

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen – Lösungen für die Grundlastfähigkeit Erneuerbarer Energien

„Samstags-Uni“ – Freiburg, 26.01.2008

Dirk Uwe Sauer

Juniorprofessur für Elektrochemische Energiewandlung &
Speichersystemtechnik
Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)
RWTH Aachen

Globale Herausforderung

The European Council and the European Parliament have both confirmed the EU's objective to limit average global temperature increase to a maximum of 2°C compared to pre-industrial level.

Commission of the European Communities, January 2007

Daraus folgen aus Klimamodellrechnungen nach Dr. Wolfram Krewitt (DLR) folgende Konsequenzen:

- **Stabilisation der globalen CO₂-Konzentration unter 450 ppm**
- **Reduzierung der durch Energieversorgung verursachten CO₂ – Emissionen von heute 27 Gt/Jahr auf 10 Gt/Jahr in 2050**
- **Mittlere Emissionsrechte pro Kopf in 2050: ~ 1 t CO₂/a**
- **Reduktion heutigen CO₂-Emission in Deutschland auf ein Zehntel**

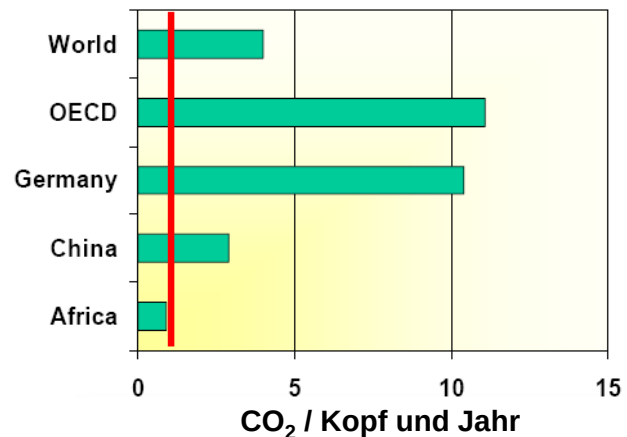
Wolfram Krewitt, *Scenarios of a future decentralised energy supply*,
Symposium Decentralised Energy Systems, Oldenburg, 15./16.02.2007

Wie verträgt sich das mit den „ernsthaften Erwägungen“ von Heiligendamm (G8-Gipfel)?

Angepeilt wird eine Halbierung der CO₂-Emission bis 2050.

Das würde fast reichen, wenn

- weltweit die Bevölkerung nicht wachsen würde und
- alle Länder der Welt den Absolutausstoß um 50% reduzieren.



Aber

- die Bevölkerung wird laut Prognosen bis 2050 von 6 auf 9 bis 10 Milliarden wachsen und
- wodurch soll 2050 noch gerechtfertigt sein, dass die heutigen Industrieländer 5x mehr CO₂ /Kopf ausstoßen dürfen als der Rest der Welt ?

Fragestellung als Grundlage der langfristigen Entwicklungs- und Investitionsentscheidungen

- Wie sehen Energieversorgung und Kraftwerkspark 2050 aus?
- In welcher Form wird Energie genutzt werden und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Versorgungsinfrastruktur?
- Wird es zu Technologiesprüngen kommen, die den Aufbau neuer, paralleler Infrastrukturen notwendig macht,
- oder können die vorhandenen Infrastrukturen auf lange Sicht evolutionär weiterentwickelt werden?
- Welche langfristigen Investitionsentscheidungen in die Versorgungsinfrastruktur müssen getroffen werden?

Wie können die Klimaziele erreicht werden?

- Energieeinsparung
- CO₂-freie Stromerzeugung
 - Erneuerbare Energien
 - Kohle und Gas mit CO₂-Sequestrierung (Clean Coal) (?)
 - Kernspaltung, Kernfusion (??)
- Gasversorgung
 - Migration von Erdgas zu Erdgas- / Biogas- / Wasserstoffgemisch mit dezentraler Einspeisung und steigendem Anteil Biogas und H₂
 - Wasserstoff aus Überschüssen erneuerbare Energien
- Kraftstoff
 - Druckgas (Gemisch wie oben)
 - Synthetische Biokraftstoffe (BTL), weltweiter Handel
- Europäische Vernetzung für Energietransfers (auch mit Nordafrika)

Wichtigste Technologien erneuerbarer Energien

- Strom
 - Wind
 - Solarthermische Kraftwerke
 - Photovoltaik
 - Biogas
 - Tiefengeothermie
 - Wasserkraft
 - Meeresenergie
- Wärme
 - Oberflächennahe Erdwärme
 - Solarthermie
 - Biomasse
- Treibstoffe
 - Biofuels (BTL, 2. Generation)
 - Wasserstoff aus thermochemischen Prozessen oder Elektrolyse



Quelle: GtV e.V.

Konsequenz

**Nur effiziente Wandlungsprozesse und Transportwege
sind akzeptabel.**

**Substitution von kohlenstoffhaltigen Energieträgern aus Gründen
der Ressourcenverfügbarkeit und der Klimaproblematik führt
zwangsläufig zu einem stark steigenden Anteil von Strom als
Endenergieträger.**

**Details im Kraftwerkspark sind für die Betrachtungen zu
Infrastrukturen von nachgeordneter Bedeutung.**

Betrachtung verschiedener Bereiche ...

