

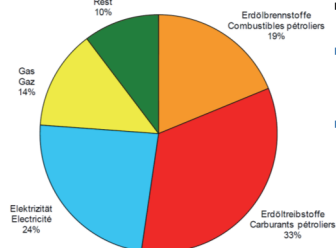


Die Rolle zentraler und dezentraler Speicher für die Energiewende

Dr. Andreas Ulbig, Power Systems Laboratory, ETH Zürich

Ausgangslage – Energieverbrauch in der Schweiz

Endenergieverbrauch 2013
Consommation finale d'énergie 2013
(Total: 896'000 TJ)

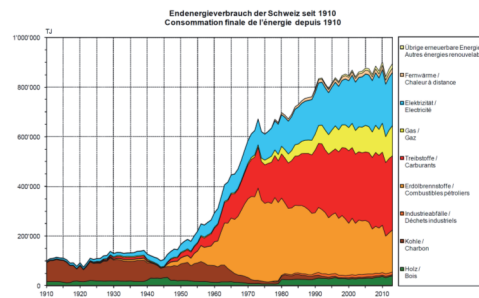


CH – Endenergieverbrauch

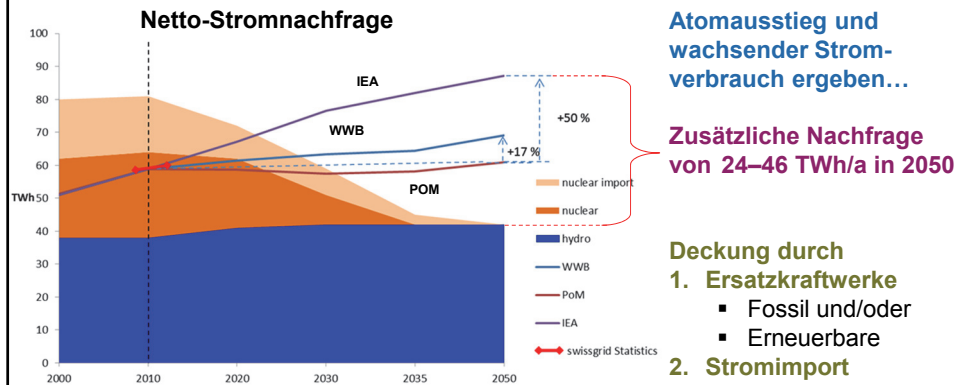
- 1945 – 1990: Verfünffachung
- seit ca. 1990: Stagnation
- bis 2050: starke Reduktion notwendig (–80% CO₂)

➤ Energiestrategie 2050

- 1/4 Stromverbrauch (Wasser, Kern, Kehrlicht)
- 1/3 Erdöltreibstoffe (Mobilität)
- 1/5 Erdölbrennstoffe (Wärme)
- Trend I** Substitution von fossilen Brennstoffen durch Strom (Wärmepumpen, Elektromobilität)
- Trend II** fluktuierende Produktion (Wind, PV)



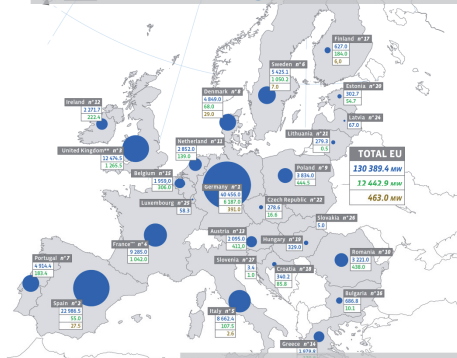
Interne Einflüsse auf das Schweizer Stromnetz (ES2050)



Externe Einflüsse auf das Schweizer Stromnetz (Ende 2014)

