



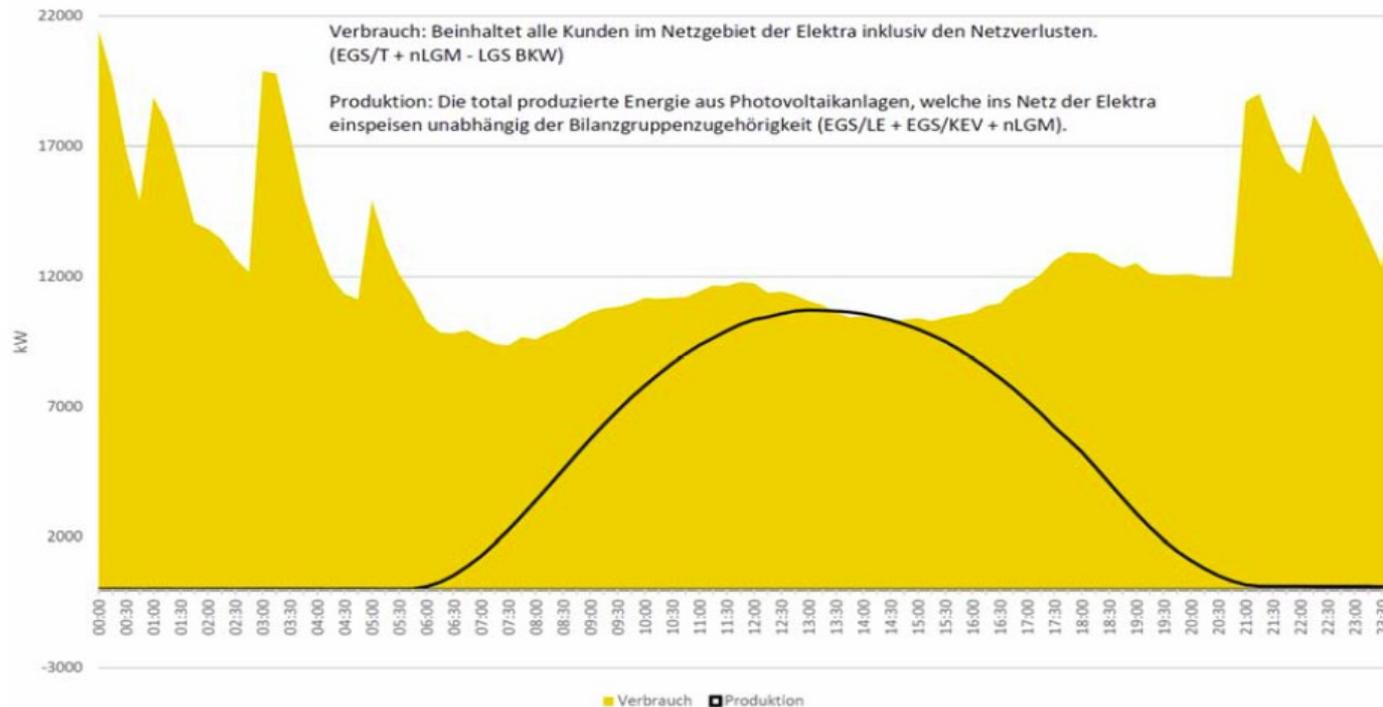
# Neue Energiewelt sorgt für Versorgungssicherheit bei tieferen Risiken

Dr. Andreas Ulbig  
Power Systems Laboratory, ETH Zürich

AEE SUISSE Kongress, 14. November 2016,

# PV-Boom ist in der Schweiz angekommen...

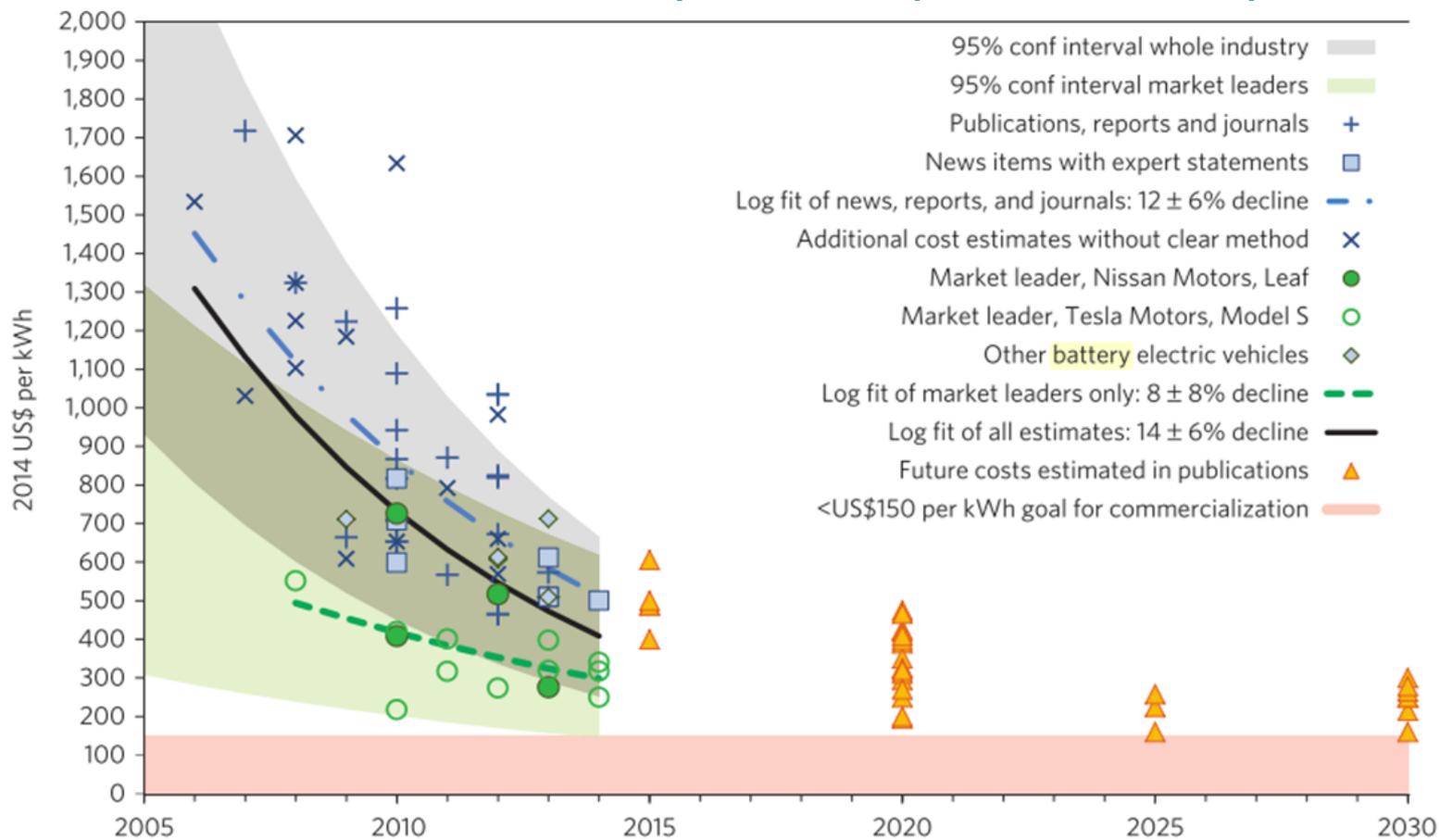
- PV-Spitze übersteigt Gesamtverbrauch einzelner Netzbetreiber