- Öffentlicher Personennahverkehr
- Individualverkehr
- Einzelwohnhäuser
- Mehrfamilienhäuser und Funktionsgebäude



... in Bezug auf Endenergieträger und Infrastrukturbedarf

Öffentlicher Personennahverkehr

- Innerstädtisch nur noch mit elektrischem Antrieb – mit (Ober-)Leitungen, Batterien, Brennstoffzellen-Hybride



26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 9

Öffentlicher Personennahverkehr

- Innerstädtisch nur noch mit elektrischem Antrieb – mit (Ober-)Leitungen, Batterien, Brennstoffzellen-Hybride
- Infrastrukturbedarf
 - Batterieladestationen an Bushöfen (typ. 100 kW pro gleichzeitiger Busladung)
 - (Ober-)Leitungen
 - Gasversorgung und flüssige Biokraftstoffe



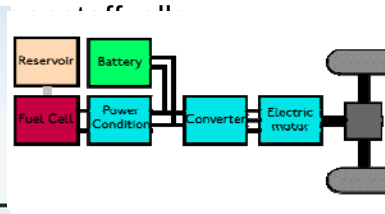
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 10

Individualverkehr

- Innerstädtisch nur noch elektrisch mit Batterien (bis 60 – 100 km/Tag)
- Überland & Autobahn mit Plug-in Hybriden mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle (Biokraftstoff, Druckgas)



26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 11

Individualverkehr

- Innerstädtisch nur noch elektrisch mit Batterien (bis 60 – 100 km/Tag)
- Überland & Autobahn mit Plug-in Hybriden mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle (Biokraftstoff, Druckgas)
- Infrastrukturbedarf
 - Bidirektionale Leistungsfluss in allen Netzsegmenten (5 kW pro Haushalt)
 - Starke Anschlüsse für Parkplätze und Parkhäuser
 - Tankstellen für synth. Biokraftstoffe und Druckgas für Motor oder Brennstoffzelle



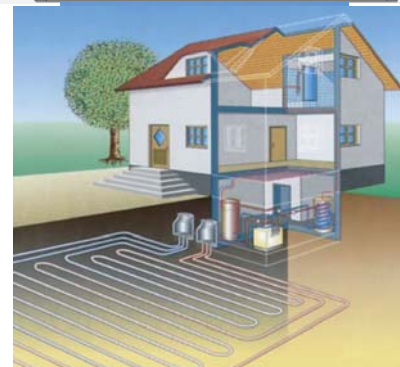
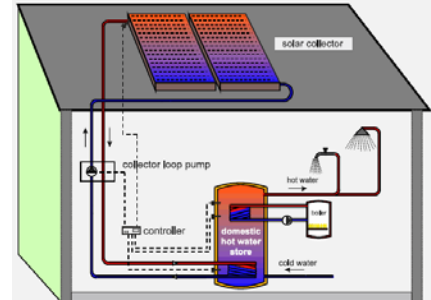
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 12

Energiebedarf in Einzelhäusern

- Thermische Isolation wird Heizbedarf auf weniger als 20 kWh / m² / Jahr senken
- Heizenergie aus Wärmepumpen (~ 600 kWh/Jahr für 120 m²).
- Warmwasser aus thermischen Kollektoren
- Zusätzlicher Strombedarf für Individualverkehr (ca. 1500 kWh / 9.000 km/Jahr)
- „Normaler“ Strombedarf weniger als 50% verglichen mit heute (< 2000 kWh/Jahr)



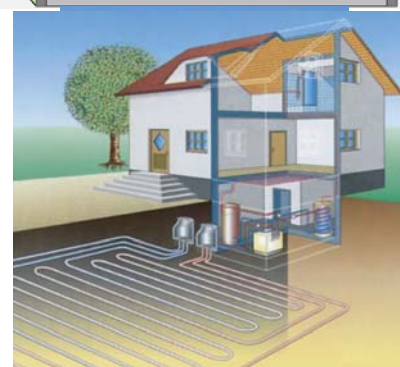
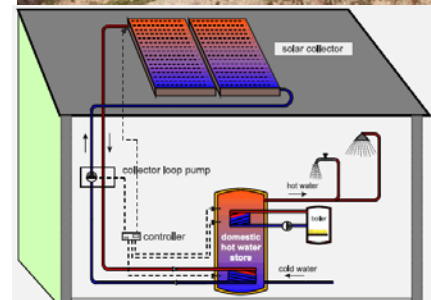
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 13

Energiebedarf in Einzelhäusern

- Thermische Isolation wird Heizbedarf auf weniger als 20 kWh / m² / Jahr senken
- Heizenergie aus Wärmepumpen (~ 600 kWh/Jahr für 120 m²).
- Warmwasser aus thermischen Kollektoren
- Zusätzlicher Strombedarf für Individualverkehr (ca. 1500 kWh / 9.000 km/Jahr)
- „Normaler“ Strombedarf weniger als 50% verglichen mit heute (< 2000 kWh/Jahr)
- Infrastrukturbedarf:
 - Bestehende Stromnetze ausreichend, aber voller bidirektionaler Leistungsfluss
 - Installation von Wärmepumpensystemen