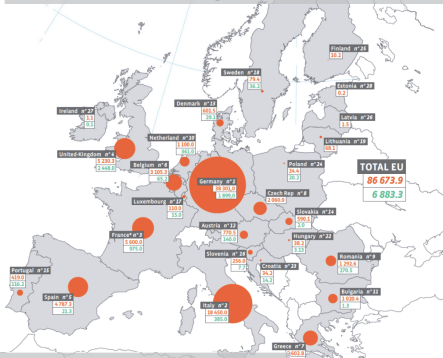
Installed wind power capacity in European Union at the end of 2014* (MW)

130 GW installierte Leistung
247 TWh Windenergie (+50% seit 2011)



Photovoltaic capacity connected in the European Union in 2014* (MWp)

87 GW installierte Leistung
91 TWh Solarenergie (+100% seit 2011)



11% der europäischen Stromerzeugung

Key

130 350.4 GW Installed capacity to date in the countries of the European Union at the end of 2014 (MW)

24 427.9 TWh Capacity installed in the countries of the European Union (2011-2014)

45.9 GW Capacity decommissioned during 2014 (MW)

Key

87 024.9 GW Cumulated photovoltaic capacity in the European Union countries in 2014 (MWp)

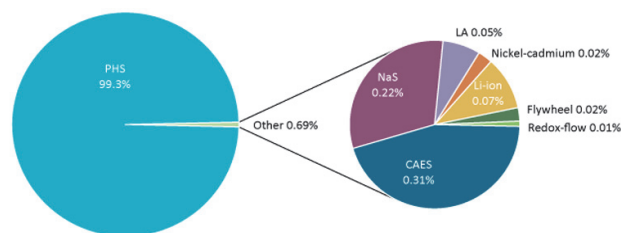
1 883.3 TWh Photovoltaic capacity connected in the European Union countries during the year 2014 (MWp)

Gliederung

- **Einführung – Rolle von Speichern in Stromnetzen**
- **SATW-Speicherstudie I – zentrale Speicher**
 - Rolle von Grossspeichern (Speicherseen, Pumpspeicher) für Landesversorgung und Flexibilitätsbereitstellung
- **SATW-Speicherstudie II – dezentrale Speicher**
 - Chancen und Herausforderungen dezentraler Speicher (Batterien und Lastmanagement)
- **Ausblick**

Speicher im Stromnetz – Globaler Überblick (2010)

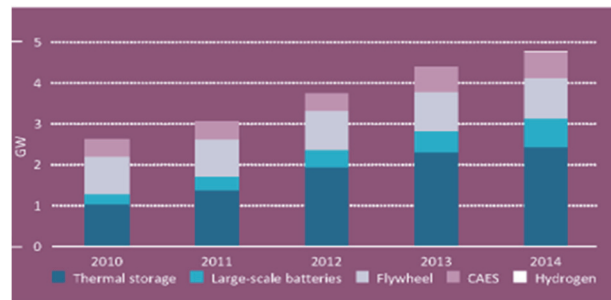
- **141 GW weltweit installierte Stromspeicherkapazität** (Jahr 2010)
 - < 3% der Stromproduktionsleistung (5'250 GW)
 - > 99% der Speicherkapazität sind Pumpspeicher
- **CH-Situation** (BFE Elektrizitätsstatistik 2014)
 - 1.8 GW Pumpspeicher + 8.0 GW Speicherseen
 - **Entspricht 10–50% der Gesamtleistung (18.6 GW)**



Global installierte Stromspeicherkapazität im Jahr 2010 (IEA, ETP 2014).

Speicher im Stromnetz – Globaler Überblick (2015)

- **nur** noch 97% der Speicherkapazität sind Pumpspeicher
- **Trends der letzten 10 Jahre**
 - Versechsfachung der Batteriekapazitäten (120 MW → 690 MW)
 - Verzehnfachung thermischer Speicherkapazität (250 MW → 2'420 MW)
 - Stand in der Schweiz: ca. 3 MW netzgebundene Batteriespeicher



Global installierte Stromspeicherkapazität (IEA, ETP 2015).

