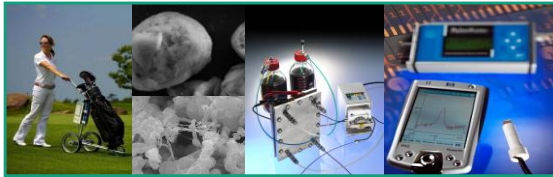


## Elektrische Speichertechnologie für erneuerbare Energie

Dr. Karsten Pinkwart, Dr. Peter Fischer, Dr. Jens Tübke  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

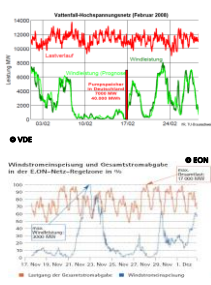
## Übersicht

- **Notwendigkeiten**
- **Möglichkeiten der Energiespeicherung**
  - Unterschiede
  - Anwendungsfelder
- **Blick über den Tellerrand**
- **Speichertechnologie**
  - Pumpspeicherkraftwerke
  - Hochtemperaturbatterie
  - Druckluftspeicherung
  - Redox-Flow Batterie
- **Elektroautos als Speicher**
- **Fazit**

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Warum brauchen wir Stromspeicher ?

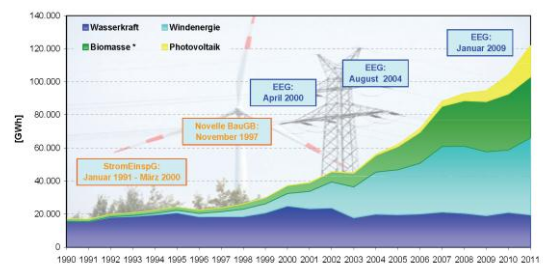


- **Einpeisung fluktuierender Energien erzeugen starke Schwankungen im Netz**
    - ▶ Netzüberlastung
    - ▶ Unterversorgung
  - **Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch ist jederzeit notwendig**
    - ▶ **Regel-/Reserveleistung (positiv/negativ) notwendig**  
(bis zu 20 % Regel-/Reserveleistung der installierten Windkraft)\*
    - ▶ **massiver Netzausbau / -verstärkung erforderlich**  
(Höchstspannungsnetz in 2015 Verstärkung von 392 km, Neubau 850 km)\*
- \* (dens Netzstudie 1, 2005)

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Beitrag der erneuerbaren Energien in Deutschland

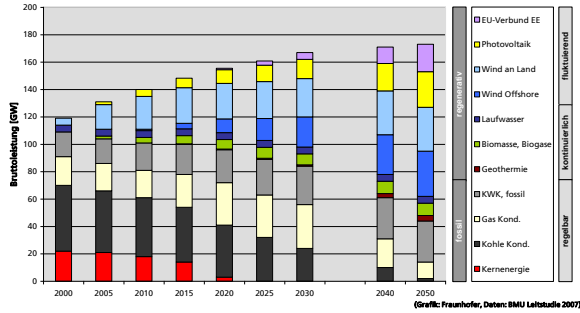


\* Ferner sind folgende Biomasse - Biogas, Deponie- und Klärgas, biogener Anteil des Abfalls, 1 GWh = 1 Mio. kWh.  
Aufgrund geringer Stromerträge ist die Teilmenge erneuerbare Kraft (Biogas, Biomasse, Deponieabfall, Klärgas) nicht dargestellt.  
Quelle: BAW-KI 10 nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AEE-Stat) Hintergrundbild: BAW / Christian Eisehoff, Stand: März 2012, Angaben vorläufig

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

### Was ändert sich in Zukunft ?



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

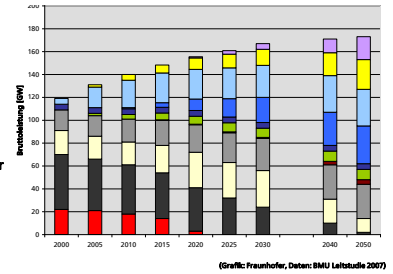
### Warum brauchen wir in Zukunft vermehrt Stromspeicher ?