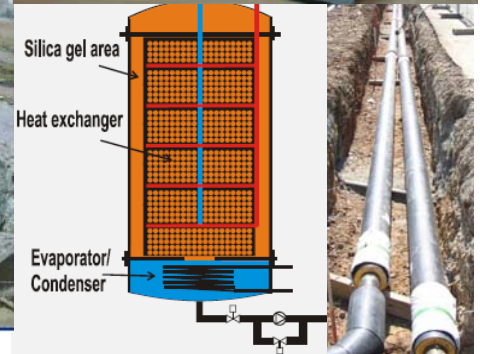
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 14

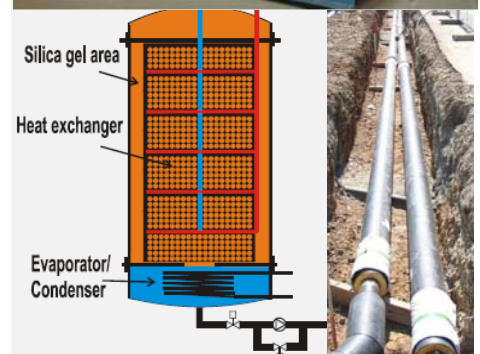
Energiebedarf in Mehrfamilienhäusern und Funktionsgebäuden

- Wärme- und Kältebedarf aus Kraftwärmekopplung (KWK)-Anlagen mit Absorptionskältemaschinen und Wärmespeichern
- KWK-Anlagen mit Gas
- Strom für alle anderen Verbraucher

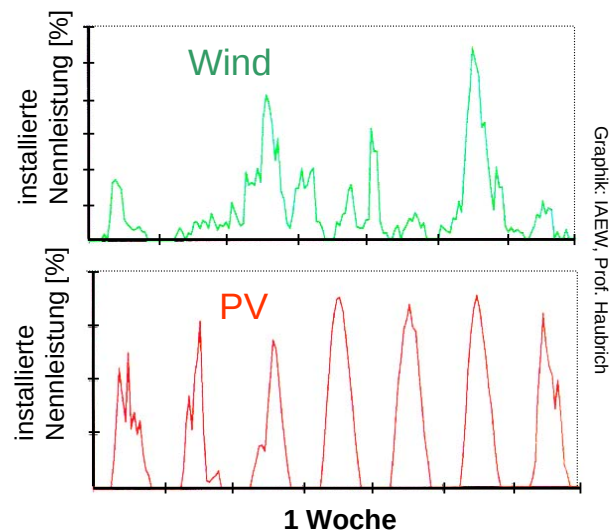
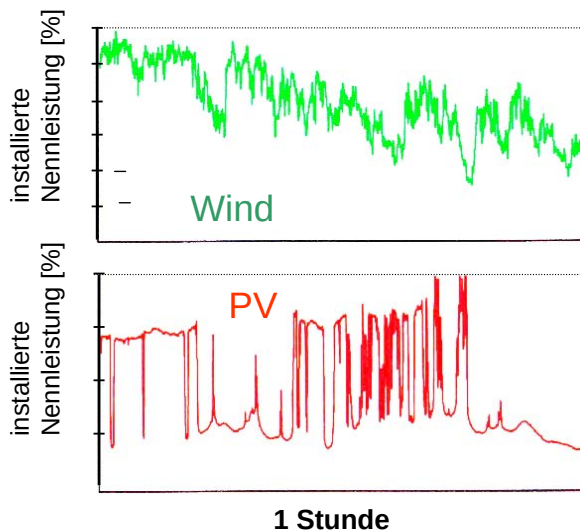


Energiebedarf in Mehrfamilienhäusern und Funktionsgebäuden

- Wärme- und Kältebedarf aus Kraftwärmekopplung (KWK)-Anlagen mit Absorptionskältemaschinen und Wärmespeichern
- KWK-Anlagen mit Gas
- Strom für alle anderen Verbraucher
- Infrastrukturbedarf:
 - Gasversorgung
 - Bi-direktionaler Stromfluss
 - Nahwärme- und Kältesysteme
 - Thermische Speicher (Tagesspeicher und saisonale Speicher)

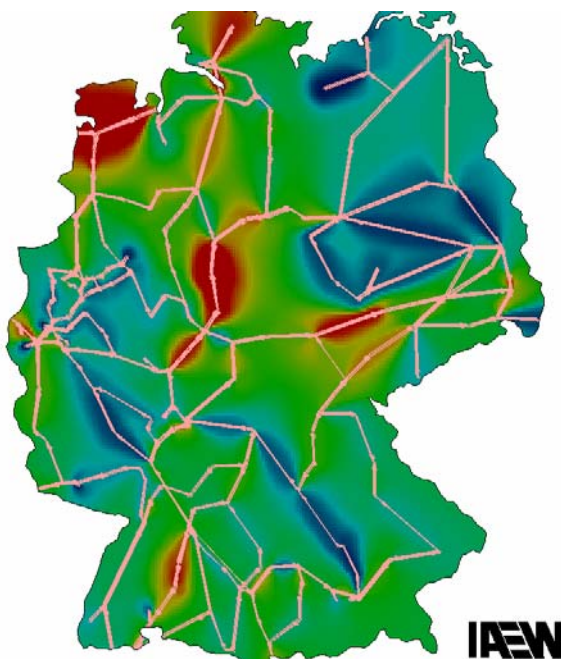


Stark fluktuierende Stromerzeugung aus Solarstrahlung und Wind



Graphik: IAEW, Prof. Haubrich

Konzentration der Stromerzeuger führt zu Überlastungen der Übertragungsnetze



Quelle: IAEW, Prof. Haubrich

- Problem kann gelöst werden durch
 - Bau neuer Übertragungsleitungen
 - Nutzung von Speichersystemen
- Speichersysteme vergleichmässigen die Auslastung

