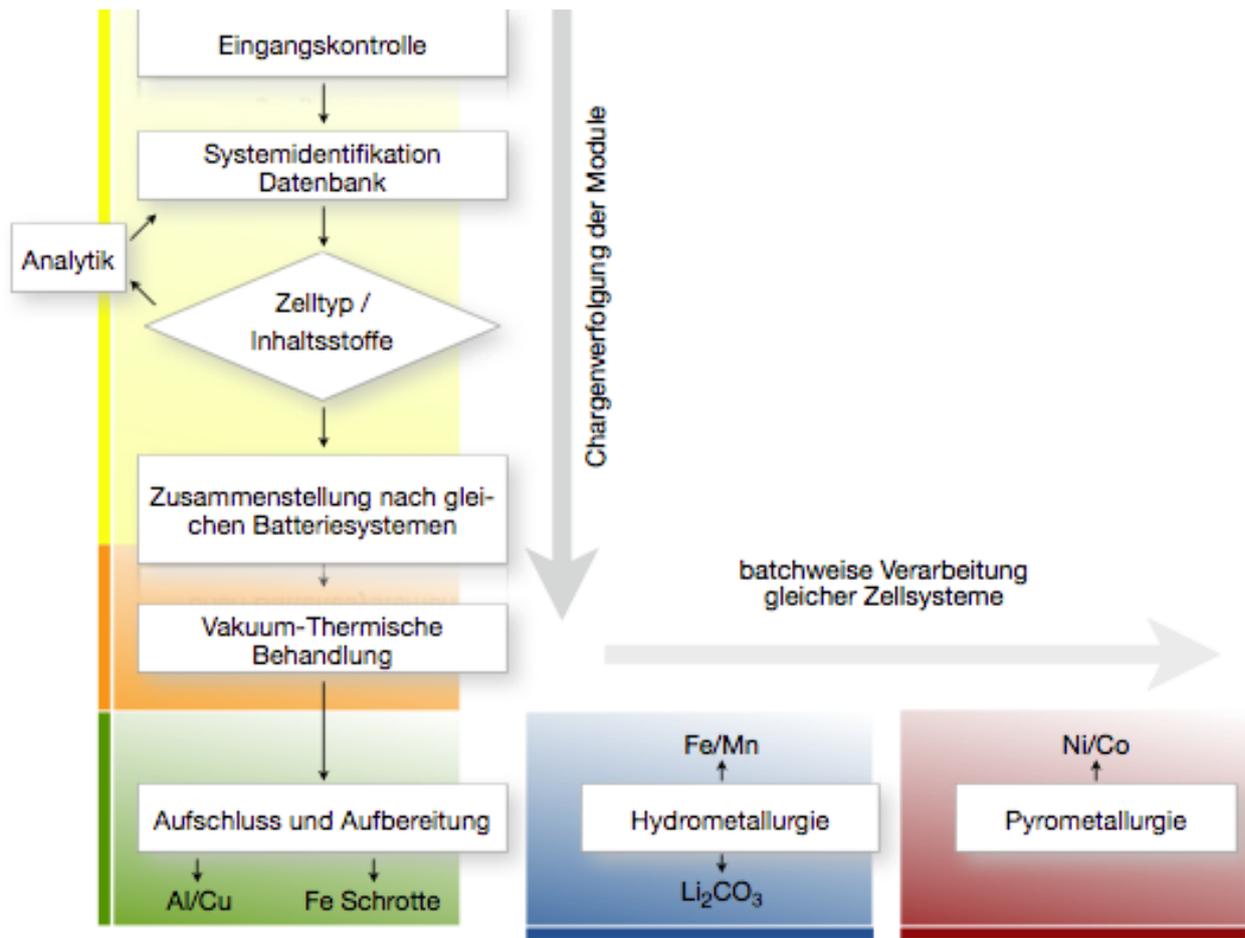


Abb. 10: Verfahrensflißschema: ACCUREC - Recyclingkonzept für Li-Ion - Batterien

## 5 Diskussion

Mit Einführung der EU-weiten Sammlungs- und Verwertungspflicht von Altbatterien werden zusätzliche kapazitive und qualitätsbezogene Anforderungen an bestehende und zukünftige Recyclingprozesse gestellt. Für moderne Batteriesysteme wie Nickel-Cadmium und Nickel-Metallhydrid Batterien stehen emissionsminimierte und nachhaltig wirtschaftende Verwertungsverfahren zur Verfügung. Demgegenüber müssen für den zukünftig marktbeherrschenden Li-Ion Akkumulator und seiner Subsysteme intelligente, Stoff-differenzierende und kostenoptimierte Verfahrenstechniken entwickelt werden. Die in Menge und zeitlicher Erwartung kaum zu prognostizierenden Sammelerfolge, sowie der stetig sinkende Metallwert dieser Li-Ion Altbatterien stellt für die Recyclingwirtschaft ein schwer zu kalkulierendes ökonomisches Investitionsrisiko dar.

## 6 Literatur

- [1] *Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren* (Batterieverordnung - BattV), in der Fassung von der Bekanntmachung vom 2. Juli 2001
- [2] R.Weyhe, *Recycling von Nickel-Cadmium Batterien durch Vakuumdestillation*, Dissertationsschrift von 2002 an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen
- [3] GRS: Internetauftritt der Stiftung unter [www.grs-batterien.de](http://www.grs-batterien.de), Stand 25.11.2009
- [4] *Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council*, 6 September 2006
- [5] *Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren* (Batteriegesetz - BattG), vom 25. Juni 2009
- [6] ACCUREC Recycling GmbH, Informationsbroschüre; Verfahrensbeschreibung, Stand 05.12.2009
- [7] C. Pillot, Avicenne Development Paris, 14th International Congress of Battery Recycling, Geneva, CH, 17.9.2009
- [8] S. Martinet, CEA Grenoble, French Technology Research Foundation, Improvements on Li-Ion Batteries, 7th Batteries Conference Paris, 2005
- [9] H.Takeshita, Institute of Information Technology Ltd, 21th International Seminar & Exhibit on Primary & Secondary Batteries, March 8, 2004



## **VORTRAG VI**

---

# **IN SITU METHODEN ZUR UNTERSUCHUNG VON ALTERUNGSVORGÄNGEN IN LITHIUM-IONEN BATTERIEN**

Pascal Marie

Electrochemistry Laboratory - Batteries

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

## *In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithiumionen-Batterien*

*Pascal Maire*

Electrochemistry Laboratory – Batteries

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

### Grosse Hoffnungen – Grosse Hürden

**Elektroautos unter Strom**  
23. August 2009, NZZ am Sonntag

... noch können die Batterien die technischen und wirtschaftlichen Vorgaben nicht erfüllen.

... kleine Reichweite und der Leistungsabbau der Batterien über die Zeit machen den Herstellern zu schaffen.

Spielverderber sind die teuren Batterien.

**Die Autos, auf die die Branche setzt**  
21. August 2009, Tages-Anzeiger



Für den voluminösen Akku mussten die Rücksitze geopfert werden.

**Der Speicher ist die Knacknuss**  
25. August 2009, Basler Zeitung

**An der Schwelle zu einer neuen Epoche im Automobilbau**  
7. August 2009, Neue Zürcher Zeitung

**Strom verleiht Flügel**  
12. Juli 2009, Blick Online

Für eine komplette Ladung werden rund acht Stunden benötigt.

Als Antriebsquelle dient eine Lithium-Ionen-Batterie, ...  
Die Lebensdauer einer Batterie soll mindestens fünf Jahre betragen.

**Dem Elektroauto fehlen nur noch die Batterien**  
3. Juli 2009, Basler Zeitung

Electrochemistry Laboratory – Batteries

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

## Funktion einer Lithiumionen Batterie

**Kathode**:  $2 \text{LiCoO}_2$  /  $2 \text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2 + e^- + \text{Li}^+$

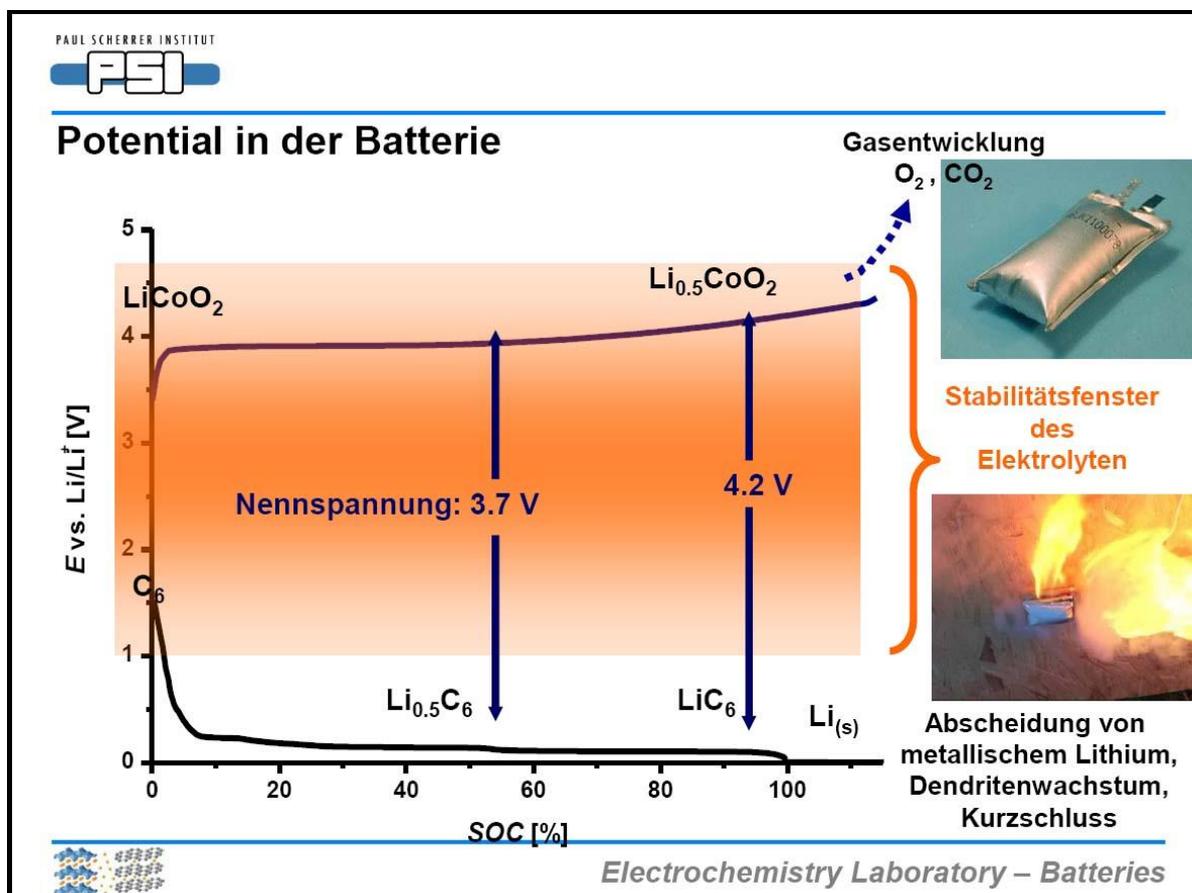
**Elektrolyt**:  $\text{Li}^+ \text{PF}_6^-$  / ROCOOR

**SEI**: LO/COLOR

**Anode**:  $\text{C}_6 + e^- + \text{Li}^+$  /  $\text{LiC}_6$

**Kupfer**

*Electrochemistry Laboratory – Batteries*



## Charakterisierung von Materialien in Modellbatterien

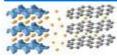
Herstellung von Elektroden  
 Formulieren  
 Beschichten  
 Walzen



Bau von Testzellen

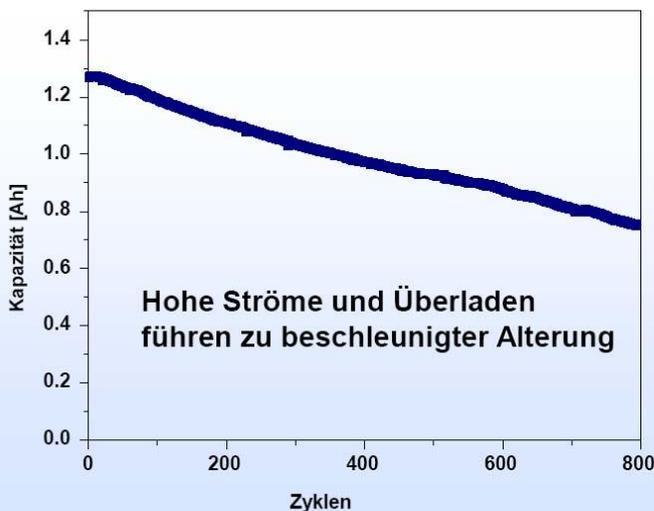
### Elektrochemische Tests

Galvanostatische Zyklen (5 nA – 500 A)  
 Zyklische Voltammetrie  
 Elektrochemische Impedanzspektroskopie



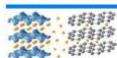
*Electrochemistry Laboratory – Batteries*

## Kapazitätsverlust mit Zyklenzahl und Alter



### Mögliche Ursachen

- Bildung von Passivierungsschichten
  - Verlust von Lithium in Reaktionen mit dem Elektrolyten
  - Erhöhter Innenwiderstand
  - Aktivmaterial verliert Kontakt zum Stromsammeler oder Leitfähigkeitsadditiv
  - Strukturveränderung im Aktivmaterial
- Wo ist wieviel Lithium ?