Verbrauch versus Produktion im Netzgebiet der Elektra Jengsdorf BE (Sonntag, 17. Juli 2016)

# Batteriekosten fallen schnell...

- Preisverfall von über \$1000 (Jahr 2008) auf ca. \$400 (Jahr 2014)

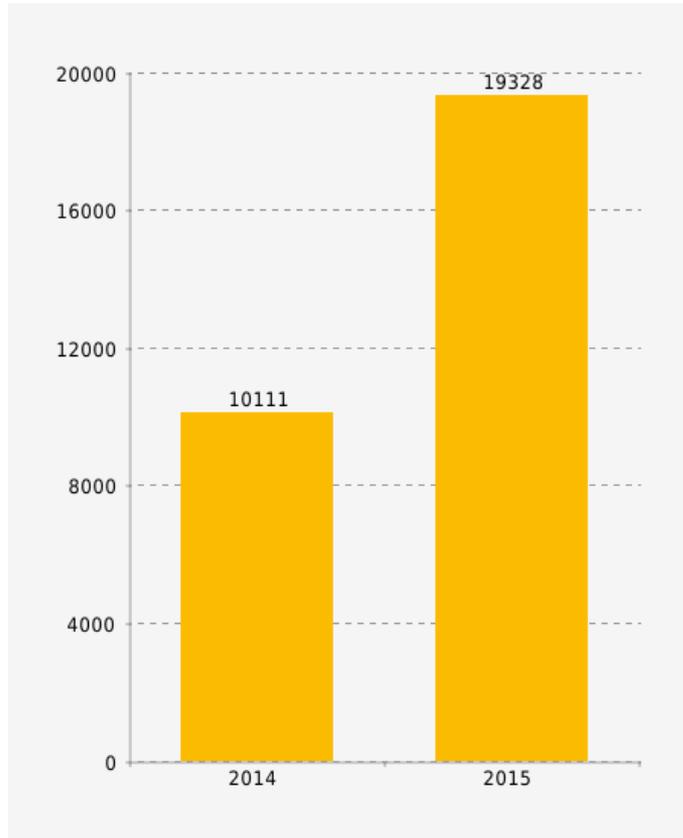


Nykvist, B. and Nilsson, M., 2015. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*.

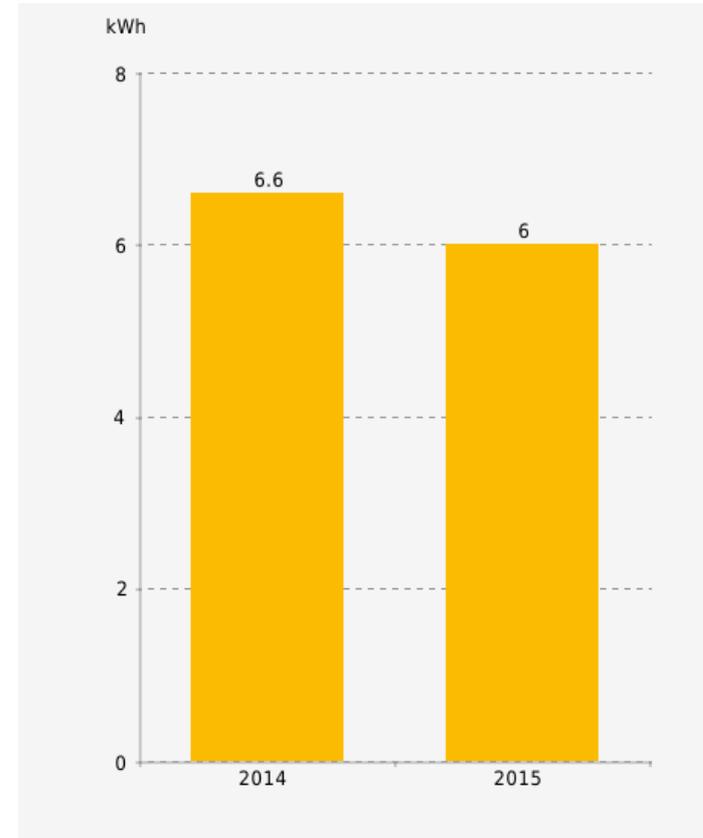
# Batteriespeicher bei Endkunden sind Realität...