Hochspannungsleitungen in Deutschland. Rote Leistungen sind durch Einspeisung von Windstrom in Norddeutschland überlastet.

Maßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetz bei hohem Anteil erneuerbarer, fluktuierender Stromerzeuger

- stromgeführte Kraft-Wärme-Kopplung
- Doppelnutzung von Speichern für Stromversorgung und Mobilität
- Ausweitung der transnationalen Stromtransportkapazitäten
- Speicher für elektrische Energie

Einsatz thermischer Speicher in KWK-Anlagen

Konsequente Umstellung auf stromgeführte KWK-Anlagen

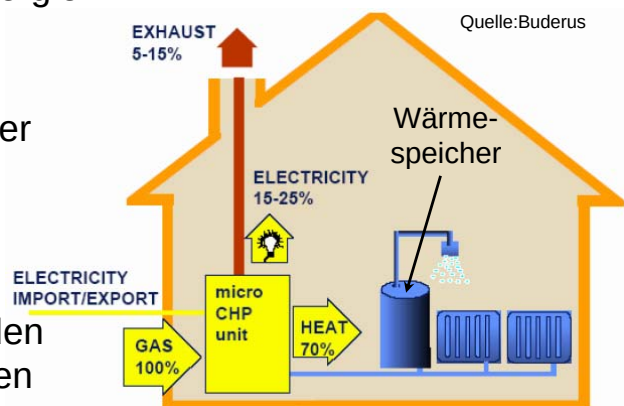
- Thermische Speicher als kostengünstige Alternative zu Stromspeichern
- Tagesspeicher und saisonale Speicher (Erdreichspeicher) für thermische Energie
- Einsatz der KWK-Anlagen als virtuelles, verteiltes Spitzenlastkraftwerk zum Ausgleich fluktuierender Stromerzeugung und Lasten

Aber

- KWK-Anlagen in Einzelhäusern werden bei guter thermischer Isolierung keinen Sinn machen.



Quelle: Buderus



Quelle: DEFU, H. Weldingh

Elektrifizierung des Individualverkehrs



Hybridfahrzeug

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



Plug-in Hybrid

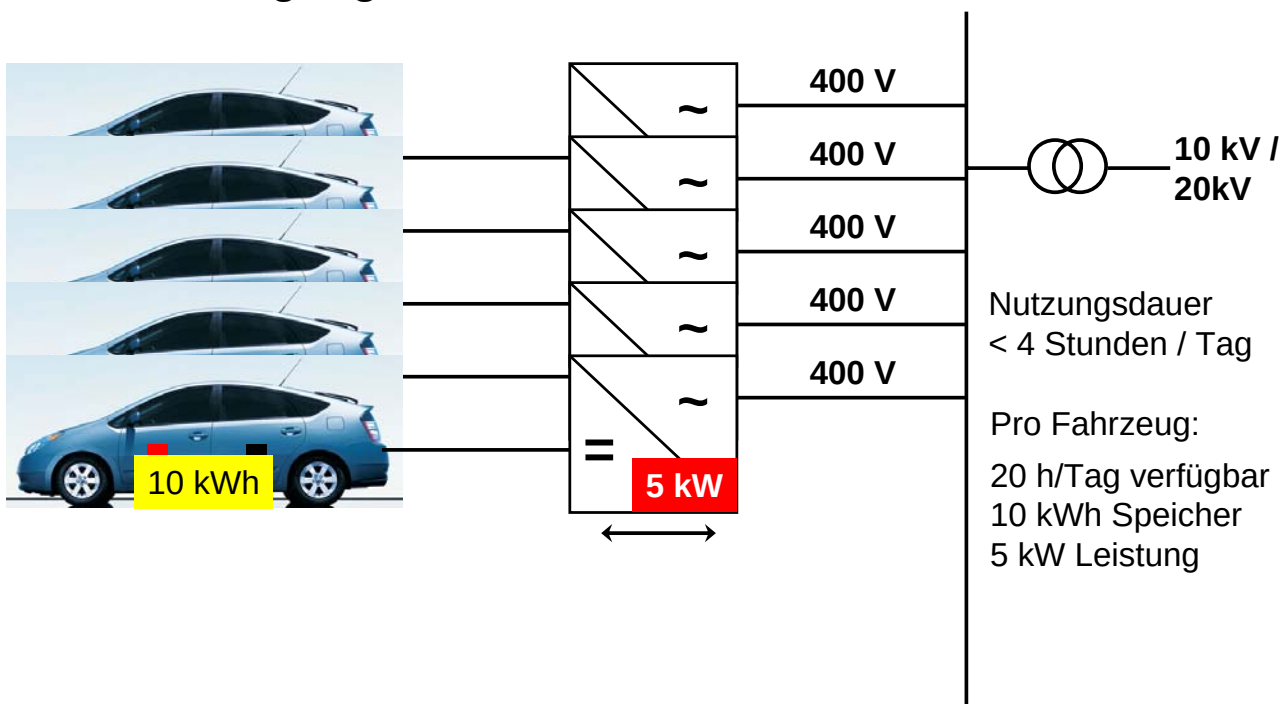
Speicher 5 – 10 kWh, Ladung aus dem Netz, 50 – 70 km Reichweite ohne Treibstoff, volle Reichweite, volle Leistungsfähigkeit