*Electrochemistry Laboratory – Batteries*

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

## Geht mobiles Lithium verloren?

**Coulometrie**  
 $1 e^- \cong 1 Li_{(aktiv)}$

**Ramanspektroskopie**

**Lithium vs. aktives Lithium**

**Chemische Oxidation**  
 $LiC_6 + H_2O \rightarrow \frac{1}{2} H_2 + LiOH + C_6$

**Röntgen- oder Neutronendiffraktion**

**Atomabsorptionsspektroskopie**

*Electrochemistry Laboratory – Batteries*

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

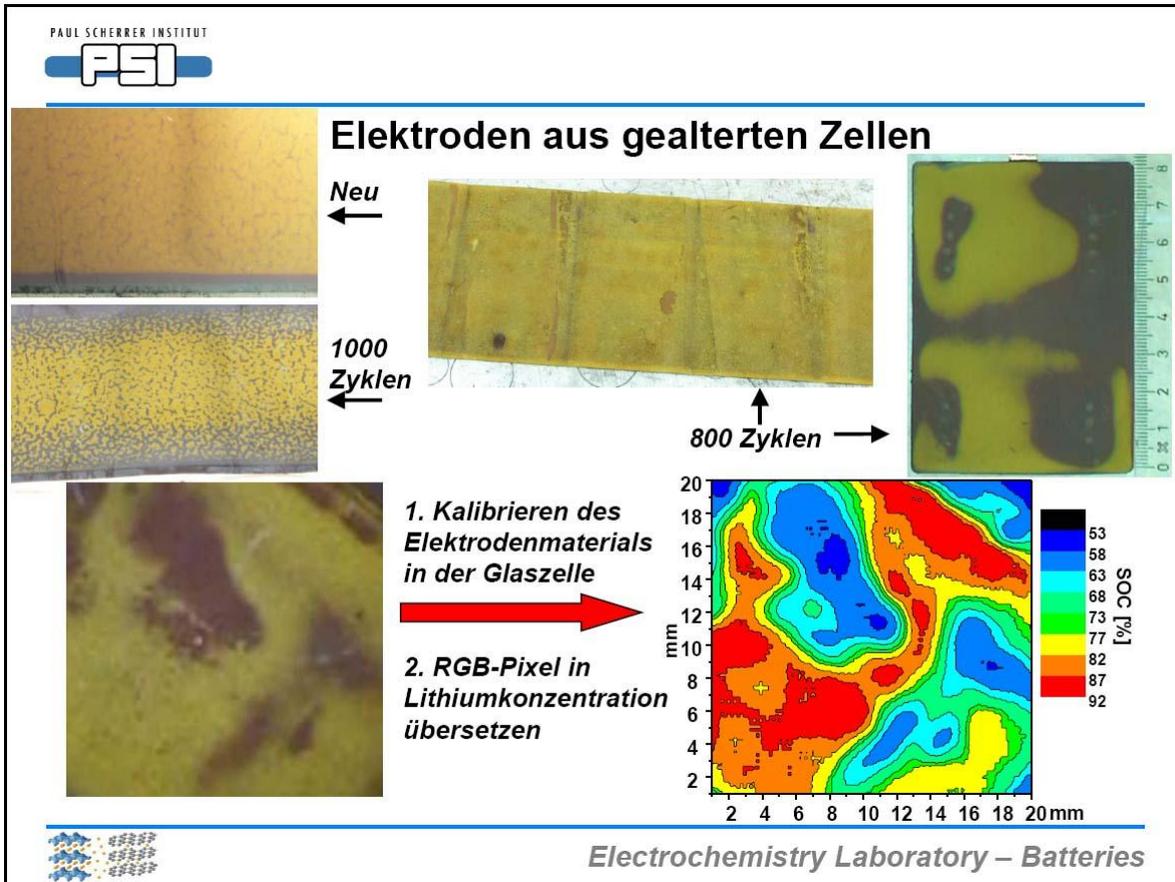
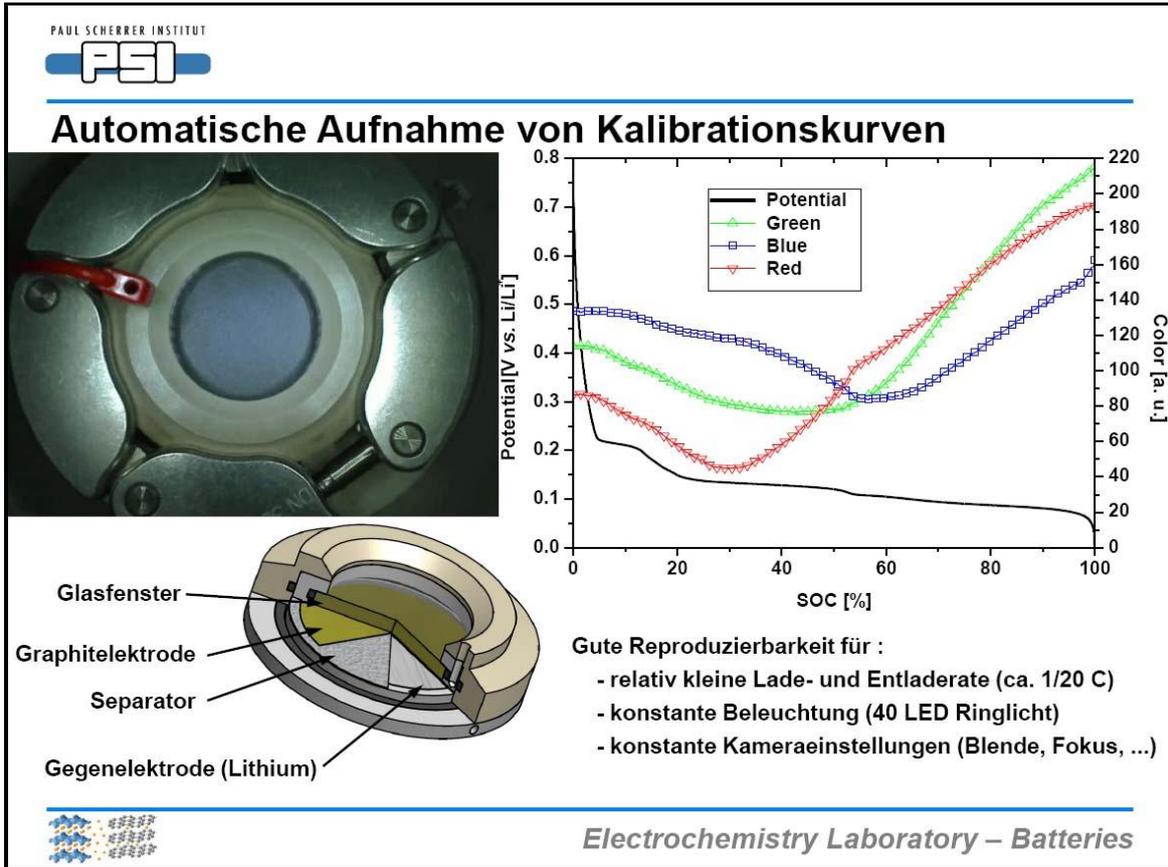
## Die Farbe einer Graphitelektrode hängt vom Ladezustand ab

**Li-Schicht**  
**Graphenschicht**

100% SOC, 32 mV    90% SOC, 93 mV    80% SOC, 94 mV  
70% SOC, 94 mV    60% SOC, 126 mV    50% SOC, 133 mV

SOC [%]	Potential [mV] (R)	Potential [mV] (G)	Potential [mV] (B)
50	133	126	94
60	126	93	94
70	94	93	94
80	94	93	94
90	93	93	94
100	32	32	32

*Electrochemistry Laboratory – Batteries*

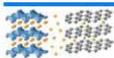
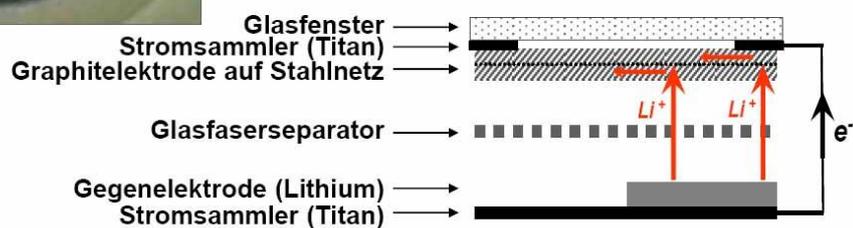


## Kinetik

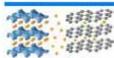
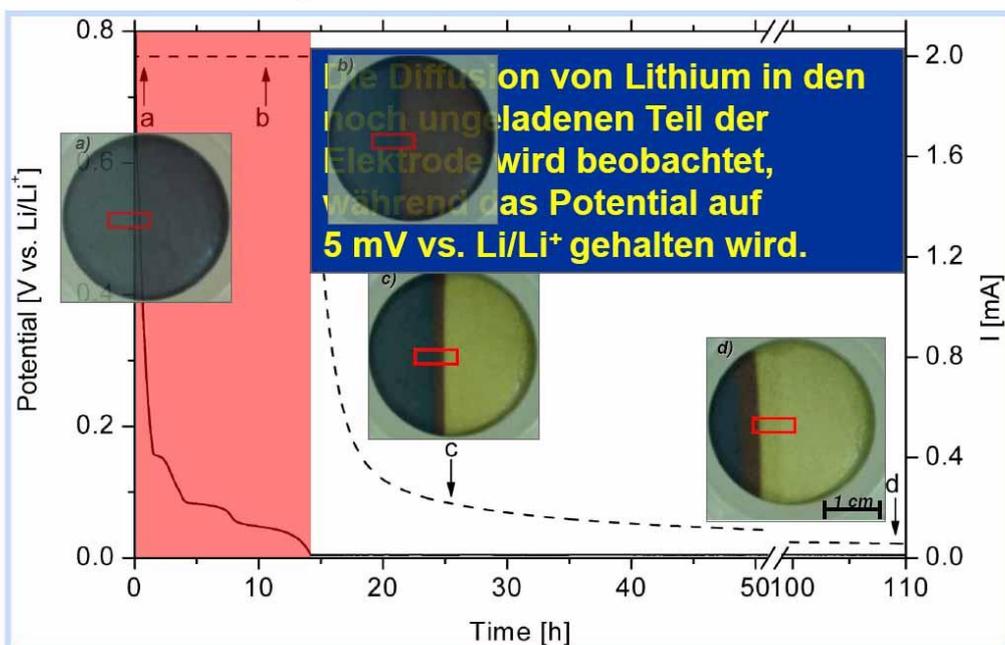


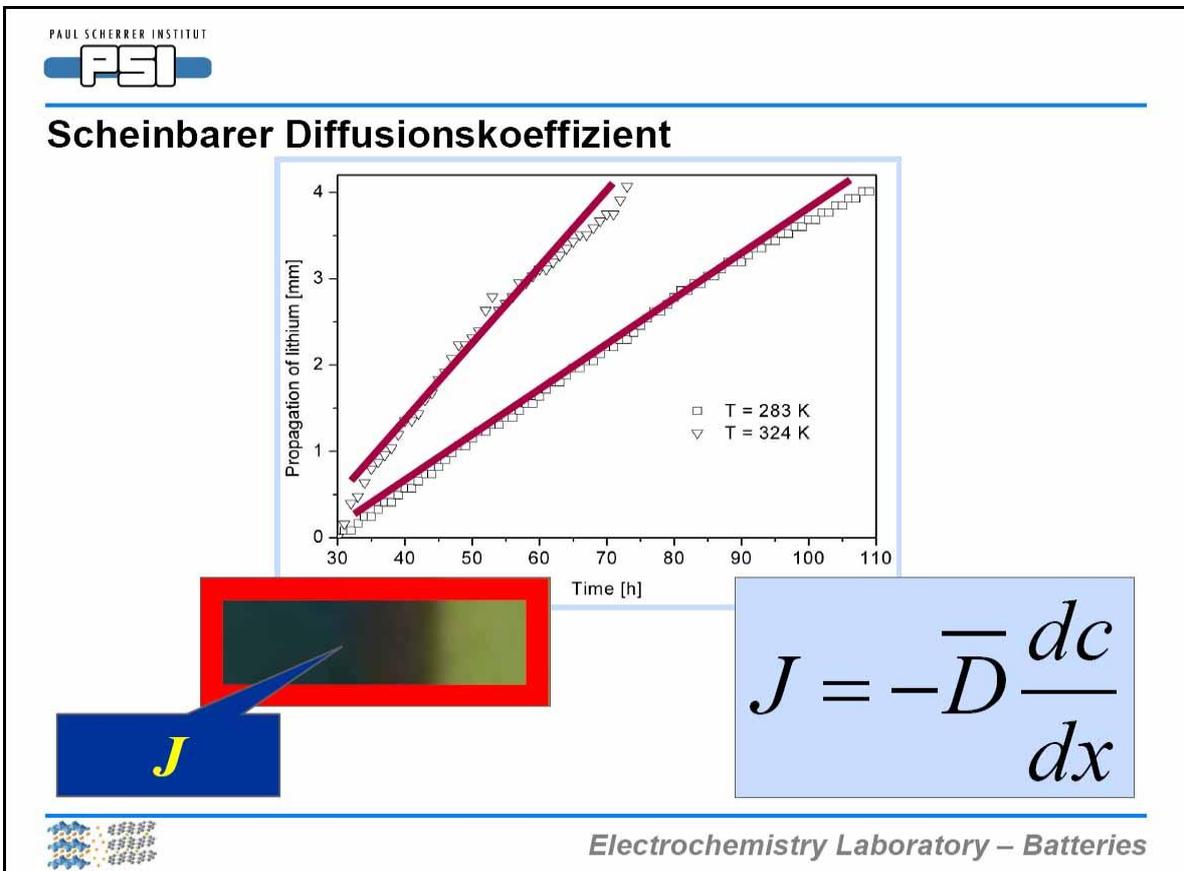
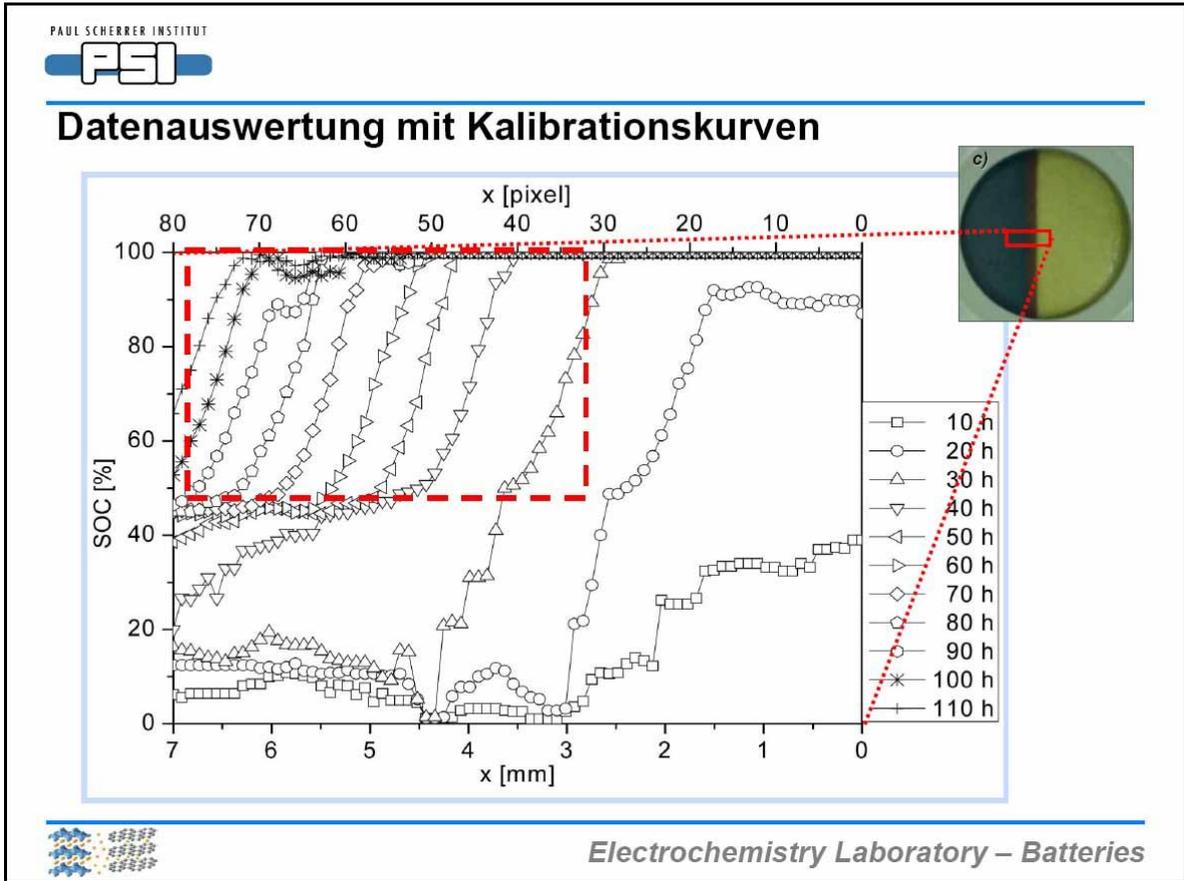
Wie schnell bewegen sich Lithiumionen in der Elektrode?

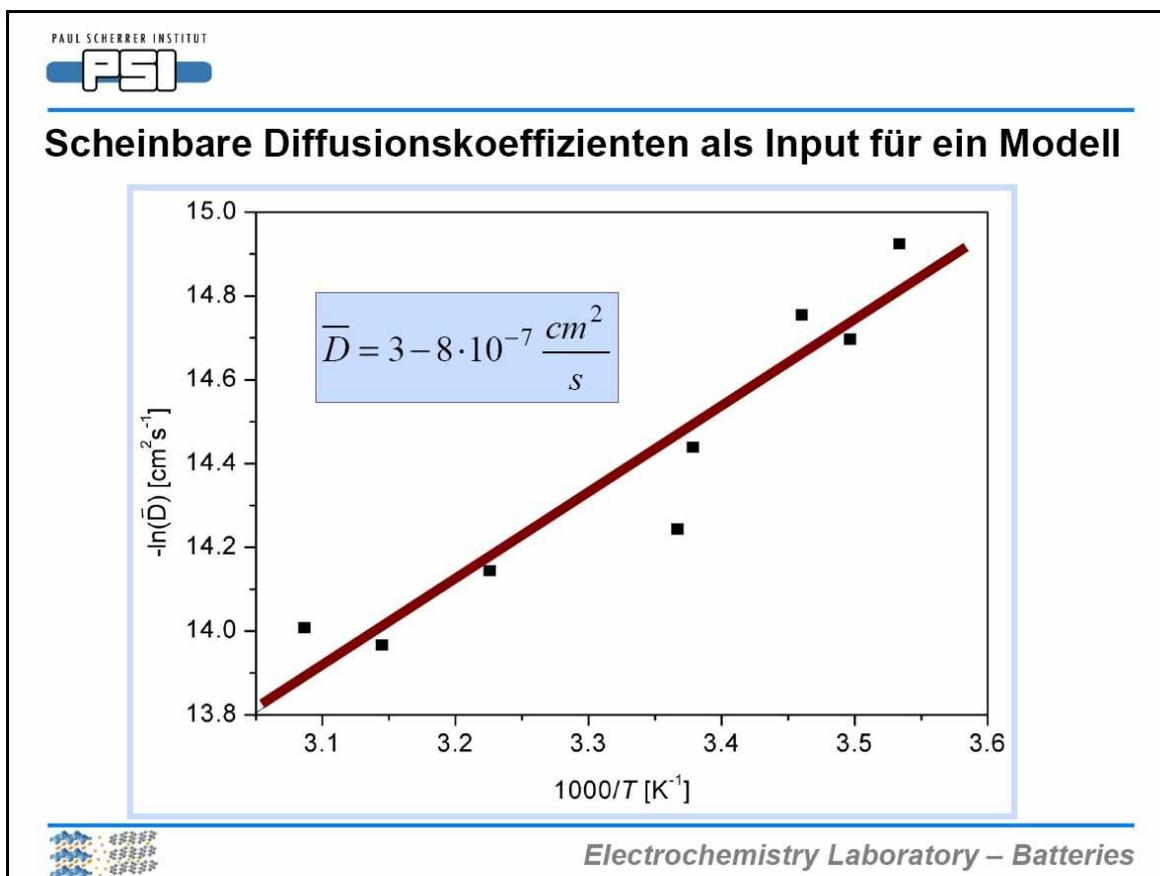
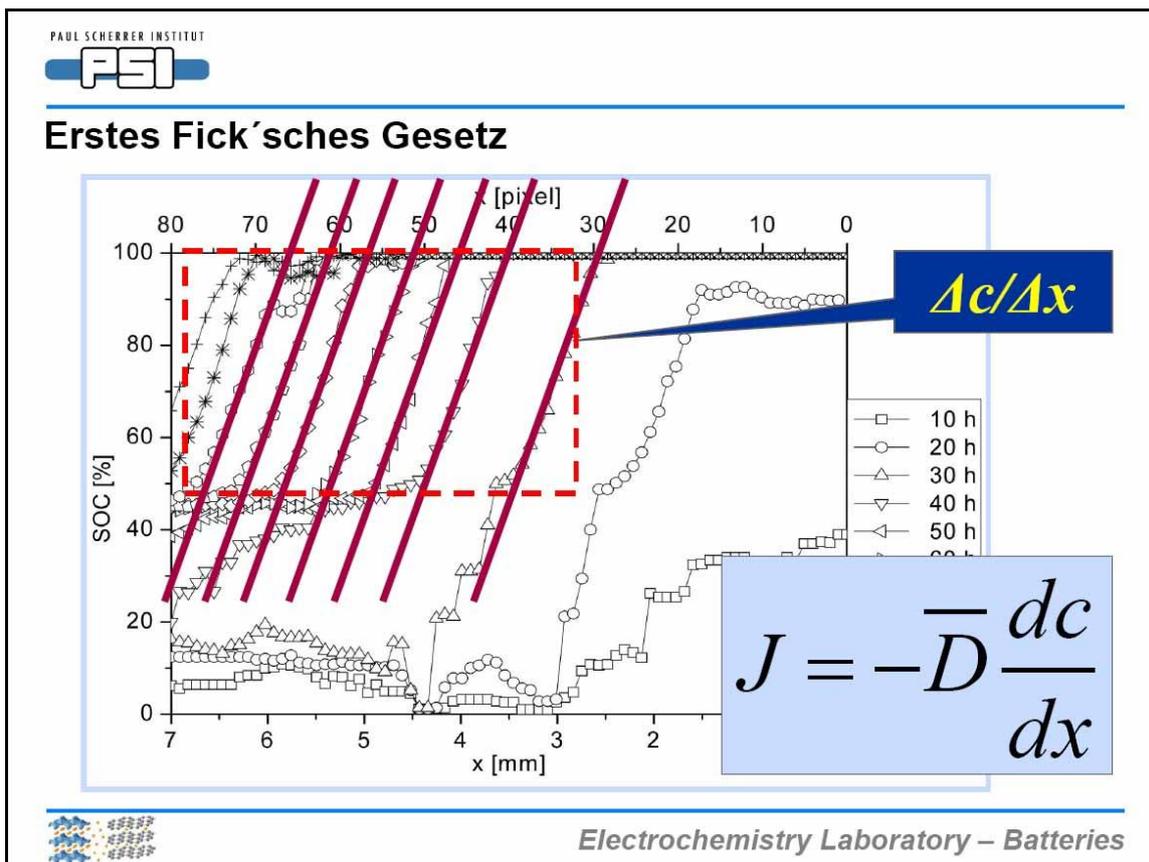
Wie gleichen sich willkürlich herbeigeführte Konzentrationsunterschiede aus?



