

**Stromversorgung der Schweiz mit 100% Erneuerbaren:
Dezentrale Batteriespeicher und starker
PV-Ausbau mit Abregelung**

Programm

1. Einleitung
2. Datengrundlage
3. Optimierungsansatz
4. Ergebnisse
5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Wo nicht anders angegeben, stammen Erkenntnisse und Grafiken aus dem Bericht aus dem SWEET-EDGE-Projekt:
Stocker, N., Wild, M., Spescha, D., Müller, D., & Rohrer, J. (2025). Facilitation of decentralized renewable Swiss energy systems with batteries, power-to-X, and demand-side management. ZHAW IUNR, Forschungsgruppe Erneuerbare Energien. <https://doi.org/10.21256/zhaw-2575>

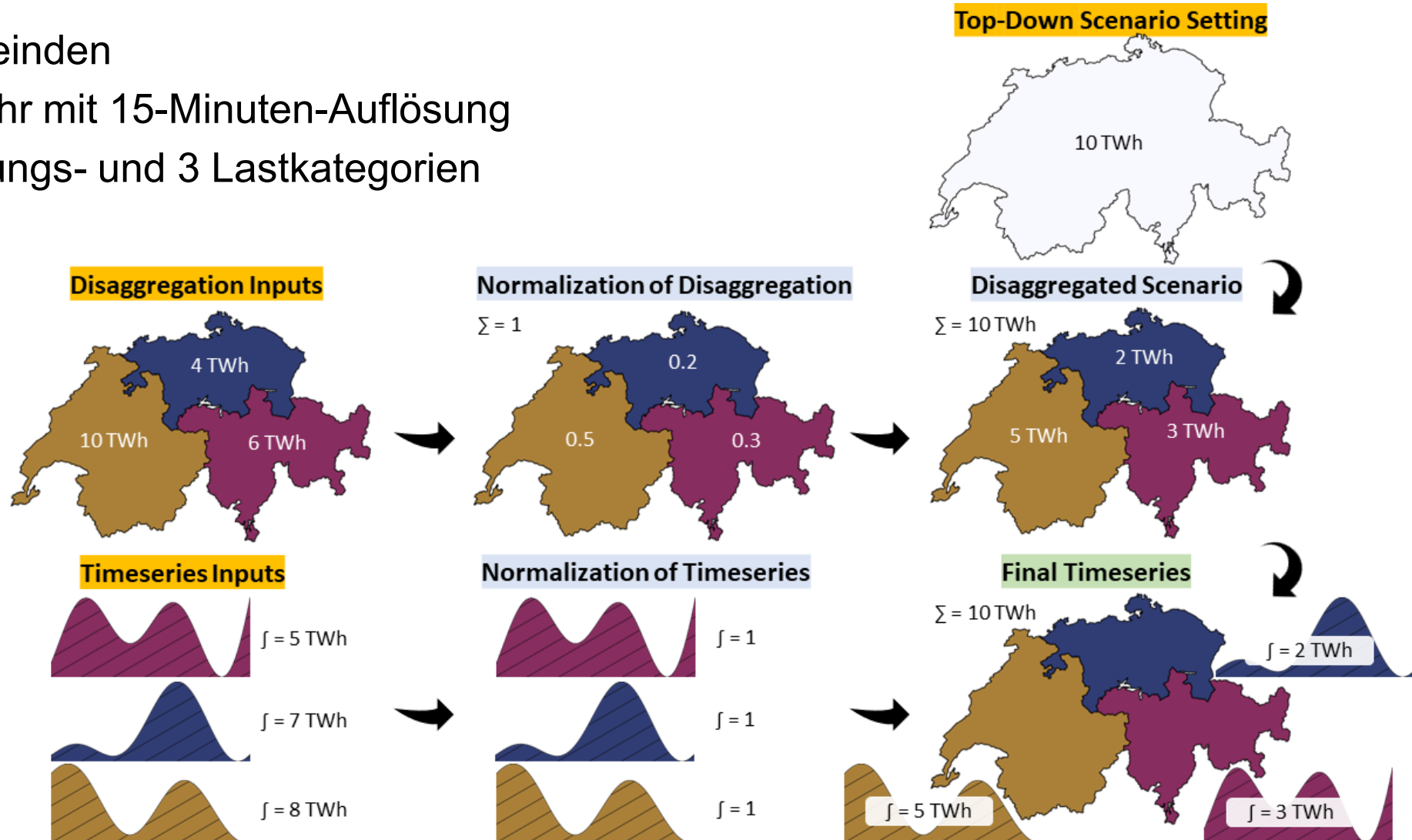


Einführung

- Was ist die kostengünstigste zukünftige Zusammensetzung des Schweizer Stromsystems unter Einbezug der geltenden Gesetze und Ziele?
 - Welche Methoden zum Energieausgleich sind in welchem Umfang sinnvoll (kurzfristig und saisonal)?
- Optimierung für jede Gemeinde zur Bestimmung einer kostenoptimalen Lösung, um für jeden Zeitschritt eine ausgewogene Leistungsbilanz zu erreichen (ein Jahr, stündliche Auflösung).
 - Kurzzeitspeicher (Batterien), Power-to-Hydrogen-to-Power (abgekürzt PtX), PV-Überausbau und Abregelung sowie Demand-Side-Management.
- Verfeinertes ZERO-Basis-Szenario aus den Energieperspektiven 2050+ als Grundlage.
 - Erzeugung: Dach-PV, Fassaden-PV, Infrastruktur-PV, alpine PV, Agri-PV, Wind, Biomasse, Biogas, Abwasser, Kehrrechtverwertung (erneuerbar), Kleinwasserkraft, Laufwasserkraft.
 - Verbrauch: allgemeine Last, Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen.
 - Zusätzlich: Kurzzeit-Batteriespeicher in Kombination mit PV-Ausbau (laut Swissolar sind schon jetzt mehr als die Hälfte der PV-Anlagen in Einfamilienhäusern mit Heimspeichern ausgestattet).