Speicher im Stromnetz – Anwendungen

- Langfristige Energiespeicherung**
 - Saisonaler Energieausgleich (Sommer / Winter)
- Kurzfristige / Mittelfristige Energiearbitrage**
 - Tag/Nacht-Energieausgleich (bis zu Wochen ausgleich)
 - Optimierung am Strommarkt
- Systemdienstleistungen (SDL)**
 - Primär-, Sekundär- und Tertiärfrequenzregelung
 - Blindleistungs- und Spannungsregelung

langsam

Flexibilitäts-
bereitstellung
auf Zeitachse

schnell

Kategorisierung von Speichertechnologien und Netzebenen 1–7 (NE 1–7).

Speichertechnologie	Leistungskapazität	Energiekapazität	NE1	NE2	NE3	NE4	NE5	NE6	NE7
Batterien (Haus/Auto)	kW	kWh							
Batterien (Industrie)	MW	MWh							
Lastmanagement (Haus)	kW	kWh							
Lastmanagement (Industrie)	MW	MWh–GWh							
Chemische Speicher (P2G)	kW–MW	GWh–TWh							
Pumpspeicher	MW–GW	MWh–GWh							
Saisonale Speicherseen	MW–GW	GWh–TWh							

Speicher sind auf allen Netzebenen vorhanden & liefern vor allem Flexibilität.

Gliederung

- Einführung – Rolle von Speichern in Stromnetzen
- **SATW-Speicherstudie I – zentrale Speicher**
 - Rolle von Grossspeichern (Speicherseen, Pumpspeicher) für Landesversorgung und Flexibilitätsbereitstellung
- **SATW-Speicherstudie II – dezentrale Speicher**
 - Chancen und Herausforderungen dezentraler Speicher (Batterien und Lastmanagement)
- **Ausblick**

SATW Speicherstudie I

SATW



Ist das geplante Stromsystem der Schweiz für die Umsetzung der Energiestrategie 2050 aus technischer Sicht geeignet?

Die Bundesrat hat das Richtwerk für Energie 2050 im Auftrag einer Energiestrategie für das Jahr 2050 ausarbeiten lassen. Ein zentraler Bestandteil dieser Strategie ist die geplante Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien. Die Bundesrat hat die Aufgabe gestellt, das Stromsystem der Schweiz so zu gestalten, dass es die Anforderungen der Energiestrategie 2050 erfüllt. Die Bundesrat hat die Aufgabe gestellt, das Stromsystem der Schweiz so zu gestalten, dass es die Anforderungen der Energiestrategie 2050 erfüllt.

SATW

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

Simulationen des Stromsystems der Schweiz im Jahr 2050

- **Veröffentlichung: Mai/Juni 2014**
www.satw.ch/publikationen/stromsystem

- **Ziele:**
 1. **Plausibilisierung und Analyse der Eignung des Schweizer Stromnetzes für die BFE Energiestrategie 2050.**
 2. **Auswirkungen auf die Speicherbewirtschaftung (Pumpspeicher und saisonale Speicherseen).**

- **Durchführung:**
 1. **Zeitlich hochauflösende Simulationen**
 2. **Europäisches Netzmodell**

Jahres/Saisonal-Energiebilanz erfüllt?

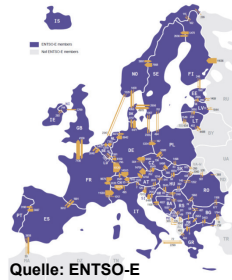


Stündliche Leistungsbilanz erfüllt trotz Wind & PV und Netzlimiten..?