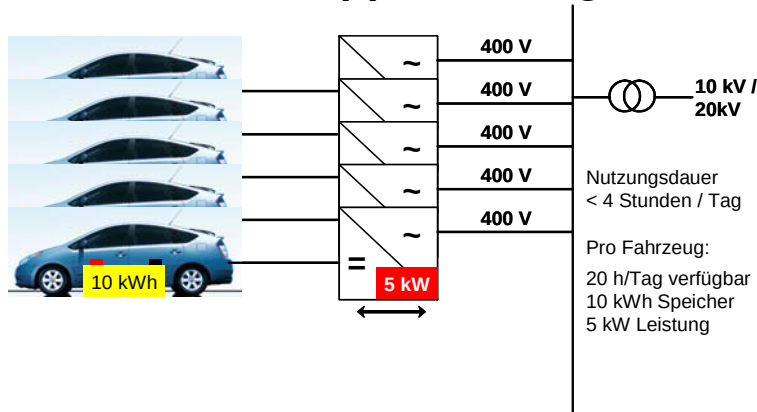
Elektrofahrzeug

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

Chancen der Doppelnutzung von Infrastruktur für Stromversorgung und Mobilität



Chancen der Doppelnutzung von Infrastruktur



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

Finanzierungskonzepte Speicher & Energie für Plug-in Hybride – Szenario „geschenkter Strom“

Szenario:

- Fahrzeughalter kauft Fahrzeug **inkl.** Batterie
- Batterie wird dem Netzbetreiber für Load-Levelling zur Verfügung gestellt
- Randbedingungen: Vollladung zum geplanten Nutzungszeitpunkt ist zu gewährleisten

Annahmen:

- Stromverbrauch 15 kWh/100 km (Stadtverkehr mit reg. Bremsen)
- Stromkosten für Stromversorger 8 ct/kWh
- Elektrische Fahrleistung 12.000 km/a
- Batteriekosten (10 kWh-Modul) bei 3.000 Euro
- Batterielebensdauer 4000 Vollzyklen (8 Jahre)

Finanzierungskonzepte Speicher & Energie für Plug-in Hybride – Szenario „geschenkter Strom“

Ökonomie für Fahrzeughalter:

- Netzbetreiber zahlt Speichernutzung durch Strom (bis 10 kWh/Tag, Reichweite etwa 60 km)
- Fahrzeughalter „spart“ 720 Euro (5 l/100km Diesel, 1,20 €/l)
- Batteriekosten für Fahrzeughalter 522 €/Jahr (Annuität bei 8% Zins)

Ökonomie für Netzbetreiber

- Netzbetreiber erhält Speicher mit 5 kW Leistung und 10 kWh Energie
- Kosten für Netzbetreiber 144 Euro / Jahr (12.000 km, 8 €ct/kWh)
→ ca. 15 €/a / installierte kWh, ca. 30 €/a / installiertes kW

Vergleich mit Pumpspeicherkraftwerk

- 600 Euro/kW Invest., 8 h Speicher, 30 Jahre Abschreibung, 8% Zins
→ ca. 7 €/a / installierte kWh, ca. 53 €/a installiertes kW

Energietransport über große Entfernung in Gleichspannungstechnik

- Freileitungen heute kaum noch durchsetzbar
- Kabeltechnik für hohe Leistungen und vergleichbaren Kosten verfügbar.



Bilder: ABB



Speicher dienen der Netzstabilisierung und Verbesserung der Power Quality

- Blindleistungsbereitstellung
- Phasensymmetrisierung
- Flickerkompensation
- Spannungshaltung

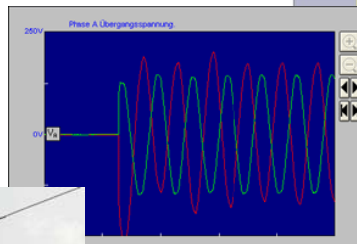
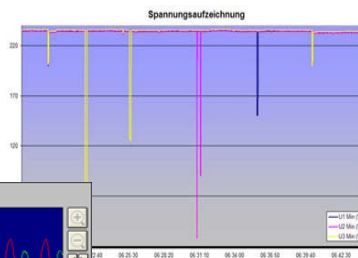