Datengrundlage

- 2148 Gemeinden
- Referenzjahr mit 15-Minuten-Auflösung
- 12 Erzeugungs- und 3 Lastkategorien



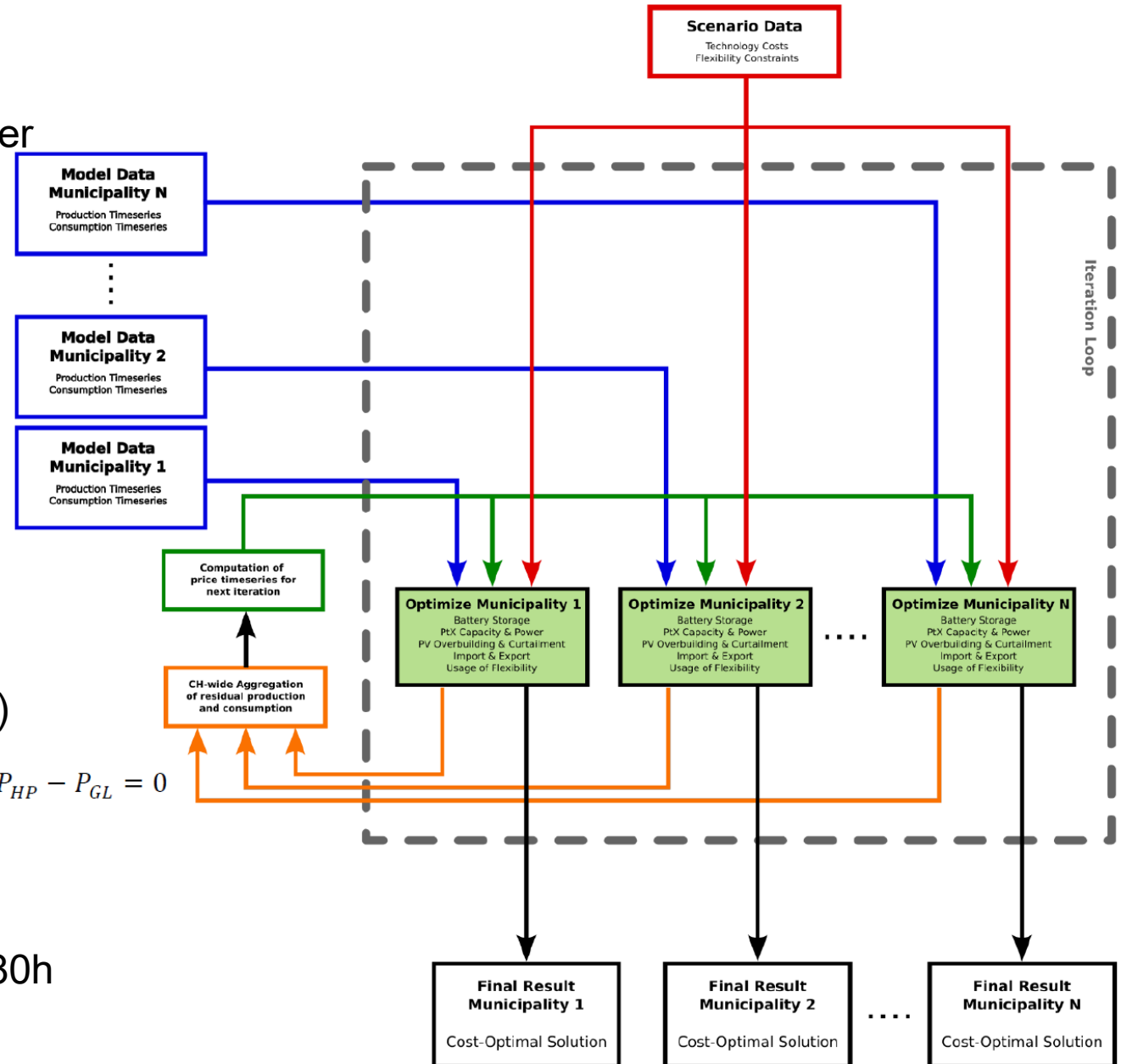
Optimierungsansatz

- Leistungsbilanz für jeden Zeitschritt innerhalb jeder Gemeinde:

- Endogene Erzeugung
- Endogener Verbrauch
- Kurzzeitspeicher (Batterien)
- Saisonaler Speicher (Power-to-Hydrogen-to-Power)
- PV-Ausbau
- Abregelung
- Demand-Side-Management
- Export/Import über Gemeindegrenzen hinweg (dynamische Preiskurve, Kapazität ist begrenzt)

