

# Saisonale Flexibilisierungsmöglichkeiten der Energieversorgung in der Schweiz

Tom Kober (PSI), Markus Friedl (HSR), Jonas Mühlethaler (Swissgrid)  
Mittwoch 28. Februar 2018, FESS Speicher-Roundtable  
Energiezentrale Forsthaus, ewb, Bern

# Ziel der Studie

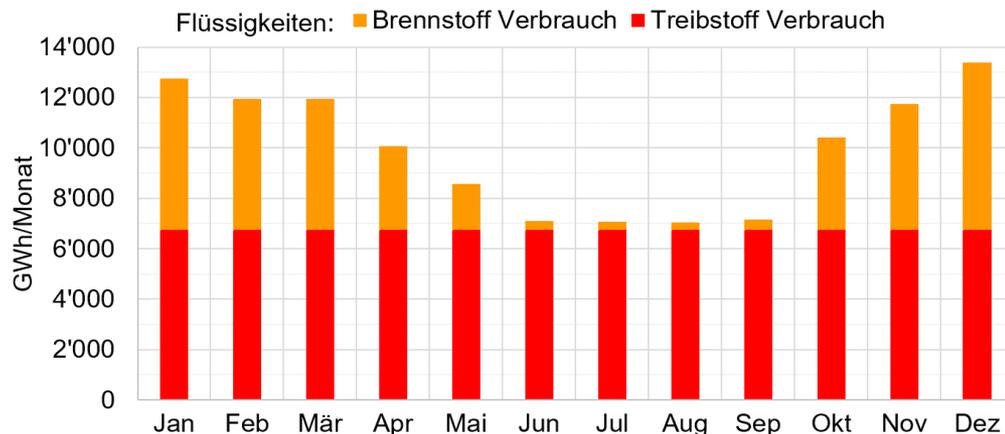
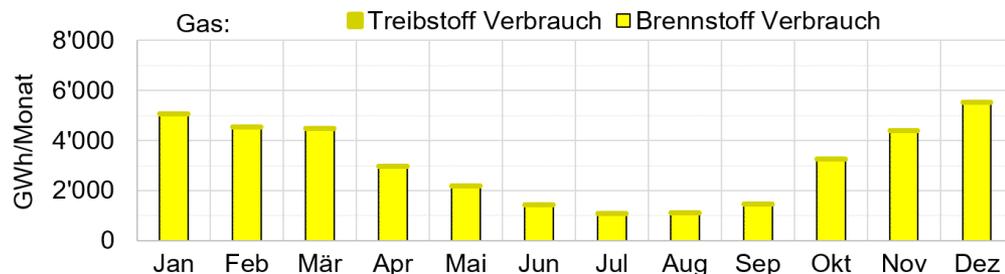
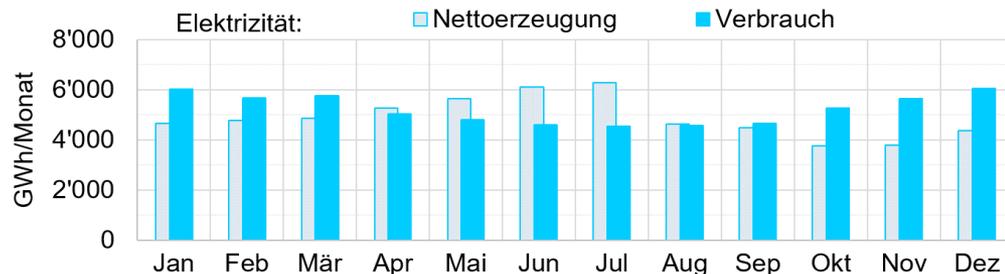
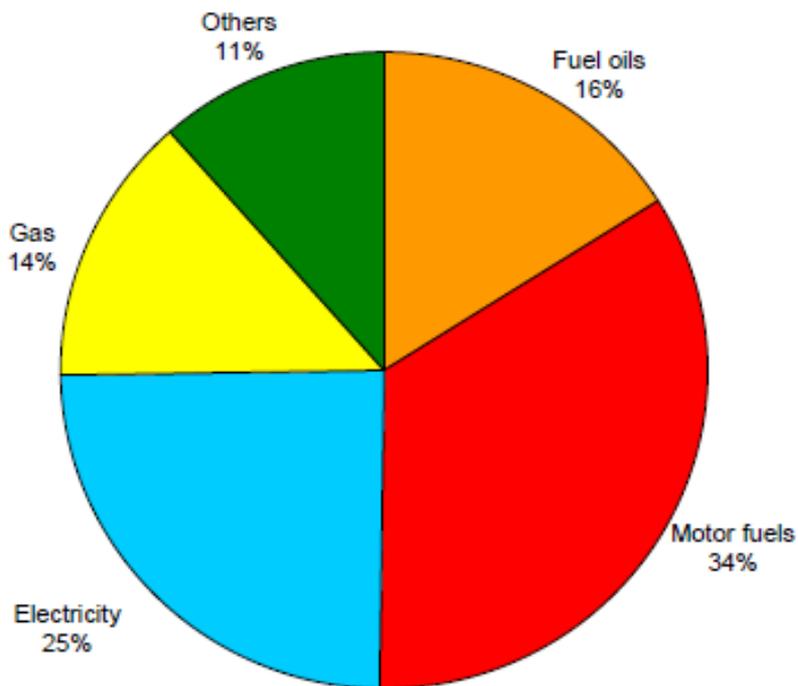
- Zusammentragen der Erkenntnisse zu saisonalen Flexibilisierungsoptionen für das Schweizer Energiesystem
- Basierend auf bestehenden Forschungsergebnissen / Veröffentlichungen
- Perspektive bis 2050
- Diskussion von Wechselwirkungen / Spannungsfeldern

# Vortragsgliederung

- Status quo & Ausgangslage
- Diskussion der 4 Flexibilitätsoptionen
- Zusammenfassung & Schlussbetrachtung

# Status-quo: Endenergieverbrauch in 2016 und saisonale Verteilung

Final Energy Consumption 2016  
(Total: 854'300 TJ)



# Ausgangslage und zentrale Annahmen

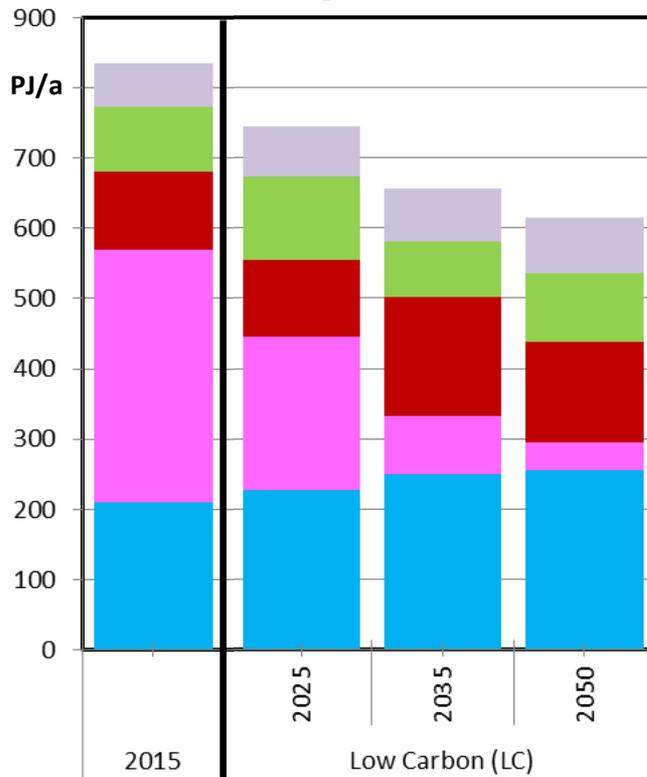
- Neuorganisation der Energieversorgung gemäss Energiestrategie 2050
  - Reduktion Endenergieverbrauch
  - Übergang zu erneuerbaren Energien
  - Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie
  - Reduktion von Treibhausemissionen
- Zunahme Stromverbrauch in Zukunft möglich
- Ersatz jahreszeitlich flexibel verfügbarer Energieressourcen (z. B. zur Bereitstellung von Wärme und Mobilität) durch Energie aus volatilen, erneuerbaren Energiequellen

## → **Zunehmender Bedarf an zeitlicher Flexibilisierung, insbesondere im Elektrizitätssystem**

Flexibilität ist die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung) mit dem Ziel, eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen (Def. gem. BNetzA)