Modellierung & Simulation des Europäischen Stromnetzes

Europäisches Stromnetz

Kraftwerkspark, Pumpspeicher, Speicherseen, Verbrauch, Netzkapazitäten (Länderebene), (basierend auf öffentlichen Daten)



Schweizer Stromnetz

5 Regionen basierend auf kantonalen Statistiken: Modellierung von Laufwasser, Pumpspeicher, Speicherseen, Wind, PV, Strombedarf, Wetter-Daten, ... (BFE/BFS, MeteoSchweiz, swissgrid)



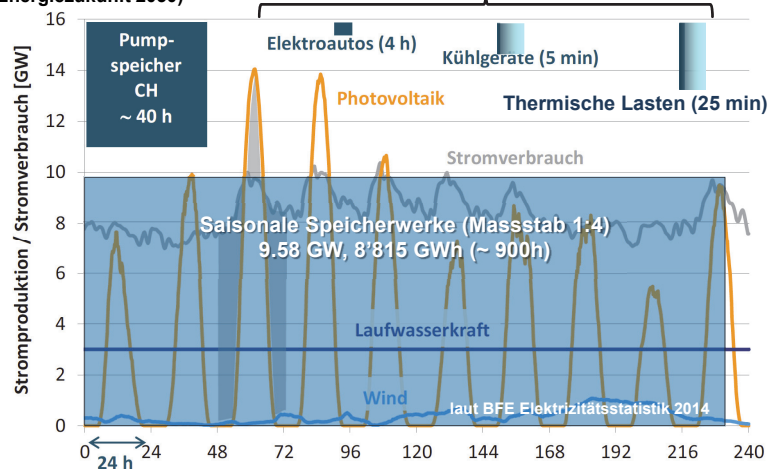
Integrierte
Netzsimulation

Prädiktiver Kraftwerks-Einsatz basierend auf Kraftwerkskosten, vorhandener Prognosedaten (Last, Wind, PV) und Lastfluss-Berechnungen (Engpässe).

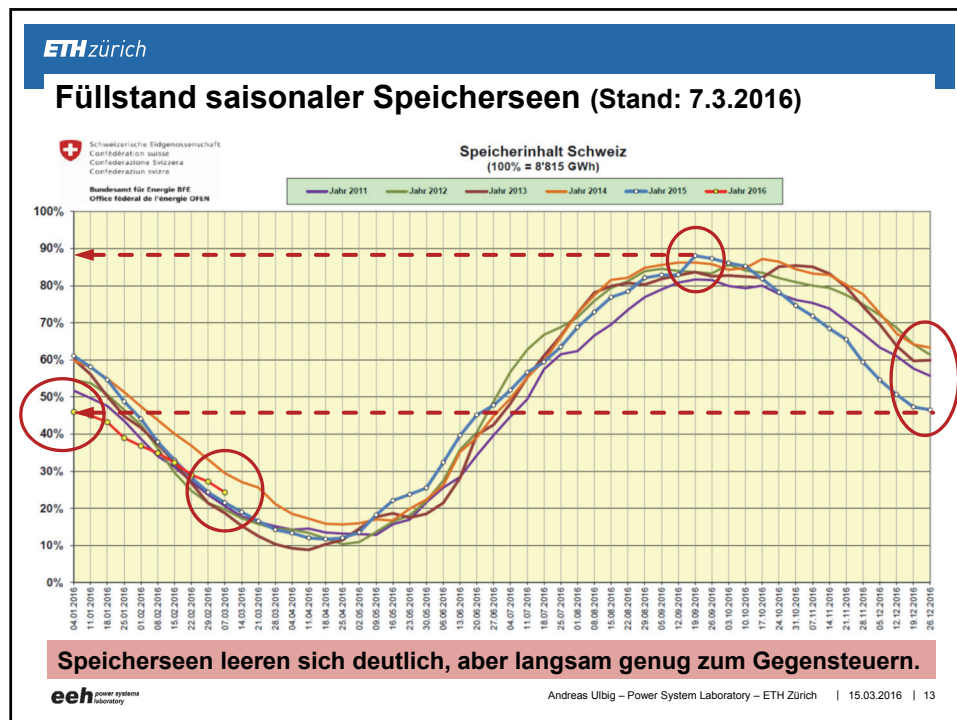
Illustrativer Vergleich – Stromspeicher & Lastmanagement in CH

Hypothetische Sommerwoche im Jahr 2050
(ETH Energiezukunft 2050)

Verteilnetz



Speicherseen & Pumpspeicher liefern grosse Leistungs-/Energiekapazitäten. Dezentrale Speicher sind dafür direkt im Verteilnetz installiert.