#### ■ Massiver Ausbau erneuerbarer Energien

- ▶ bis 2030  
Wind bis 50 GW  
Solar bis 12 GW
- ▶ bis 2050  
Fluktuierende über 90 GW
- ▶ Leistungsbedarf bei ca. 80-90 GW

#### ■ Verhältnis fluktuierender zu regelbarer Leistung

- ▶ heute: 1 zu 6
- ▶ 2030: 1 zu 1,3
- ▶ 2050 1 zu 0,5



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

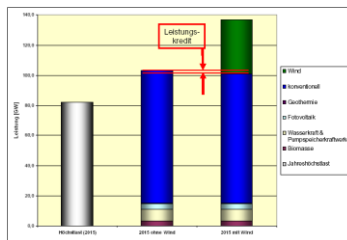
### Warum brauchen wir in Zukunft vermehrt Stromspeicher ?

#### ■ Zugewinn an gesicherter Leistung durch fluktuierende Einspeiser (bei gleichbleibender Netzverfügbarkeit)

- ▶ Wind 5 - 7%

#### ■ Immer weniger regelbare Kraftwerke stehen fluktuierenden Einspeisern gegenüber

- ▶ noch mehr Regel-/Reservekraftwerke („Schattenkraftwerke“)
- ▶ Energie-Speicher für positive und negative Abweichungen



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

### Gleichen sich nicht die ganzen Erneuerbaren Energien aus ?



#### ■ Kurzfristige Schwankungen im Netz

- ▶ Windböen, Wolkendurchgang gleichen sich aus.

#### ■ Regionaler Energieausgleich

- ▶ eher unwahrscheinlich, da die regionalen Wetterverhältnisse ähnlich sind.

#### ■ Großräumiger/internationaler Energieausgleich

- ▶ nur sehr begrenzt möglich, da
  - Hochlastzeiten europaweit ähnlich,
  - Netzkapazitäten begrenzt
  - internationale Koppelstellen häufig ausgelastet sind

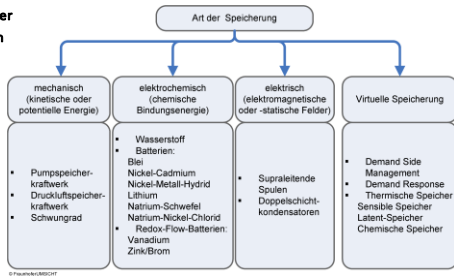
© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Welche Möglichkeiten der Energiespeicherung gibt es ?

### Energiespeicher

- mechanisch
- chemisch
- elektrisch
- virtuell

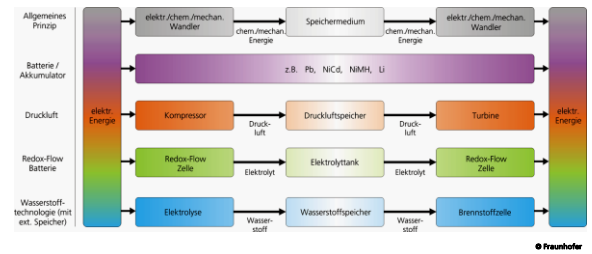


© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Wie funktionieren Energiespeicher?

### Funktionsweise realer Energiespeicher



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

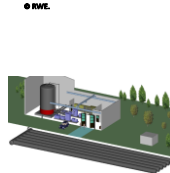
## Welche Technologien für Energiespeicher werden eingesetzt ?

- Pumpspeicherkraftwerke (PH)**
  - effizient
  - topologische Anforderungen
  - problematischer Ausbau
- Druckluftspeicherkraftwerk (CAES)**
  - bisher wenig effizient
  - Kompressorentwicklung notwendig
  - besondere geologische Anforderungen
- Vision Micro-CAES**
  - bisher nur Konzept



© RWE

© E.ON



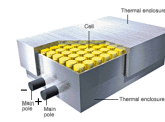
© Fraunhofer

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Welche Technologien für Energiespeicher werden eingesetzt ?