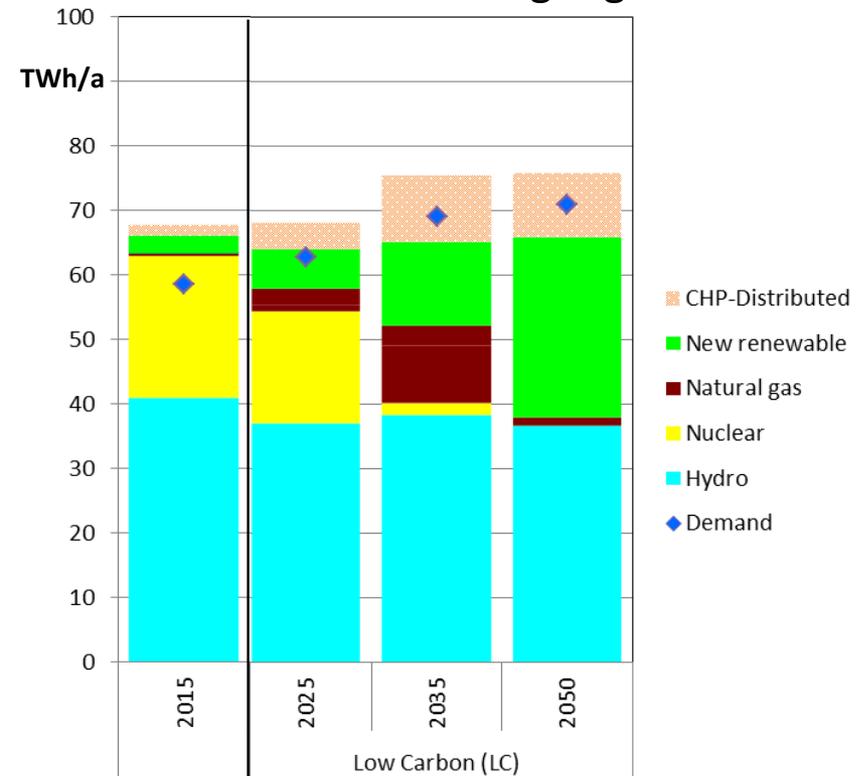
# Möglicher Transformationspfad des Energiesystems der Schweiz unter stringenter Klimaschutzpolitik

## Endenergieverbrauch



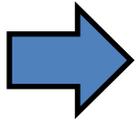
■ Elektrizität    ■ Brenn- und Treibstoffe (flüssig, exkl. Kerosin)  
■ Erdgas        ■ Sonstige    ■ Kerosin

## Elektrizitätserzeugung



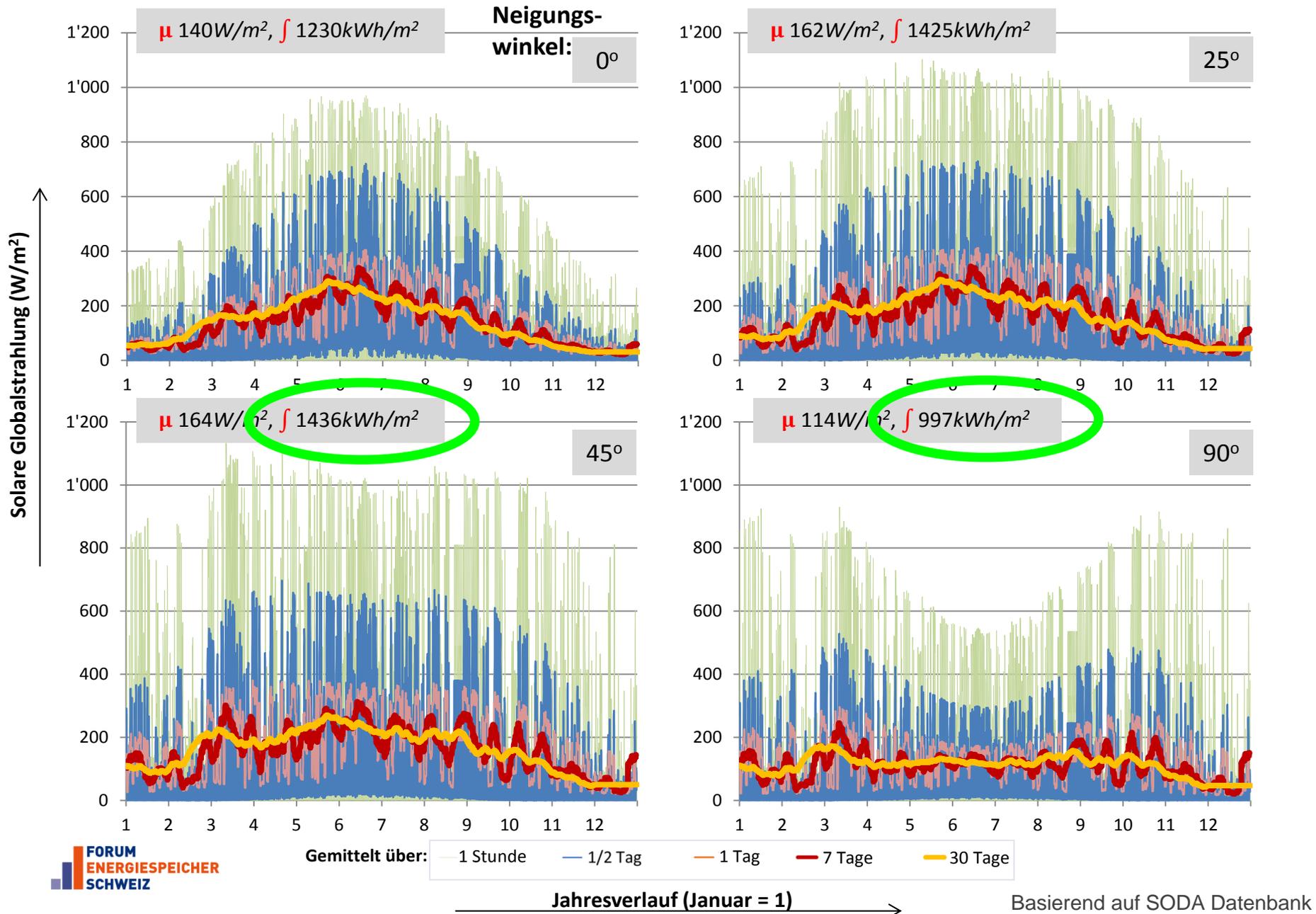
*LC - Klimaschutzziel: -60% der energiebedingten CO<sub>2</sub> Emissionen bis 2050 ggü. 2010*

# 4 Flexibilitätsoptionen für den saisonalen Ausgleich im Fokus



- Anpassung der Energieerzeugung
- Import / Export (Stromhandel)
- Energiespeicher (z.B. Speicherkraftwerke, Lager für flüssige Kraft- und Brennstoffe, Gasspeicher und saisonale Wärmespeicher), Sektorkopplung
- Anpassung der Energienachfrage (Hybrid-Technologien)

# Solarstrahlung im Jahresverlauf (2005-Daten für Zürich)

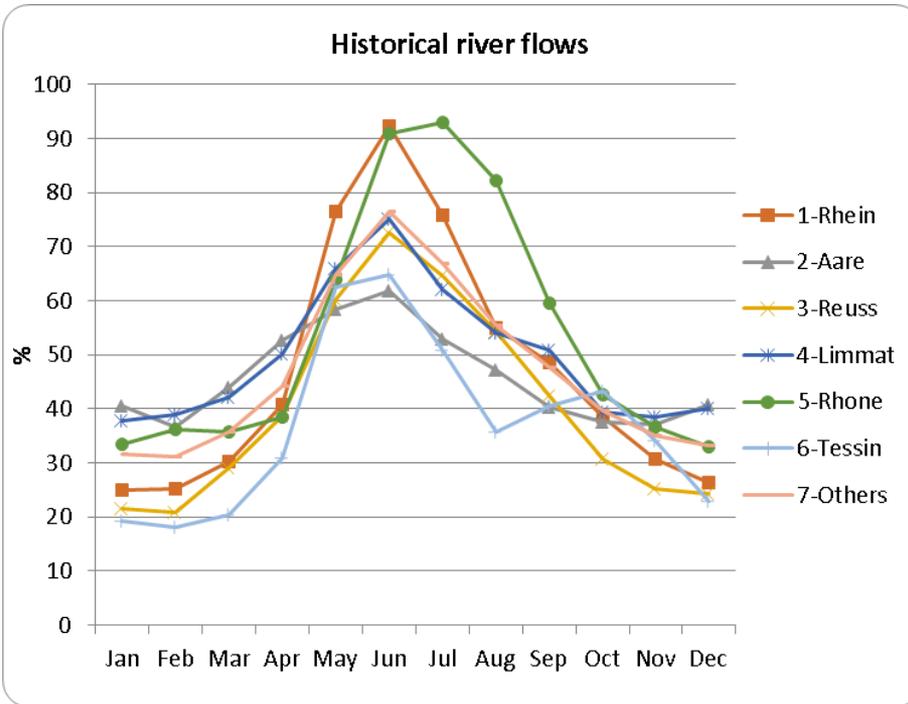


# Solar PV als Herausforderung **und** Teil der Lösung

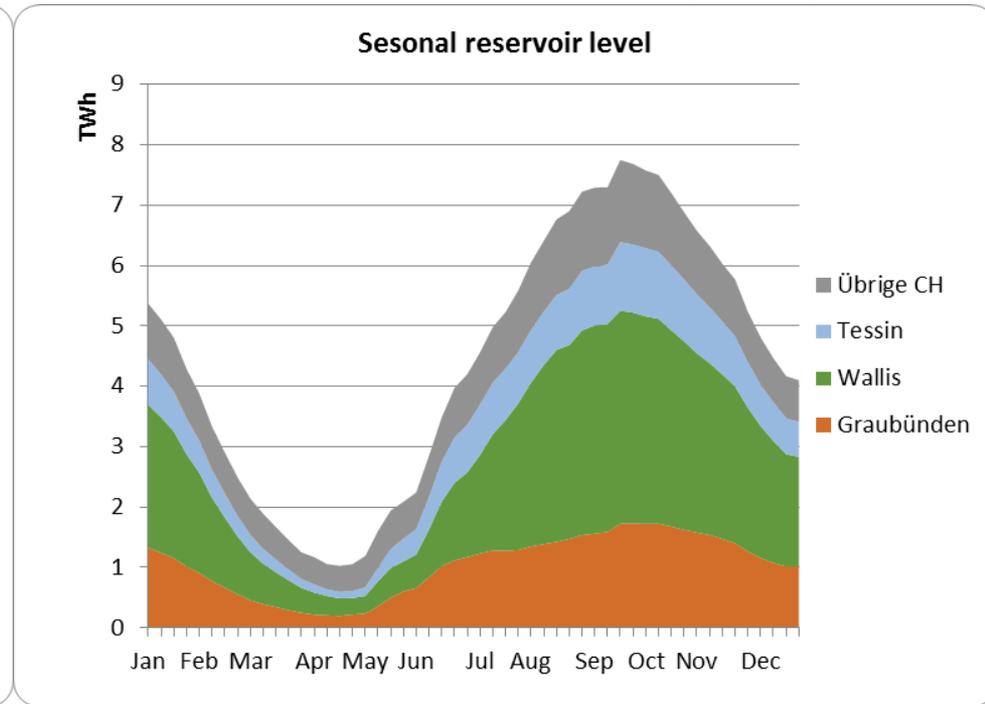
- Kurzfristflexibilität von herausragender Bedeutung für Integration von grossen Produktionsmengen aus Solar PV
- Gemittelte monatliche Produktion aus  $20\text{GW}_p$ <sup>1</sup> Solar PV kann im Sommer in etwa der heutigen Monatsproduktion der thermischen Kraftwerke (4GW) entsprechen; Winterproduktion aus Solar PV deutlich geringer
- Ausrichtung und gezielte Standortwahl der Solaranlagen kann helfen den saisonalen Flexibilitätsbedarf zu reduzieren. Aber:
  - erhöhte Investitionskosten → Marktanreize notwendig für bedarfsgerecht ausgerichtete Solarstromproduktion
  - räumliche Aspekte können eine Rolle spielen (Platzangebot f. Solar / verfügbares Potenzial)

# Bewirtschaftung der Wasserkraftwerke

## Laufwasserkraft (2015)



## Speicherwasserkraft (2015)

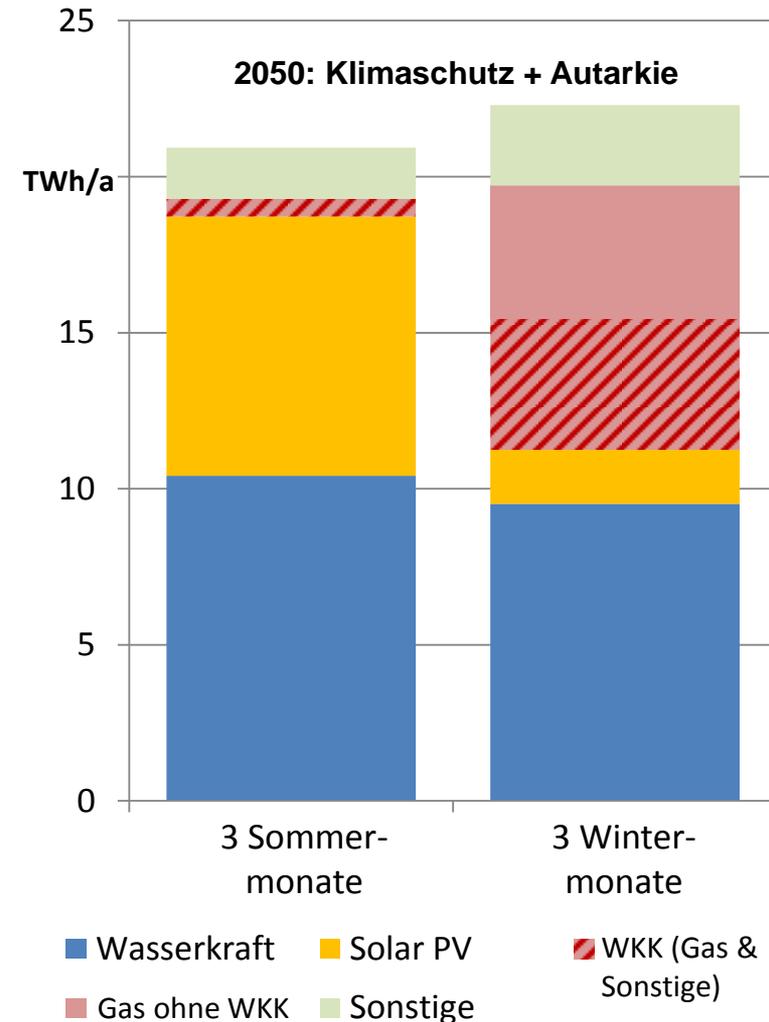


→ Wasserspeicher ermöglichen Verlagerung von ca. 7 TWh in den Winter

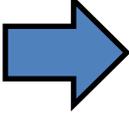
Zufluss	27'254 GWh	10'827 GWh
Produktion	22'439 GWh	17'829 GWh
	Sommer	Winter
		7'002 GWh

# Gaskraftwerke und verteilte Erzeugung mit WKK zum saisonalen Ausgleich

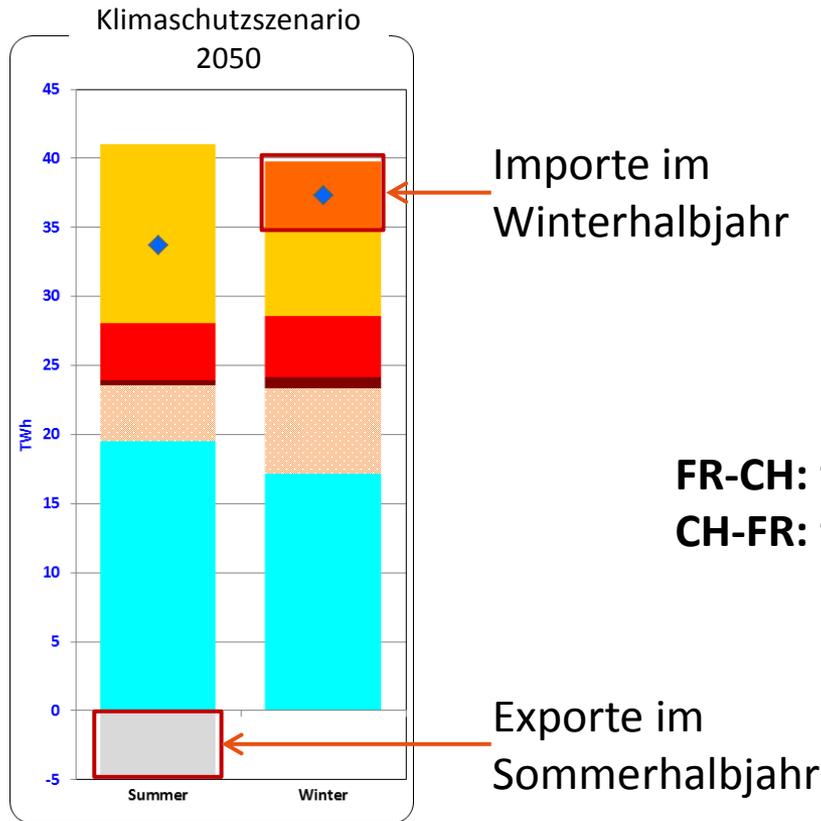
- Gaskraftwerke und sonstige verteilte Erzeugung mit WKK zur Kompensation reduzierter Solarstromproduktion im Winter
- Wärmeauskopplung aus WKK für Raumwärme primär in den Übergangsmonaten und im Winter
- Jahresauslastung der Gaskraftwerke ohne WKK kleiner 2000 Stunden
- Entstehende Treibhausgasemissionen müssen durch Minderungsmaßnahmen in anderen Sektoren kompensiert werden



# 4 Flexibilitätsoptionen für den saisonalen Ausgleich im Fokus

- Anpassung der Energieerzeugung
-  • Import / Export (Stromhandel)
- Energiespeicher (z.B. Speicherkraftwerke, Lager für flüssige Kraft- und Brennstoffe, Gasspeicher und saisonale Wärmespeicher), Sektorkopplung
- Anpassung der Energienachfrage (Hybrid-Technologien)

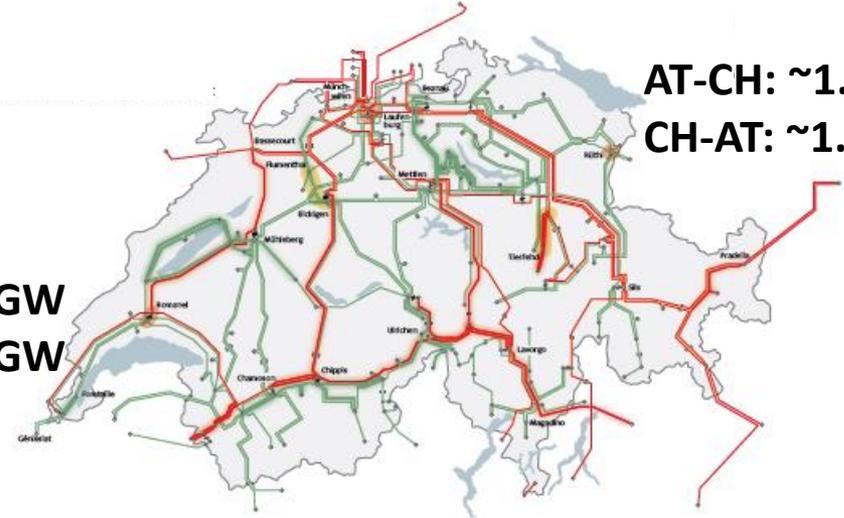
# Stromaussehenhandel als kosteneffiziente saisonale Flexibilitätsoption bei hohen Kuppelleitungskapazitäten



**DE-CH: ~4.4GW**  
**CH-DE: ~6.1GW**

**AT-CH: ~1.0GW**  
**CH-AT: ~1.9GW**

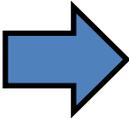
**FR-CH: ~3.2GW**  
**CH-FR: ~1.7GW**



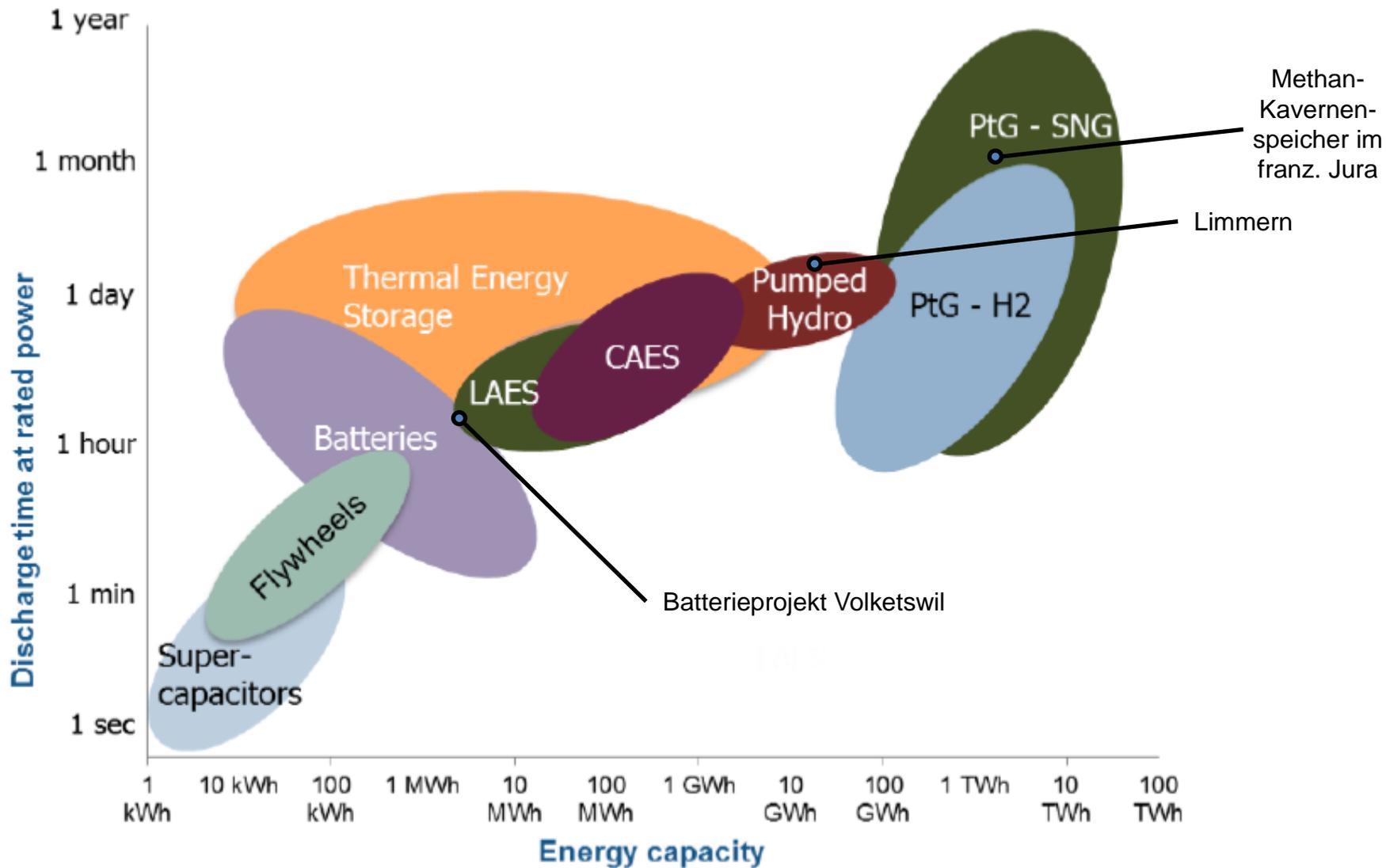
**IT-CH: ~3.1GW**  
**CH-IT: ~5.5GW**

■ Hydro ■ Gas ■ CHP-Dist ■ Solar ■ Others  
 ■ Storage ■ Net export ■ Net import ◆ Demand

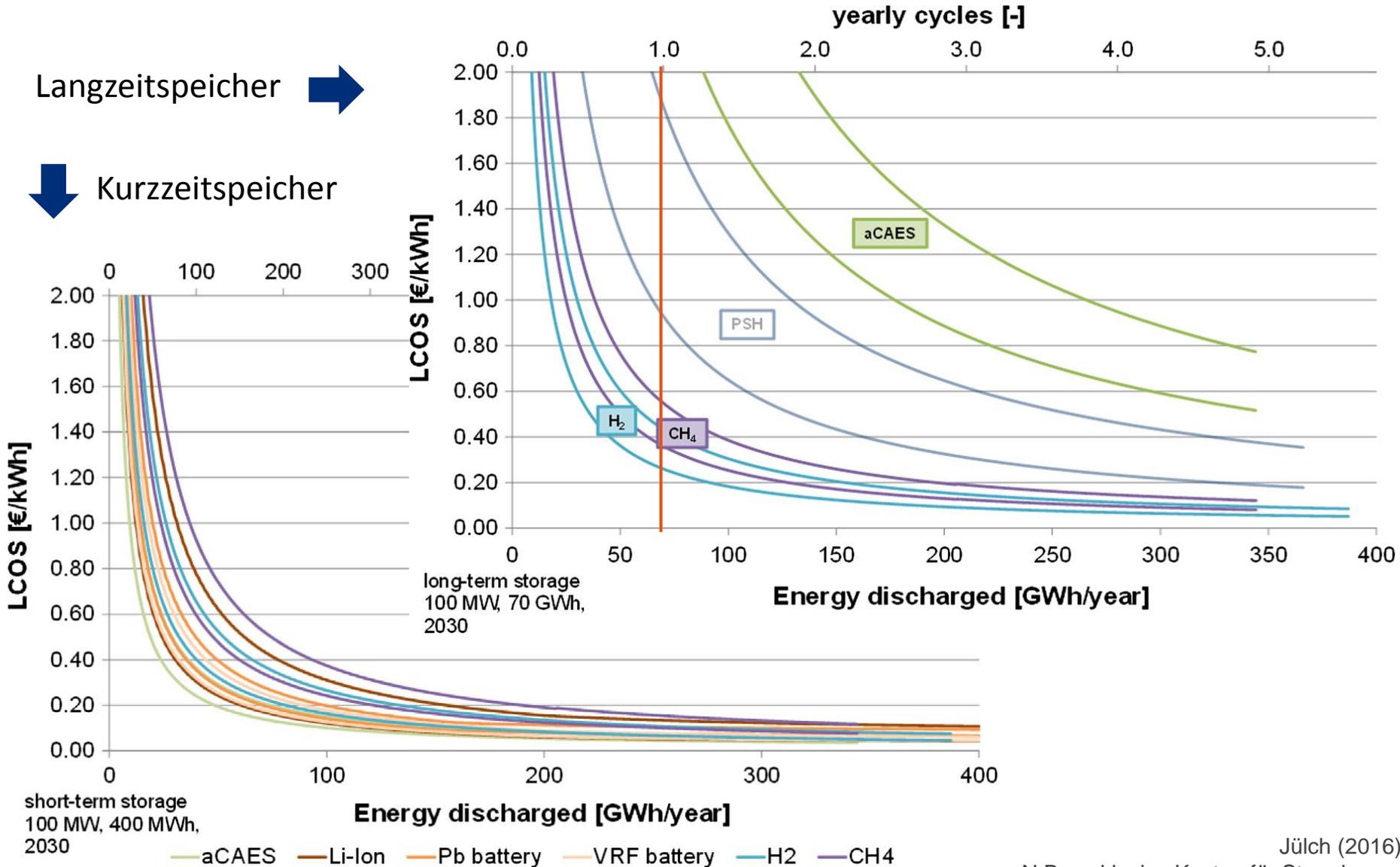
# 4 Flexibilitätsoptionen für den saisonalen Ausgleich im Fokus

- Anpassung der Energieerzeugung
- Import / Export (Stromhandel)
-  • Energiespeicher (z.B. Speicherkraftwerke, Lager für flüssige Kraft- und Brennstoffe, Gasspeicher und saisonale Wärmespeicher), Sektorkopplung
- Anpassung der Energienachfrage (Hybrid-Technologien)

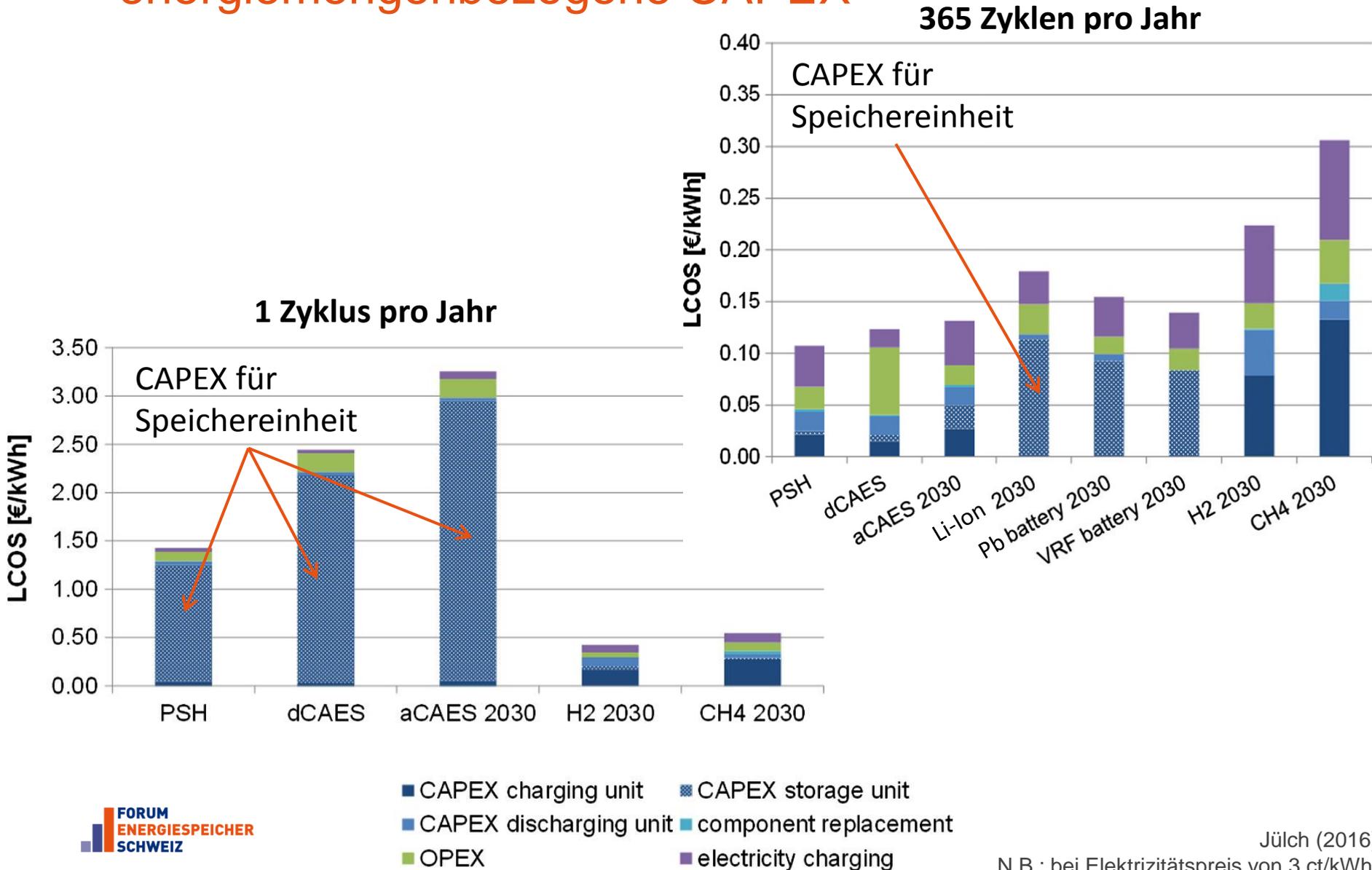
# Übersicht Speichertechnologien



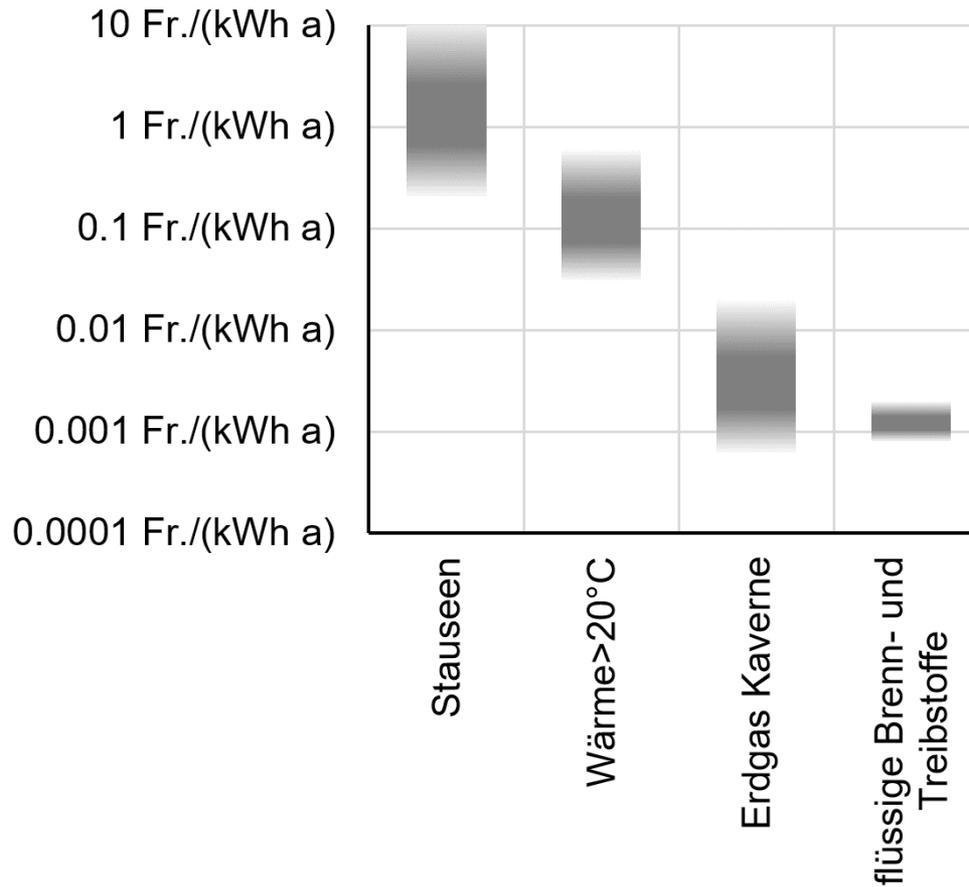
# Speicherkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Zyklen



# Für Wasserstoff und Methan vergleichsweise niedrige energiemengenbezogene CAPEX



# Speicherkosten für Brenn- und Treibstoffe vergleichsweise günstig



Quellen: Abdon, A., Zhang, X., Parra, D., Patel, M. K., Bauer, Ch., Worlitschek, J. "Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales", Energy 139 (2017) 1173-1187, Gasverbund Mittelland AG, Carburra, Jenni Energietechnik AG, Daten Prof. Hubert Käslin ETH, eigene Recherchen zu konkreten Projekten

# Energiespeichermöglichkeiten in der Schweiz

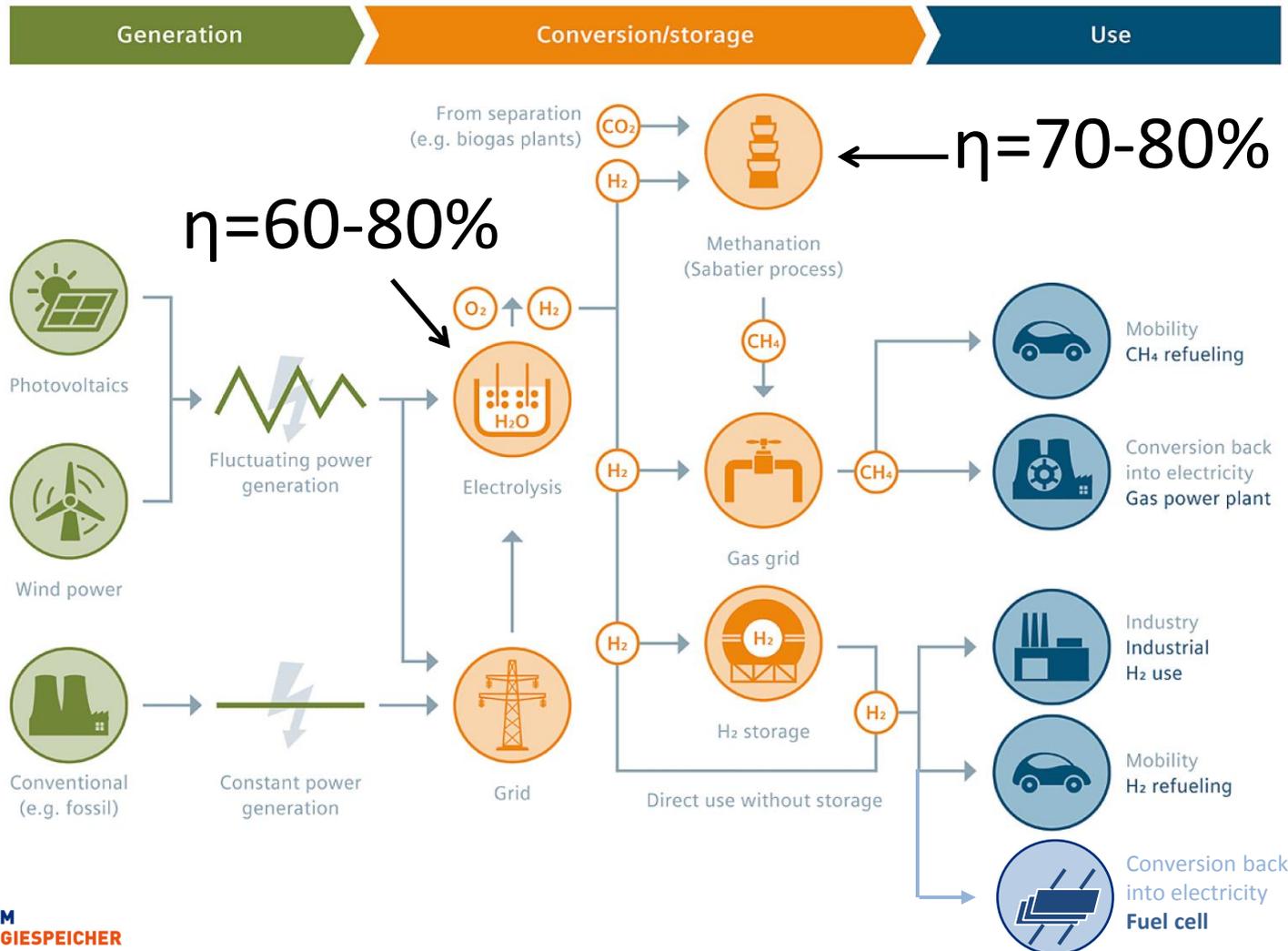
Beschreibung	Speichergrösse/-dauer
Speicherwasserkraftwerk: Wasserkraftwerk mit Stausee (im Gegensatz zu Flusswasserkraftwerken ohne Speichermöglichkeit).	8.8 TWh (heute, 55 Tage*) 10.8 TWh (bei weiterem Ausbau)
Pumpspeicherkraftwerk bestehend aus mehreren Reservoirs mit Pumpen und Turbinen dazwischen.	400 GWh (2.5 Tage*)
Erdgasnetz mit angeschlossenen Kurzzeitspeichern	80 GWh (1.1 Tage*)
Erdgaskavernen: Die Schweizer Gaswirtschaft ist an einer Kaverne in einem ehemaligen Salzbergwerk im französischen Jura beteiligt.	1'510 GWh (20.6 Tage*)
Heizöltanks in den Wohngebäuden	geschätzt > 1 Jahr
Pflichtlager für Notversorgung der Schweiz: flüssige Brenn- und Treibstoffe Autobenzin und Diesel sowie Flugpetrol	5.5 Monate Heizöl*)
	4.9 Monate Benzin*)
	4.1 Monate Diesel*)
	2.6 Monate Flugpetrol*)
Stationäre Batteriespeicher, die direkt mit dem Netz verbunden sind	
Wärmespeicher mit $T < 20\text{ °C}$ (Anergiespeicher im Boden, Eisspeicher)	
Wärmespeicher mit $T > 20\text{ °C}$ , Brauchwarmwasser in Haushalten, Saisonale Speicher in Jenny-Häusern oder im energieautarken Haus in Brütten	
Luftdruckspeicher (Compressed Air Energy Storage, CAES), in der Schweiz gibt es ein Projekt im Tessin.	220'000 m <sup>3</sup> für 1GWh → kaum Potenzial als Langzeitspeicher

→ Nutzung existierender Speicher ggf. via Sektorkopplung

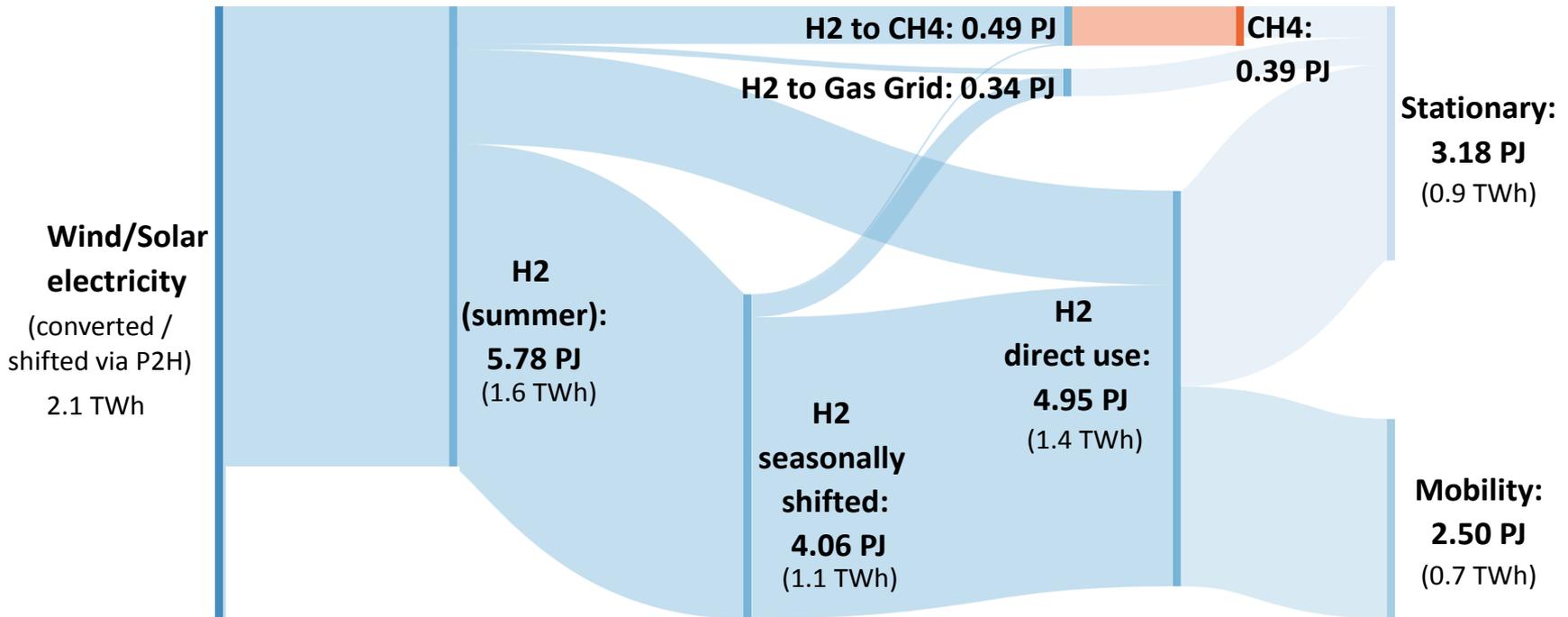
\*) Speicherdauer berechnet mit durchschnittlichem Endverbrauch der Schweiz des entsprechenden Energieträgers. Quellen: Bundesamt für Energie, Carbura, IET HSR, Eurelectric (2011)

# Sektorkopplung durch Power-to-Gas (Wasserstoff/ Methan) mit und ohne Speicher

→ im Fokus der SCCER Joint Activity “White Paper Power-to-X”

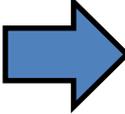


# Möglicher Power-to-X Pfad unter stringentem Klimaschutzregime in 2050



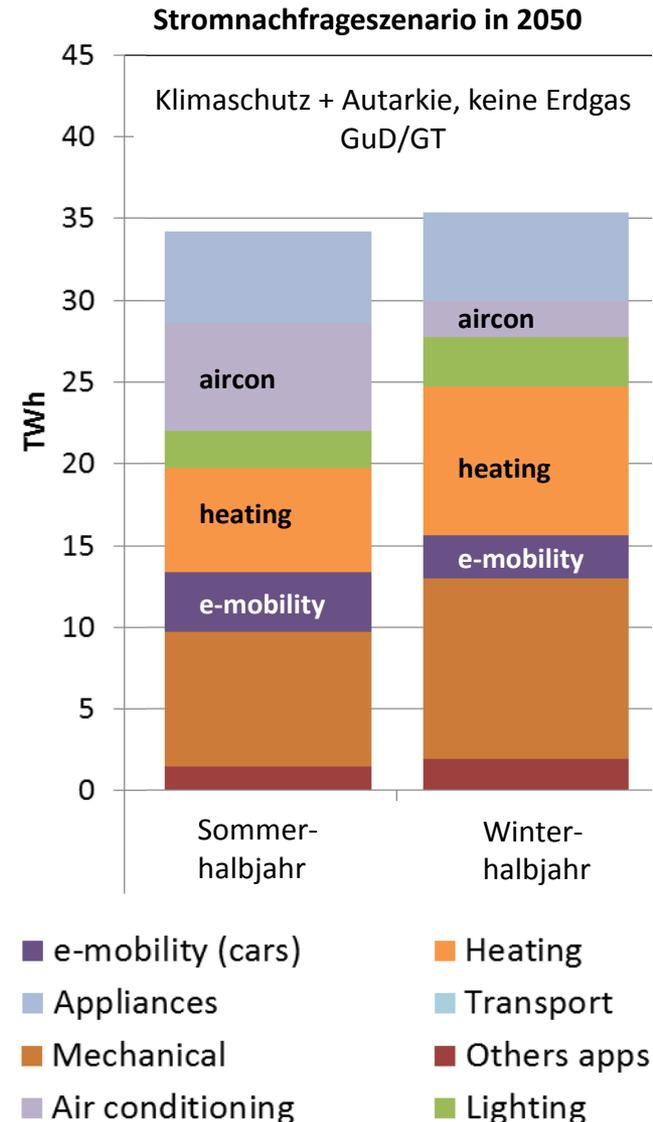
→ strombasierte saisonale Speicherung zur Dekarbonisierung der Energienachfrage

## 4 Flexibilitätsoptionen für den saisonalen Ausgleich im Fokus

- Anpassung der Energieerzeugung
- Import / Export (Stromhandel)
- Energiespeicher (z.B. Speicherkraftwerke, Lager für flüssige Kraft- und Brennstoffe, Gasspeicher und saisonale Wärmespeicher), Sektorkopplung
-  • Anpassung der Energienachfrage (Hybrid-Technologien)

# Saisonale Stromnachfrageflexibilisierung begrenzt

- Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich die Nachfrageprofile in Zukunft verändern (z.B. durch Energieeinsparmassnahmen, el. Klimatisierung und Raum-/Warmwasserbereitstellung, Elektromobilität)
- Saisonale Flexibilität durch Nachfrage-technologien mit mehreren Energieträgern (Strom & Brennstoffe)
  - Plug-in Hybrid-Fahrzeuge
  - Kessel + Speicher mit elektrischer Zusatzheizung
  - Hybridbox (BHKW + el. WP)
- Vor allem kurzfristige Flexibilitätsoptionen zum Load-Shifting
  - Elektrische Raumwärme- und Warmwassertechnologien

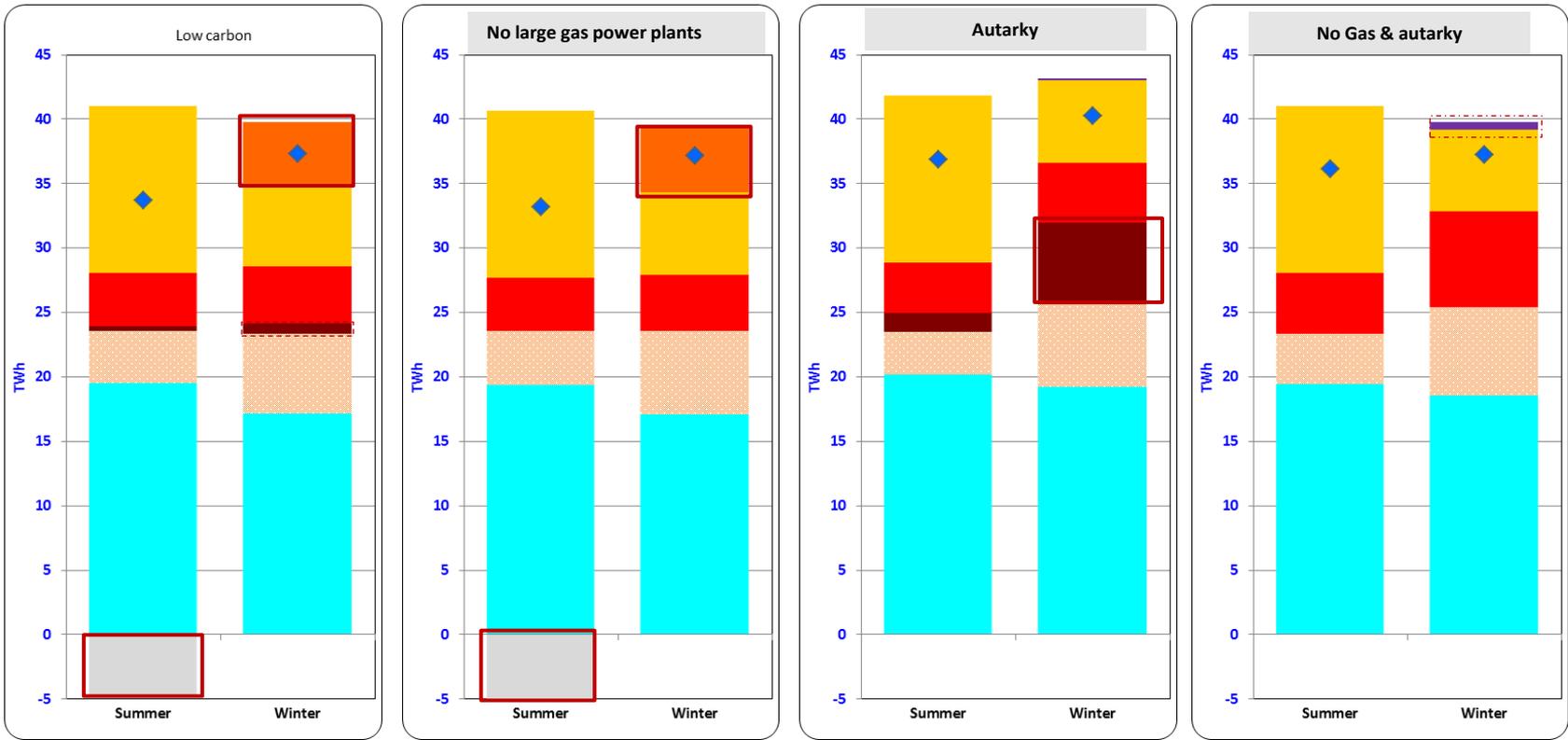


# Generelle Erkenntnisse

- Langfristig kann es zu einem Anstieg der Stromnachfrage kommen (10+% bis 2050 ggü. 2015), insbesondere wenn sich die Dekarbonisierung der Nachfragesektoren auf Stromanwendungen stützt.
- Standortwahl und bedarfsorientierte Produktion aus neuen erneuerbaren Energien ist Teil der Lösung.
- Für Integration von Solar PV ist die kurzfristige Flexibilisierung von besonderer Bedeutung.
- Verschiedene Optionen stehen für die saisonale Flexibilisierung zur Verfügung.

# Zusammenfassung saisonale Flexibilisierung anhand ausgewählter Klimaschutzszenarien für 2050

Boundary →



■ Hydro ■ Gas ■ CHP-Dist ■ Solar ■ Others ■ Storage ■ Net export ■ Net import ◆ Demand

Seasonal flexibility →

Interconnector & gas plant, distr. CHP

Interconnector, distr. CHP

Gas plants &, distr. CHP

distr. CHP & Storage, demand

Kosten für das Energiesystem im Jahr 2050 im Vergleich zum Klimaschutzszenario (low carbon) →

1%

+ 8%

+ 17%

# Pro/Contra der 4 Optionen zur saisonalen Flexibilisierung

Gas-KW

P2X

## Flexible Erzeugung

	+	-
Gas-KW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Kapitalkosten</li> <li>- Produktion im Winter mit WKK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brennstoff- und Emissionskosten</li> <li>- Akzeptanz für Grosskraftwerke</li> </ul>
P2X	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dekarbonisierung Energienachfrage</li> <li>- Bei massivem Ausbau Erneuerbarer</li> <li>- Saisonale Speicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleichsweise hohe Umwandlungsverluste</li> <li>- Kapitalintensiv</li> </ul>

## Stromhandel

	+	-
Gas-KW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grosses Flexibilitätspotenzial</li> <li>- Gute Infrastruktur vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auslandsabhängigkeit</li> <li>- Unsicherheiten</li> <li>- Steigende Strompreise</li> </ul>

## Energiespeicher

	+	-
Gas-KW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kostengünstig für flüssige Brenn- und Treibstoffe</li> <li>- Speicherwasserkraft</li> <li>- Wasserstoff und Methan auch saisonal zu speichern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Batterien, Pump- und Druckluftspeicher eher für Kurzfristspeicherung</li> <li>- Marktbedingungen müssen Anreize zur Langfristspeicherung erlauben</li> </ul>

## Nachfrageflexibilität

	+	-
Gas-KW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Möglichkeiten im Wärmesektor und im Verkehrsbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eher kurzfristig</li> <li>- Verlangt Adaptation durch Konsumenten</li> </ul>

# Schlussfolgerungen / Handlungsempfehlungen

Standortwahl und Ausrichtung von Solar PV ist Teil der Gesamtlösung  
→ Konzept bzw. Anreizsystem für bedarfsgerechten Ausbau

Saisonale Flexibilität im Stromsektor insb. auf der Angebotsseite  
→ Erdgas GuD und dezentrale BHKW als Optionen ermöglichen

Flexibilisierung durch Stromhandel erfordert entsprechende europäische Marktintegration

Für saisonale Energiespeicherung eignen sich eher Speicher mit hohen Energie-zu-Leistungs-Verhältnissen und geringen energiebezogenen Speicherkosten (wie z.B. für gasf. & flüssige Brenn- und Treibstoffe)  
→ Sektorkopplung zur Dekarbonisierung der Energienachfrage

Integrierte Untersuchungen notwendig zu den Wechselwirkungen von Speichern und anderen Flexibilitätsoptionen im Energiesystem, inkl. Einfluss von Netzaspekten und Marktdesign

# Partner

aee SUISSE

 **BKW**  
**swissgrid**



**erdgas**   
Die freundliche Energie.

**TNO**

| s | g | s | w |  
Sankt Galler Stadtwerke

 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

 **UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

 **SCCER CREST**

PAUL SCHERRER INSTITUT

 **PSI**

 **energieschweiz**  
Unser Engagement: unsere Zukunft.

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

 **HSR  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL**

# Referenzen

- Bundesamt für Energie Elektrizitätsstatistik 2016
- Bundesamt für Energie, Gesamtenergiestatistik 2016
- VSG, Jahresstatistik Ausgabe 2017
- BNetzA, 2017, online unter [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/NetzentwicklungundSmartGrid/Flexibilitaet/Flexibilitaet\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungundSmartGrid/Flexibilitaet/Flexibilitaet_node.html)
- SODA database, 2018, online unter <http://www.soda-is.com>
- Bauer, C., S. Hirschberg (eds.), Y. Bäuerle, S. Biollaz, A. Calbry-Muzyka, B. Cox, T. Heck, M. Lehnert, A. Meier, H.-M. Prasser, W. Schenler, K. Treyer, F. Vogel, H.C. Wieckert, X. Zhang, M. Zimmermann, V. Burg, G. Bowman, M. Erni, M. Saar, M.Q. Tran (2017) “Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies.” PSI, WSL, ETHZ, EPFL. Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Switzerland
- Koepfel, G. (2016), Die Rolle der Wasserkraft als Energiespeicher, Symposium der ETH Zürich «Die Zukunft der Energiespeicher: Trends und offene Fragen», 14. Dezember 2016
- V. Jülch (2016), Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method, Applied Energy 183 (2016) 1594–1606
- World Energy Council (2016), World Energy Resources – E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications
- Swissgrid (2015), Bericht zum Strategischen Netz 2025
- Abdon, A., Zhang, X., Parra, D., Patel, M. K., Bauer, Ch., Worlitschek, J. “Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales”, Energy 139 (2017) 1173-1187
- Gasverbund Mittelland AG,
- Carbura, Geschäftsbericht 2016
- Jenni Energietechnik AG
- Panos, E., Ramachandran, K. (2018), Integration of Variable Renewable Energy in Switzerland – Implications for Storage Technologies and System Flexibility, 5th Swiss Symposium Thermal Energy Storage, 29 Jan. 2018, Lucerne

# Acknowledgement

Die Autoren danken K. Ramachandran, E. Panos sowie A. Singh (alle PSI) für Ihre wertvolle Unterstützung bzgl. der modellgestützten Szenarioergebnisse und Datenaufbereitung.