ETH zürich

SATW Speicherstudie I – Wichtigste Ergebnisse

Annahme Strategisches Netz 2020 & anstehende Pumpspeicher-Projekte realisiert.

- Versorgungssicherheit der Schweiz gewährleistet**
 - für alle BFE-Szenario-Kombinationen als auch
 - für ein deutlich höheren Stromverbrauch (+50%, 89TWh)
 - auch in Extremfällen (kein Stromimport, keine Wind & PV-Produktion)
- Notwendigkeit von Ersatzkraftwerken (Gas)**
 - nicht unbedingt notwendig, nützlich als Reservekraftwerke
 - reduzieren Nettostromimport, erhöhen aber Erdgasimport deutlich
- Potenzial der Photovoltaik (PV) in der Schweiz**
 - BFE-Ziel (11TWh) kann vollständig integriert werden
 - auch doppelt so hoher PV-Ausbau integrierbar
- Rolle der Pumpspeicher & Speicherseen**
 - entscheidende Rolle bei Sicherung der Stromversorgung
 - andere Speicherbewirtschaftung als heute

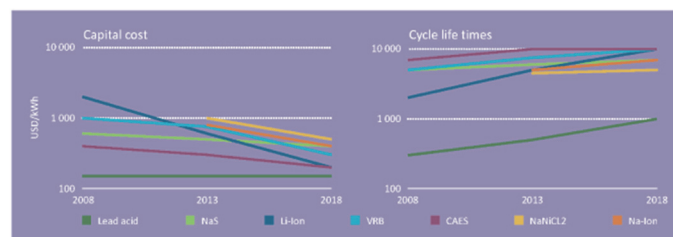
eeh power systems laboratory

Andreas Ulbig - Power System Laboratory - ETH Zürich | 15.03.2016 | 14

Gliederung

- Einführung – Rolle von Speichern in Stromnetzen
- SATW-Speicherstudie I – zentrale Speicher
 - Rolle von Grossspeichern (Speicherseen, Pumpspeicher) für Landesversorgung und Flexibilitätsbereitstellung
- SATW-Speicherstudie II – dezentrale Speicher
 - Chancen und Herausforderungen dezentraler Speicher (Batterien und Lastmanagement)
- Ausblick

Speicher im Stromnetz – Batteriekosten & Projekte



Entwicklung von Batterie-Investitionskosten und Speicherzyklen (2008–18), IEA

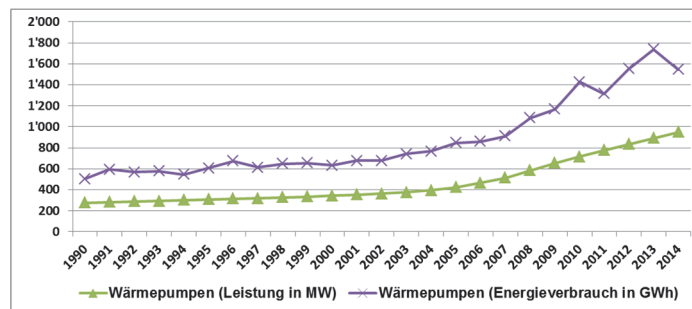
Auswahl Batterie-Grossspeicher-Projekte (weltweit)

- 2012: 1MW/580kWh Li-Ion, Dietikon ZH, EKZ/ABB (ETH)
- 2013: 2MW Li-Ion, Berlin, Vattenfall
- 2014: 20MW/40MWh Li-Ion, Hong Kong, BYD
- 2014: 5MW/5MWh Li-Ion, Schwerin, WEMAG/Younicos
- 2015: 250kW/719kWh Li-Ion, Zürich, ewz/Helion
- 2015: 1MW/500kWh Li-Ion, EPFL Campus, Leclanché/Romande Energie
- 1986–94: 17MW/14.4MWh, Blei, West-Berlin, BEWAG
- 1988–97: 14MW/40MWh, Blei, Chino (Kalifornien), SCE
- 2003– : 27MW/7MWh, Ni-Cd, Fairbanks (Alaska), GVEA/ABB