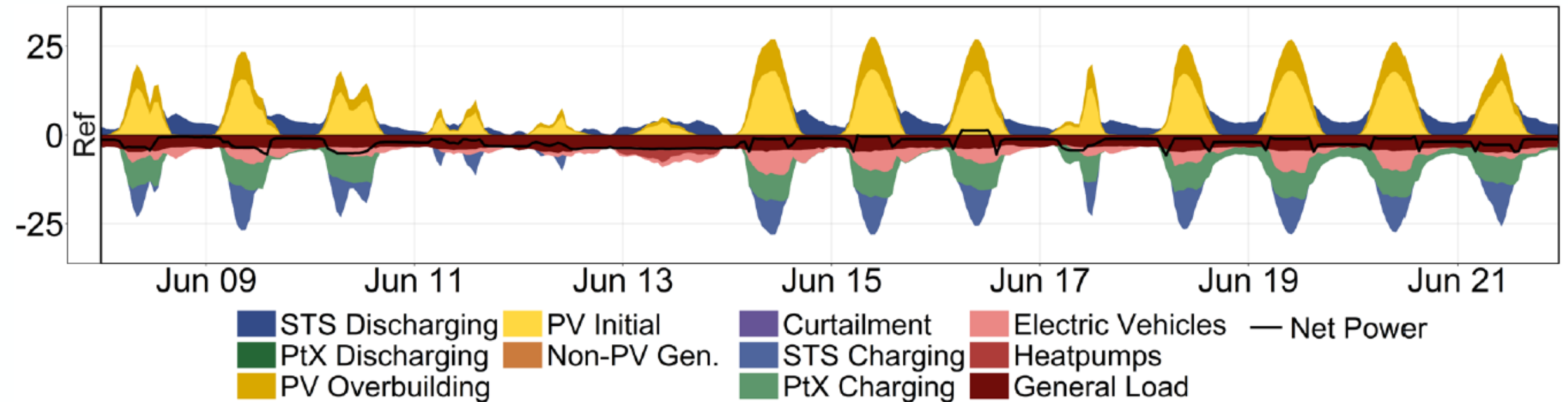
$$P_{PROD}^0 + P_{PV}^+ - P_{CUR} + P_{IMP} - P_{EXP} - P_{BAT}^{ch} + P_{BAT}^{dc} - P_{PtX}^{ch} + P_{PtX}^{dc} - P_{EV} - P_{HP} - P_{GL} = 0$$

- Konvexes Optimierungsproblem in Python mit Gurobi als Solver auf ZHAW-Rechencluster
- 20 Iterationen mit 4h pro Iteration: 1 Szenario in 80h



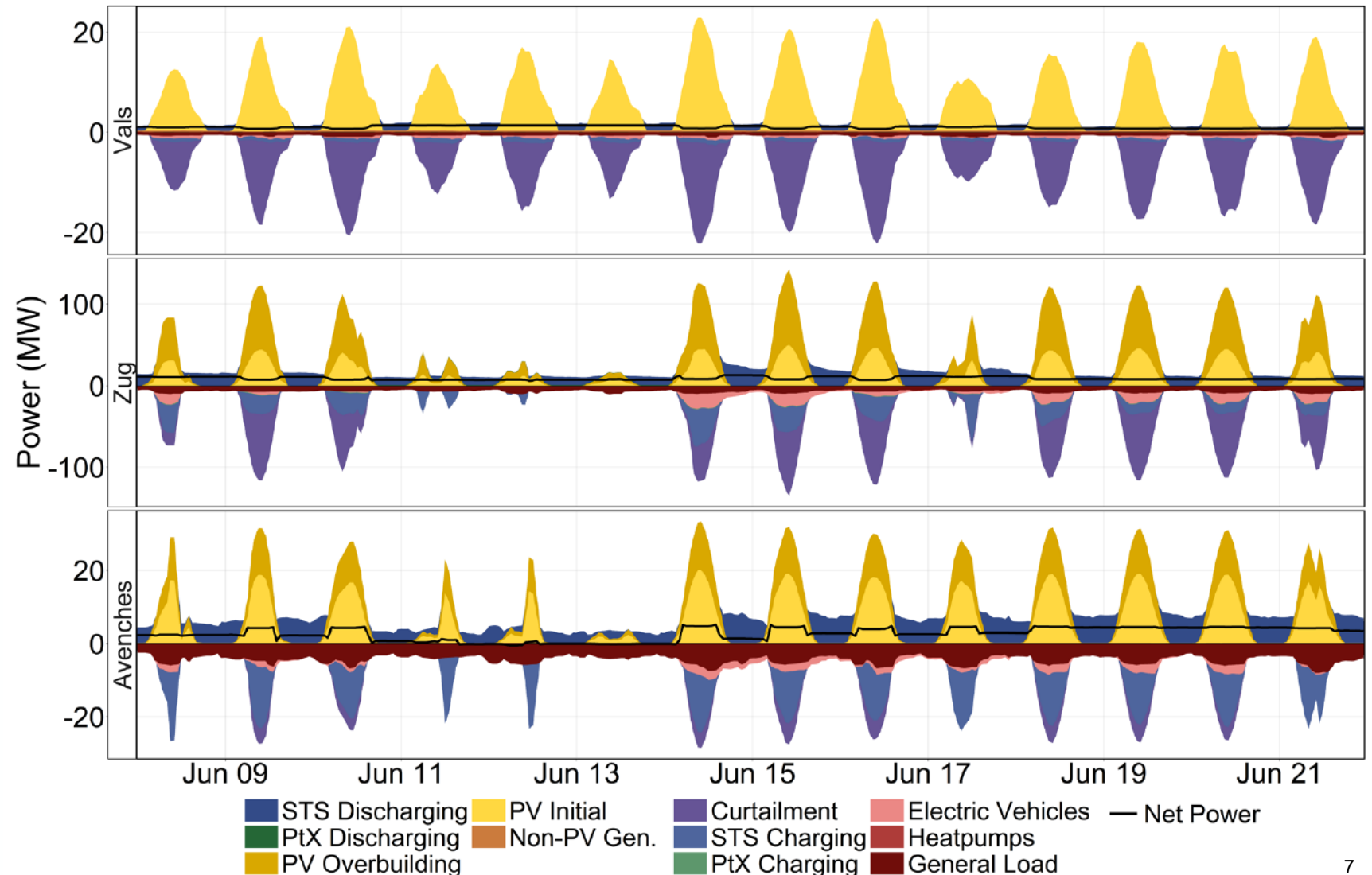
Beispielresultate: Power-to-Hydrogen

Horw als Beispielgemeinde mit Power-to-Hydrogen-to-Power.
Batteriegepufferter Betrieb von PtX sichtbar.