## Wie schnell bewegen sich Lithiumionen?







PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

## Kathodenmaterialien

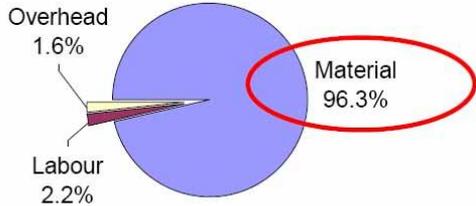
Metalloxide als Kathodenmaterial:  
LiCoO<sub>2</sub>, LiNiO<sub>2</sub>, oder Ni, Mn, Co Gemische,  
LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, LiFePO<sub>4</sub>

Spezifische Kapazität der Aktivmaterialien  
LiCoO<sub>2</sub>: **137 mAh/g**  
Graphit : 372 mAh/g

Nachteile:  
Die Kobalt und Nickel sind toxisch, teuer und nicht in beliebigen Mengen verfügbar.

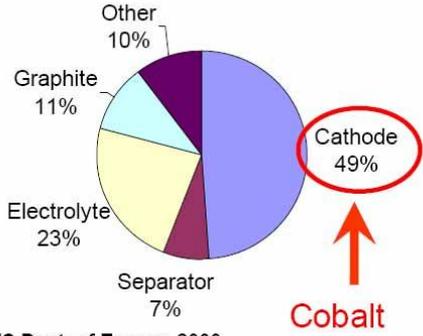
Kobaltverbrauch für Batterien:  
1995 3%      2005 23%

**Battery Production Costs\*  
[1 mil. Cells/ year]**



Overhead 1.6%  
Labour 2.2%  
Material 96.3%

**Li-ion Cell Material Costs**



Other 10%  
Graphite 11%  
Electrolyte 23%  
Separator 7%  
Cathode 49%

Cobalt

\* „Cost of Li-Ion Batteries for Vehicles“, Argonne National Laboratory, US Dept. of Energy, 2000

Electrochemistry Laboratory – Batteries

PAUL SCHERRER INSTITUT  
PSI

## Organische Polymere als Katodenmaterialien

### Eigenschaften eines vielversprechenden Kathodenmaterials

Reversibel oxidierbar bei 3.5 – 4.5 V vs. Li/Li<sup>+</sup>

- höhere Spannung → höhere Energiedichte
- ab 4.5 V zersetzen sich die herkömmlichen Elektrolyte
- herkömmliche Elektronik könnte weiterverwendet werden

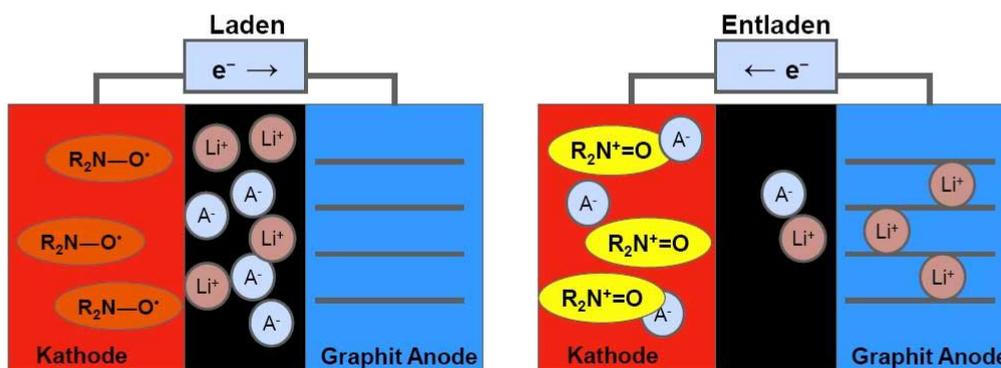
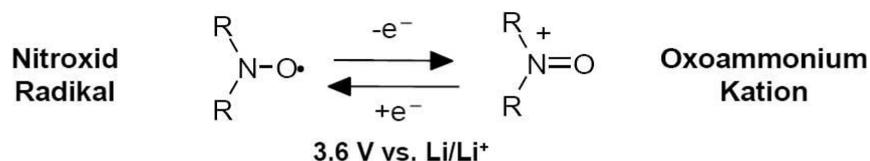
Kleine Masse pro gespeicherte Ladung → hohe Kapazität

Reduzierte und oxidierte Form müssen im Elektrolyten stabil sein

Billig, ungiftig, einfach zu verarbeiten, ...

Electrochemistry Laboratory – Batteries

## Batterien auf Basis organischer Radikale

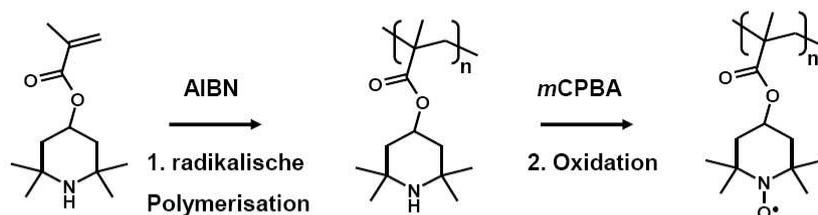


K. Nakahara et al., *Chem. Phys. Lett.* 2002



Electrochemistry Laboratory – Batteries

## Tetramethylpiperidinyloxy (TEMPO) Radikale

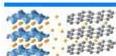


Designmerkmale:

Die reaktive Nitroxidgruppe ist durch sperrige Gruppen abgeschirmt

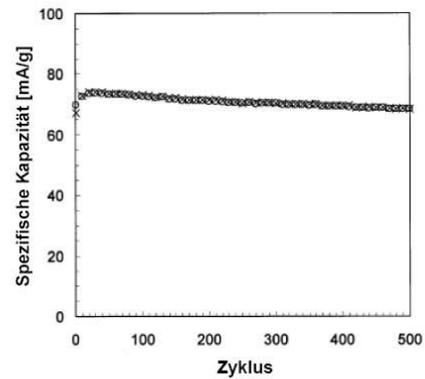
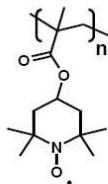
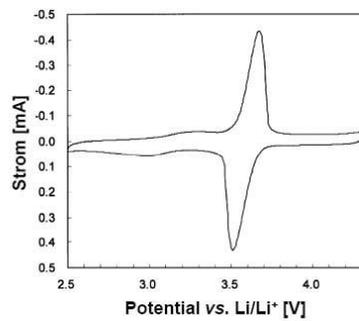
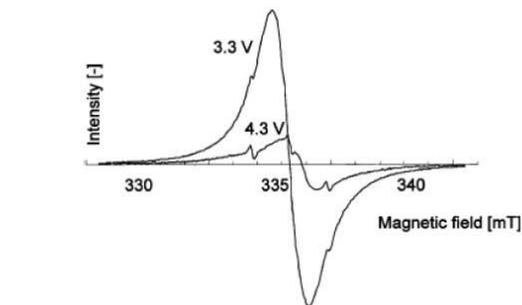
Die Nitroxidgruppe ist in einen Ring eingebunden

Ein Polymer verhindert das Wegdiffundieren des Aktivmaterials in den Elektrolyten



Electrochemistry Laboratory – Batteries

## PTMA als Kathodenmaterial

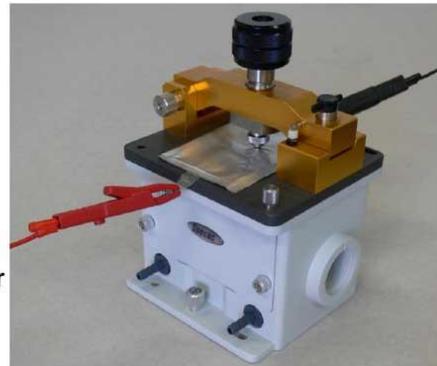
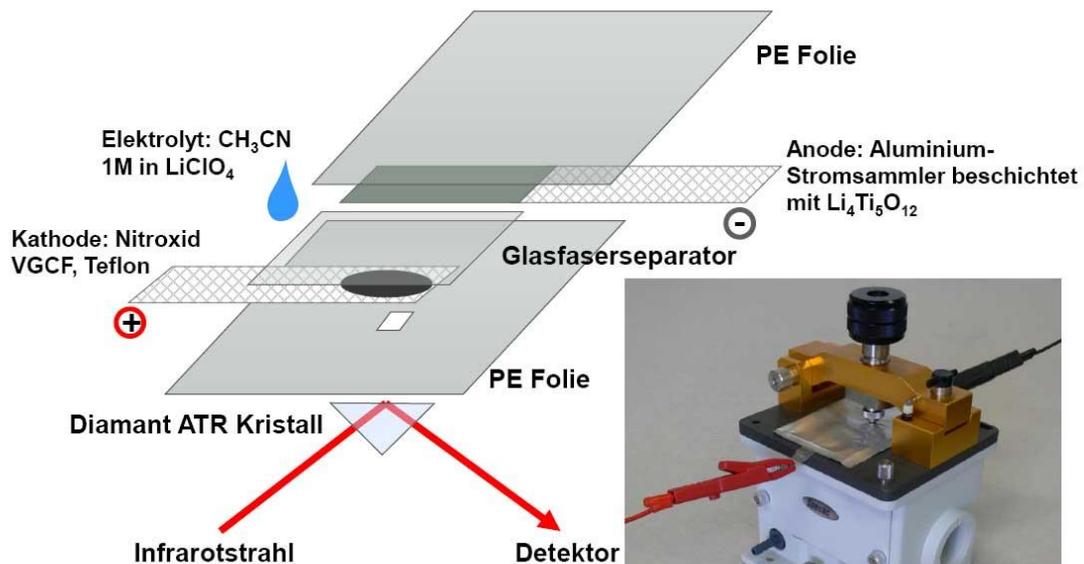


Masse des Monomers: 241 g/mol  
 Theoretische Kapazität: 111 mAh/g  
 In der Praxis werden maximal 90 mAh/g  
 erhalten, und nur 81% der Monomere sind  
 Nitroxide



Electrochemistry Laboratory – Batteries

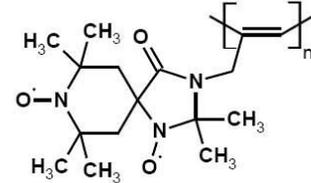
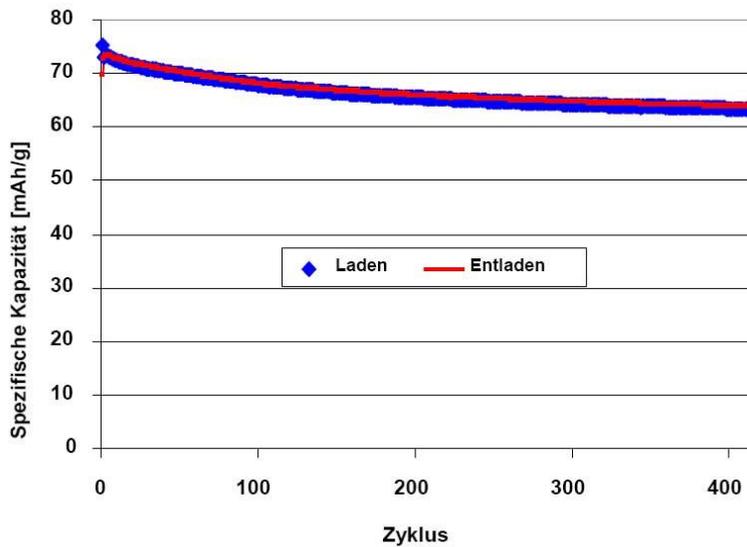
## In situ Infrarotspektroskopie von Nitroxidmaterialien



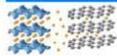
Electrochemistry Laboratory – Batteries



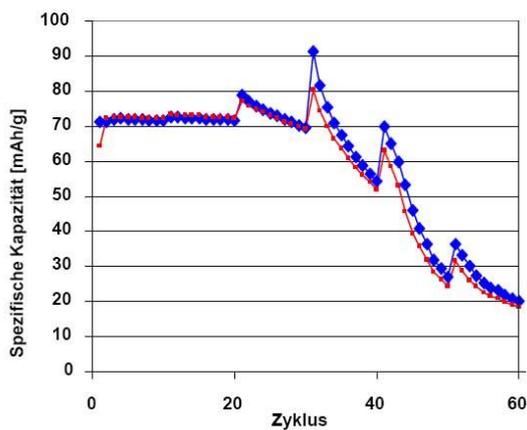
## Stabilität des Bisnitroxidpolymers



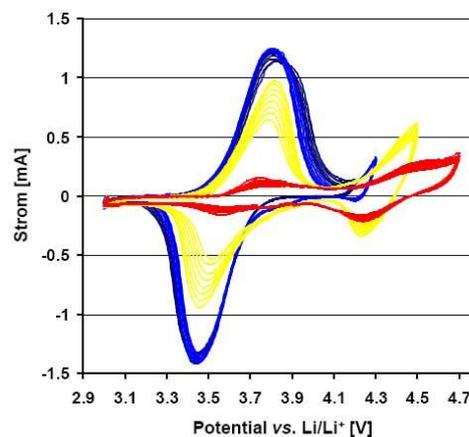
Rate: 1 C  
 Zellspannung: 3.0 – 4.2 V  
 Elektrolyt: EC/DMC 1:1,  
 1M in LiPF<sub>6</sub>  
 Kathode: Nitroxid 20%, KS4 34%,  
 ENSACO 250 7%, PVDF 39%



## Mehr Kapazität durch erweiterte Spannungsgrenzen?

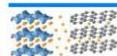


Zyklus 1 - 10: 3.0 - 4.1 V  
 Zyklus 11 - 20: 3.0 - 4.2 V  
 Zyklus 21 - 30: 3.0 - 4.3 V  
 Zyklus 31 - 40: 3.0 - 4.4 V  
 Zyklus 41 - 50: 3.0 - 4.5 V  
 Zyklus 51 - 60: 3.0 - 4.6 V



Zyklen 3 - 10: 3.0 - 4.2 V  
 Zyklen 11 - 19: 3.0 - 4.3 V  
 Zyklen 28 - 36: 3.0 - 4.5 V  
 Zyklen 46 - 54: 3.0 - 4.7 V