- Natrium-Schwefel-Batterie (NaS)**
  - Einsatz kritischer Materialien
  - hohe Temperaturen
  - Verluste
- Bleibatterie (LA)**
  - Stand der Technik
  - kostengünstig
  - geringe Lebensdauer
  - wenig Entwicklungspotenzial
- Redoxflow-Batterien (Redox)**
  - günstiges Scale-up
  - hoher Entwicklungsbedarf / hohes Entwicklungspotenzial



© NGK Insulators Ltd.



© Fraunhofer (Batteriespeicher Mont. Carlo)



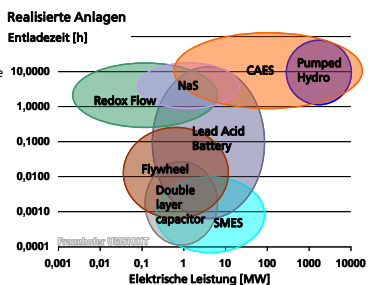
© Fraunhofer (Cellstrom-Redox-Flow-Battery)

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

### Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

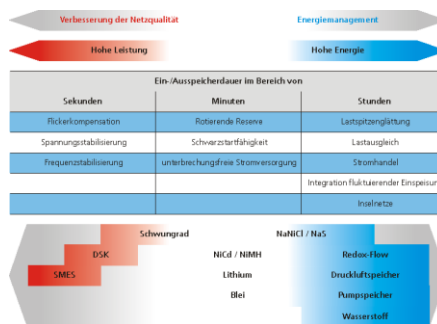
- Mittel-/Langfrist**
  - ▶ Pumpspeicherkraftwerke
  - ▶ Druckluftspeicherkraftwerke
  - ▶ Redox-Flow Batterien
  - ▶ Bleibatterien
- Kurzfrist**
  - ▶ Bleibatterien
  - ▶ Schwungradspeicher
  - ▶ Kondensatoren
  - ▶ Supraleitende Spulen



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

### Welche Anwendungen gibt es für Energiespeicher?

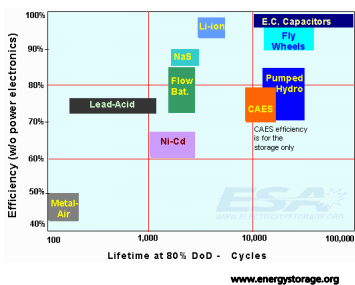


© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

### Wie hoch ist die Effizienz der Energiespeicher überhaupt?

- Gesamtwirkungsgrad (AC-AC)** beeinflusst durch Anwendung / Teillast, Effizienz der Wechselrichter, Trafos
  - ▶ **Lithium-Batterien** (bis zu 90%)
  - ▶ **Pumpspeicher, Bleibatterie** (bis zu 80%)
  - ▶ **NaS / Redoxflow-Batterie** (ca. 70 - 80%)
  - ▶ **Druckluftspeicherkraftwerk** (ca. 42 - 70%)
  - ▶ **Wasserstoff – BZ** (ca. 30 - 50%)



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

### Weltweite Leistung von Energiespeichern

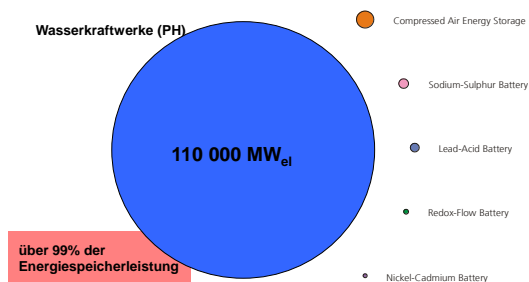
- ▶ **Druckluftspeicher** 477 MW<sub>el</sub> (Compressed Air Energy Storage)
- ▶ **NaS-Batterie** >200 MW<sub>el</sub> (Sodium-Sulphur Battery)
- ▶ **Bleibatterie** 125 MW<sub>el</sub> (Lead-Acid Battery)
- ▶ **Redox-Flow** 11 (38\*) MW<sub>el</sub> (Redox-Flow Battery)
- ▶ **NiCd-Batterie** 26 MW<sub>el</sub> (Nickel-Cadmium Battery)