- ca. 30'000 Photovoltaik-Batteriespeicher in Deutschland (Ende 2015)

Anzahl neu installierter PV-Batteriespeicher

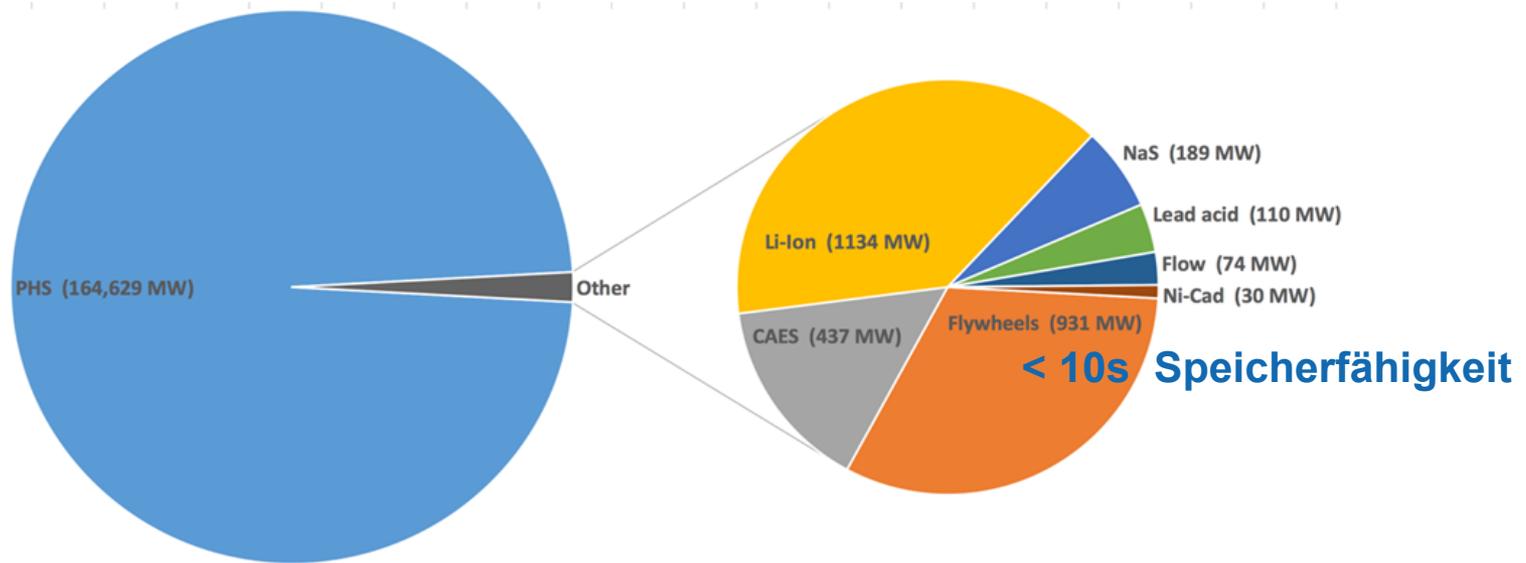


nutzbare Speicherkapazität (Ø)



# Speicher im Stromnetz – Globaler Überblick (2016)

- **168 GW weltweit installierte Stromspeicherkapazität**
  - ca. 98% der Speicherkapazität sind Pumpspeicher
- **Trends der letzten 10 Jahre**
  - **Verzwölfachung der Batteriekapazitäten** (120 MW → ca. 1'500 MW)
  - **Stand in der Schweiz (2016):** ca. 3 MW netzgebundene Batteriespeicher



Global installierte Stromspeicherkapazität im Jahr 2016 (US DOE, Sept. 2016).

# SATW Speicherstudie I

## SATW



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

Der Bundesrat hat das Bundesamt für Energie BFE beauftragt, eine Energiestrategie für das Jahr 2050 auszuarbeiten mit dem Ziel, diese baldmöglichst umzusetzen. Seit diesem Entscheid reissen die Diskussionen nicht ab, ob die gesetzten Ziele überhaupt technisch erreichbar sind. Um eine faktenbasierte Diskussion zu unterstützen, hat die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) untersuchen lassen, ob die geplante Energiestrategie in der Schweiz mit der heute vorhandenen und bereits geplanten Infrastruktur technisch machbar ist und ob die Versorgung auch in Extremfällen gewährleistet werden kann. Die Studie setzt voraus, dass alle für 2020 beziehungsweise 2025 geplanten Ausbauten im Bereich Netz und Pumpspeicherkraftwerke ausgeführt werden. Die dafür notwendigen Investitionen sind bekannt, deren Finanzierung muss aber zum Teil noch geregelt werden. Ökonomische Betrachtungen sind nicht Teil dieser Studie, da diese für den betrachteten Zeitraum zu keinem schlüssigen Ergebnis führen können.

Welche Fragen wurden untersucht?

- Genügen die Produktions- und Übertragungskapazitäten innerhalb des Landes und grenzüberschreitend, um die Stromversorgung (genügend Energie und genügend Leistung) auch in Extremfällen in allen Landesteilen bis 2050 störungsfrei sicher zu stellen?
- Sind die Pumpspeicherkraftwerke in der Schweiz in der Lage, den durch Photovoltaik und Wind zusätz-

## SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften  
Académie suisse des sciences techniques  
Accademia svizzera delle scienze tecniche  
Swiss Academy of Engineering Sciences

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

Swiss Energy Strategy 2050 and the Consequences for Electricity Grid Operation – Full Report

Farid Comaty, Andreas Ulbig, Göran Andersson  
ETH Zürich, Power Systems Laboratory

Im Auftrag der SATW  
Zürich, Mai / Juli 2014

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften  
Gelbergasse 3, CH-8601 Zürich  
Tel: +41 44 226 50 11, Fax: +41 44 226 50 19  
info@satw.ch, www.satw.ch

Member of the Akademien der Wissenschaften Schweiz

- Veröffentlichung: Mai/Juni 2014  
[www.satw.ch/publikationen/stromsystem](http://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..?

# SATW Speicherstudie I – Wichtigste Ergebnisse

Annahme Strategisches Netz 2020 & anstehende Pumpspeicher-Projekte realisiert.