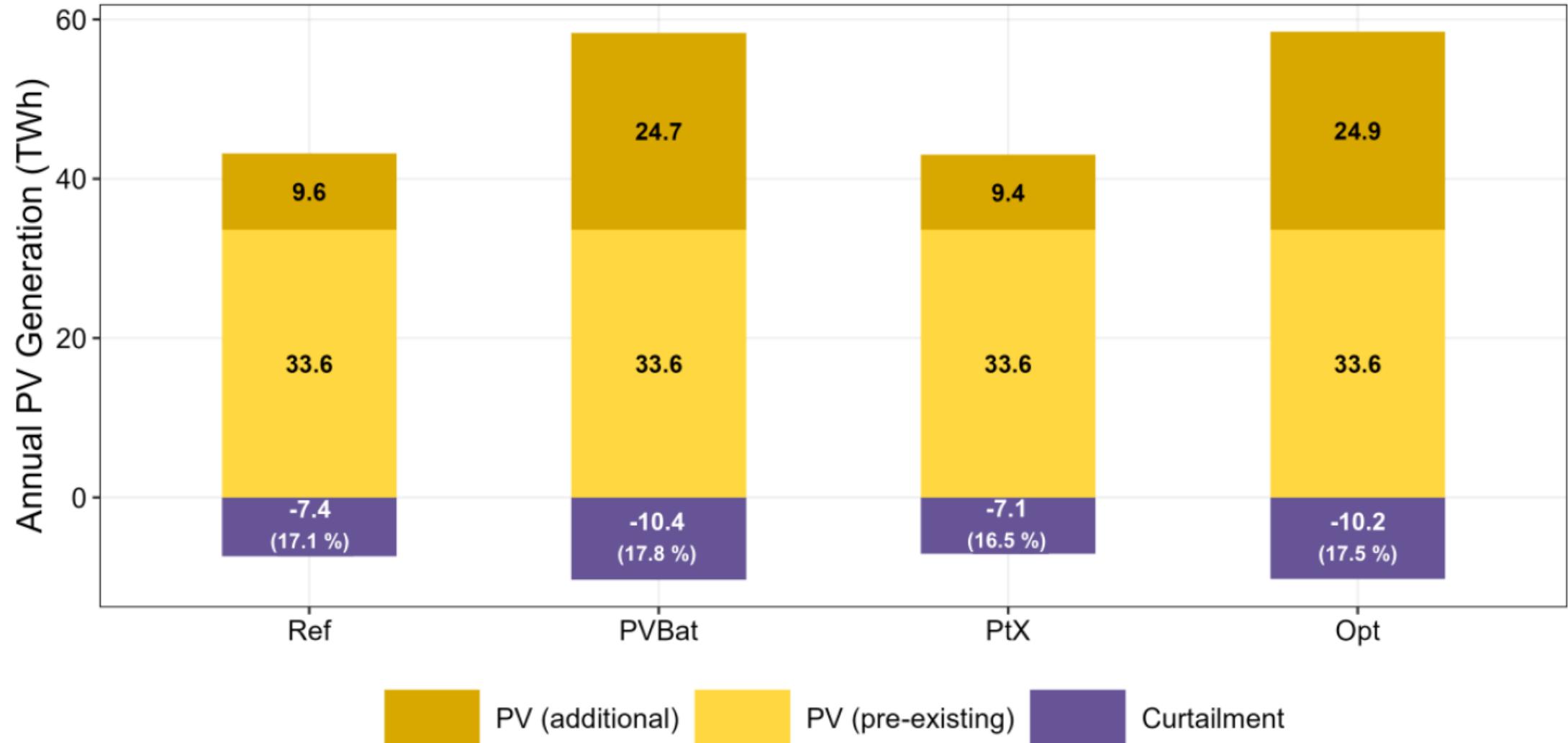


Beispielresultate

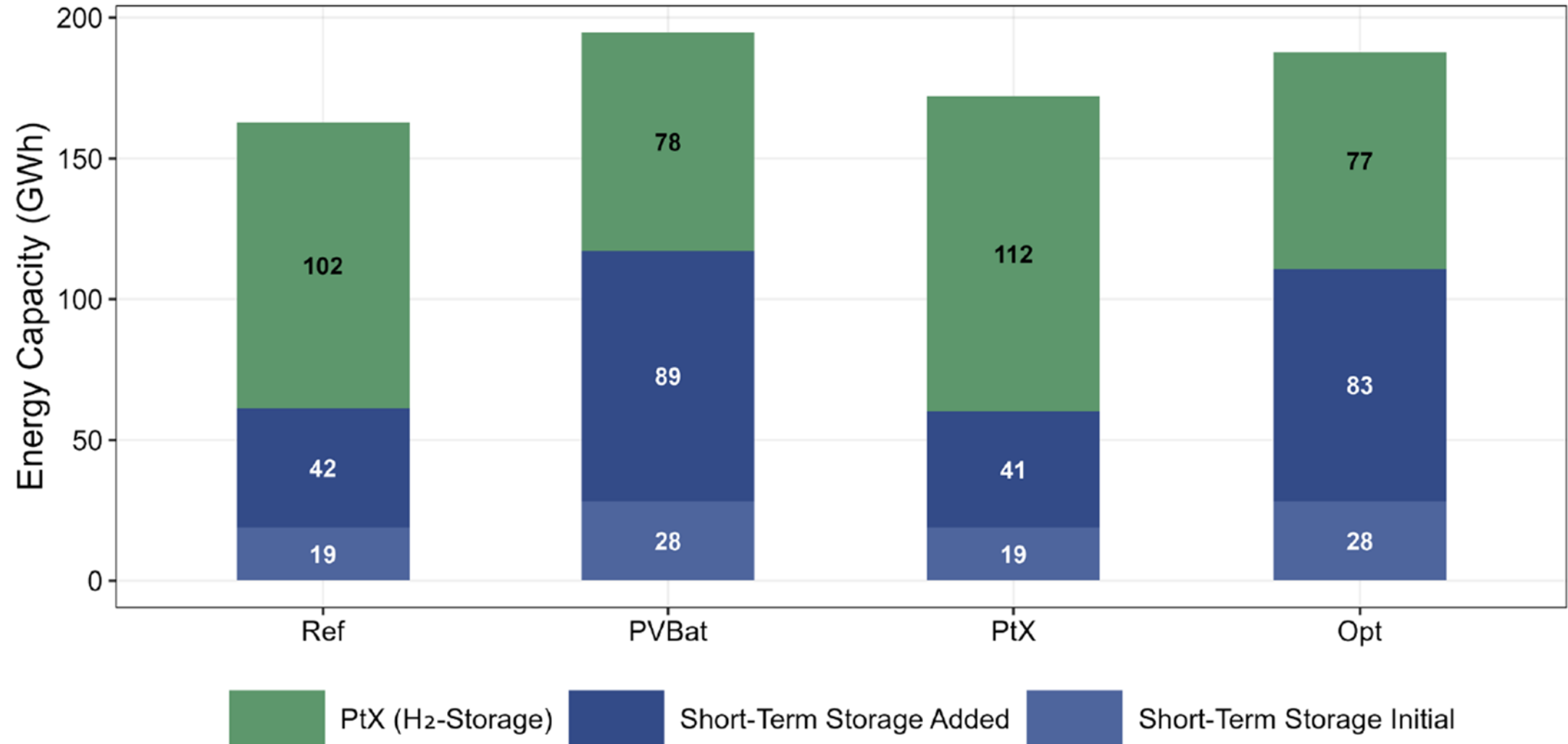
- Die meisten Gemeinden weisen keine saisonale Speicherung mit PtX auf.
- Dominierende Strategie: PV-Überausbau, Abregelung und Kurzzeitspeicherung.