Bild: Wikimedia Commons



Bild: Wikimedia Commons

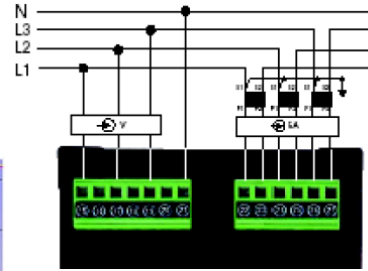


Bild: Chauvin Arnoux

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 27

Speichern im Niederspannungsnetz – Persönliche Optimierung des Strombezugs

- Bei Betrieb eigener Stromerzeuger (Photovoltaik, KWK)
- Differenz zwischen Bezugskosten und Verkaufspreis kann höher sein, als die Kosten für Speicher (ohne Einspeisevergütung)

Beispiel:

Vergütung für Einspeisung 5 ct/kWh

Kosten für Energiebezug 20 ct/kWh

Speicher interessant,

wenn Kosten < 15 ct/kWh



Bild: Wikimedia Commons

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 28

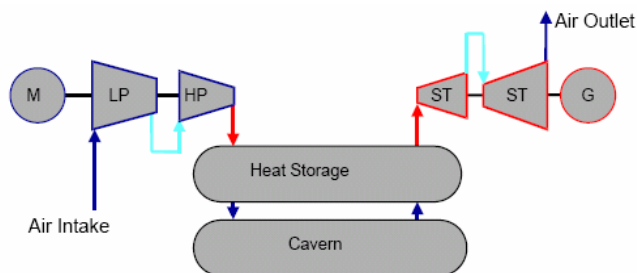
Technologien für zentrale Großspeicher



Wasserstoff mit Kavernenspeichern



Pumpspeicher



Druckluft (mit und ohne Wärmespeicher)



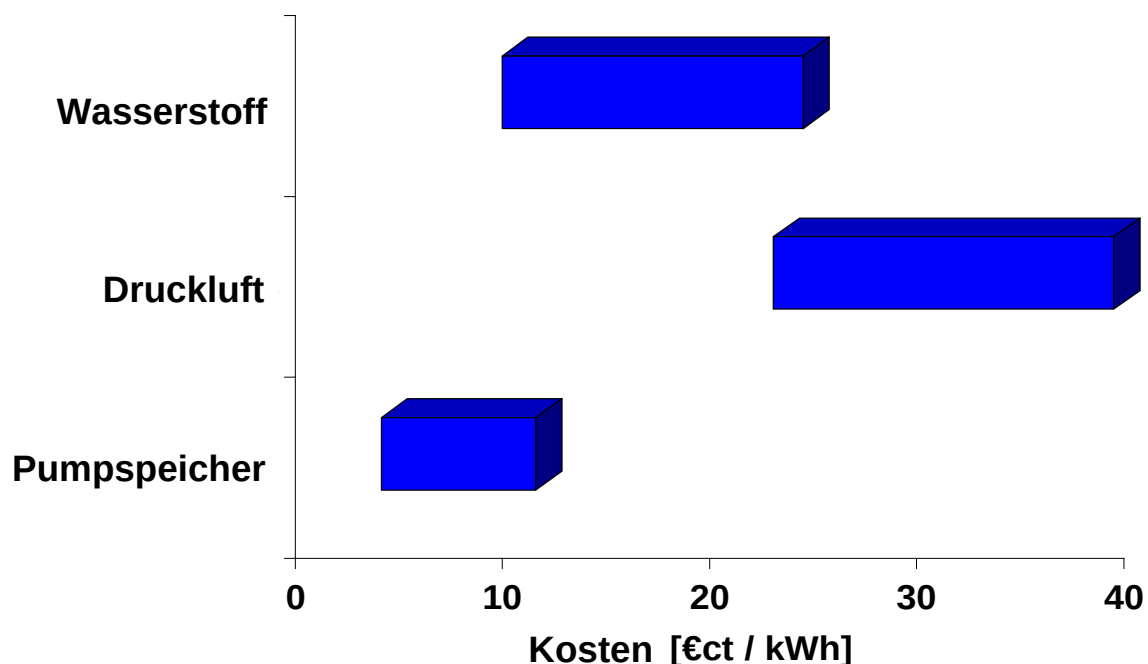
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 29

Kosten für Energie aus Großspeichern („monatlich“)

(500 MW, 100 GWh, ~1,5 Zyklen pro Monat, Zins 8%, Stromkosten 4ct)



Quelle: ENERGY STORAGE FOR IMPROVED OPERATION OF FUTURE ENERGY SUPPLY SYSTEMS, M. Kleimaier, et.al., CIGRE 2008