Vorschub 1mV/s  
 Elektrolyt: PC, 1M in LiPF<sub>6</sub>



## Mögliche Einsatzgebiete für ORB



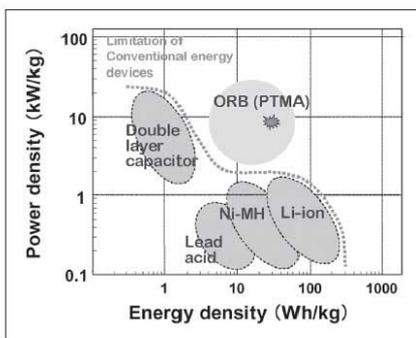
Prototyp einer 100 mAh ORB mit 35 W Leistung; 4 Stück davon genügen um einen Desktop PC bei Stromausfall sicher auszuschalten



Smart Cards

Intelligentes Papier, Sensoren, Etiketten auf Konsumgütern

Biegsame Batterien



RFID

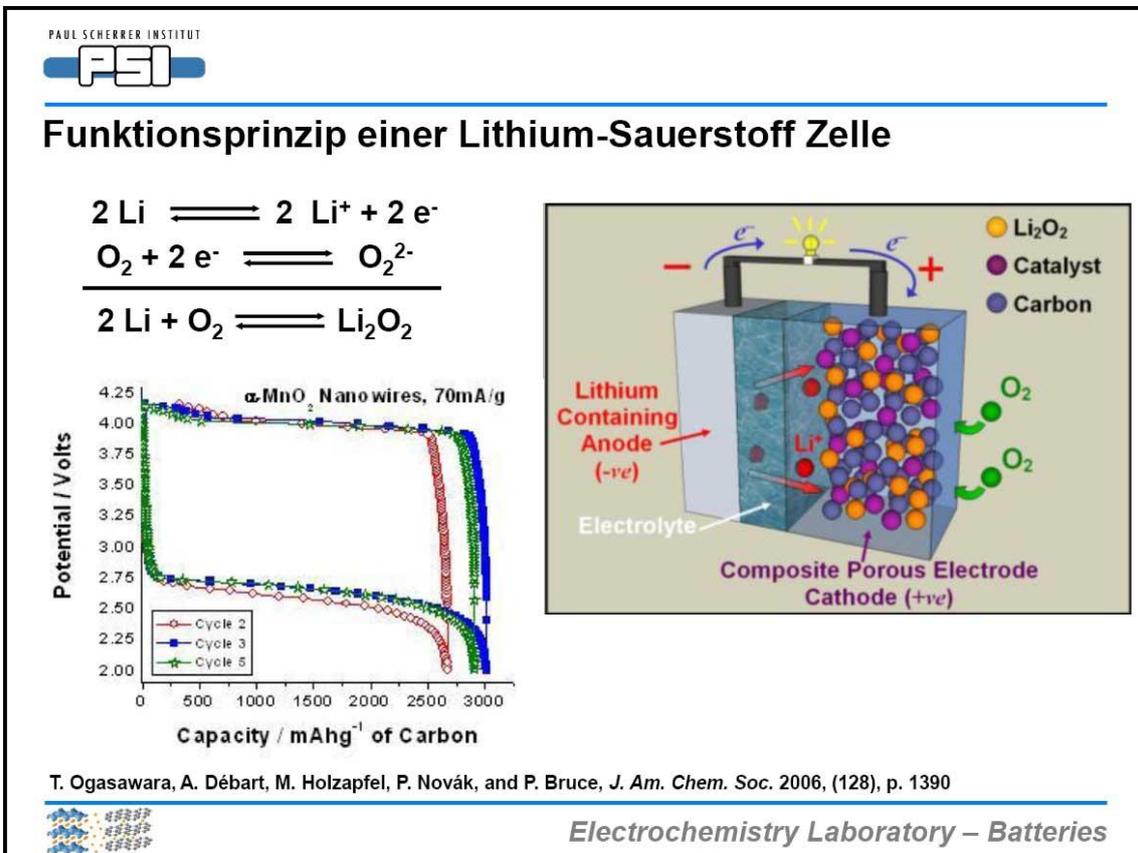
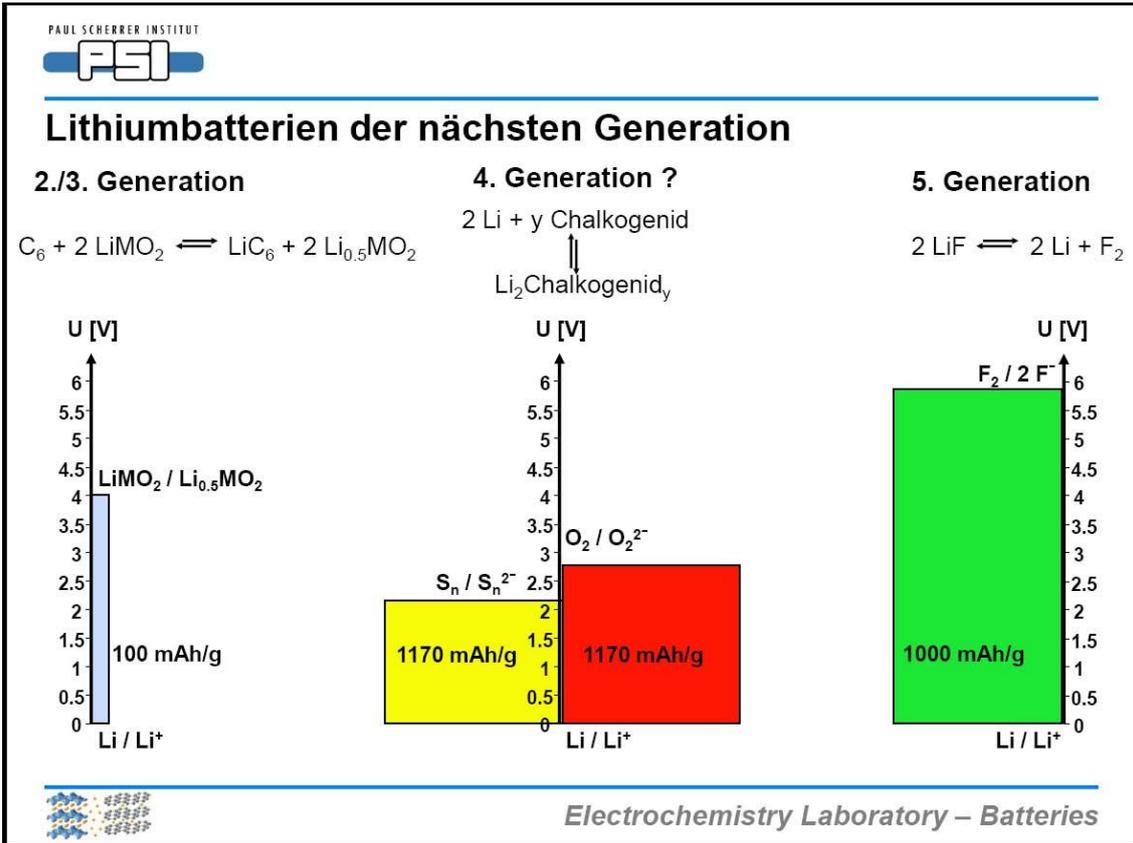
M. Satoh, NEC J. of Adv. Tech. 2005

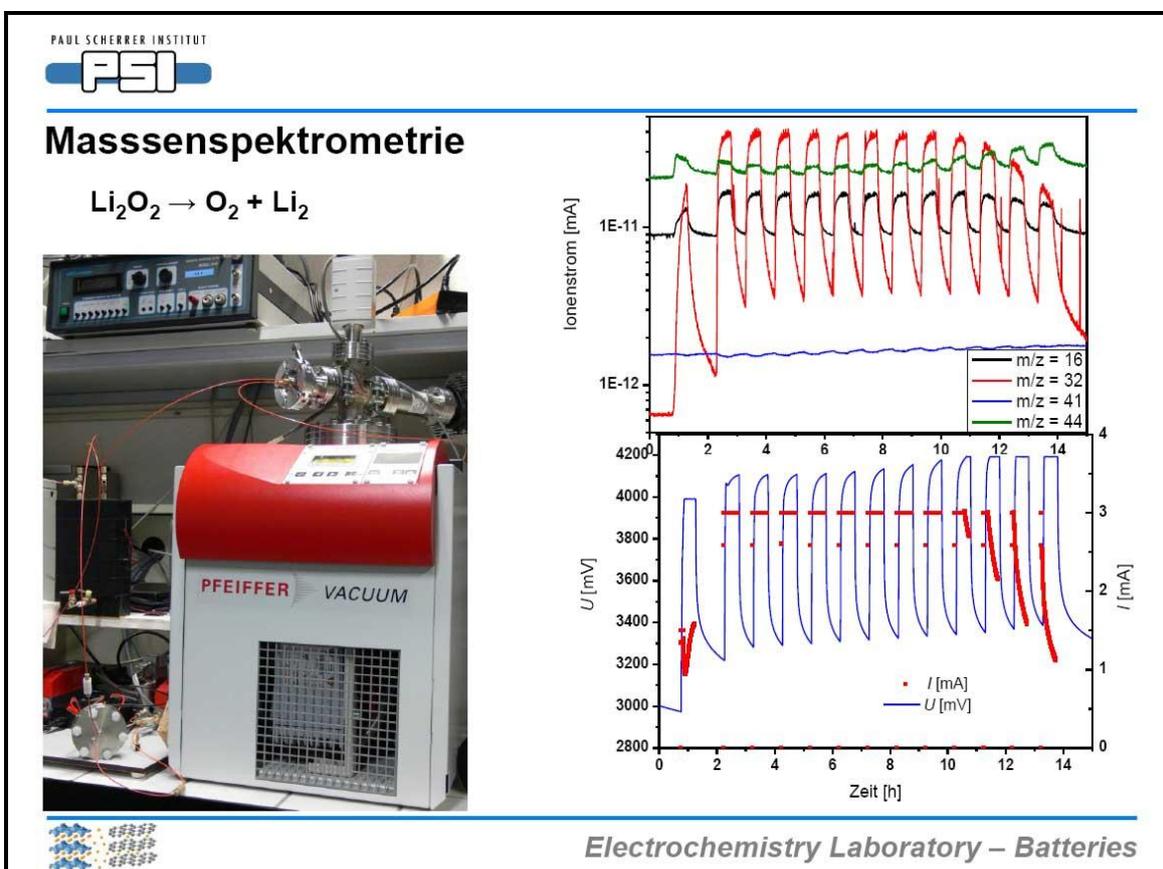
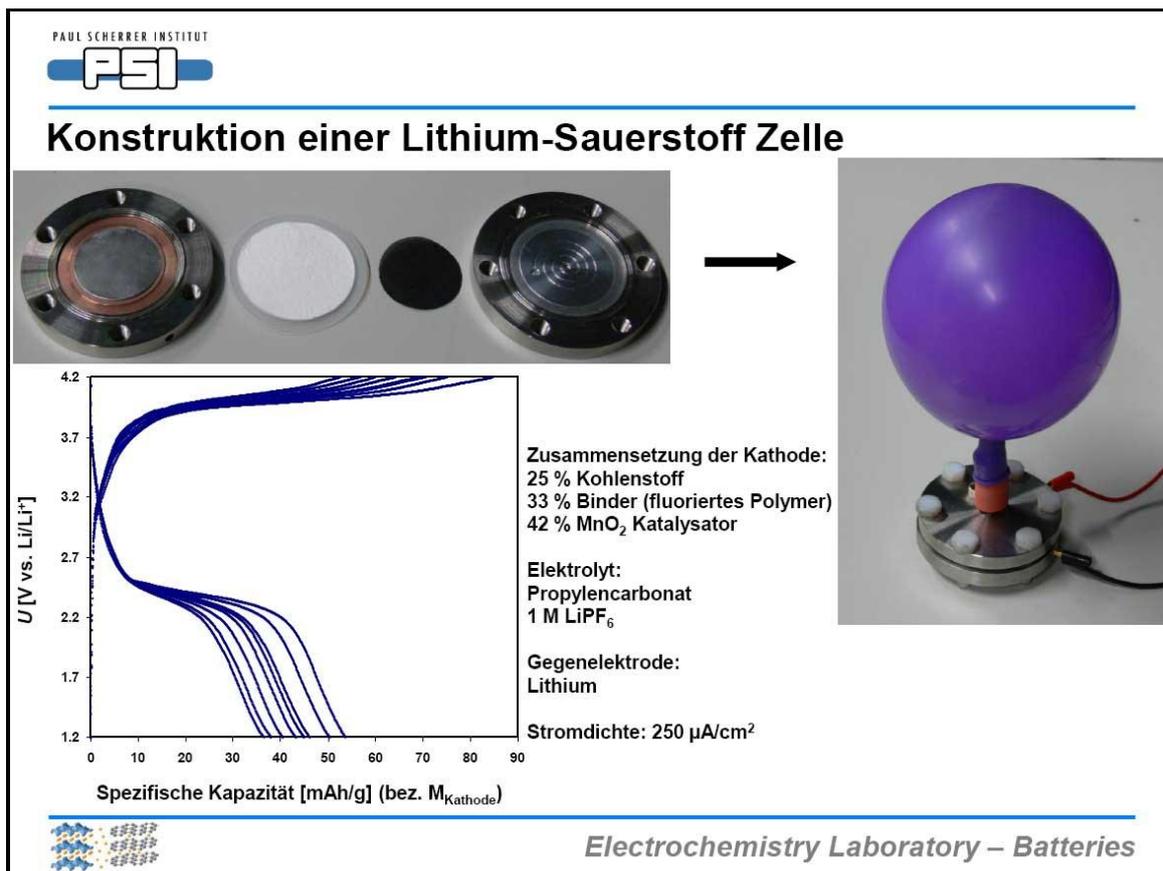


## Kapazitätsgrenzen von Lithiumionen Batterien:

### Die 18650er Zelle







## Herausforderungen bei Lithium/Luft Batterien

Energieeffizienz, Überspannung, Wahl eines geeigneten Katalysators

Schutz der Lithiumelektrode vor Sauerstoff, Stickstoff  
Wasser, Kohlendioxid, ...

Kontrolle über die Morphologie des abgeschiedenen Lithiums

Volumenänderung in der Kathode

Zuverlässige Kontaktierung der Aktivmaterialien und des Katalysators

Flüchtigkeit des Elektrolytlösungsmittels im offenen System

Aufwand für „Hilfsaggregate“ (Kompressor, ... )



***Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !***

***Labor für Elektrochemie, Batteriegruppe***

***Peter Nesvadba, Ciba SC***

***Stefan Freunberger, Universität St. Andrews***

***Finanzierung:***

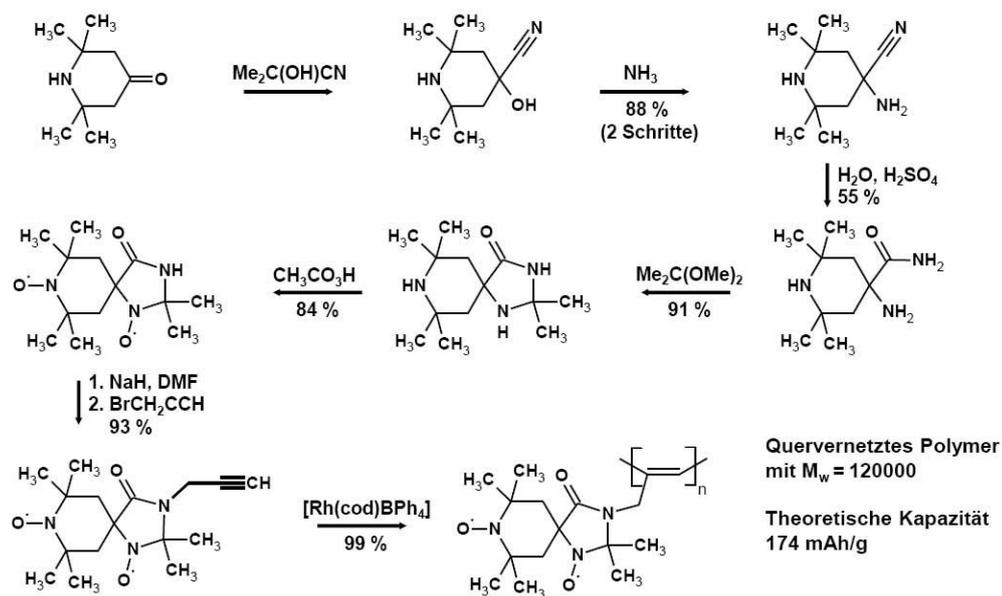
***PSI***

***Industriepartner***

***Schweizerischer Nationalfonds***



## Synthese eines spiro-Bisnitroxidpolymers





## **VORTRAG VII**

---

# **UMWELTBEWERTUNG VON ELEKTROMOBILITÄT**

Udo Lambrecht

**Der Vortrag ist auf Anfrage beim Autor erhältlich**

IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH  
Wilckensstraße 3, D-69120 Heidelberg

Webseite: [www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)

## **VORTRAG VIII**

---

# **DIE ZUKUNFT FÄHRT ELEKTRISCH ENTWICKLUNG EINER WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR ELEKTROMOBILITÄT ALS GRUNDLAGE FÜR EIN NEUES ENERGIE-PARADIGMA**