} SDL-Lieferung
für Spezialfälle

Speicher im Stromnetz – Lastmanagement

- **Starkes Wachstum flexibler thermischer Lasten (Wärmepumpen)**
 - Seit 1990 **Verneunfachung Wärmepumpen-Anzahl** (244'000, BFE 2014)
 - ca. 1 GW installierte Leistung,
 - ca. 1.5 TWh /a Stromverbrauch (= 2–3% des Landesverbrauchs)
 - ca. 5 TWh/a Wärmebereitstellung (3.5 TWh/a erneuerbar aus Erdsonden)



Dezentrale Speicher – Bewertung Einsatzfälle

Technische Bewertung des Energiespeicher-Einsatzes im Verteilnetz

Anwendungen	Batterie NE7	Batterie NE5	DSM	Grossspeicher
Primärfrequenzregelung (PFR)	+	++	+/-	(P)SKW
Sekundärfrequenzregelung (SFR)	+	+	+	(P)SKW
Spannungsregelung	++	+	+	Kein Einfluss (NE1)
Peak-Reduktion	+	+	+	-
PV-Integration	+	0	+	-
Energiearbitrage	+	+	+	(P)SKW
saisonale Energiespeicherung	--	--	--	Speicher-KWs

→ **Vermeidung von Verteilnetzausbau** ► Verringerung Netzbelastung

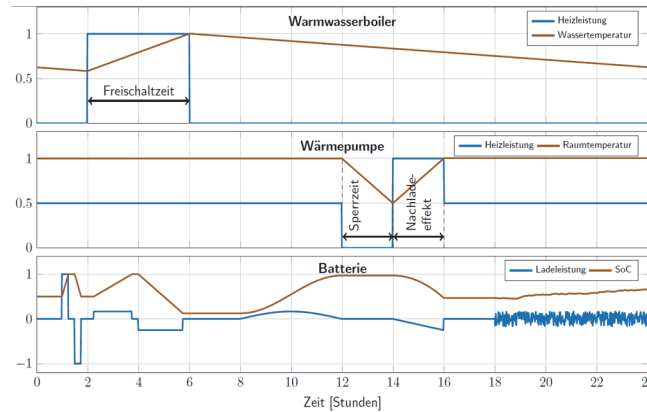
→ **Prosumer-Thematik** ► Einbindung Endverbraucher in Netzbetrieb

Dezentrale Speicher eignen sich für schnellen Leistungsausgleich (SDL) und lokale Aufgaben (Spannungsregelung, Peak-Reduktion, PV-Integration).

Flexibilitätsbereitstellung durch dezentrale Speicher

Weniger
Flexibilität

Mehr Flexibilität



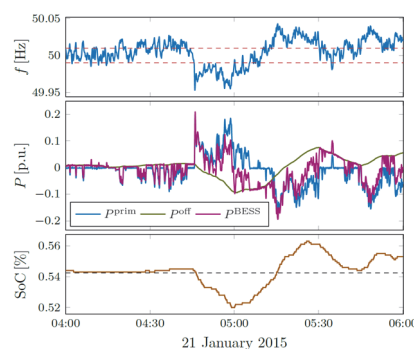
Normierte Ladeleistung / Ladezustand flexibler Lasten & Batterien.
Quelle: T. Borsche, ETH PSL 2015

Lastmanagement heute oft nur bedingt flexibel, obwohl das technische Potenzial deutlich höher wäre (Flaschenhals: begrenzte Schaltzeiten, IKT).

Dezentrale Speicher – Praxis-Anwendung (SDL)

Primärfrequenzregelung durch 1 MW Batteriesystem

- Maskierung der Energiebeschränkung durch **Nachladestrategie**



Zurich 1 MW Batterie, Dietikon ZH.