\* inklusive zweier abgebrochener Regensys Projekte

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

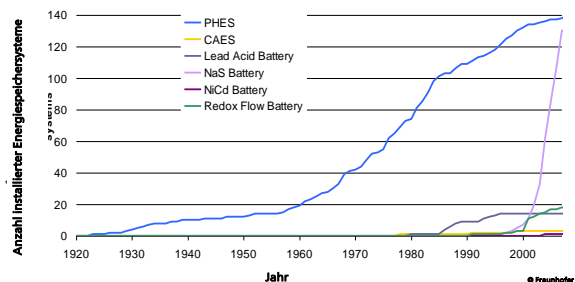
### Weltweite Leistung von großen Energiespeichern



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT


### Entwicklung der Anlagenzahl von großen Energiespeichern weltweit



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

### Ist der Speicherbedarf eine rein deutsche Problematik (EEG)?

- 
- Deutschland**  
 In Deutschland basiert der Bedarf an Energiespeichern vorrangig auf dem Ausbau der Erneuerbaren Energien und deren regionaler Verteilung.
  - Japan**  
 Hier besteht der hohe Energiespeicherbedarf (über 200 Batteriespeicher im Megawattbereich) vor allem durch Netzrestriktionen (Netzstruktur, Topologie, Koppelstellen, Bebauungsdichte).
  - USA, Südeuropa**  
 In Ländern mit ausgeprägter sommerlicher Spitzenlast (verschärfend: hoher Anteil an Grundlaststromerzeugern) steigt der Speicherbedarf.
  - Inseln**  
 Speicher sind dort zumeist technisch notwendig.

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

### Welche dieser Technologien werden in Zukunft eingesetzt und wo ?

- 
- Zentral im Netz / an großen Windparks**
    - Zukünftig **Druckluftspeicher** im 2 bis 3-stelligen MW-Bereich (adiabate CAES, Micro-CAES)
    - Langfristig **H<sub>2</sub>-GuD** im 3-stelligen MW-Bereich
  - Dezentral an Netzknoten / mittelgroßen Einspeisern (Windanlage, große PV)**
    - Stand der Technik: Blei- / NaS-Batterien
    - Zukünftig **Redox-Flow Batterien**
  - Lokal bei netzfernen Endkunden bzw. Kleinspeisern (Dach-PV)**
    - Stand der Technik: Bleibatterien
    - Zukünftig **Lithium-Batterien**

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Pumpspeicherkraftwerke

- Bereitstellung elektrischer Spitzenenergie
- Grundlast in Spitzenlast
- Verwertung Überschussenergie (Pumpen)
- Primärregelung für Sekundenreserve (laufende Anlage)
- Bereitstellung bei Großkraftwerksausfall
- Optimierung von Wärmekraftwerken durch Leistungsregelung
- Schwarzstartfähigkeit bei Netzwiederaufbau



Daten: VDE, Leitstudie 2009



© Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Pumpspeicherkraftwerke

- Technologiechancen
  - topographische Voraussetzungen
  - zeitaufwendige Genehmigungsverfahren
  - 7000 MW installierte Leistung
  - Entladezeit für einige Stunden
  - Gesamtwirkungsgrad liegt bei ca. 80%
  - Phasenschieberbetrieb
  - Blindleistungsregelung ohne Pump- und Turbinenbetrieb
- Entwicklungsziele
  - Regelbarer Pumpbetrieb
  - Stromrichter-gepeiste Maschinen



Daten: BMU Leitstudie 2007

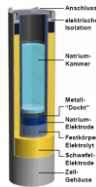
© Fraunhofer ICT



## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Hochtemperaturbatterie

- Aktivmassen liegen in flüssiger Form vor
- Betriebstemperatur 270-350 °C
- Natrium – Nickel - Chlorid NaNiCl
  - Fehlerfall niedrigohmig
  - Spannungsverlust
  - Nach Lebensdauerende - Neuinvestition
- Natrium – Schwefel – Batterie NaS
  - Geringe Kosten
  - Hohe Zyklenlebensdauer
  - Nach Lebensdauerende - Neuinvestition



Daten: VDE Leitstudie 2009



© Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Druckluftspeicher – Compressed Air Energy Storage