## 1. 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)

## 2. Notwendigkeit von Ersatzkraftwerken (Gas)

- nicht unbedingt notwendig, nützlich als Reservekraftwerke
- reduzieren Nettostromimport, erhöhen aber Erdgasimport deutlich

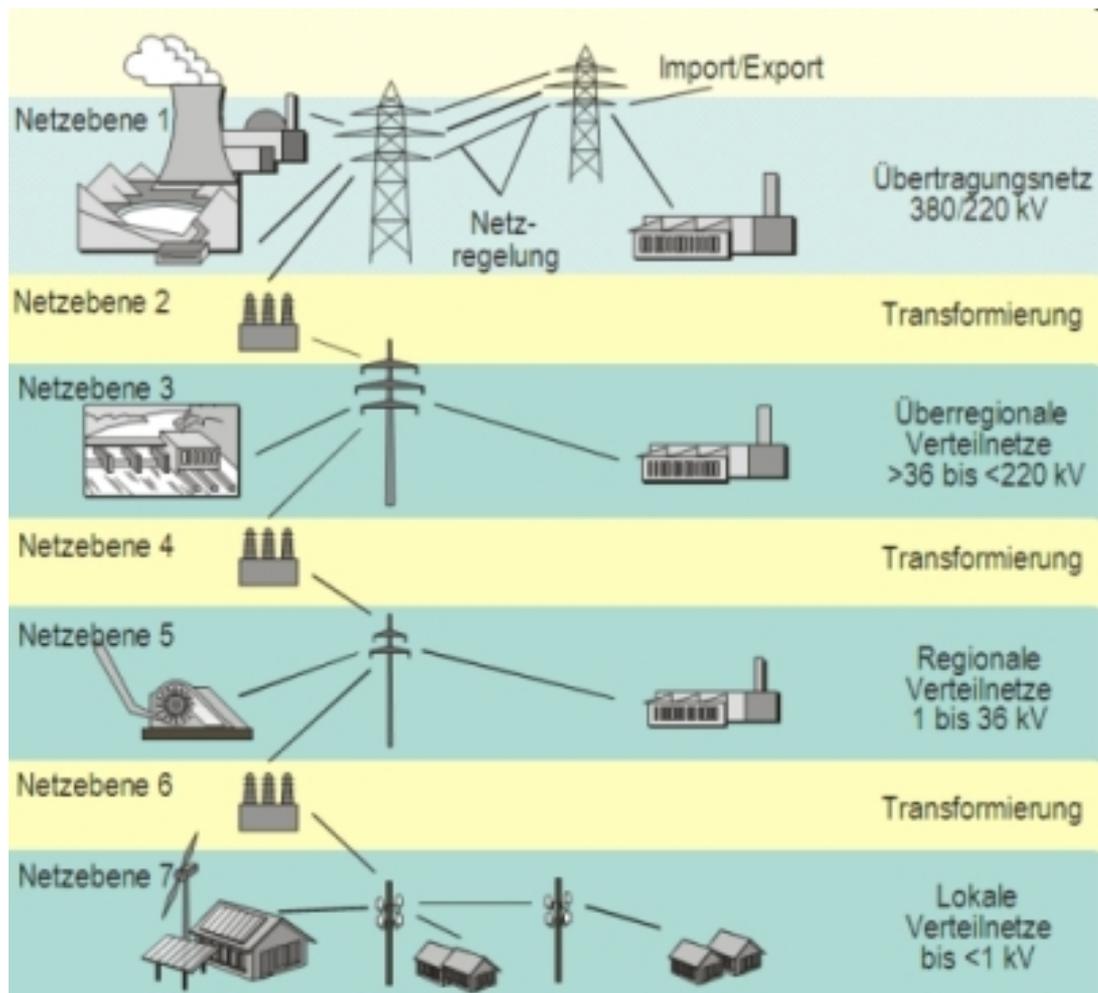
## 3. Potenzial der Photovoltaik (PV) in der Schweiz

- BFE-Ziel (11TWh) kann vollständig integriert werden
- auch doppelt so hoher PV-Ausbau integrierbar

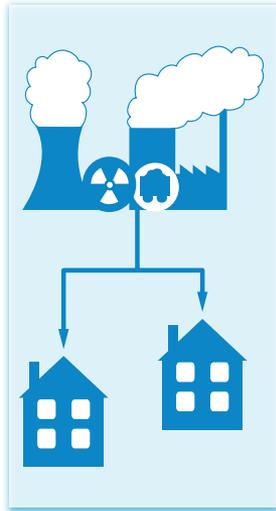
## 4. Rolle der Pumpspeicher & Speicherseen

- **entscheidende Rolle bei Sicherung der Stromversorgung**
- andere Speicherbewirtschaftung als heute

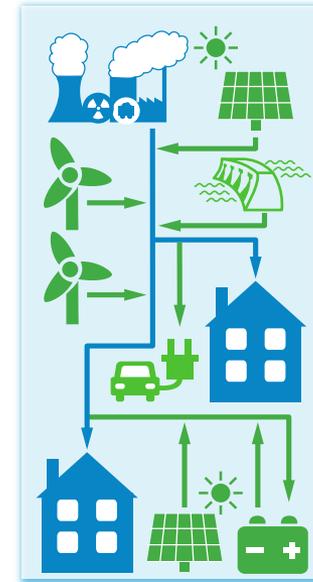
# SATW-Studie zur Energiestrategie 2050 (2014): «Das Schweizer Übertragungsnetz ist gut aufgestellt...»