PV-Ausbau und Abregelung

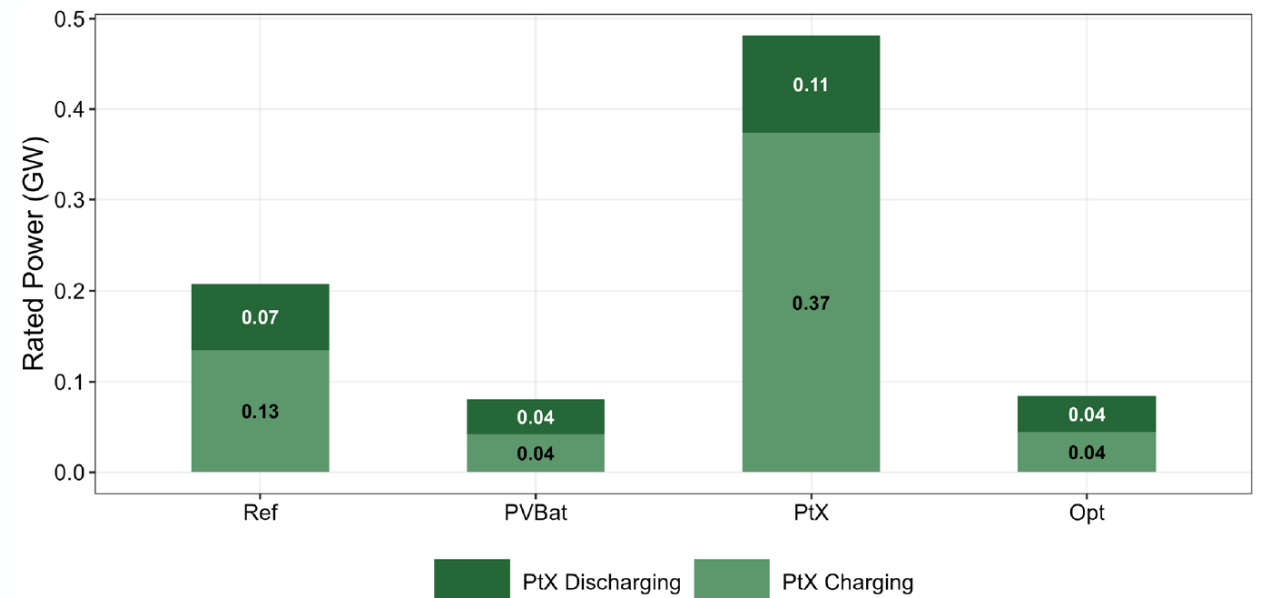
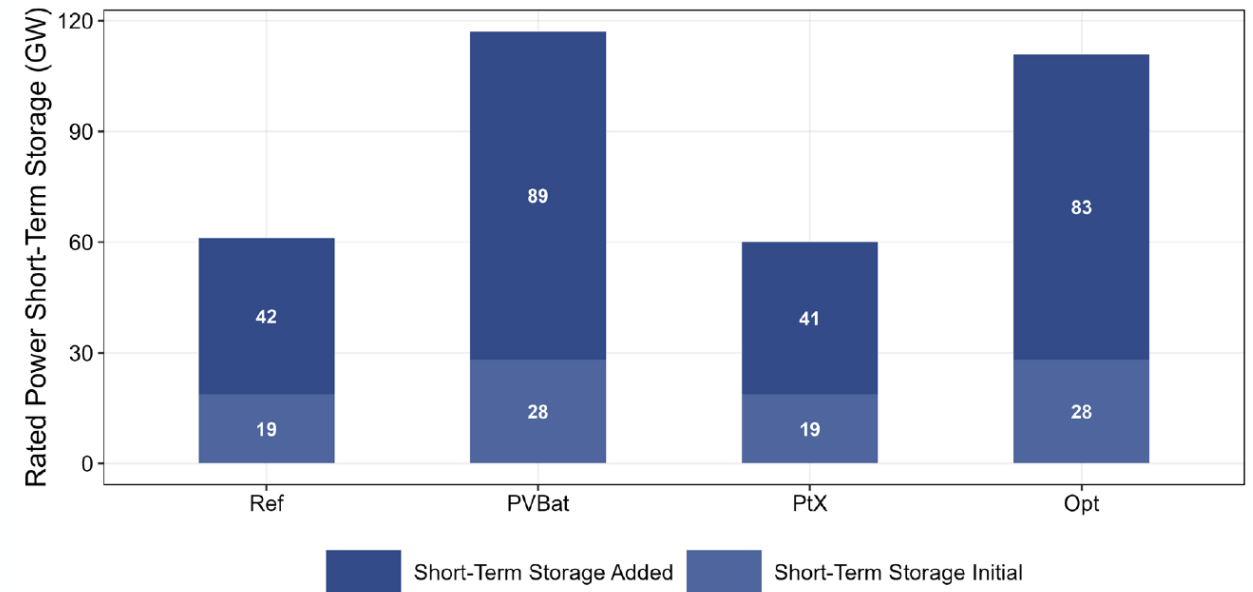