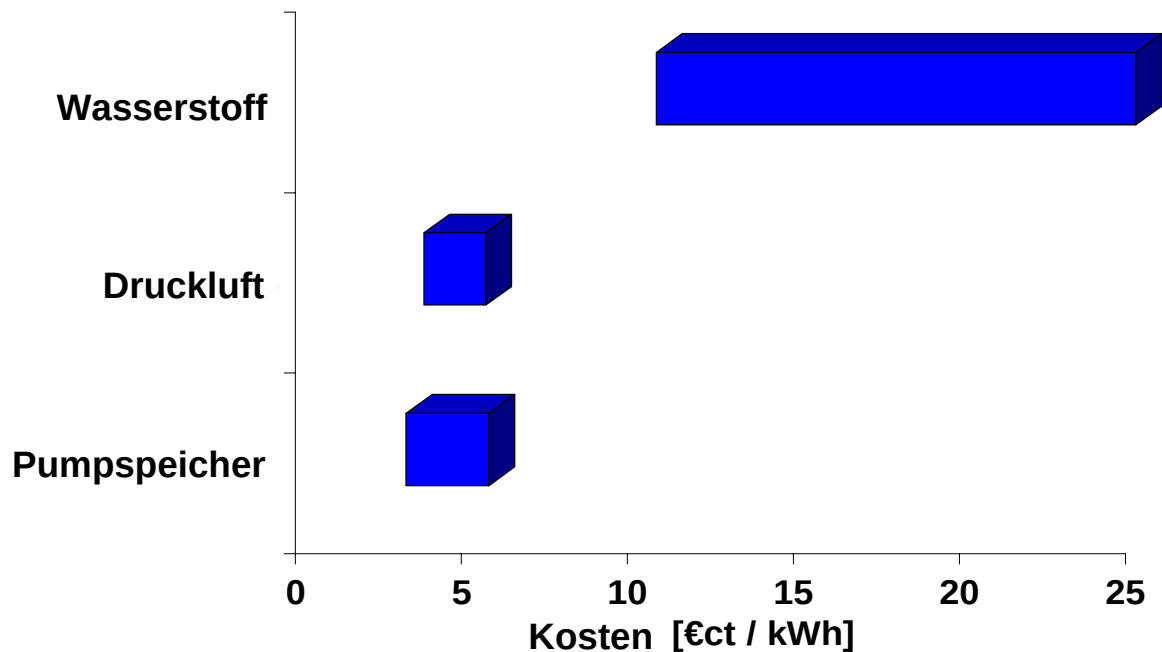
26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 30

Kosten für Energie aus Großspeichern („täglich“)

(1 GW, 8 GWh, 1 Zyklus pro Tag, Zins 8%, Stromkosten 4ct)



Quelle: ENERGY STORAGE FOR IMPROVED OPERATION OF FUTURE ENERGY SUPPLY SYSTEMS, M. Kleimaier, et.al., CIGRE 2008

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 31

Batterietechnologien



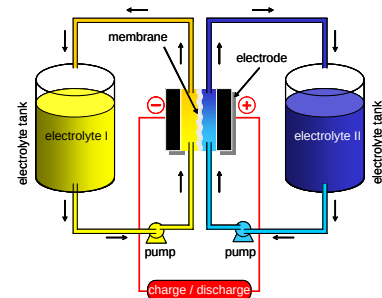
NaS / NaNiCl



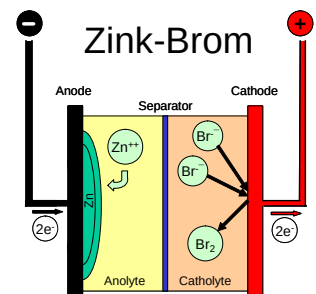
NiCd



Lithium-Ionen



Redox-flow



Bleisäure

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 32

Lithium-Ionen-Batterien

Anode

Kathode



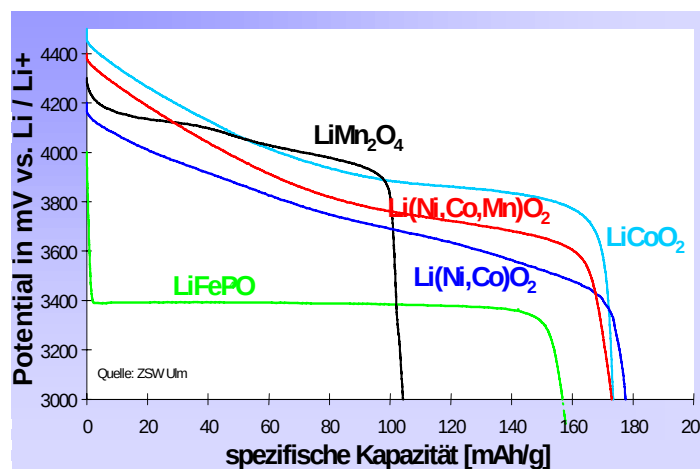
Stärken

- hohe Energiedichte
- gute Leistungsdichte
- große Zahl von Materialkombinationen
- viele Anbieter
- hoher Wirkungsgrad
- gute Lebensdauer bei kleiner Zyklientiefe

Schwächen

- Sicherheit

Lithium-Ionen-Batterien



Stärken

- hohe Energiedichte
- gute Leistungsdichte
- große Zahl von Materialkombinationen
- viele Anbieter
- hoher Wirkungsgrad
- gute Lebensdauer bei kleiner Zyklientiefe

Schwächen

- Sicherheit

Sicherheit von Li-Ionen-Batterien

Erhöhung der passiven Sicherheit der Zellen

- Verbesserte Überdruckventile bzw. Sollbruchstellen
- Verwendung von keramischen Separatoren
- LiFePO_4 als inhärent sicheres Material

Aktive Sicherheit

- Spannungsüberwachung jeder einzelnen Zelle
- Genaues Lade- und Entlademanagement
- Temperaturüberwachung und Kühlkonzepte

Einschätzung des Restrisikos?