...aber die Energiewende passiert grösstenteils im Verteilnetz



- **Spannungsprobleme**
- **Stromrückflüsse**
- **Netzbelastung**



Stand (Ende 2015)

Anzahl	Schweiz	Europa
PV-Anlage	> 50'000 (ca. 1.3 GW)	> 1.5 Mio. (ca. 40 GW) in Deutschland
Wärmepumpen	> 250'000	> 1 Mio. in Frankreich
Elektroautos	≈ 9'000	≈ 25'500 in Deutschland
Hausbatterien	≈ 100 – 200	≈ 30'000 in Deutschland

Quelle: EurObserver, BFE, statista, eigene Analyse

# SATW Speicherstudie II



- Analyse der Rolle von dezentralen Speichersystemen, **Batterien und thermischen Lasten**, für das Stromsystem
- Themen
  - Motivation für dezentrale Energiespeicher
  - Welche Speichertechnologie für welche Netzanschlussebene?
  - Anwendungsfälle für dezentrale Speicher
  - Wirtschaftlichkeit von Batterien und Lastmanagement
  - Vermeidung von Netzausbau durch dezentrale Speicher

[www.satw.ch/themen/weitere/energie/speichersystem](http://www.satw.ch/themen/weitere/energie/speichersystem)

# Dezentrale Speicher – Anwendungen & Bewertung

## Technische Bewertung des Energiespeicher-Einsatzes im Verteilnetz

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

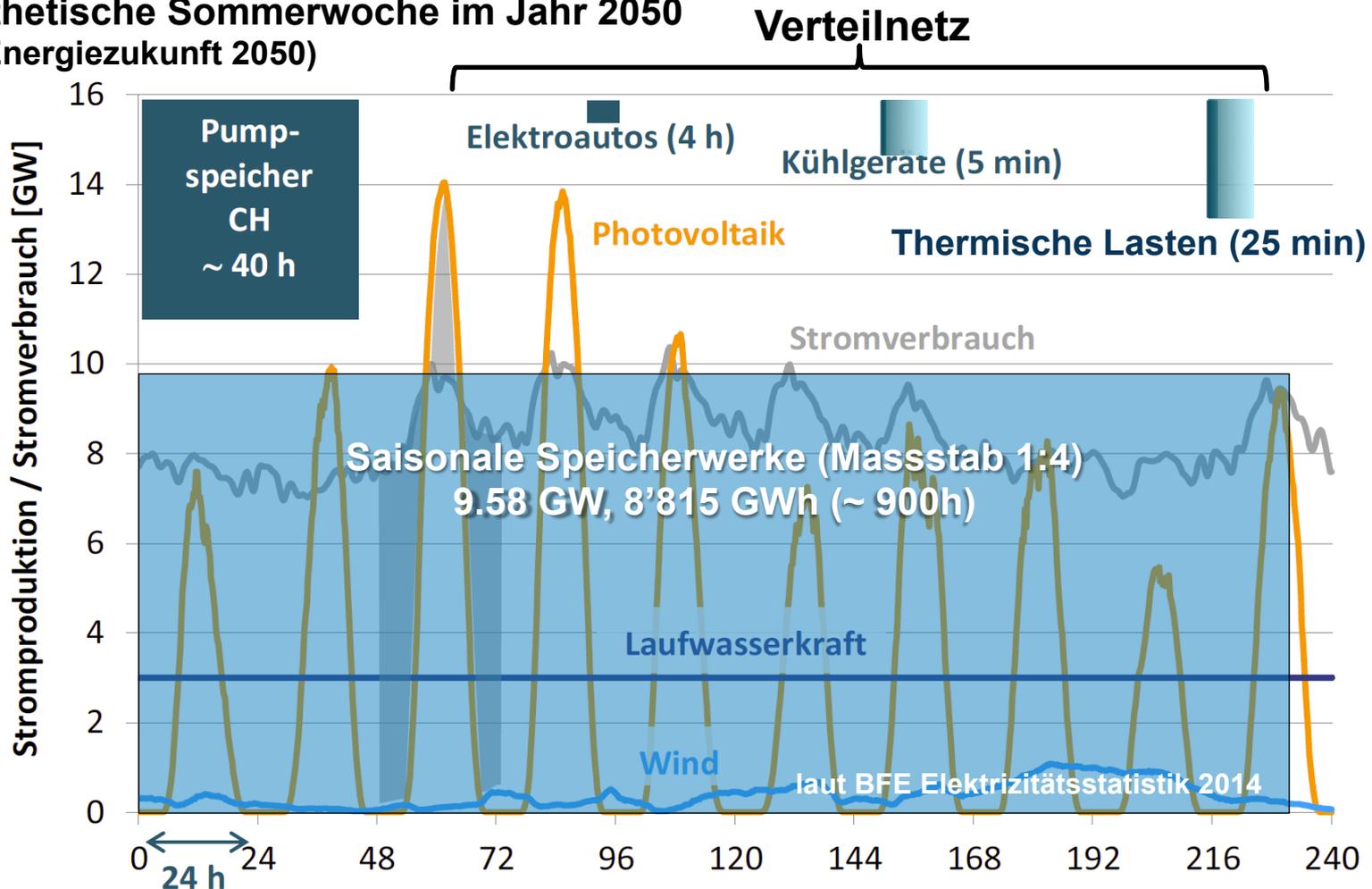
→ **Vermeidung von Verteilnetzausbau** ► Verringerung Netzbelastung

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

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

# Illustrativer Vergleich – Stromspeicher & Lastmanagement in CH

Hypothetische Sommerwoche im Jahr 2050  
(ETH Energiezukunft 2050)