	Kavernenvolumina / m <sup>3</sup>			
	Dauer GT-Betrieb	Dauer Kompressor-Betrieb	140 MW GT	401 MW GT
Gesamtvolumen			230.000	660.000
Kavernenzahl	8 h	16 h	1	2
Einzelvolumina			230.000	330.000
Gesamtvolumen			345.000	980.000
Kavernenzahl	12 h	12 h	1	2
Einzelvolumina			345.000	490.000
Gesamtvolumen			460.000	1.320.000
Kavernenzahl	24 h	8 h	1	3
Einzelvolumina			460.000	440.000

(Grafik: Fraunhofer, Daten: BMU Leitstudie 2007)

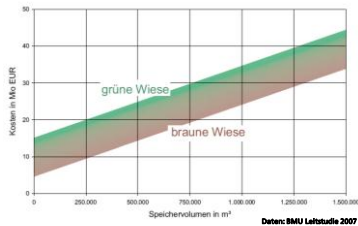
© Fraunhofer ICT



## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Druckluftspeicher – Compressed Air Energy Storage

- Kosten für Planung und Erstellung
  - grüne Wiese maximale Investitionskosten
  - braune Wiese minimale Investitionskosten (Solanlage vorhanden, keine Kosten für Exploration)



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Druckluftspeicher – Compressed Air Energy Storage

- Kavernenstandorte und Salzvorkommen
  - Geologie in Deutschland
  - vorhandene Salzvorkommen
  - Standorte im mittel- bis norddeutschen Raum
  - Süddeutschland weist einen hohen Anteil an löslichen Bestandteilen auf



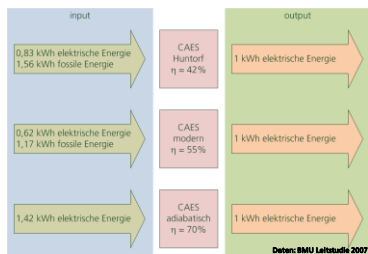
© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Druckluftspeicher – Compressed Air Energy Storage

- Wirkungsgrad



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Redox-Flow Batterie

- Motivation
  - hoher Wirkungsgrad (>75 % Gesamtsystem)
  - lange Lebensdauer, hohe Zyklenfestigkeit (> 10.000)
  - flexibler Aufbau (Trennung von Energiespeicher und -wandler)
  - leicht skalierbar
  - schnelle Ansprechzeit (µs – ms)
  - Überlade- und Tiefentladetoleranz
  - geringer Wartungsaufwand
  - keine Selbstentladung



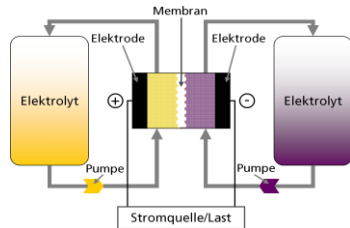
© Fraunhofer ICT

Fraunhofer ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Redox-Flow Batterie

#### Funktionsprinzip



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Redox-Flow Batterie

#### Technologien

Redox-Flow-Batterie (beide elektroaktive Komponenten sind flüssig)	Hybrid-Flow-Batterie (eine elektroaktive Komponente ist fest, eine ist flüssig)
<b>Energieinhalt (Elektronenvolumen) und Leistung (Größe des Reaktors) sind unabhängig voneinander skalierbar</b>	<b>Energieinhalt ist limitiert und steht im festen Verhältnis zur Leistung (Menge feste elektroaktive Komponente im Reaktor)</b>
<b>Kobaltium</b> + $V^{IV}/V^{III}$ + $U^{VI}/U^{V}$ + C-Fix + C-Fix + Polymermatrixreaktor + Membran	<b>Vanadium-Bromid</b> + $VO^{2+}/VO^{3+} + Br^-$ + $Zn^{2+}/Zn$ + C-Graphit-Fix + C-Graphit-Fix + NAFION 112
<b>Polysulfid-Bromid</b> + $S_2^{2-}/S_8^{2-}$ + $S_2^{2-}/S_8^{2-}$ + Graphit, act. C + NAFION 125 (Selenium)	<b>Vanadium-Bromid</b> + $VO^{2+}/VO^{3+}$ + $VO^{2+}/VO^{3+}$ + C + C + NAFION
<b>Eisen-Chrom</b> + $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ + $Cr^{VI}/Cr^{III}$ + C + NAFION	<b>Nickel-Zink</b> + $Ni^{2+}/Ni^{3+}$ + $Zn^{2+}/Zn$ + C + C + Zn + NAFION
<b>Nickel-Zink</b> + $Ni^{2+}/Ni^{3+}$ + $Zn^{2+}/Zn$ + C + C + Zn + NAFION	<b>Vanadium-Chrom</b> + $VO^{2+}/VO^{3+}$ + $Cr^{VI}/Cr^{III}$ + C + NAFION
+ positiver Elektrolyt + negativer Elektrolyt + positive Elektrode + negative Elektrode + Separator	