Kosten von Li-Ionen-Batterien

heute

- Hochleistungsbatterien bei ca. 1000 Euro / kWh (Kleinserie)

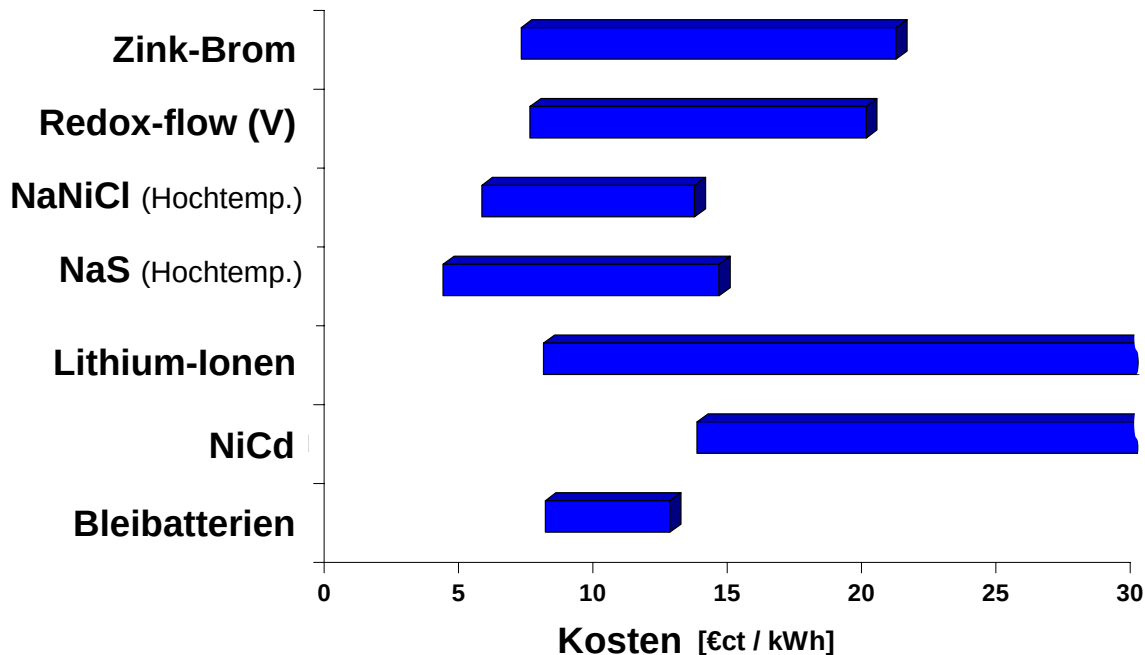
Einschätzung bzw. Marktforderung der erreichbaren Kosten bei Massenproduktion:

- 500 €/kWh für Hochleistungsbatterien
- 300 €/kWh für Hochenergiebatterien

Warum?

- Laptop-Batterien heute bei 220 €/kWh
- Hochenergiebatterien aus China heute schon für 300 €/kWh erhältlich (Markt für Elektrofahrräder), Qualität fraglich

Kosten für Energie aus Speichern im MS-Netz (10 MW, 40 MWh, 2 Zyklen pro Tag, Zins 8%, Stromkosten 4ct)



Quelle: ENERGY STORAGE FOR IMPROVED OPERATION OF FUTURE ENERGY SUPPLY SYSTEMS, M. Kleimaier, et.al., CIGRE 2008

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 37

Energiespeicher vs. Energietransport

- Übertragungsnetz ist Rückgrat der europäischen Stromversorgung.
- Vor- und Nachteile von Speichern und Übertragungsnetzen:

Speichersysteme

- Wirkungsgrad abhängig Technologie (30 - 90% Strom in Strom)
- sehr flexibel in Bezug auf Leistung und Energiekapazität
- verringert Abhängigkeit von Drittstaaten durch Erhöhung der Energieautonomie
- Erhebliche Kosten

Übertragungsnetz

- hoher Wirkungsgrad (HVDC ~ 5% Verluste / 1000km)
- Erdkabel für große Leistungen verfügbar
- teuer in dünn besiedelten Gebieten
- Internationale Kooperation und Stabilität notwendig
- Planung und Bau sehr zeitaufwändig.

26.01.2008
Dirk Uwe Sauer

Strom-, Wärme- und Verkehrssektor wachsen zusammen

Folie 38

Zusammenfassung

- Stromnetze werden die einzige Infrastruktur der „letzten Meile“ für Einzelwohnhäuser und das Rückgrat des transnationalen Energieaustauschs.
- Gasnetze werden nur noch große Wohn-, Geschäfts-, Industrie- und Verwaltungseinheiten anschließen.
- Strom wird im Individualverkehr die dominierende Endenergie.
- Speicher in Fahrzeugen werden alle Probleme der Netzstabilität auf der Zeitskala eines Tages lösen können.
- Intelligentes Energiemanagement von verteilten Verbrauchern, Speichern und Erzeugern ist die zentrale Herausforderung.
- Es werden keine neuen, parallelen Energieversorgungsinfrastrukturen benötigt.



Es gibt viel zu tun, aber die Technologien sind da und der Übergang wird kontinuierlich, wenn wir heute beginnen.

Kostenberechnung