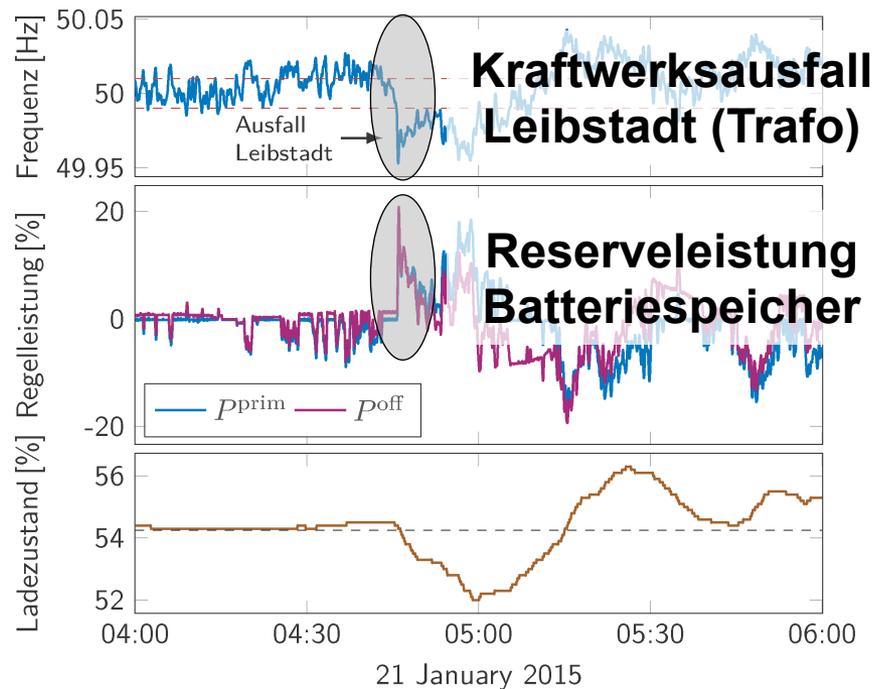


**Speicherseen & Pumpspeicher liefern grosse Leistungs-/Energiekapazitäten. Dezentrale Speicher sind dafür direkt im Verteilnetz installiert.**

# 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 ( $P^{\text{prim}}$ ), Leistungsabgabe des BESS ( $P^{\text{BESS}}$ ) und Nachladeleistung ( $P^{\text{off}}$ ). Unten: Ladezustand (State-of-Charge, SoC).

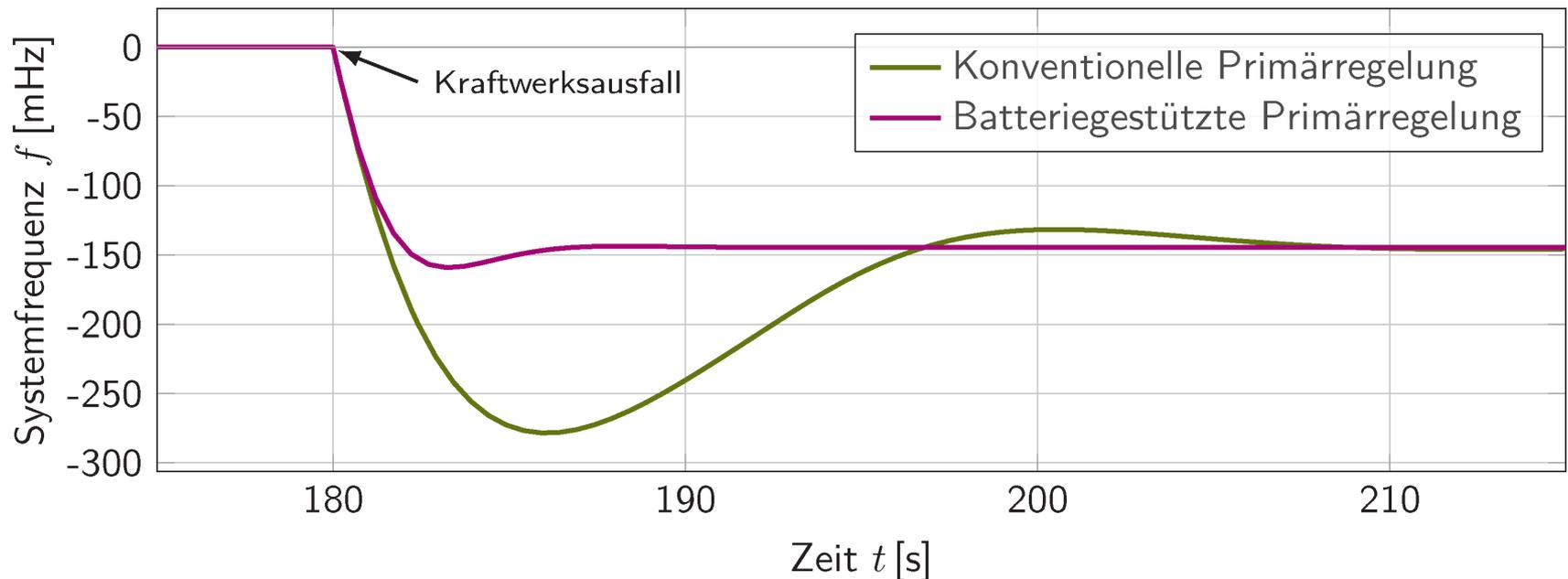
Quelle: M. Koller, M. González-Vaya, A. Chacko, T. Borsche, A. Ulbig, CIGRE 2016 Session

**Batterien liefern auch bei grossen Ausfällen die notwendige Leistung.**

# Dezentrale Speicher – Praxis-Anwendung (SDL)

## Verbesserung der Netzstabilisierung durch Batteriesysteme

- **Höhere Frequenzstabilität durch sehr schnelle Reaktionsfähigkeit**
- **Unterstützung** bei hohen Anteilen Wechselrichter-gekoppelter Erzeuger und Stromverbraucher



**Stabilere Netzdynamik durch schnellere Primärfrequenz-Regelleistung**

Quelle: A. Ulbig, T. Borsche et al., IFAC World Congress 2014, SATW Speicherstudie II (2016)

**Batterien liefern schnellere Regelleistung als konv. Kraftwerke.**

# Ausblick

- **Grossspeicher als auch dezentrale Energiespeicher sind für die Stromversorgung und die Versorgungssicherheit 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)**
- **Technische Regularien (*GridCodes*) für EE europaweit verbessern**