Reaktion der Zurich 1MW Grossbatterie (BESS) auf einen Kraftwerksausfall.

Oben: Verlauf der Netzfrequenz. Mitte: Gefordertes Primärregelsignal (P_{prim}), Leistungsabgabe des BESS (P_{BESS}) und Nachladeleistung (P_{off}). Unten: Ladezustand (State-of-Charge, SoC).

Quelle: M. Koller, M. González-Vaya, A. Chacko, T. Borsche, A. Ulbig, CIGRE 2016 Session

Batterien liefern auch bei grossen Ausfällen die notwendige Leistung.

Stromspeicher – Grössenvergleich

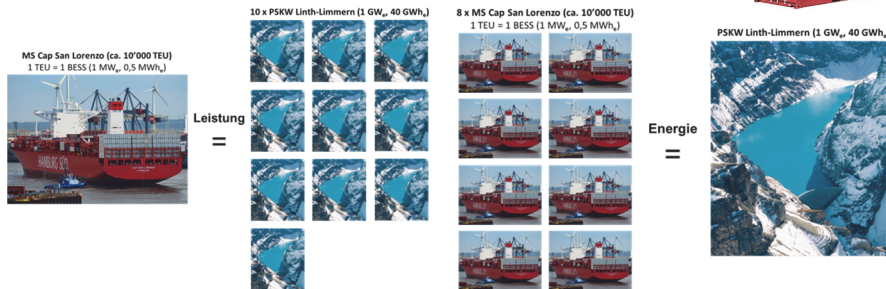
Pumpspeicherkraftwerk – PSKW Linth-Limmern

- Leistungskapazität: 1000 MW_e Pump-/Turbinenbetrieb
- Energiespeicherkapazität: 40.9 GWh_e, Speicherdauer: ca. 41h



Grossbatterie – Zurich 1 MW Batterie, Dietikon ZH

- Leistungskapazität: 1.0 MW_e Lade-/Entladeleistung
- Energiespeicherkapazität: 0.5 MWh_e, Speicherdauer: 0.5 h



Batterien liefern hohe Leistungs- aber nur geringe Energiekapazität.

Stromspeicher – Einsatzvergleich (Energiearbitrage)

Vergleich Pumpspeicher – Batteriespeicher

- **ähnlicher Wirkungsgrad: ca. 80–90% Speicherzyklus-Effizienz**
- **Fall 1: Speicherung von Strom-Import/Export durch PSKW**
zentral Netz NE1 → Pumpspeicher → Netz NE1
▶ **Netzverluste: 2–4%**
- **Fall 2: Speicherung von Stromproduktion aus PV-Anlagen (NE7)**
b) zentral PV Anlage NE7 → Trafo NE6 → Netz NE 5 → Trafo NE 4 → Netz NE3 → Trafo NE2 → Netz NE1 → Pumpspeicher → Netz NE1 → Trafo NE2 → Netz NE3 → Trafo NE4 → Netz NE5 → Trafo NE6 → Verbraucher NE7
▶ **Netzverluste: 12–22%!**
- a) dezentral PV-Anlage NE7 → Batteriespeicher → Verbraucher NE7
▶ **Netzverluste: ≈0% (selbes Haus) / ca. 2% (Nachbarschaft)**

Batterien können Netzverluste bei PV-Integration vermeiden helfen.

Stromspeicher – Synergiepotenzial

Synergien Pumpspeicher – Batteriespeicher

- **Verkoppelung hoher Reaktionsfähigkeit von dezentralen Energiespeichern mit Leistungs-/Energiekapazität von PSKW**
 - **Reduktion der mechanischen Belastung** der (Pump-) Speicherturbinen
 - **Technische Leistungsfähigkeit von Grossspeichern verbessern** durch hohe Reaktionsgeschwindigkeit von dezentralen Speichern
- **Dezentrale Speicher als Ergänzung der Leistungsbereitstellung von neuen PSKW für Stromverbrauchs-/Produktionsspitzen**
 - **Kurzfristig verfügbare zusätzliche Leistungsreserven** für Grossspeicher durch dezentrale Speicher

Synergiepotenzial zentraler und dezentraler Speicher: Addition der jeweiligen technischen Stärken & Maskierung technischer Schwächen.