Prof. Dr. Guy Fournier

Karlsruhe 14.12.2009 – 15.12.2009

Welcome  
 Bienvenida benvenuto Hoşgeldiniz  
 환영합니다 Vítejte Добро Дошли ЛАСКАВО ПРОСИМО  
 Vitajte Dobro Došli добро пожаловать  
 Serdecznie Witamy  
 Mirë se vini Wezon  
 欢迎  
 ش و خ د ي د م آ b i e n v e n u e  
 سلام علی کم  
 यागत Velkommen Laipni lūdzam  
 गतम مرحبا Καλωσήρθατε  
 Selamat Datang  
 ಸ್ವಾಗತ  
 歡迎 வனக்கம்  
 Sugeng Rawuh  
 ようこそ  
 willkommen  
 Willkommen

Pforzheim University of Applied Sciences

# Die Zukunft fährt elektrisch

Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Elektromobilität als Grundlage für ein neues Energie-Paradigma“

KIT-Workshop: "Systemanalyse für elektrochemische Speicher., Karlsruhe, 14. und 15.12.2009

Prof. Dr. Guy Fournier

Pforzheim University of Applied Sciences



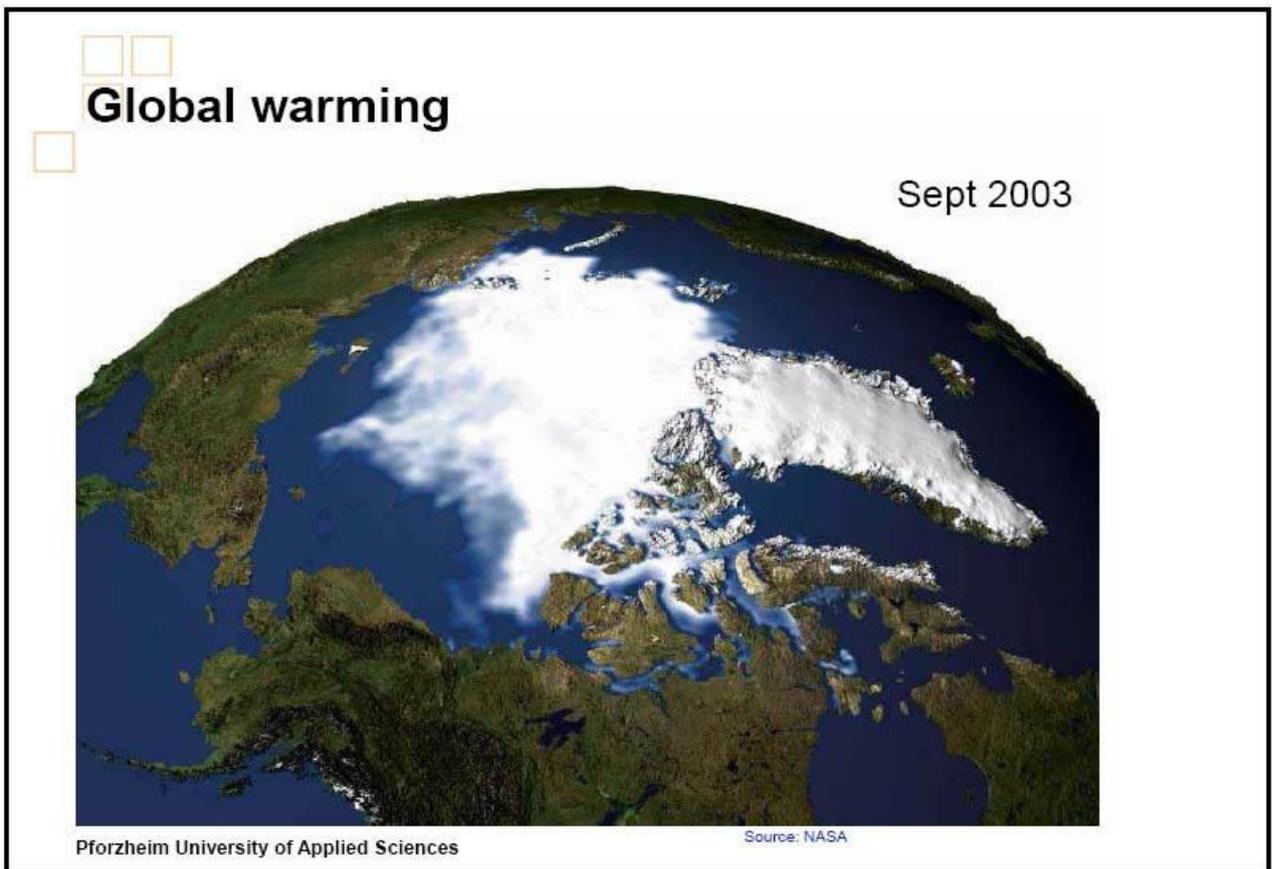
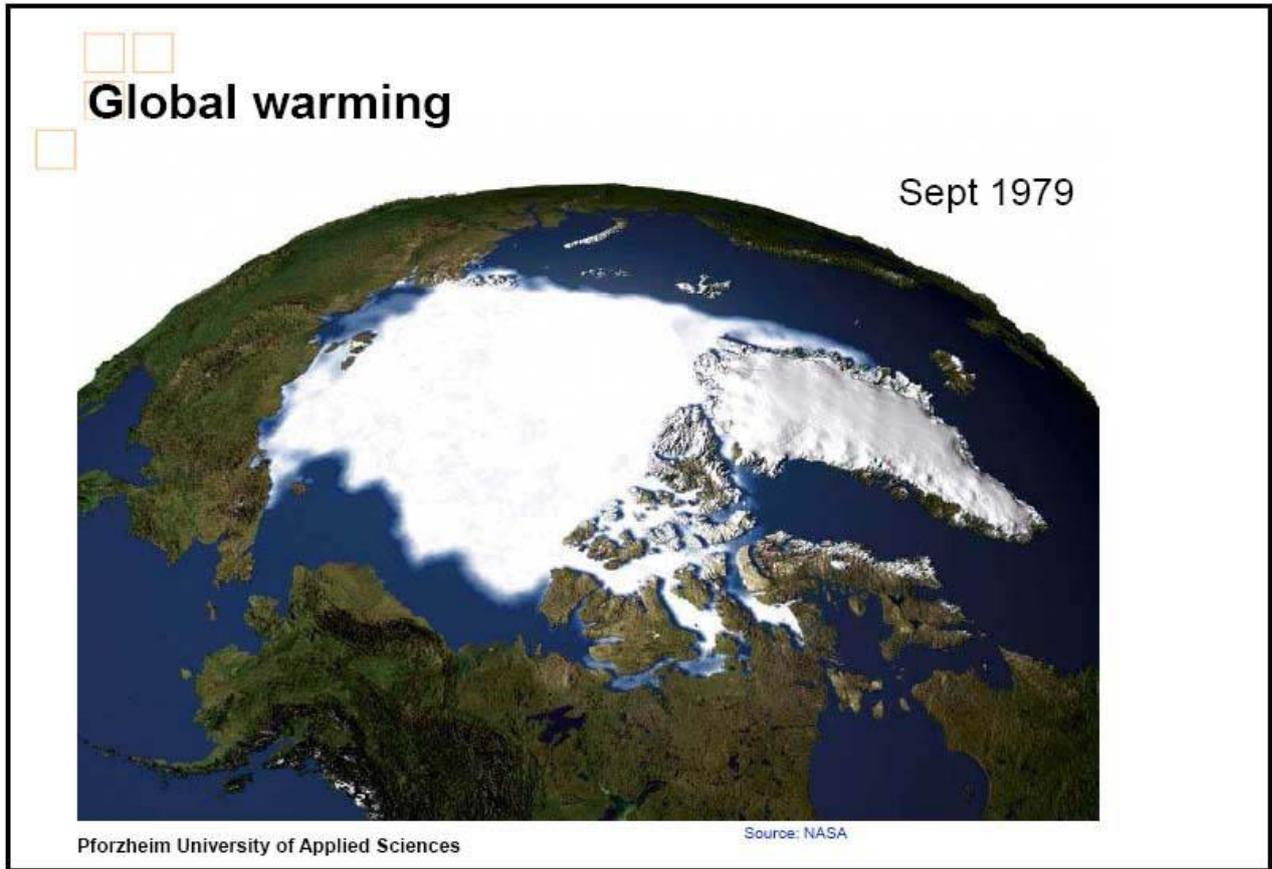
## Agenda

- Drivers of the new paradigm
- Options for our future mobility
- The new mobility value chain
- Impact on the energy needs and infrastructure
- New business opportunities and new business models
- How to enable synergies and economic growth
- Conclusion



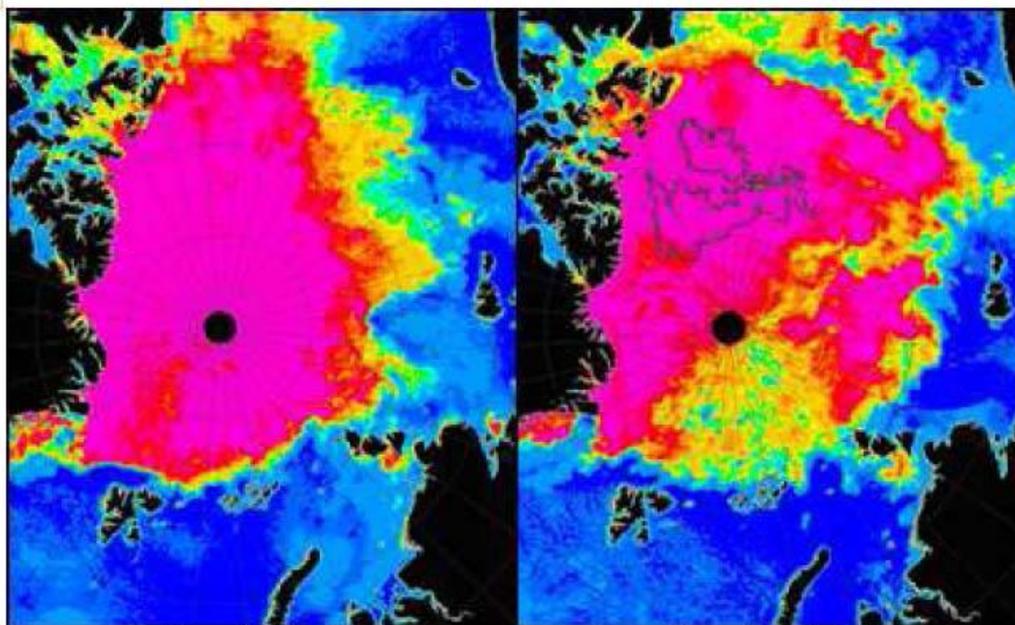
## Agenda

- **Drivers of the new paradigm**
- Options for our future mobility
- The new mobility value chain
- Impact on the energy needs and infrastructure
- New business opportunities and new business models
- How to enable synergies and economic growth
- Conclusion



## Global warming

IEA nov. 2009:  
 - 6°C temperature rise to the end of the century  
 - "alarming consequences for the planet" (IEA)



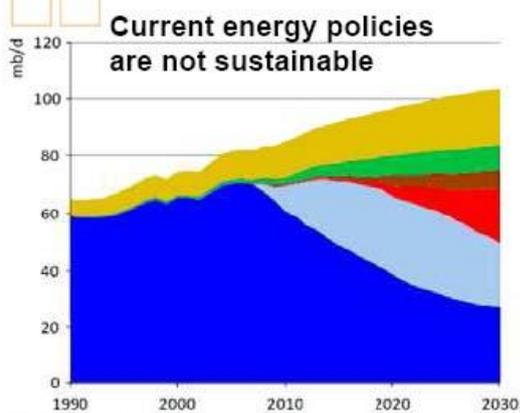
August 24th, 2005

August 23rd, 2006

Pforzheim University of Applied Sciences

Source: ESA (2006)

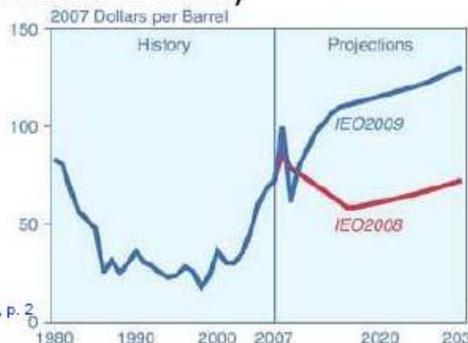
## Energy challenge: dependence on oil



- Natural liquid gas
- Non conventional crude oil (incl. Canadian oil sands)
- Crude oil – additional EOR (Enhanced Oil Recovery)
- Crude oil – fields yet to be found
- Crude oil – fields yet to be developed
- Crude oil – currently producing fields

Source: International Energy Agency 2008  
 Pforzheim University of Applied Sciences

- World fossil fuel production increased by 2.9% in 2008, reaching the highest level ever recorded
- Current price for crude oil: 78 \$/barrel (brent, October 2009)
- Estimation of EIA: 120-180 \$/barrel in 2030
- Estimation of IEA: 115 \$/barrel in 2030 (190 \$/barrel in nominal terms)



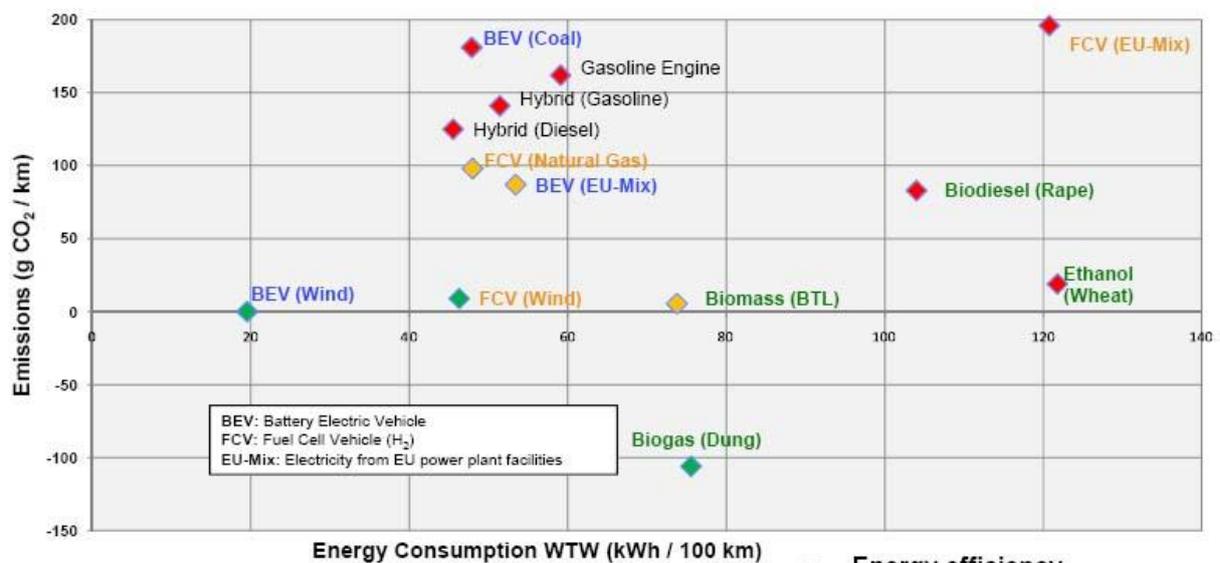
Source:  
 Energy Information  
 Administration 2009, p. 2

## Agenda

- Drivers of the new paradigm
- Options for our future mobility
- The new mobility value chain
- Impact on the energy needs and infrastructure
- New business opportunities and new business models
- How to enable synergies and economic growth
- Conclusion

Pforzheim University of Applied Sciences

## CO<sub>2</sub> and energy efficiency of power trains (Well-to-Wheel)



Source: based on data from Concawe, Eucar, JCR 2007; Daimler Optiresource tool

Pforzheim University of Applied Sciences

- Energy efficiency
- Low or no emissions of CO<sub>2</sub>
- Flexibility

## The future thinks electric: speed of transformation

### Market share development of EV and PHEV

In 2020, Western Europe may be the lead market with annual sales of more than 3 million EVs and PHEVs – followed by China



- The main question is therefore not if, but when (near) zero emission vehicles will penetrate the market