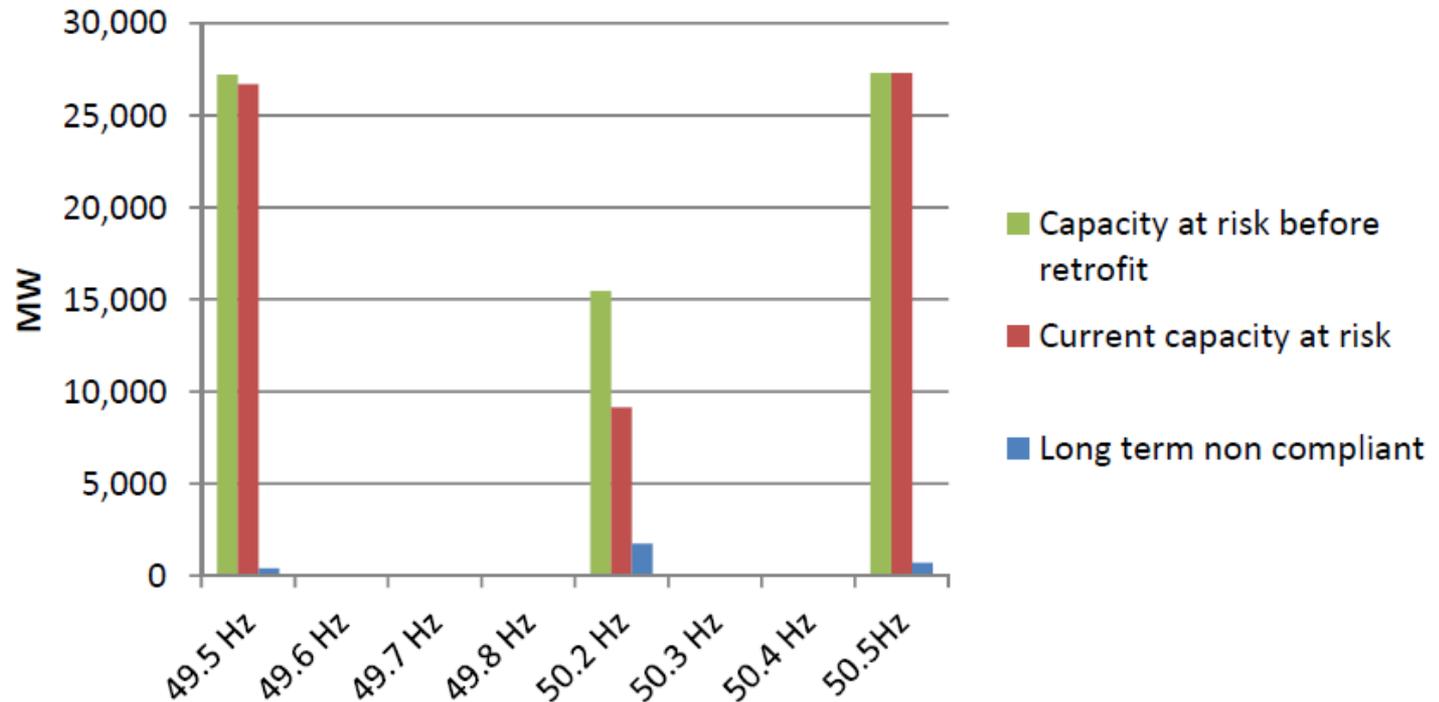
# Backup

# Anpassung der Grid Codes für EE-Anlagen

## Capacity at risk per technology



## National retrofit actions - Germany

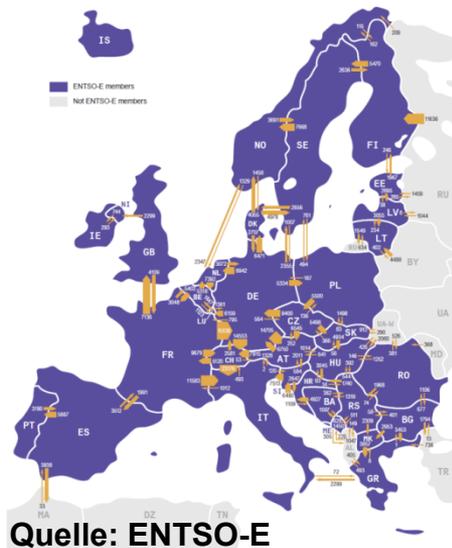


ENTSO-E – DISPERSED GENERATION IMPACT ON CE REGION SECURITY, 2014

# Modellierung & Simulation des Europäischen Stromnetzes

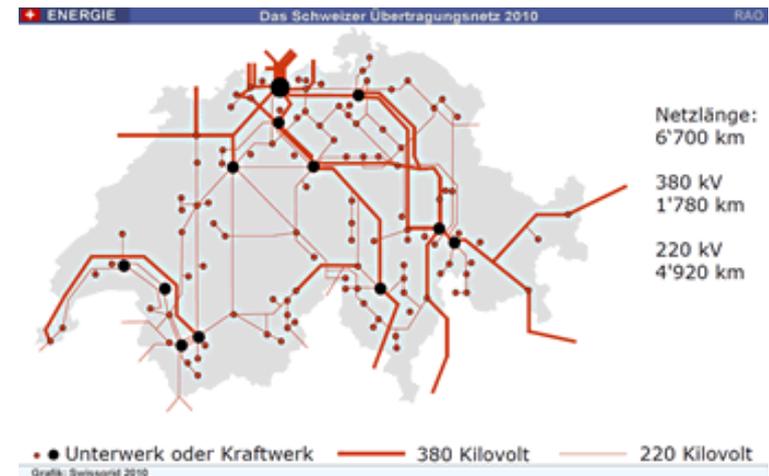
## Europäisches Stromnetz

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

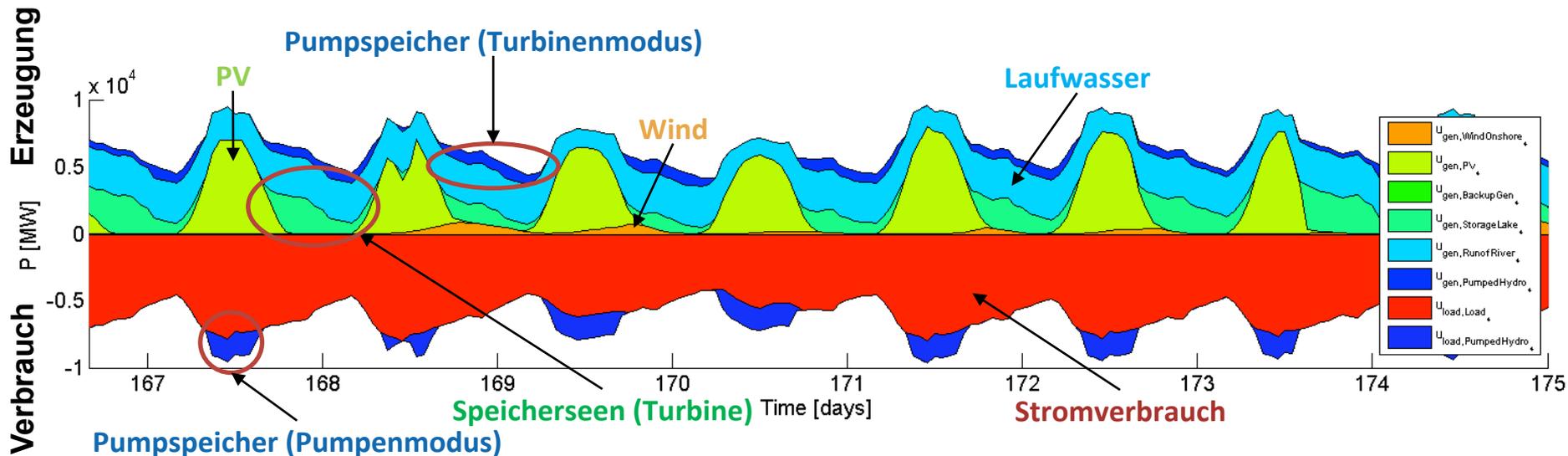
**Prädiktiver Kraftwerks-Einsatz basierend auf Kraftwerkskosten, vorhandener Prognosedaten (Last, Wind, PV) und Lastfluss-Berechnungen (Engpässe).