Ausblick

- Sowohl Grossspeicher als auch dezentrale Energiespeicher sind für die zukünftige Stromversorgung wichtig
- Bedeutung von Speichern wird in Zukunft wieder zunehmen
 - Zunahme der absoluten Fluktuation Erneuerbarer Energien
 - Abbau Kraftwerksüberkapazitäten (alte Kohlekraftwerke, ...)
 - mehr Nachfrage nach flexibler Spitzenlast und Speichern

Empfehlungen

- Technologische Vorteile von dezentralen Speichern nutzen (idealerweise in Kombination mit PSKW)
- SDL-Regularien für dezentrale Speicher sinnvoll weiterentwickeln (niedrige Eintrittshürden schaffen)

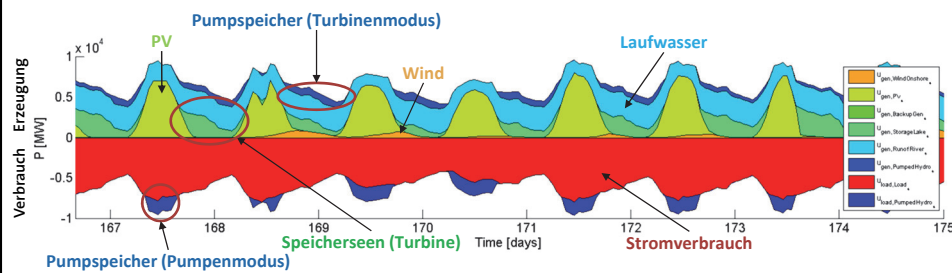
Backup

Veränderung der Speicherbewirtschaftung

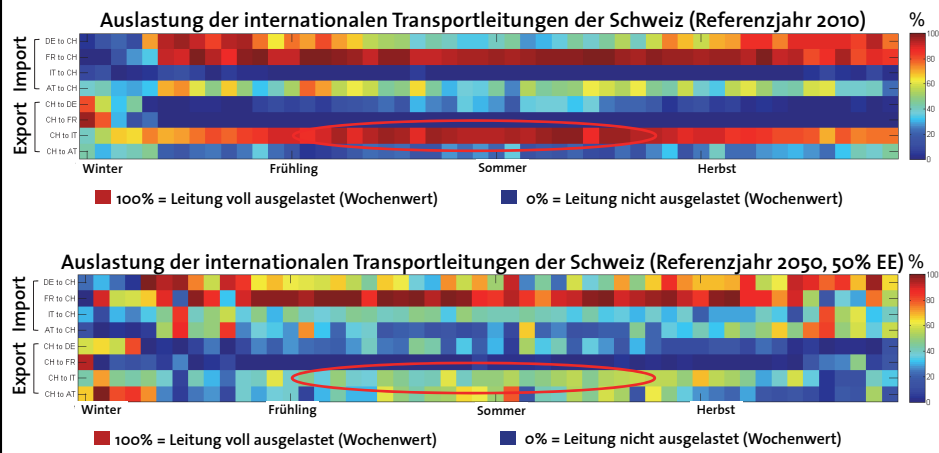
In SATW-Studie: Prädiktiver Dispatch flexibler Kraftwerks-/speichertypen

➤ Modelprädiktive Optimierung (engl. Model Predictive Control)

- Optimierung basierend auf marginalen Kraftwerkskosten und Wasserwert
- Explizite Berücksichtigung von Vorhersage-Zeitreihen (Last, Wind, PV, Wasser)
- Netztransport-Limite



Veränderung der Lastflüsse um die Schweiz



Quelle: Farid Comaty, Andreas Ulbig, ETH PSL, 2013