Speicherkapazitäten



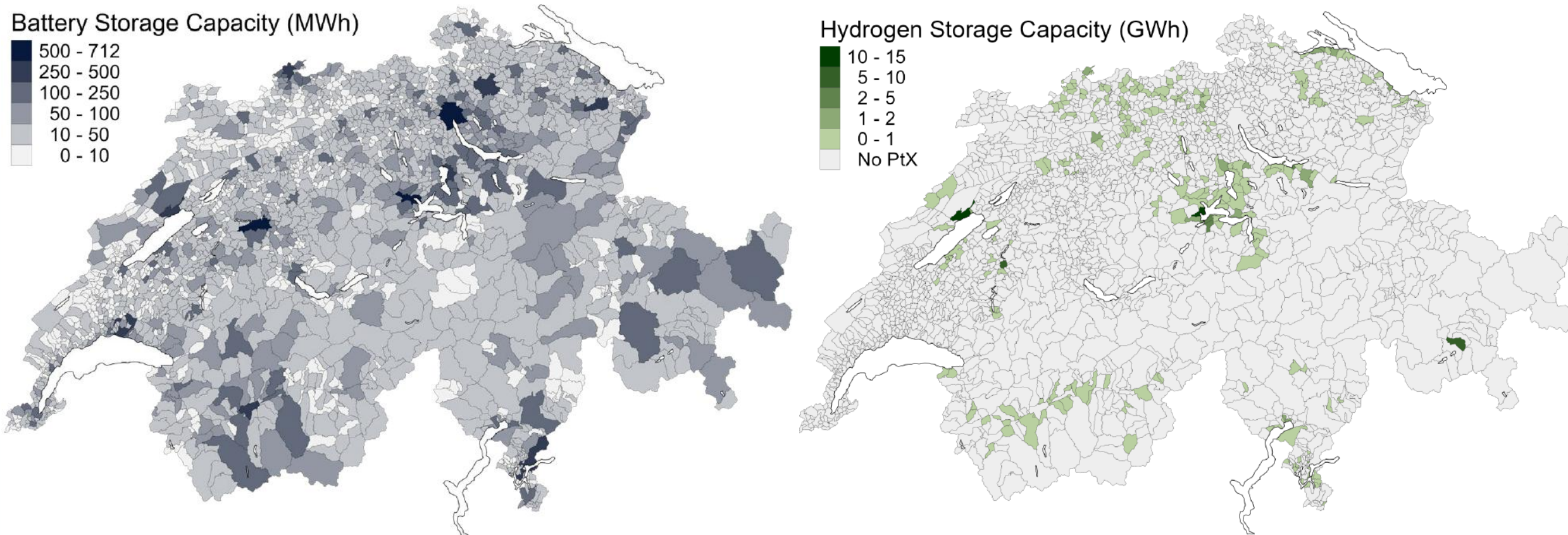
Speicherleistungen

- Installierte Leistungskapazität von Kurzzeitspeichern in allen Szenarien enorm (C-Rate = 1).
- Installierte Leistung von Elektrolyse und Brennstoffzellen sehr begrenzt.
- Batteriegepufferter Betrieb von Power-to-Hydrogen → nahezu kontinuierlicher Betrieb im Sommer möglich.