© Fraunhofer ICT

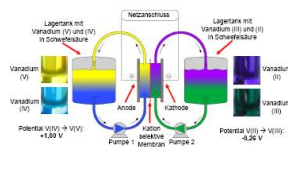
Fraunhofer  
ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### Redox-Flow Batterie

#### Entwicklungsziele

- Vandium Redox-Flow Batterie
- Reduzierung von Anlagen- und Wartungskosten
- neue Elektrolytssysteme für höhere Energiedichten
- Elektrodenoptimierung für mehr Leistung
- Membranentwicklung für geringere Wartungskosten
- Elektrische Systementwicklung



Quelle: VDE Leitstudie 2009

© Fraunhofer ICT

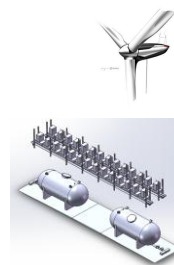
Fraunhofer  
ICT

## Wie unterscheiden sich die Technologien für Energiespeicher?

### RedoxWind

- Entwicklung und Aufbau eines getriebelosen Windrades in Kombination mit einer Redox-Flow-Batterie,

- Schwerpunkt des Projektes ist die Anpassung einer WKA an den Betrieb mit einer RFB
- Nutzung von Synergien / gemeinsamen Komponenten beider Anlagenteile
- Entwicklung einer kostengünstigen Produktionstechnologie für den Stackaufbau in Zielgröße ca 35 kW
- Betriebsführung einer RFB an einem / mehreren WKA, mit Blick auf einen Inselbetrieb (nicht ausschließlich)

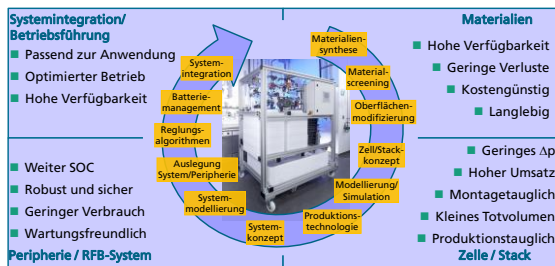


© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT



## Entwicklungsschwerpunkte Redox-Flow-Batterie

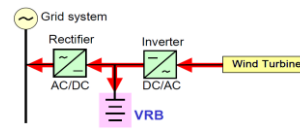


© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## RedoxWind

- getriebeloses Windrad mit 2 MW Leistung, Nabenhöhe 100 m, Gesamthöhe ca. 145 m
- Speicher mit 2 MW Peakleistung und 10 h Speicherzeit (20 MWh)
- Installation des Speichers nach DC/AC Wandlung, Speicher übernimmt teilweise Gleichrichtungsfunktion

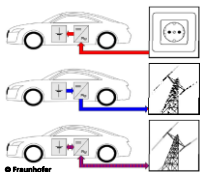


© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Elektroautos als Energiespeicher (Vehicle to grid)?