- 2 Scenarios

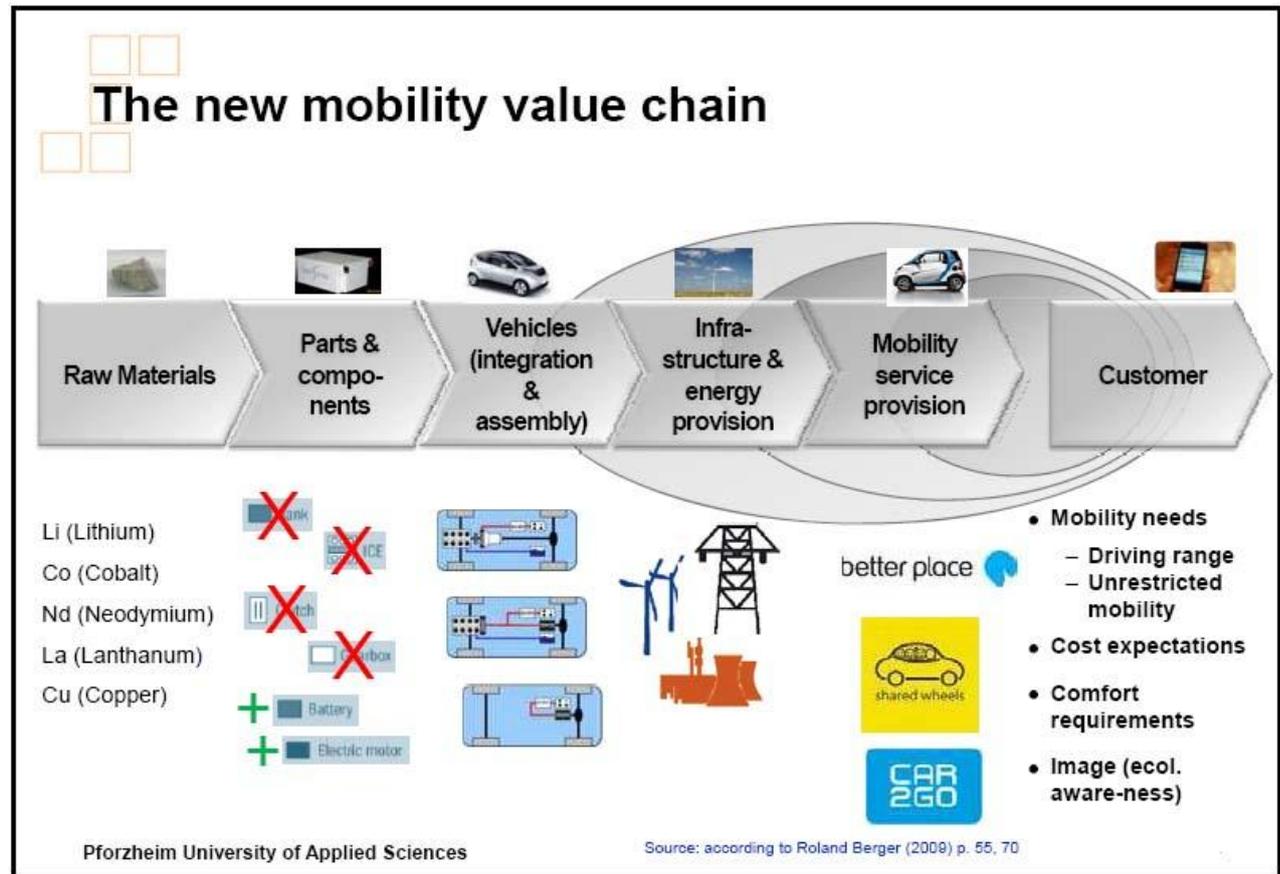
Pforzheim University of Applied Sciences

Source: Roland Berger 2009, p. 69

## Agenda

- Drivers of the new paradigm
- Options for our future mobility
- **The new mobility value chain**
- Impact on the energy needs and infrastructure
- New business opportunities and new business models
- How to enable synergies and economic growth
- Conclusion

Pforzheim University of Applied Sciences



## Additional electric energy requirements (Germany)

- Fleet in Germany: 41.3 mio.
- Average energy consumption per EV in kWh: 15 kWh/100km
- Kilometrage p.a.: 13,000 km
- Power generation 2008: 639.1 TWh

$$\text{Fleet in Germany (20\%)} \times \text{Average energy consumption per 100 km} \times \text{Kilometrage p.a.} \\ = 41,300,000 \times 0,20 \times 0,15 \text{ kWh/km} \times 13,000 \text{ km pa} \\ = 16 \text{ TWh p.a.}$$

↑ **+ 2.52 % of electricity generation (20 % EV)**

Source: KBA (2009), DIW (2005), AGEB (2008)

- Impact in Austria (20% electric vehicles in 2030):

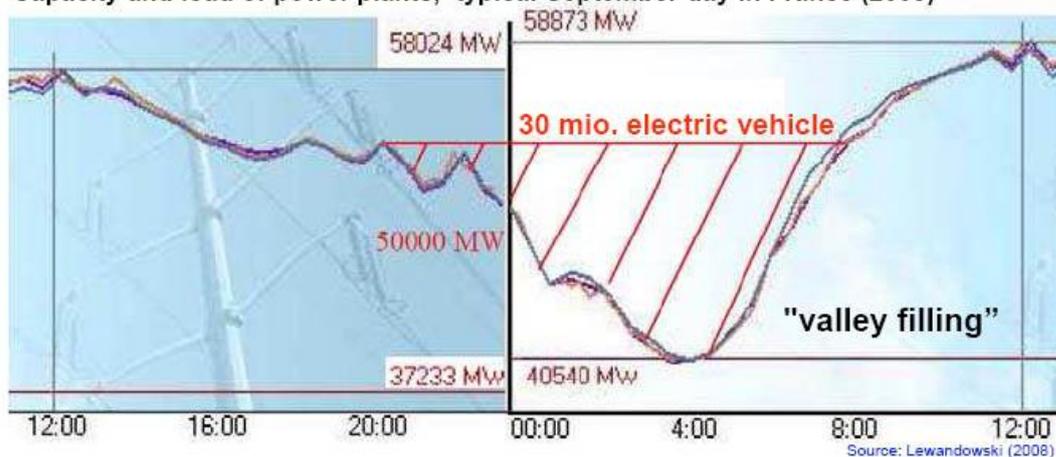
↑ - **+ 2.6% of electricity generation**



Pforzheim University of Applied Sciences

## Additional power plants requirements (France)

Capacity and load of power plants, typical September day in France (2008)



- Utilisation of power fluctuation to charge the car batteries
- No need for massive development of power plants
- Even with a fast growing electric vehicles market

Pforzheim University of Applied Sciences

## Synergies with renewables, windmills

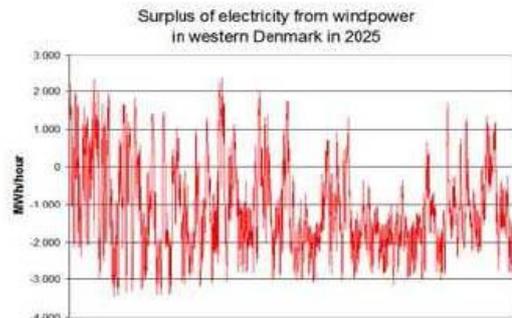
### Negative Price in Germany on a windy day Oct. 2009



		So, 04.10.
00-01	€/MWh	0,05
	MWh	17.414,0
01-02	€/MWh	-105,76
	MWh	18.042,7
02-03	€/MWh	-500,02
	MWh	17.620,6
03-04	€/MWh	-100,09
	MWh	18.176,4
04-05	€/MWh	-60,09
	MWh	18.176,7
05-06	€/MWh	-25,04
	MWh	18.222,6
06-07	€/MWh	0,00

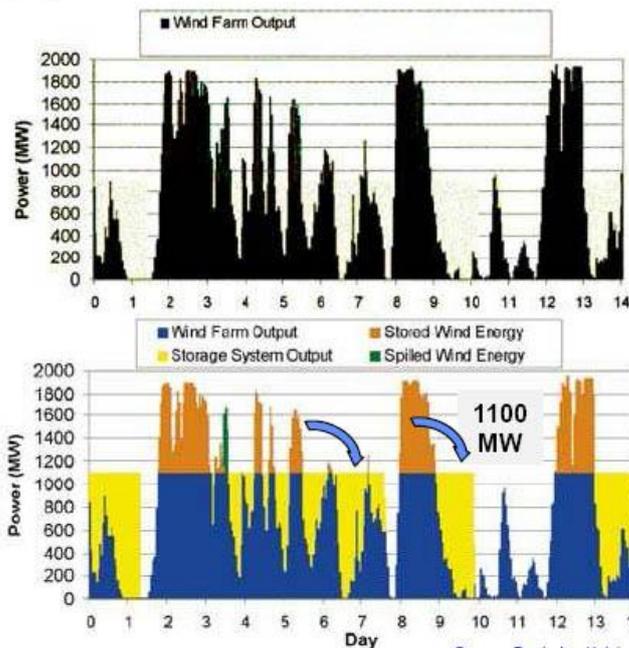
- Synergy by “peak shaving”

- Negative price (windy day in Germany October 4th 2009)
- surplus for 70 days in each year (Denmark in 2025)



Pforzheim University of Applied Sciences <http://www.eex.com/de>

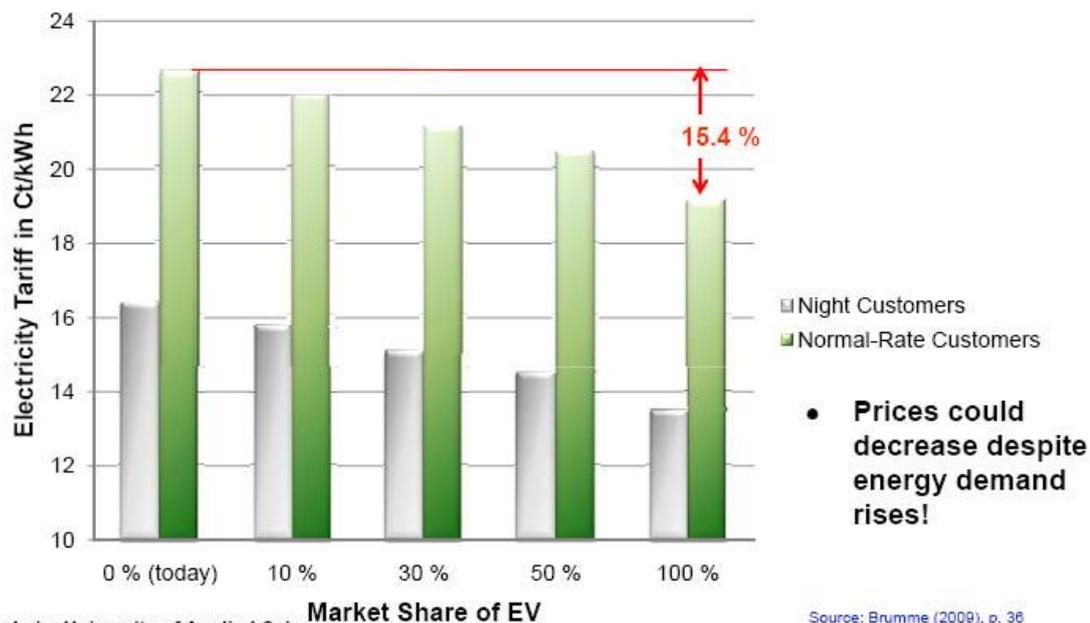
## Synergies with renewables, windmills



- Synergy by:
  - “valley filling” (Denmark, Germany)
  - “peak shaving”
- V2G Makes renewable systems:
  - economically viable,
  - more efficient,
  - stable and
  - reliable
- Grid integration required to integrate these variable generation sources

Pforzheim University of Applied Sciences Source: Denholm, Kulcinski, Holloway (2005)

## Additional electric energy requirements Impacts on electric costs (Germany)



Pforzheim University of Applied Sciences

## Vision: Intelligent networks

- Denmark is seeking ways to supply  
50% renewable energy by 2025  
100 % renewable energy by 2050



- from dumb to smart energy provision
- Demonstration: Bornholm Island in the Baltic Sea:
  - just 40,000 inhabitants,
  - relies mostly on wind energy
  - with only one sea cable connecting it to the national power grid.
- “100 to 1,000 times larger than the Internet”!? (Cisco)
- 390 bn € market by 2030 in Europe (Eur. Techn. Platform)

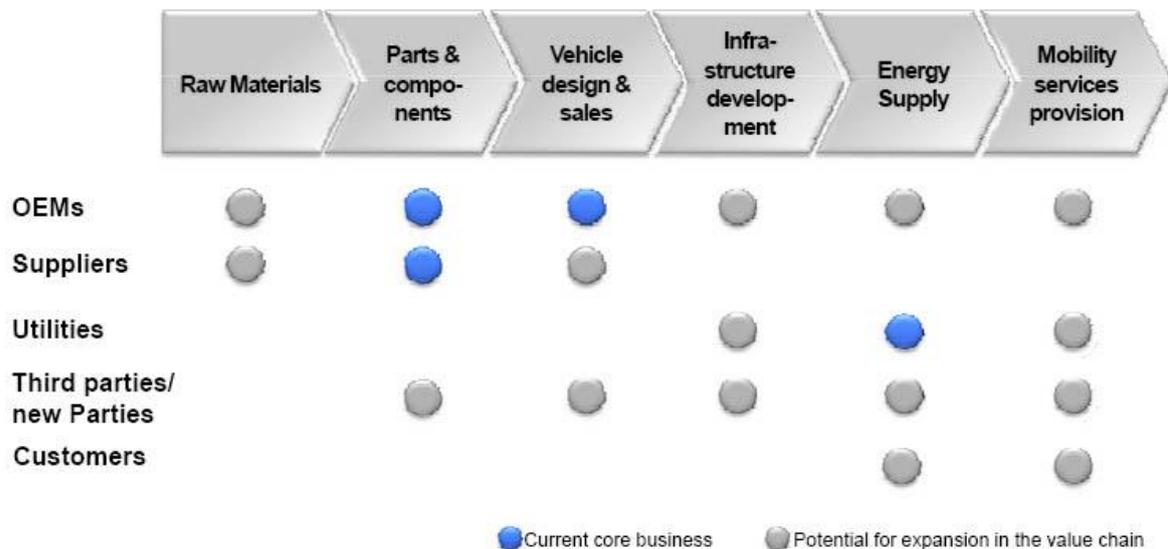
Pforzheim University of Applied Sciences

## Agenda

- Drivers of the new paradigm
- Options for our future mobility
- The new mobility value chain
- Impact on the energy needs and infrastructure
- **New business opportunities and new business models**
- How to enable synergies and economic growth
- Conclusion

Pforzheim University of Applied Sciences

## New business models and new business opportunities



Pforzheim University of Applied Sciences

Source: according to Roland Berger (2009), p. 80

## Agenda

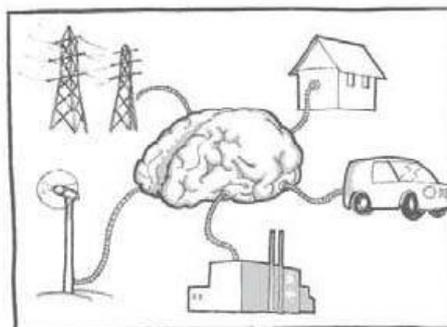
- Drivers of the new paradigm
- Options for our future mobility
- The new mobility value chain
- Impact on the energy needs and infrastructure
- New business opportunities and new business models
- **How to enable synergies and economic growth**
- Conclusion

Pforzheim University of Applied Sciences

## The future thinks electric:

### Overall macro economic impact

- **Impact in Austria  
(20% electric vehicles in 2030):**
  - - 16% CO<sub>2</sub> for road traffic
  - **Contribution to EU Energy Efficiency targets of Austria: 39%**
  - **Effect on the national budget: largely neutral**
  - **Net effect on the economy by 2020:  
+ 1.3 bn € (10% of the total industry volume as of today)**



Pforzheim University of Applied Sciences

## How to enable synergies and economic growth

- EU should continue the “carrot and stick” policy to accelerate the transformation process



- New regulation of the energy sector



- Moderation of the different participants of industry

- Define a master plan of industry or governmental program
- Take the leadership and define European and worldwide standards



Pforzheim University of Applied Sciences

## Conclusion

**"The best way to predict the future is to create it"**  
*Peter F. Drucker*



Source: Siemens 2009

Pforzheim University of Applied Sciences



**Thank you for  
your attention!**

Prof. Dr. Guy Fournier  
Pforzheim University, Germany  
guy.fournier@hs-pforzheim.de

## WORKSHOP 1

---

# **Welche Implikationen können Ressourcenaspekte auf die Entwicklung von elektrochemischen Speichern haben?**

Saskia Ziemann, Marcel Weil

Ein begrenztes Angebot an wichtigen Rohstoffen kann den Erfolg bestimmter technologischer Entwicklungen gefährden. In diesem Workshop sollte nicht nur der Ressourcenbedarf für verschiedene elektrochemische Speicher, sondern auch die Konkurrenz mit anderen emergenten Technologien um bestimmte strategische Ressourcen diskutiert werden. Weitere Themen waren die Rezyklierbarkeit der verschiedenen Speichersysteme und die Qualitätsanforderungen an sekundäre Rohstoffe.

Die Gruppe, mit Forschern aus unterschiedlichen Fachbereichen besetzt, war sich einig, dass Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer technischen Überlegenheit zukünftig die bevorzugten elektrochemischen Speicher für Elektroautos sein werden. Insofern wird die Verfügbarkeit von Lithium entscheidend sein für den Ausbau beziehungsweise die Verbreitung der Elektromobilität, weshalb es wichtig ist, die Versorgung mit den benötigten Rohstoffen zu sichern.

## Recycling

In diesem Zusammenhang wurde zuerst genauer auf das Thema Recycling von Lithium-Ionen-Batterien eingegangen, denn dies ist eine Möglichkeit für ein zusätzliches Angebot an Rohstoffen zu sorgen. Eine Workshopteilnehmerin berichtete dazu aus ihren Erfahrungen mit einem großen Recycling-Unternehmen:

Das Recycling von Lithium aus Lithium-Ionen-Batterien sei zwar technisch machbar, aber derzeit ökonomisch nicht lohnend. Dies liegt zum einen daran, dass es bisher zu wenig Rücklauf von gebrauchten Lithium-Akkumulatoren gibt. Zum anderen ist der angewandte Recycling-Prozess momentan so ausgelegt, dass das Lithium in die Schlacke gelangt und keine Rückgewinnung des Metalls stattfindet. Die so entstandene Schlacke kann theoretisch als Zuschlagstoff für Beton verwendet werden. Allerdings hat das enthaltene Lithium (und auch andere Wertmetalle) keinerlei Funktion.

Die Verwendung von Batterie-Schlacke für die Betonherstellung wurde jedoch von einem anderen Workshopteilnehmer in Frage gestellt, zumal es sehr strenge Regelungen für Recyclingbeton in Deutschland gibt. Aufgrund der hohen Metallkonzentrationen in der Schlacke könnte sich die Verwendung dieser Schlacke bei der Betonherstellung sehr schwierig gestalten. Eine Teilnehmerin informierte auch darüber, dass es zwar machbar sei, das Lithium aus der Schlacke zurückzugewinnen, allerdings mit sehr hohem Energieaufwand. Außerdem wäre in diesem Fall der Einsatz der zurückbleibenden Restschlacke in der Betonindustrie nach Aussage des betreffenden Unternehmens nicht mehr möglich.

## Standardisierung

Einzelne Workshopteilnehmer griffen einen weiteren Gedanken zum Recycling auf (der schon von Herrn Dr. Weyhe, vgl. Vortrag, angesprochen wurde): eine Standardisierung im Bereich der Batterietechnologie wäre sicherlich hilfreich, auf lange Sicht sogar notwendig, um nicht nur das Recycling wirtschaftlicher zu machen, sondern auch die Rückgewinnung der enthaltenen Metalle verbessern zu können. Aktuell werden „robuste“ Recyclingtechnologien favorisiert, die weniger effizient hinsichtlich der Recyclingquote (qualitative/quantitative)

sind, dafür aber unterschiedliche Batterietypen aufbereiten können. Selbst sogenannte „Fehlwürfe“ scheinen den Prozessablauf nicht nennenswert zu stören, was für eine industrielle Aufbereitung sehr wichtig erscheint. Eine Standardisierung mit genauer Kennzeichnung der Batterien würde allerdings eine effizientere Recyclingtechnologie erlauben, die nicht mehr die oben beschriebene „Robustheit“ besitzen müsste.

Jedoch bleibt trotz bestehender und sich in der Entwicklung befindlicher Recyclingtechnologien unklar, welche Qualität die sekundären Rohstoffe aufweisen können und ob die erforderliche Reinheit der Metalle und Verbindungen für einen erneuten Einsatz in der Batterieproduktion gewährleistet ist.

### Alternative Energiespeicher-Optionen

Ein anderer Workshopteilnehmer störte sich an der Fokussierung auf Elektroautos und Lithium-Ionen-Batterien und fragte, ob denn dies wirklich die beste Lösung für die zukünftige Mobilität ohne fossile Kraftstoffe sei. Er wollte wissen, inwiefern dabei die Nachhaltigkeit der Technologie gewährleistet ist, wenn doch die ausreichende Verfügbarkeit des Rohstoffes Lithium in Frage steht. Dies veranlasste die Workshopteilnehmer zu diskutieren, ob es überhaupt eine langfristig nachhaltige Technologie gibt. Ein überwiegender Konsens bestand darin, dass höchstwahrscheinlich in Zukunft ein sogenannter „Blumenstrauß“ an verschiedenen Energietechnologien notwendig sein wird, um eine nachhaltige Energieversorgung zu ermöglichen. So wurden dann auch die potenziellen Alternativen zu Elektroautos und Lithium-Ionen-Batterien erörtert. Dabei lassen sich drei Ebenen unterscheiden. Auf der Materialebene kommen andere Batterietechnologien in Frage, die kein Lithium enthalten, doch bleibt auch dort die Rohstofffrage (z.B. Nickel, Vanadium) immer kritisch zu betrachten. Auf der Technologieebene existiert die Brennstoffzelle als Alternative, wobei diese bisher unter anderem Platin benötigt und somit ebenfalls die Rohstoffverfügbarkeit ein entscheidender Faktor ist. Es bleibt auf der Funktionsebene noch die Suffizienz, also die Einschränkung des Energie- und Ressourcenverbrauchs durch eine geringere Nachfrage nach den entsprechenden Gütern oder sogar dem Konsumverzicht. Es herrschte dabei weitgehend

Einigkeit darüber, dass jede Technologie Schwächen hat und es nicht die „einzig richtige“ für die Zukunft gibt. Jedoch blieb in diesem Zusammenhang zum Schluss die Frage offen, ob nicht jede Technologie, auch die sogenannten Schlüsseltechnologien, eigentlich nur Brückentechnologien sind bis durch die weitere technologische Entwicklung wieder eine neue Technologie zur Lösung eines bestimmten Problems entsteht.

## WORKSHOP 2

---

# Einsatzbereiche von elektrochemischen Speichern im Netzumfeld

Thomas Kaschub

### ***Zusammenfassung des Workshopthemas***

Im Folgenden soll in die Bandbreite der Thematik eingeführt werden und einzelne Fragestellungen näher beleuchtet werden.

### **Einsatzbereiche**

Elektrische Speicher werden in Zukunft eine größere Rolle im Elektrizitätsnetz spielen. Ein Grund hierfür ist insbesondere die erheblich größere (nicht beeinflussbare) Volatilität der Stromeinspeisung durch den starken Ausbau von erneuerbaren Energien (insb. Windenergie). Neben den elektrochemischen Speichern, die u. a. auch mobile Speicher in Fahrzeugen sein können, können auch Druckluftspeicher und Pumpspeicher eingesetzt werden. Wichtige Einsatzbereiche von *zentralen Großspeichern* sind:

- Lastausgleich
  - Grund-/Spitzenlast
  - Verzögerter Netzausbau
- Integration von erneuerbaren Energien
- Frequenzregelung

- Spitzenlastreduzierung

Weitere wichtige Einsatzgebiete gibt es für *dezentrale kleinere Energiespeicher*:

- Versorgungsqualität (USV)
- Spannungsqualität und -haltung (z. B. Blindleistung)
- Lastmanagement
- Inselnetze
- Regelleistung
- Erzeugungsausgleich

Je nach Einsatzbereich des Energiespeichers werden künftig verschiedene **Einflussfaktoren** von Relevanz sein. Diese werden insbesondere von den künftigen Entwicklungen der *Technologien, Preise* und *Rahmenbedingungen* beeinflusst. Eine Bewertung oder ein Vergleich der verschiedenen Speichertypen kann mit diesen Einflussfaktoren nach ökonomischen, ökologischen, technischen und sozialen Gesichtspunkten geschehen.

Gerade langfristig entstehen bei diesen Überlegungen große Unsicherheiten, da viele Fragen noch ungeklärt sind. Einige dieser Fragen sind beispielsweise: Welche Speichertechnologien sind zukunftsfähig? Wird es künftig noch weitere Speichertypen geben? Wird Wasserstoff als Speicher eine wesentliche Rolle spielen? Sind mobile Speicher eine Alternative?

Um solche Fragen, die mit großen Unsicherheiten versehen sind, wissenschaftlich zu diskutieren, bedient man sich unterschiedlicher Szenarien. Diese spiegeln dann mögliche Entwicklungen wider. Hierbei werden alle wesentlichen Eingangsparameter und deren Zusammenhänge berücksichtigt. Man geht hierbei in der Regel von einem Business-as-Usual Szenario aus, oder nimmt extreme Entwicklungen der Eingangsparameter an um eine Bandbreite der künftigen Entwicklung der Zielgröße abzuschätzen. Z. B. werden in VDE (2008)<sup>1</sup> verschiedene Anwendungsfälle von Energiespeichern mit ihren spezifischen Kosten in verschiedenen Szenarien bewertet.

---

<sup>1</sup> VDE 2008: Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Energietechnische Gesellschaft (ETG) im Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE), 2008.

## Besonderheiten von stationären und mobilen Speichern

Neben diesen allgemeinen Fragestellungen hinsichtlich der Anforderungen an Energiespeicher gibt es derzeit im Rahmen der Elektromobilitätsforschung auch eine breite Diskussion um mobile Speicher. Wesentliche Besonderheiten von stationären und mobilen Speichern werden in Tabelle 1 aufgeführt.

Stationäre Speicher	Mobile Speicher
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primäreinsatz: Elektrizitätsnetz</li> <li>• speziell für einen Einsatzzweck</li> <li>• hohe Verfügbarkeit</li> <li>• bekannte Einsatzbedingungen</li> <li>• hohe Planbarkeit</li> <li>• Netzanbindung starr vorgegeben</li> <li>• niedrige spez. Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primäreinsatz: Energie für mobile Anwendung               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Kommunikationstechnik</li> <li>○ Elektrofahrzeuge</li> <li>○ „leise“ Energiebereitstellung</li> </ul> </li> <li>• hohe Energie- und Leistungsdichte</li> <li>• Temperaturschwankungen</li> <li>• Sicherheit</li> <li>• zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ begrenzte Einsatzdauer</li> <li>○ Netzanbindung ort- und zeitvariabel</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 1: Besonderheiten von stationären und mobilen Speichern

Gibt es weitere wichtige Besonderheiten für stationäre oder mobile Speicher? Als zentrale Einsatzmöglichkeit für mobile elektrochemische Speicher wird der motorisierte Individualverkehr gesehen: die **Elektromobilität**. In der heutigen Entwicklungsstufe ist das ungesteuerte Laden Standard. In Zukunft wird gesteuertes Laden (Leistung und Energie) an Bedeutung gewinnen um oben genannte Einsatzbereiche als Zweitnutzen zu ermöglichen. Eine Erweiterung auf bidirektionales Laden ermöglicht auch Rückspeisen ins Elektrizitätsnetz, dessen Funktionalitäten unter dem Namen „Vehicle to Grid“ (V2G) bekannt wurde. Eine Ladungssteuerung durch Signale kann entweder durch direkte und verpflichtende Steuersignale erfolgen oder durch indirekte, nicht-verpflichtende Steuersignale, wie bspw. Preissignale.

## **Kopplung von elektrochemischen Speichern mit anderen Technologien**

Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich wird in Zukunft die **Kopplung mit anderen Technologien**. Eine Kopplung mit Umwandlungseinheiten wie Wind kann zu einer Konditionierung der Leistungsgradienten genutzt werden und damit auch zur Reduktion von Flickern oder Oberschwingungen. Im Bereich der kleinen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kann durch Speicherung z. B. der Eigenverbrauch erhöht werden.

Eine **Kopplung verschiedener Speichertechnologien** erweitert deren Funktionalitäten und somit deren Einsatzbereich. Bspw. kann der Einsatz eines Hochleistungsspeichers wie Kondensatoren oder eines Massenschwungrades den Leistungsfluss des elektrochemischen Speichers verstetigen. Insbesondere im mobilen Bereich sind derartige Hybridspeicher denkbar.

Wie ändern sich durch diese Kopplungen die Anforderungen der einzelnen Speicher?

## **Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)**

Für viele der genannten Einsatzzwecke sind Informations- und Kommunikationstechnologien Grundvoraussetzung. In Stichpunkten werden einige wichtige Bereiche für IKT gelistet:

- Laderegelung
- Sicherheitstechnik
- Mensch-Maschine-Interfaces
- Einsatzoptimierung
- Abrechnungssysteme
- Authentifizierung

## **Ausblick**

Elektrochemische Speicher werden in Zukunft in verschiedenen Einsatzbereichen eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere der verstärkte Einsatz von regenerativen Energien wird einen signifikanten Ausbau an elektrischen Speichern notwendig machen. Allein im Bereich der Elektromobilität kann in den kommenden Jahren ein Massenmarkt entstehen,

der als elektrischer Speicher genutzt werden könnte. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Automobilbranche sondern auch in der Energiewirtschaft. Sich ändernde Rahmenbedingungen und neue technologische Möglichkeiten, wie der zunehmende Einsatz von IKT im Elektrizitätsnetz, werden in Zukunft den Einsatz von elektrochemischen Speichern ermöglichen. Welche Auswirkungen dies auf das Gesamtsystem haben wird und welche Möglichkeiten vorteilhaft sind, sind Fragestellungen und Aufgaben für die Forschung, die es anhand von Modellen und Gesamtsystemanalysen zu untersuchen gilt.



## WORKSHOP 3

---

**Ist die Elektromobilität ein Entwicklungspfad, der vorbehaltlos, weltweit nachhaltig (ökonomisch, ökologisch, sozial) beschritten und empfohlen werden kann?**

-

**Elektroautos, nachhaltige Mobilität und die Rolle der Energiespeicher**

Eva Zscheschang , Udo Jeske , Thomas Kaschub

Im Rahmen des Workshops sollte sowohl der sozialwissenschaftlichen Fragestellung, ob Elektromobilität im Automobilbereich ein Entwicklungspfad sein kann, der vorbehaltlos, weltweit nachhaltig (ökonomisch, ökologisch, sozial) beschritten und empfohlen werden kann als auch der technischen Fragestellung nach der Rolle und des Entwicklungsstands elektrochemischer Speicher nachgegangen werden. Besonders interessant erscheinen dabei mögliche Synergien aus der Kopplung der verstärkten Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge (Angebot an Energiespeichern beim Fahrzeugstillstand) mit dem zunehmenden Anteil der nicht-steuerbaren Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen (Nachfrage nach Energiespeichern bei „Überproduktion“).

Um die verschiedenen Blickwinkel und Fachrichtungen der Workshop-Teilnehmer kennenzulernen und in der Diskussion berücksichtigen zu können, wurden zunächst die Fachrichtungen vorgestellt und Stichworte zu den Fragestellungen gesammelt. Die Stichworte berührten die verschiedenen Ebenen der Problemstellungen von globalen

Aspekten bis hin zu technischen Details. Mit Blick auf die Globalisierung wurde gefragt, ob der Mobilitätsgrad in unserem Land (bzw. Europa/USA/Japan) verallgemeinerbar ist bzw. sein sollte, ob es andere Modelle der Mobilität als Alternative oder hinreichende Ergänzung gibt oder ob nicht andere Modelle sogar vorrangig notwendig wären, um globale Nachhaltigkeitsziele zu erreichen? Als Nachhaltigkeitsziel wurde beispielhaft das Klimaziel 2050 genannt.

Ein nächster Fragenkomplex berührte die Rolle der Konsumenten hinsichtlich tradierter Muster als beharrendem Element gegenüber Veränderungen, den Möglichkeiten zu Veränderungen, sowie den dabei auftretenden Fragen von Kosten und sozialer Gerechtigkeit beim Zugang zur Elektromobilität. Es wurde gefragt, ob die Marktdurchdringungsrate von Elektrofahrzeugen ausreichend groß sein könnte, um z. B. die gesteckten Klimaziele zu erreichen. Aber auch die technischen Fragestellungen wurden in diesem Kontext angesprochen. Die Batterieentwicklung wurde mit dem Fokus auf mögliche Preisentwicklungen der erforderlichen Energiespeicher sowie der Verträglichkeit der Batterietechnologien mit Nachhaltigkeitserfordernissen diskutiert.

Da deutlich wurde, dass die Thematik eine außerordentliche Komplexität aufweist, wurde nicht über das „Ob“ einer interdisziplinären Herangehensweise diskutiert sondern die Frage gestellt, was genau eine solche Zusammenarbeit umfassen sollte, wie diese Zusammenarbeit von statten gehen könnte und wer dazu zusammengebracht werden müsste.

In der anschließenden Diskussion wurden vier Schwerpunkte behandelt:

- Gründe für den Umstieg auf Elektrofahrzeuge,
- Mobilitätskonzepte der Zukunft,
- Elektrochemische Energiespeicher für mobile, stationäre und wechselnde Einsatzbereiche sowie
- interdisziplinäre Forschung zu den Themen am KIT.

### **Ziele für den Umstieg auf Elektrofahrzeuge**

Ein wichtiges Ziel ist die Verringerung der Abhängigkeit von Erdölimporten und anderen Ressourcen, welche sich durch die Einführung der Elektrofahrzeuge erhofft wird. Die bezahlbare Energie- und Versorgungssicherheit bei Aufrechterhaltung der momentanen Mobilität und der Flexibilität im Energiesystem sind wichtige Voraussetzungen für den erfolgreichen Umstieg auf Elektrofahrzeuge. Des Weiteren werden durch die Einführung der flächendeckenden E-Mobilität Emissionsminderungen von Treibhausgasen, Lärm und Staub erwartet.

### **Mobilitätskonzepte für die Zukunft**

Im zweiten Diskussionsschwerpunkt, Mobilitätskonzepte der Zukunft, wurden zwei Thesen aufgestellt. Die erste besagt, dass es sehr vielfältige Möglichkeiten der Steuerung von Mobilität gibt, die zu nutzen wären. Die zweite These besagt, dass eine ausschließliche Top-

Down-Steuerung als nicht durchführbar angesehen wird. Als Beispiel für ein sich änderndes Verbrauchsverhalten von Konsumenten wird Deutschland genannt, wo das Auto als Statussymbol einer Veränderung unterliegt. Diese Veränderungen sind im Allgemeinen zeitlich und örtlich sehr verschieden und stark von ökonomischen Gesichtspunkten und dem Einsatzzweck abhängig. Die Verschmelzung von privater und öffentlicher Nutzung von Kraftfahrzeugen wird als ein nachhaltiges Mobilitätskonzept angesehen.

### **Elektrochemische Energiespeicher**

Im dritten Diskussionsschwerpunkt wurde mit der These eingeleitet, dass durch die Entwicklungen der Speichertechnologie ein neues Verhältnis von Energiesystem und Mobilität entstehen wird und damit auch ein Paradigmenwechsel. Davon ausgehend wurde zunächst diskutiert welche Einsatzbereiche Batteriespeichern heute schon offen stehen und welche Entwicklungen erst noch abgewartet werden müssen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen mobilen und stationären Einsatzzwecken. Zudem spielen sowohl technische, verhaltensbedingte, wirtschaftliche als auch politische Aspekte eine große Rolle.

Politische Vorgaben sind oftmals Ausgangspunkt für weitreichende Systemänderungen (Bsp. Dänemark) solange die wirtschaftliche Triebkraft noch nicht gegeben ist. Für den Systemumbau bis hin zu 100 % erneuerbare Energien werden Speicher als erforderlich angesehen. Wobei auch in Zukunft komplementäre Systeme eingesetzt werden und der jeweilige Einsatzzweck die genutzte Speichertechnologie bestimmt. Auch wird dem Energiemanagement eine noch wichtigere Bedeutung zu kommen, den Einsatz der verschiedensten Teilsysteme und Komponenten zu optimieren.

Mobile Speicher in Elektrofahrzeugen werden dabei als eine Möglichkeit gesehen, als neue Puffer in intelligenten Netzen zu agieren. So könnten sie für verschiedene Einsatzbereiche neben dem Primärzweck „sauberer“ Mobilität genutzt werden. Denkbar ist hier insbesondere die Aufnahme eines Überangebots von Elektrizität aus fluktuierenden erneuerbaren Einspeisungsquellen oder nicht ausgelasteter Kraftwerke. Weitergehende Überlegungen gehen in Richtung Rückspeisung, also der Abgabe von gespeicherter Energie zu Hochlastzeiten. Doch von solchen Anwendungen mit Rückspeisung (V2G) ist man zurzeit noch weit entfernt.

Aktuell sind diese Überlegungen noch nicht umsetzbar. Zum einen sind die Kosten für Elektrofahrzeug-Batterien derzeit noch sehr hoch (Größenordnung: 1000 €/kWh) und die Kosten für einzelne Metalle wie bspw. Kobalt werden voraussichtlich steigen bzw. kommen aus nur wenigen Regionen der Erde (z.B. Nd aus China), was eine weitere Abhängigkeit bedeutet. Zum anderen ist die Lebensdauer der Batterie derzeit mit nur ca. 1.000 Ladezyklen noch begrenzt: Doch nicht nur an den aktuell favorisierten Li-Ionen-Batterien wird geforscht, auch Ansätze wie Metall-Luft Batterien werden intensiv verfolgt (IBM).

Allerdings halten sich die Batteriehersteller bei genaueren Angaben zur Haltbarkeit und chemischen Zusammensetzung sehr bedeckt, was die Unsicherheit für Prognosen verstärkt.

### **Interdisziplinäre Forschung am KIT**

Als verbindendes Element für Verständnis und Entwicklung von Energiesystemen in interdisziplinärer Zusammenarbeit wurde die Modellierung angesprochen. Ermöglicht würde die Bildung von Zukunftsszenarien zu den interessierenden Fragen der Nachhaltigkeit des gekoppelten Systems Elektromobilität und regenerative Elektroenergie. Dabei könnte auch die Wasserstofftechnologie konkurrierend oder ergänzend berücksichtigt werden. Entstehen könnte ein aus Teilsystemen von KIT-Partnern und Externen zusammengekoppeltes Gesamtmodell am KIT, das auf abgestimmten Projekten mit verteilten Verantwortlichkeiten und einem System-Integrator beruhen würde, vorzugsweise auf einer Open Source Plattform. Voraussetzung wäre das Interesse einer genügenden Anzahl von Forschergruppen, sowie die Nutzung der KIT-Strukturen zur regelmäßigen Kommunikation und zum wissenschaftlichen Austausch, beginnend mit der Darstellung des Standes der Arbeiten.

## WORKSHOP 4

---

### **Neue Forschungsfragen für elektrochemische Speicher durch systemische Betrachtungen**

Torsten Fleischer

Ziel des Workshops war es, neue Forschungsfragen zu identifizieren, die sich durch systemische Betrachtungen entlang der gesamten Innovationskette für elektrische Speicher in fahrzeugbezogenen Anwendungen ergeben. Die interdisziplinär zusammengesetzte Gruppe nahm dabei zunächst – von den eigenen Forschungserfahrungen geprägte – eher detailorientierte Fragestellungen in den Blick, um dann anschließend verbindende Elemente und Wechselwirkungen herauszuarbeiten.

Eine häufig wiederkehrende Problematik war die nach dem „basic design“ zukünftiger Elektrofahrzeuge. Hier finden sich sehr unterschiedliche Vorstellungen, die unter anderem durch sozioökonomische Faktoren wie Nutzergewohnheiten und -Erwartungen, Mobilitätsverhalten und diesbezügliche zukünftige Veränderungen sowie Zahlungsbereitschaften, aber auch durch technische Faktoren wie Anforderungen an die Betriebs- und Systemsicherheit beeinflusst werden. Wird das dominante Entwurfparadigma weiterhin das fünfsitzige, urlaubstaugliche Familienfahrzeug mit 500 km Reichweite – mit entsprechenden Auswirkungen auf Fahrzeuggewicht und Speicherkosten – sein? Werden andere, den technischen und ökonomischen Limitation elektrisch angetriebener Fahrzeug

eher Rechnung tragende Fahrzeugdesigns daneben treten? Ist angesichts der von den meisten Fahrzeugen heute durchschnittlichen täglich zurückgelegten Distanzen im zweistelligen Kilometerbereich ein Speicherlayout auf 300 ... 500 km Reichweite eine „vernünftige“ Option, oder lassen sich für den vergleichsweise seltenen Fall langer Fahrstrecken akzeptable add-on-Lösungen vorstellen? Welche könnten dies sein? Mit welchem Untersuchungsdesign könnte man Fragstellungen dieser Art valide erfassen?

Damit einher geht die für systemanalytische Untersuchungen und Szenarioentwicklungen nach dem Diffusionsverlauf von Elektrofahrzeugen. Wer werden die ersten Nutzer (early adopters) von Elektrofahrzeugen sein? Wer sind die Zielgruppen dieser Produkte? Flottenbetreiber? Kleinhaushalte im urbanen Bereich? Mehrkindfamilien auf dem Lande? Wie können daraus belastbare Annahmen für die Struktur des zukünftigen Parks an Elektrofahrzeugen und seiner zeitlichen Entwicklung gewonnen werden?

Antworten auf diese Fragen sind nicht nur von akademischem Interesse, sondern haben bei einer Reihe von Themen durchaus praktische Relevanz. Eine betrifft die nach dem Layout der zukünftigen Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen. Die gegenwärtige „Philosophie“ scheint das Laden von Fahrzeugen an der „Steckdose“ – in der eigenen Garage oder auf dem eigenen Stellplatz – in den Vordergrund zu stellen. Aus dieser Setzung entsteht eine Reihe von Konsequenzen. Einerseits ist diese Situation nur bei einer bestimmten Zahl von Haushalten gegeben. Andere, urbanere Strukturen mit „Laternenparkern“ oder regelmäßig wechselnden Stellplätzen werden hierdurch zunächst nicht bedient, was durchaus als Innovationsbarriere wirken kann, da großen Teilen von sozialen Gruppen der Zugang zur Elektromobilität aufgrund von Infrastrukturmängeln erschwert wird.

Eine weitere Folge dieser Setzung betrifft die Analyse von Netzkapazitäten bzw. die Planung von eventuell notwendigen Netzausbauten. In vergleichsweise dünn besiedelten, von Ein- und Zweifamilienhäusern geprägten Wohngebieten – der typischen „Garagengegend“ – stellen sich Fragen nach Netzengpässen und deren Ausbaumöglichkeiten aus technischer und ökonomischer Perspektive ganz anders als in hoch verdichteten urbanen Räumen. Auch sind flexibel nutzbare Lade- und Abrechnungstechniken bei wechselnden Nutzern ganz anders zu diskutieren als bei einem Haushalt zuordenbaren Ladestationen.

Ein weiterer Komplex von Fragestellungen entsteht, wenn man die unterschiedlichen Akteure auf dem Gebiet der Elektromobilität und ihre – teilweise unterschiedlichen – Interessen in den Blick nimmt. Im Workshop drehte sich die Diskussion dabei vor allem um die Kunden („Verbraucher“), die Automobilindustrie, die Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) sowie „die Politik“.

Als politische Ziele für die Förderung der Elektromobilität wurden im Workshop Umweltschutz, Diversifizierung der Endenergeträgerstruktur im Straßenverkehr (bisher öldominiert), Reduktion von Verkehrslärm, Industriepolitik und Beiträge zu einer nachhaltigen Entwicklung benannt. Davon ausgehend wurden mögliche Ansatzpunkte für politisches Handeln zur Unterstützung der Umsetzung von Elektromobilität diskutiert. Neben der klassischen Forschungsförderung betraf dies vor allem mögliche Anreizmechanismen für zukünftige Nutzer von Elektrofahrzeugen sowie eine koordinierende oder moderierende Funktion bei Interessenkonflikten der Beteiligten. Daneben solle er auch übergreifende Fragen wie die nach technischen Entwicklungspotentialen bei konkurrierenden Speichersystemen oder nach eventuellen Ressourcenknappheiten bei Rohstoffen für Speichersystemkomponenten, die als Showstopper für Innovationsstrategien wirken könnten, im Blick behalten.

Ausführlich besprochen wurden neue Interaktionen zwischen Elektrizitätsversorgern und Verbraucher, die sich im Zuge einer stärkeren Marktdurchdringung von Elektromobilität herausbilden können. Ein in diesem Kontext gegenwärtig intensiv diskutiertes Konzept ist das der (temporären) Nutzung von in Fahrzeugen integrierten Speicher als Betriebsmittel der Elektrizitätsversorgung, etwas zur Netzstabilisierung oder zum Ausgleich von Diskrepanzen zwischen Energienachfrage und Energieangebot. Auf den ersten Blick faszinierend, sind damit doch eine Reihe von nicht gut beantworteten Fragen verbunden. Unter welchen Umständen sind Fahrzeugeigentümer überhaupt bereit, ihr System einem weitgehend anonymen Dritten zur Nutzung zu überlassen? Sind ausreichende finanzielle Anreize darstellbar, die dies für die Eigentümer attraktiv machen? Schließlich ist eine Batterie auf absehbare Zeit eine sehr teure Komponente im Fahrzeug, die durch Nutzung altert. Lässt sich dieser Wertverlust für den Kunden ausreichend kompensieren? Wäre es möglicherweise eine auch aufgrund dieser Herausforderungen günstigere Strategie. Traktionsbatterien nicht fest mit dem Fahrzeug zu verbinden und in das Eigentum des Fahrzeugbesitzers übergehen

zu lassen, sondern sie als wechselbare Komponente, die vom EVU verleast wird, auszulegen? Letztere Strategie ließ sich auch als potentieller Lösungsansatz für „Nachtanken unterwegs“ einfacher umsetzen als Ansätze, die aus Schnellladen von Fahrzeugen setzen.

Ein zweites Problem betrifft die Steuerung der Restkapazität des Speichersystems. Kulturell sind Personenfahrzeuge auch Mobilitätsoptionen auf Vorrat. Die Möglichkeit, jederzeit und spontan mobil sein zu können, ist ein wichtiger Kaufanreiz für Individualverkehrsmittel. Inwieweit wird diese Option durch den (zeitweisen) Zugriff des EVU auf die Batterie beeinträchtigt – und sei es auch nur subjektiv – und wie kann dem durch intelligente Regelkonzepte zumindest teilweise begegnet werden? Wer haftet bei Nichteinhalten von entsprechenden Abreden oder gar im Schadensfall?

Diese Fragen weisen – mehr oder minder beispielhaft – auf eine Reihe von noch zu lösenden Herausforderungen für Elektromobilität hin, die über technische Aufgaben weit hinausgehen, aber eng mit ihnen verbunden sind. Eine rechtzeitige und kreative Auseinandersetzung mit ihnen kann helfen, Innovationsbarrieren eher zu erkennen und sozial robustere Lösungen zu identifizieren, die Elektrofahrzeugen zu mehr werden lassen als ein Nischenprodukt.

# Systemanalyse für elektrochemische Speicher

14.-15.12.2009

## Programm

### Programm 14.12.2009

Vorträge		Autor
12.40 - 13.00	Einführung Systemanalyse für elektrochemische Speicher	Dr. M. Weil
13.00 - 13.20	Rohstoffe für Zukunftstechnologien –Behindert die Verfügbarkeit von Lithium den Ausbau der Elektromobilität“	Dr. G. Angerer
13.20 - 13.40	Moderierte Diskussion	
13.40 - 14.00	E-Mobilitätsprojekte der EnBW	Dr. A. Kessler
14.00 - 14.20	Elektromobilität - Auswirkungen auf das Energiesystem	Dr. D. Möst
14.20 - 14.40	Moderierte Diskussion	
15.10 - 15.30	Recycling von Li-Ion Traktions-Batterien: Voraussetzungen und Anforderungen aus der Sicht der Recyclingindustrie	Dr. R. Weyhe
15.30 - 15.50	Moderierte Diskussion	
15.50 - 16.10	In situ Methoden zur Untersuchung von Alterungsvorgängen in Lithium-Ionen Batterien	Dr. P. Maire
16.10 - 16.30	Moderierte Diskussion	
16.30 - 16.50	Umweltbewertung von Elektromobilität	U. Lambrecht
16.50 - 17.10	Moderierte Diskussion	

**Programm 15.12.2009**

<b>Vorträge</b>		<b>Autor</b>
09.20 - 09.25	Begrüßung	Dr. M. Weil
09.25 - 09.45	Impulsvortrag: Die Zukunft fährt elektrisch – Entwicklung einer Wertschöpfungskette für Elektromobilität als Grundlage für ein neues Energie-Paradigma	Prof. Dr. G. Fournier
09.45 - 10.00	Moderierte Diskussion	
<b>Workshops</b>		
10.00 - 11.15	Parallele Workshops	
11.15 - 11.45	Pause/Imbiss	
11.45 - 13.00	Fortführung parallele Workshops	
13.00 - 13.30	Kurze Ergebnispräsentation aus den Workshops Vorstellung Netzwerk für elektrochemische Speicher	

**Veranstaltungsort:**

KIT Campus Nord  
 (ehemals Forschungszentrum Karlsruhe GmbH)  
 Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt (FTU)  
 Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

## Liste Moderatoren

<b>Name</b>	<b>Institut am KIT</b>
Marcel Weil	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS-ZTS)
Vinga Szabo	Institut für Materialforschung III (IMF III)
Saskia Ziemann	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS-ZTS)
Torsten Fleischer	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Jens Buchgeister	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS-ZTS)
Udo Jeske	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS-ZTS)
Sylvio Indris	Institut für Nanotechnologie (INT)

## Danksagung

An dieser Stelle sei dem SANEESS-Team unter Beteiligung von Dr. S. Indris (INT), Prof. Th. Leibfried und Dr. R. Badent (IEH), Frau Dr. D.V. Szabo (IMF III), Dr. A. Weber (IWE), Dipl. Phys. T. Fleischer und Prof. M. Decker (ITAS) des KIT gedankt, die mit ihrer Mitarbeit diesen Workshop erst ermöglicht haben. Dem KIT-Zentrum NanoMikro danke ich für die Mittelbewilligung für das SANEESS-Projekt. Ein besonderer Dank gilt den Vortragenden, die auch ihren Beitrag für den Workshopbericht zur Verfügung gestellt haben. Für die Unterstützung bei der Moderation der Workshops, der Diskussionsrunden und der Erstellung der Workshopberichte danke ich sehr Frau Saskia Ziemann, Eva Zscheschang, Udo Jeske, Jens Buchgeister, Thomas Kaschub und Mireana Bucur.

Der reibungslose Verlauf des Workshops ist das Ergebnis vieler Beteiligter. Herrn Frank Sauer war eine wichtige Unterstützung bei der IT Administration. Frau Monika Zimmer möchte ich herzlich danken für die Übernahme vieler organisatorischer Aufgaben und ihr persönliche Engagement, ohne das die Veranstaltung nicht so wunderbar gelungen wäre.

Marcel Weil