**

# Veränderung der Speicherbewirtschaftung

## Prädiktiver Dispatch flexibler Kraftwerks-/Speichertypen

### ➤ Modelprädiktive Optimierung (engl. *Model Predictive Control*)

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

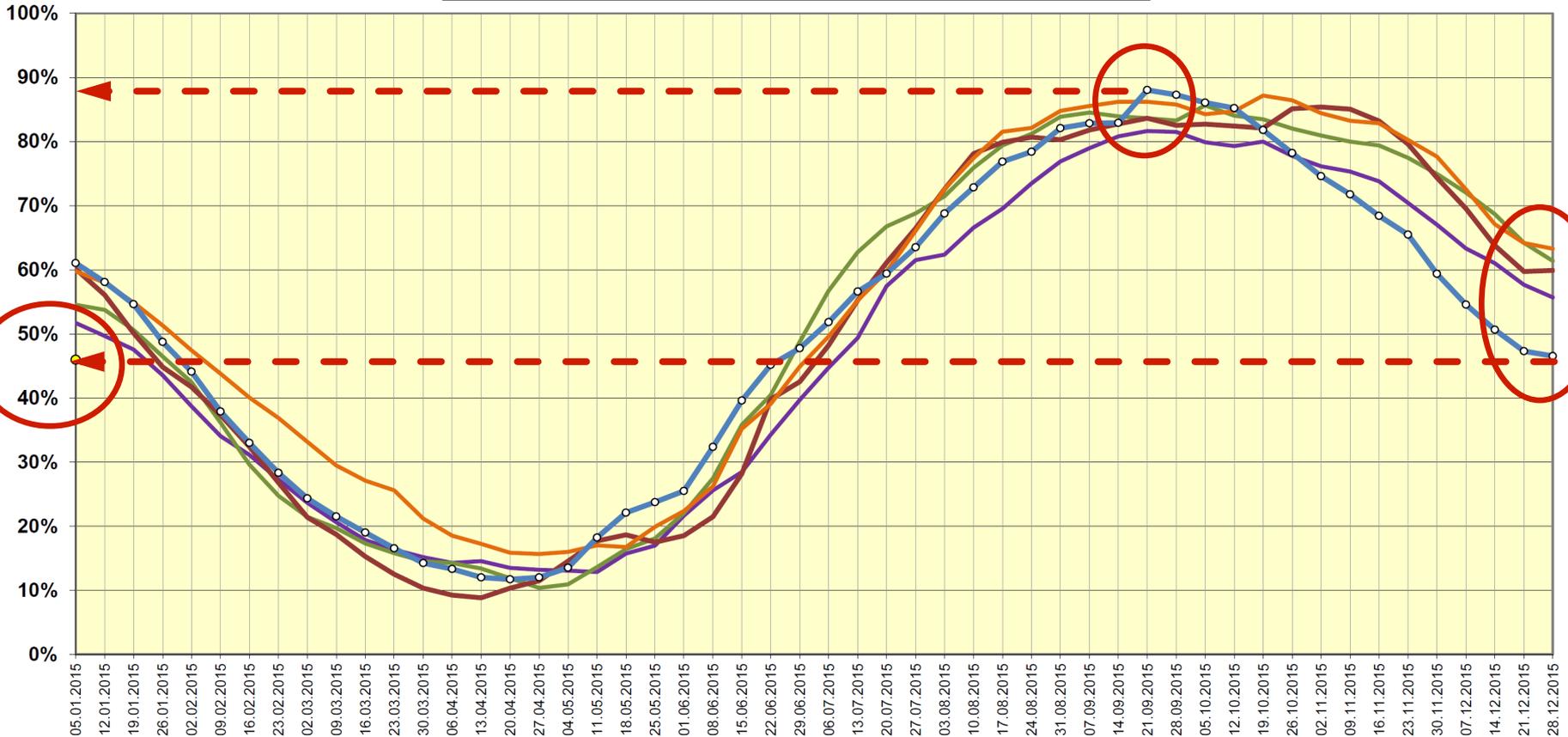
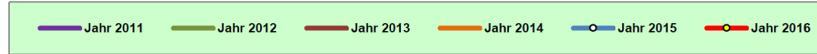


# Füllstand saisonaler Speicherseen (Stand: 8.1.2016)

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN

Speicherinhalt Schweiz  
(100% = 8'815 GWh)



**Speicherseen leeren sich deutlich, aber langsam genug zum Gegensteuern.**