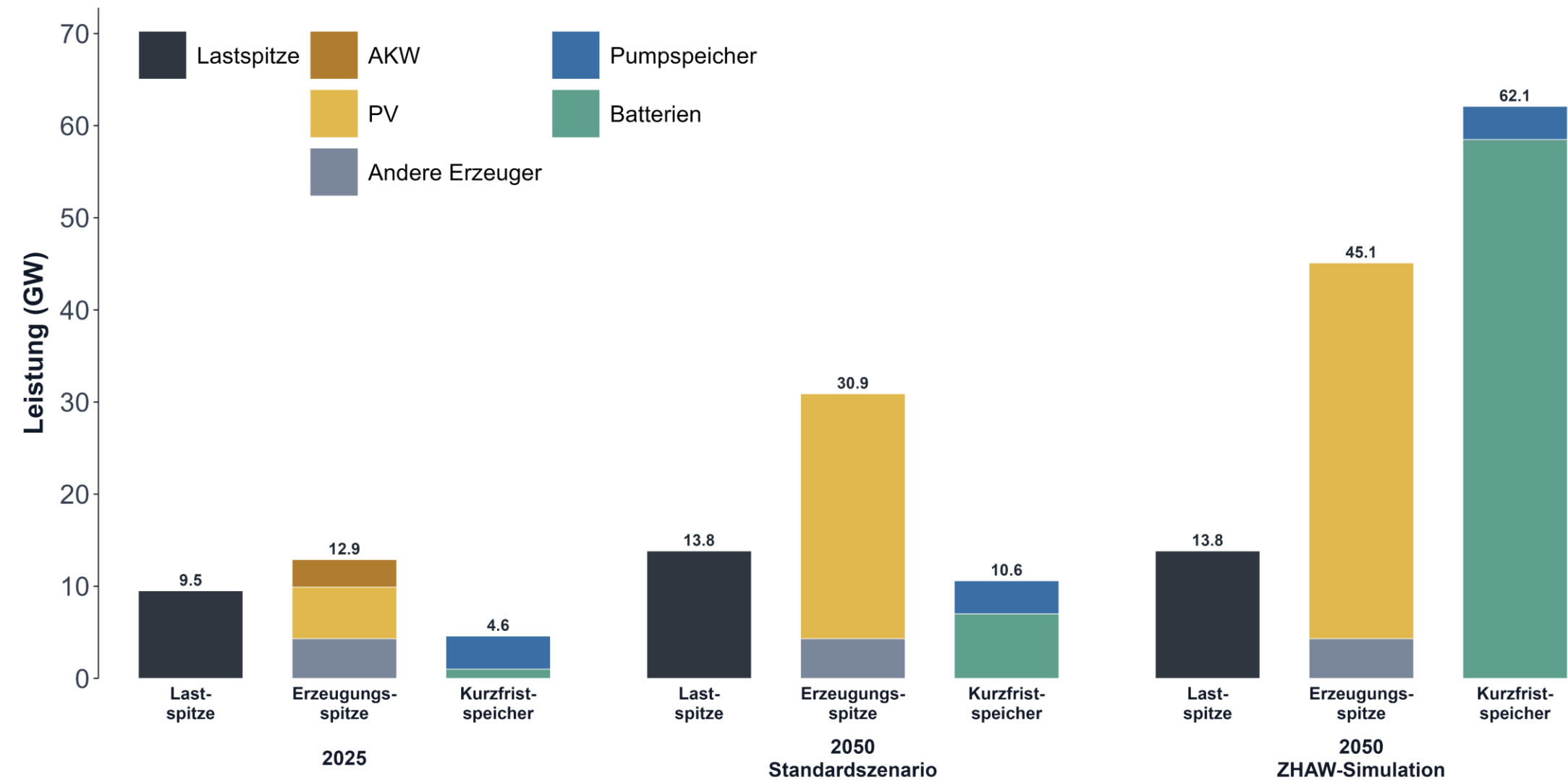


Räumliche Verteilung der Speicher

Resultate des Referenz-Szenarios



Resultate im Kontext: Leistungswerte im Fokus



Diskussion

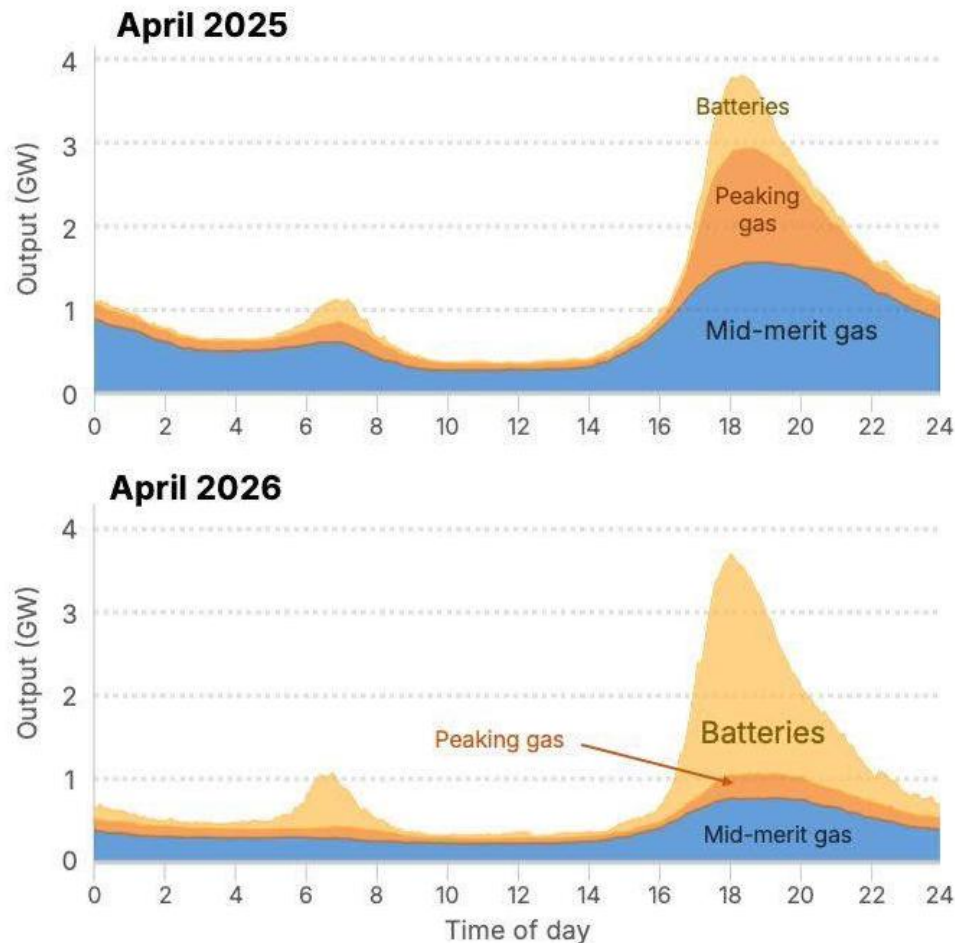
- Batterierevolution: aktuell doppelt unterschätzt in der Schweiz:
 - Geschwindigkeit weltweit deutlich höher als bisher angenommen.
 - Auswirkungen Batterien bei entsprechender Regelung tiefgreifend.
- Paradigmenwechsel mit grossen Auswirkungen auf:
 - Betrieb Stromnetze
 - Integration fluktuierender Erneuerbarer
 - Resultate an den Strommärkten (Energie und Systemdienstleistungen) und damit auf alle anderen Stromerzeugungstechnologien
 - Energiegemeinschaften
 - Microgrids und Smart Grids