- Hybridtechnologie bisher nicht dafür vorgesehen**
  - Batterie wird u.a. vom Verbrennungsmotor geladen
- Elektroautos: Lithium-Batterie-Technologie**
  - Viele Automobilhersteller arbeiten an batteriebetriebenen Elektroautos
  - Lastmanagement (sinnvoll)**  
Batterien werden nachts unter Netzaspekten geladen
  - Netz-Besicherung (möglich)**  
Batterien stehen notfalls bereit um Energie einzuspeisen
  - Energiespeicherung / -verschiebung (teuer)**  
Batterien speichern in Schwachlastzeiten und speisen in Hochlastzeiten ein



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Was werden erste Einsatzgebiete von Stromspeicher sein ?

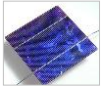
- Inselsysteme / netzferne Gebiete**
  - Diese Gebiete sind zum Teil heute schon ökonomisch erschließbar, da eine Netzanbindung meist zu teuer ist.
  - Verbesserung der Technologie und Senkung der Kosten ermöglicht weit mehr Inselsysteme zu erschließen.
  - Kostendegression durch Standardisierung, Weiterentwicklung, Massenfertigung.
- Netzintegrierte Anwendungen**
  - Gebiete mit Netzengpässen und hoher Einspeisung fluktuierender Energien.



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Fazit



- Integration Erneuerbarer Energien ist ein vorrangiges Problem der Zukunft
- **»Smart Systems«** mit realen und virtuellen **Energiespeichern** können hierzu einen relevanten Beitrag leisten

### Notwendige Technologien

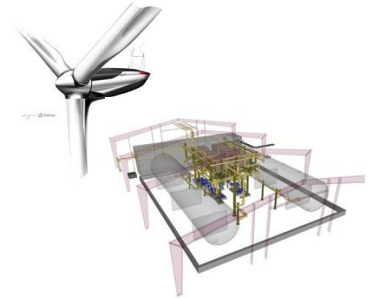
- ▶ Reale Energiespeicher für
  - große Off-Shore Windparks
  - Netznoten
  - dezentrale Einspeiser
- ▶ Virtuelle Energiespeicher
- ▶ IKT Technologie für »Smart Grids« (Smart Metering, Demand Response)



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

## Fazit



- Erzeugungsausgleich
- Spitzenlast
- Regelleistung
- Stabilität
- Netzengpass
- Inselnetze / Micro-Grids
- Lastmanagement
- Spannungshaltung
- Spannungsqualität
- Versorgungsqualität

© Fraunhofer ICT

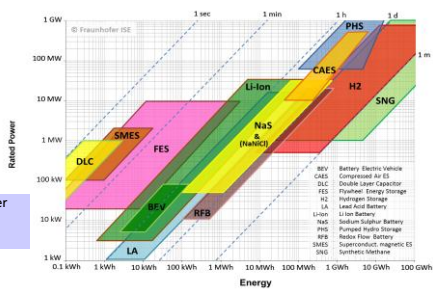
Fraunhofer  
ICT

## Fazit

Verschiedene Speicherprinzipien:

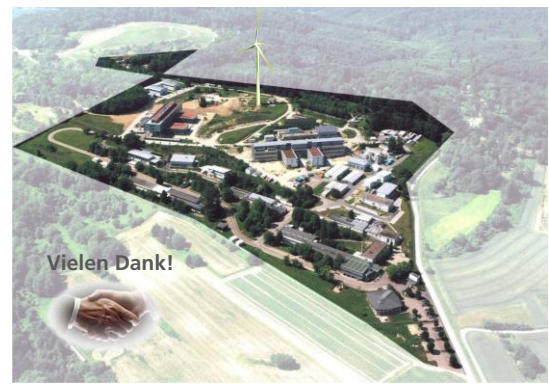
- Elektrochemisch
- Chemisch
- Mechanisch
- Elektromagnetisch

■ Es existiert nicht der eine universelle Speichertyp!



© Fraunhofer ICT

Fraunhofer



Vielen Dank!

© Fraunhofer ICT

Fraunhofer  
ICT

Dr. Karsten Pinkwart  
Angewandte Elektrochemie  
Fraunhofer-Institut für Chemische  
Technologie  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7  
76327 Pfinztal  
Tel.: +49 (721) 4640322  
Fax: +49 (721) 4640318  
Email:  
karsten.pinkwart@ict.fraunhofer.de