Vergleich mit Pumpspeicherkraftwerk Linth-Limmern;
Leistung der Generatoren und Pumpen: **1 GW**

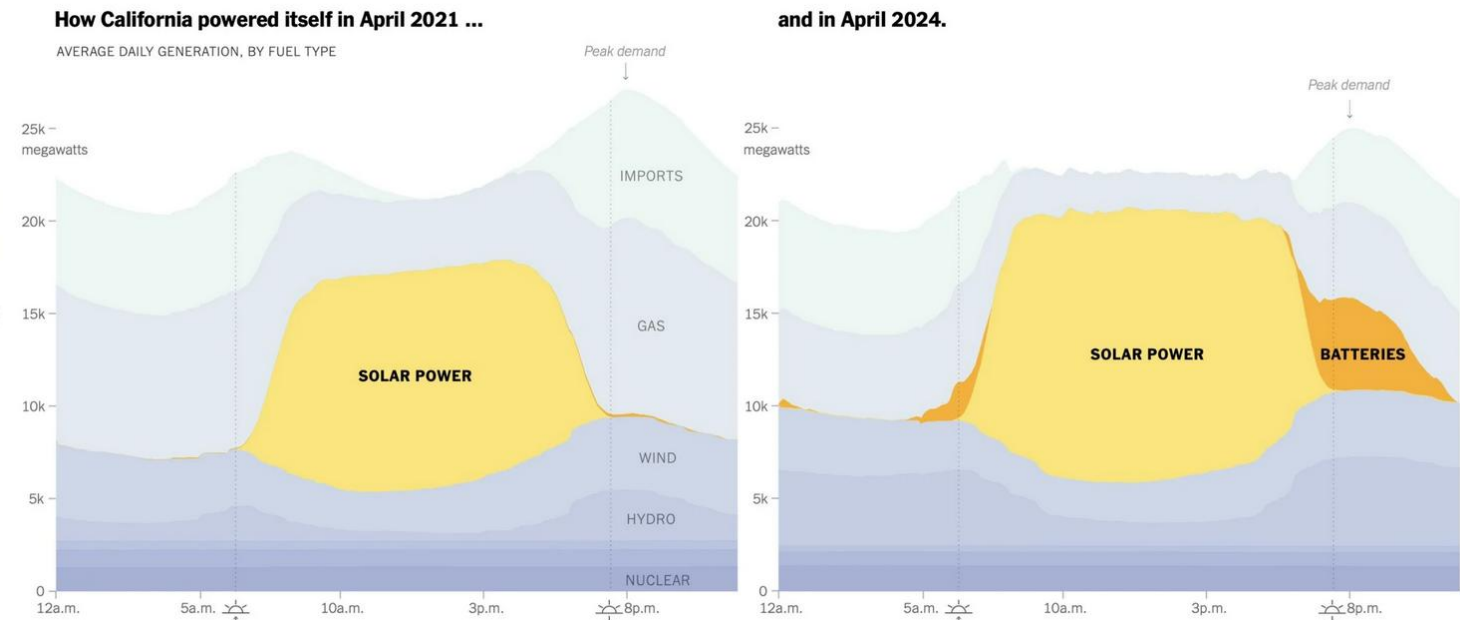
Diskussion

- Australien und Kalifornien: Hohe PV-Durchdringung, schneller Batteriezubau. Unsere Zukunft?
- Gewichtige Konsequenzen für andere Technologien an den Strommärkten und Vorteile fürs Netz.



Source: Open Electricity, via AFR
NEM 28-day average ending 30th April each year

@gavinmooney



Plumer and Popovich, New York Times, 7. Mai, 2024
Datenquelle: California Independent System Operator via Grid Status

Schlussfolgerungen

- Eine Schweizer Stromversorgung auf Basis von 100 % erneuerbarer Energie (inländisch) erwies sich als machbar, mit Netto-Winterstromimporten von unter 5 TWh.
- Rückgrat der kostenoptimalen Lösung:
 - PV-Überausbau (höher als Ziele gemäss Stromgesetz)
 - Dynamische Abregelung
 - Kurzzeit-Energiespeicherung
- Flexibilitäten bei der Ladung von E-Fahrzeugen und beim Betrieb von Wärmepumpen sinnvoll nutzbar (wenig zusätzlicher Ressourceneinsatz).
- Power-to-Hydrogen-to-Power mit nur marginalen Beiträgen und ungleichmässiger räumlicher Verteilung.
- Enorme installierte Leistung von Kurzzeitspeichern (Batterien).
 - Tiefgreifende Auswirkungen auf das Schweizer Stromsystem.
 - Würde einige Herausforderungen der Schweizer Energiewende entschärfen.
- Enorme Kapazitäten für Kurzfristausgleich führen durch Arbitrage zu Strompreisen, die über längere Perioden praktisch konstant sind (tief im Sommer, höher im Winter).

Danke für das Interesse!

Forschungsgruppe Erneuerbare Energien am Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen der ZHAW:
<https://www.zhaw.ch/de/lfsf/institute-zentren/iunr/oekotechnologien-energiesysteme/erneuerbare-energien>



Jürg Rohrer
Prof. und Gruppenleiter
Juerg.Rohrer@zhaw.ch



Nicolas Stocker
Wiss. Mitarb. / Dozent
Nicolas.Stocker@zhaw.ch



Michael Wild
Wiss. Mitarbeiter
Michael.Wild@zhaw.ch



Dominic Müller
Wiss. Mitarbeiter
Dominic.Mueller@zhaw.ch

Die in dieser Präsentation vorgestellten Forschungsergebnisse wurden mit Unterstützung des Schweizerischen Bundesamts für Energie im Rahmen des SWEET-Konsortiums EDGE erarbeitet. Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für die in dieser Publikation enthaltenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen.