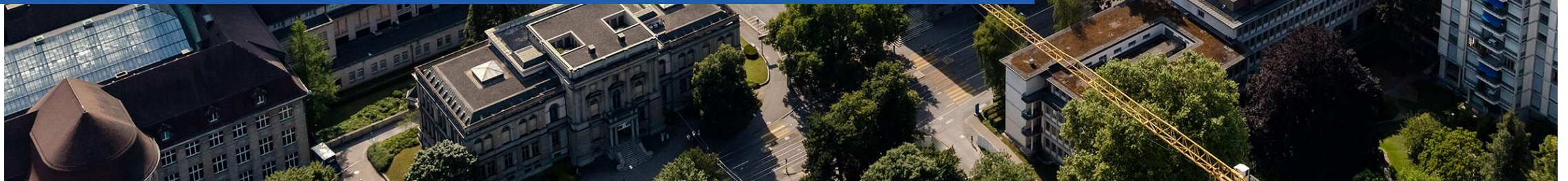




# Das elektrische Energiesystem im Wandel

Prof. Dr. Gabriela Hug  
07.05.2026

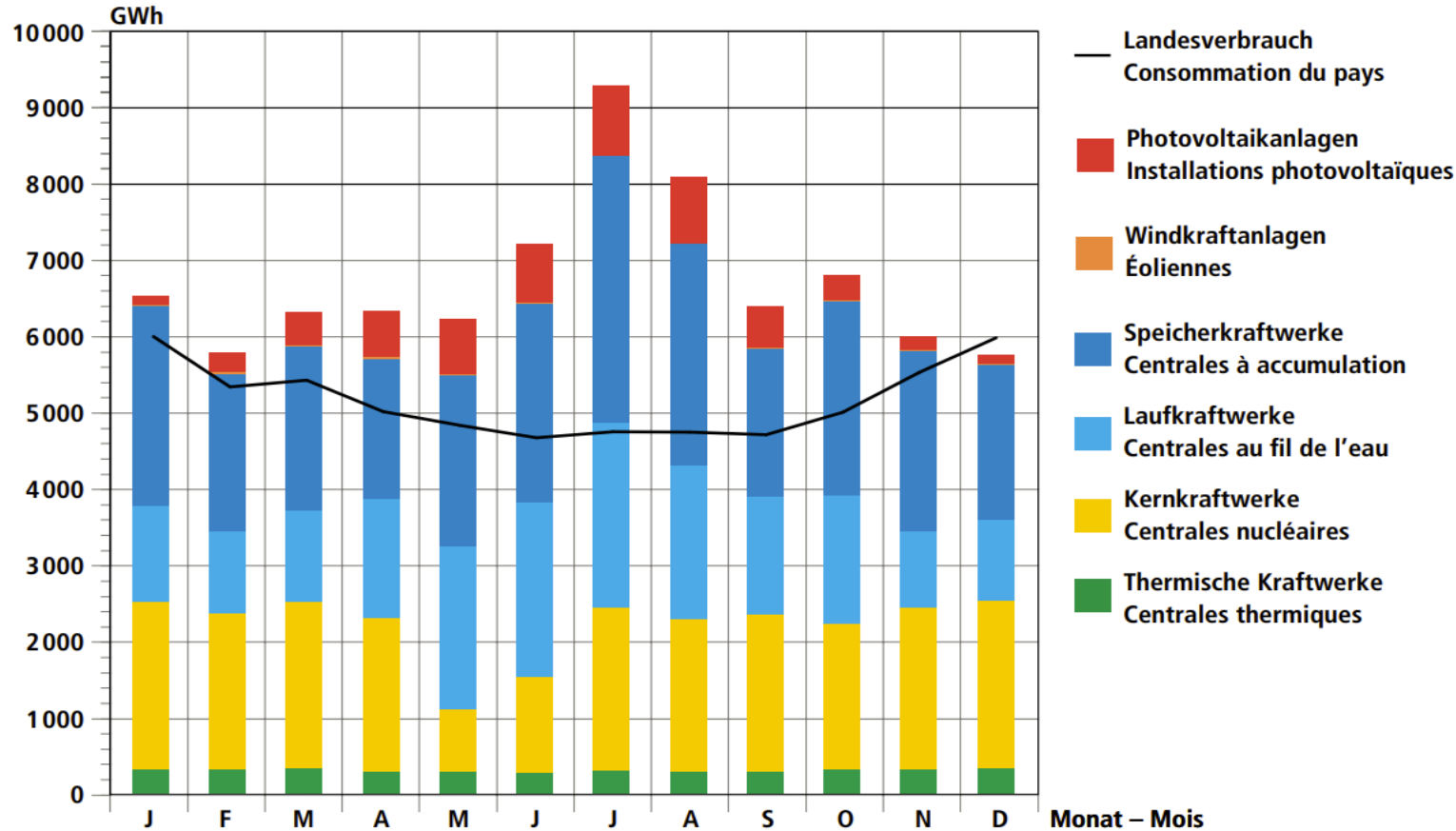


# Übersicht

- Elektrisches Energiesystem und dessen Betrieb
- Szenario für die Schweiz und Herausforderungen
- Nutzung von Flexibilität
  - Potential E-Mobilität
  - Tarifgestaltung
- Zusammenfassung

# Elektrische Energieerzeugung

## ■ Produktion/Konsum Schweiz (2024)



Quelle: Bundesamt für Energie, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2024»

### Daten 2024:

Gesamtproduktion:  
76.2 TWh

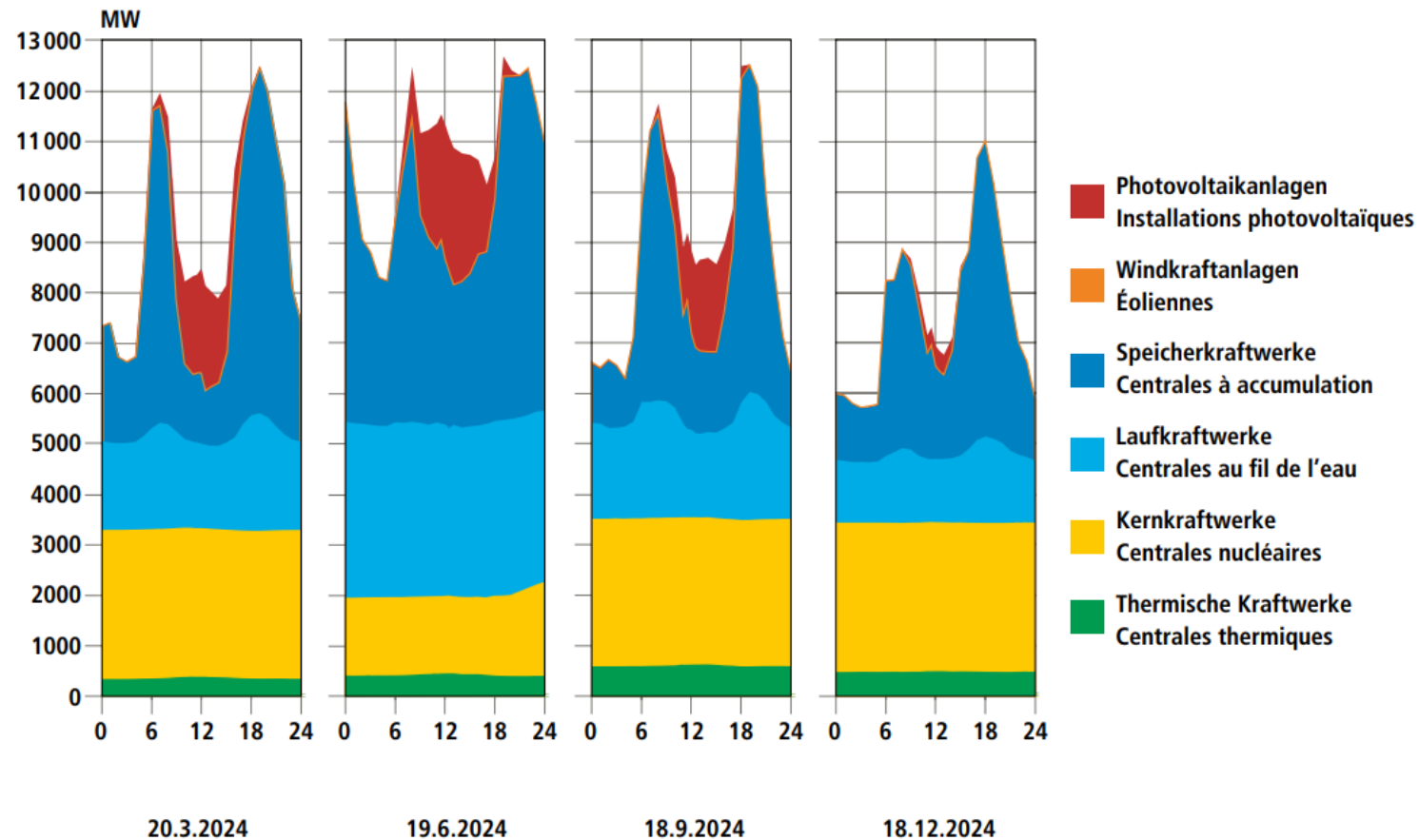
Gesamtverbrauch:  
57.5 TWh

↳ Verluste:  
4.3 TWh  
(Übertragung  
und Verteilung)

↳ Import/Export

# Elektrische Energieerzeugung

## ■ Produktion/Konsum Schweiz (2024)

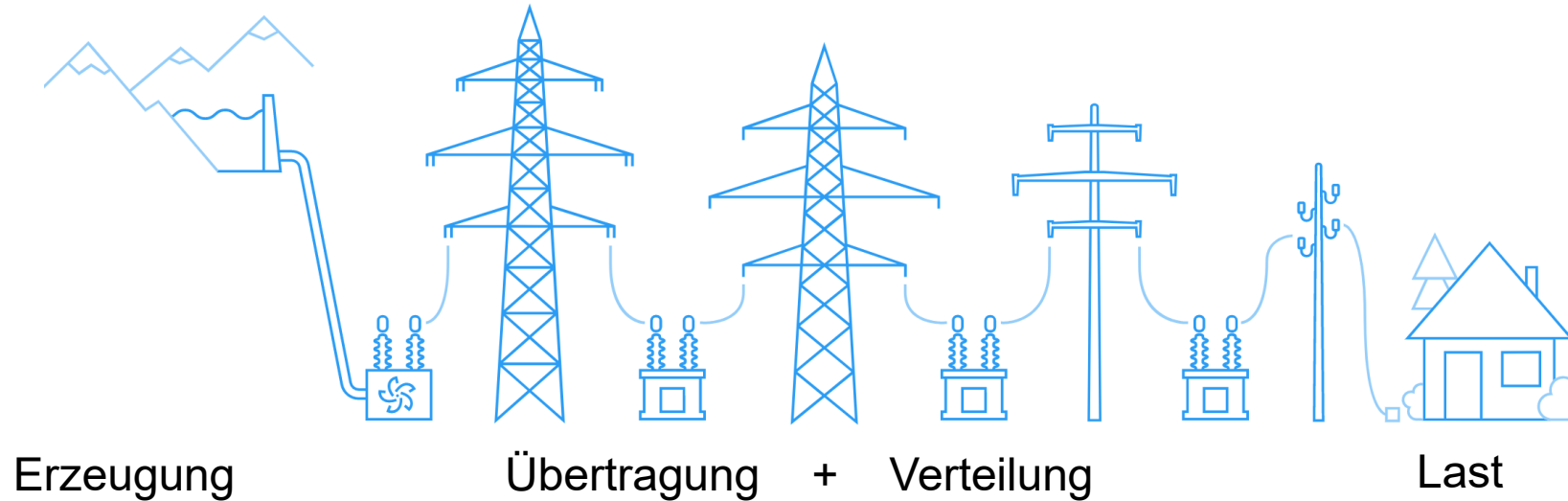


- Wasserkraft als flexible Ressource
- Nuklearkraft momentan als Bandenergie
- Steigender Beitrag von PV Anlagen

Quelle: Bundesamt für Energie, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2024»

# Elektrische Energieübertragung und Netzbetrieb

- Physische Struktur



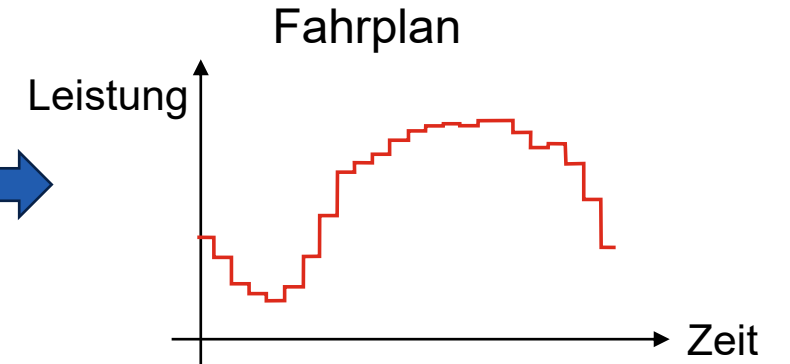
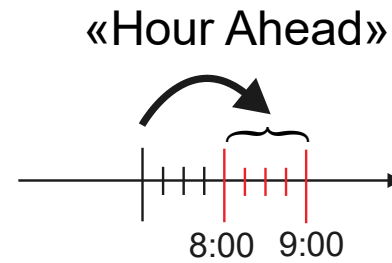
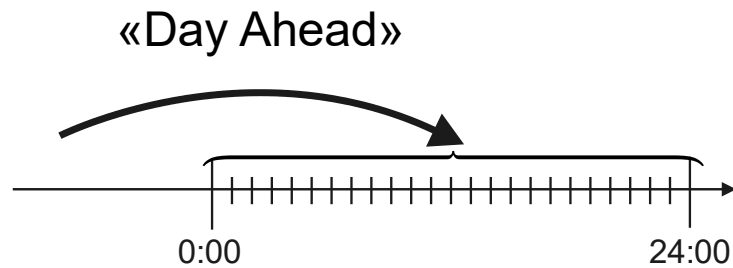
Source: [www.swissgrid.ch](http://www.swissgrid.ch)

- Betrieb

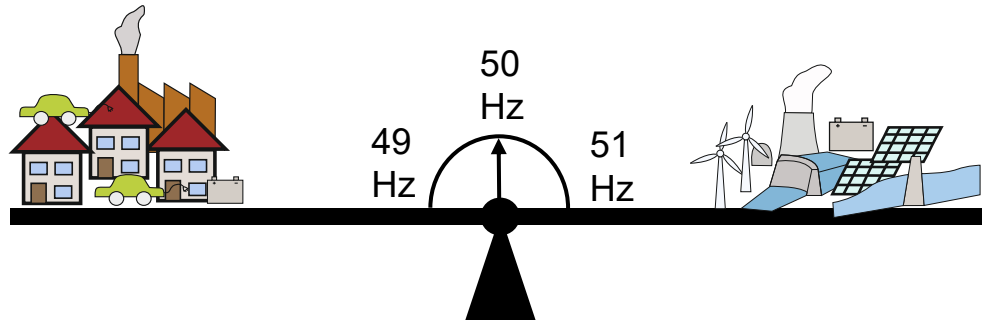
- I. Ausbalancieren von Erzeugung und Verbrauch
- II. Vermeiden von Verletzungen der Netzbeschränkungen

# Ausgleich Erzeugung und Verbrauch

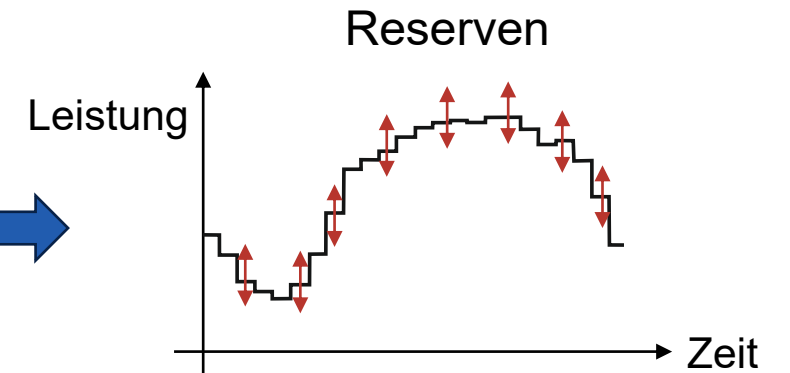
- Fahrplan
  - Basierend auf Vorhersagen



- Echtzeit-Betrieb
  - Basierend auf Frequenzabweichung



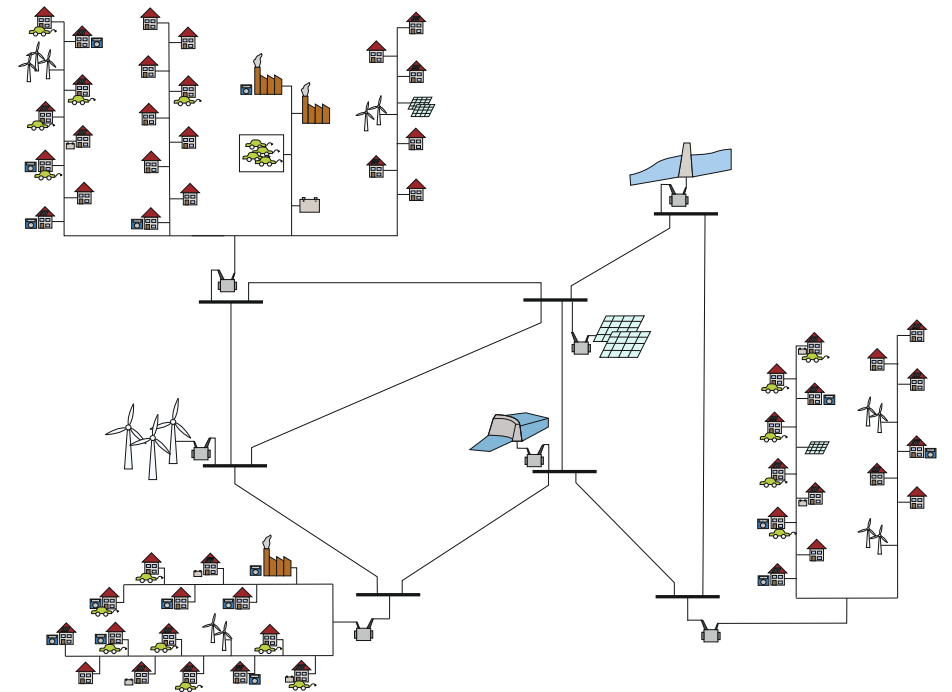
$$\dot{f} = \frac{p_M - p_E}{M}$$



# Einhaltung von Netzlimitierungen

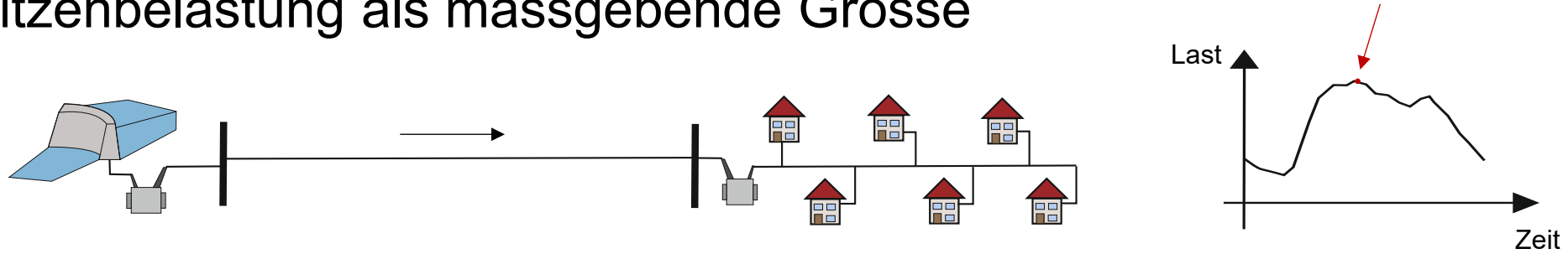
- Netzlimitierungen
  - Leistung fließt gemäss physikalischen Gesetzen und bestimmt die Spannungen
  - Kapazität jeder Komponente (Leitung, Transformator) ist limitiert
  - Spannungen müssen zwischen definierten Werten liegen
- Netzbetrieb
  - Berechnung der resultierende Netzflüsse und Spannungen und gegebenenfalls Anpassung des Fahrplans der Kraftwerke oder Einleitung weiterer Massnahmen

Ort der Einspeisung  
ist wichtig!

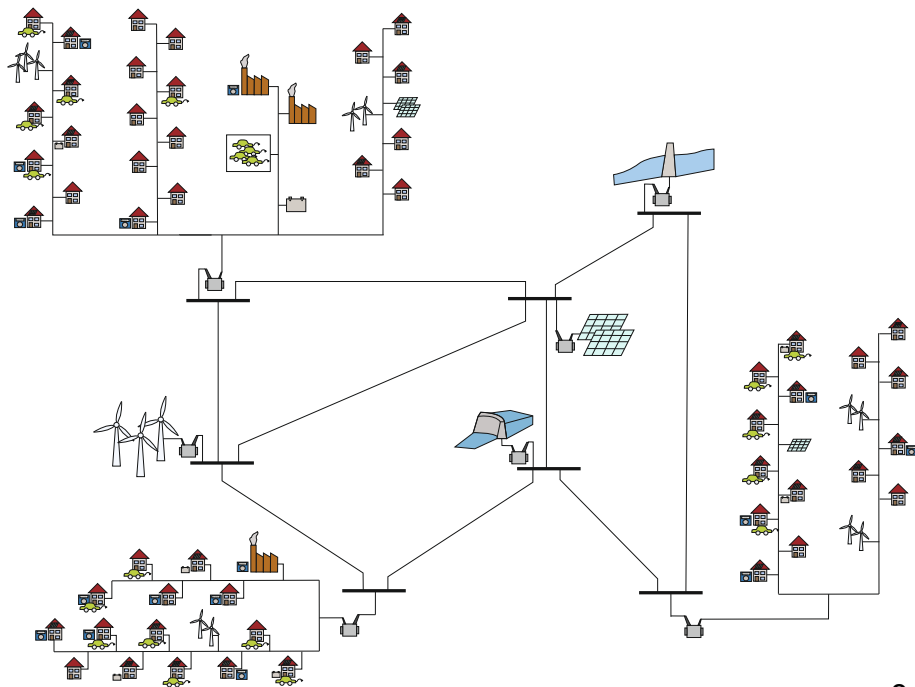


# Planung des Stromnetzes

- Spitzenbelastung als massgebende Grösse



.... im Fall von einem System ist es etwas komplizierter ...



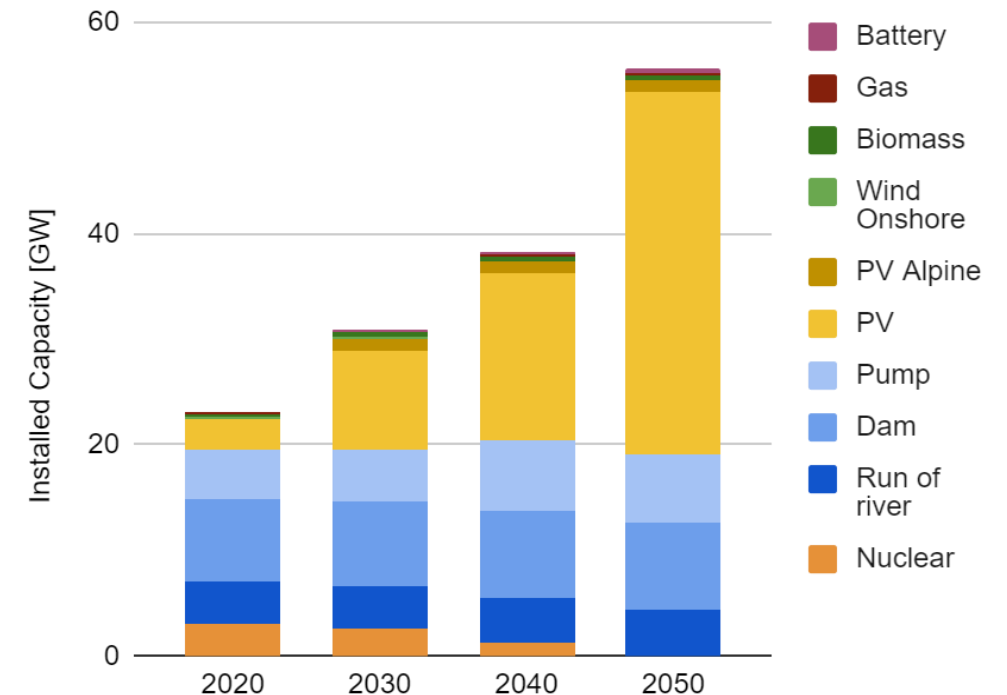
➔ sowohl die Last wie auch die Erzeugung und deren geographische und zeitliche Verteilung spielen eine Rolle

# Übersicht

- Elektrisches Energiesystem und dessen Betrieb
- Szenario für die Schweiz und Herausforderungen
- Nutzung von Flexibilität
  - Potential E-Mobilität
  - Tarifgestaltung
- Zusammenfassung

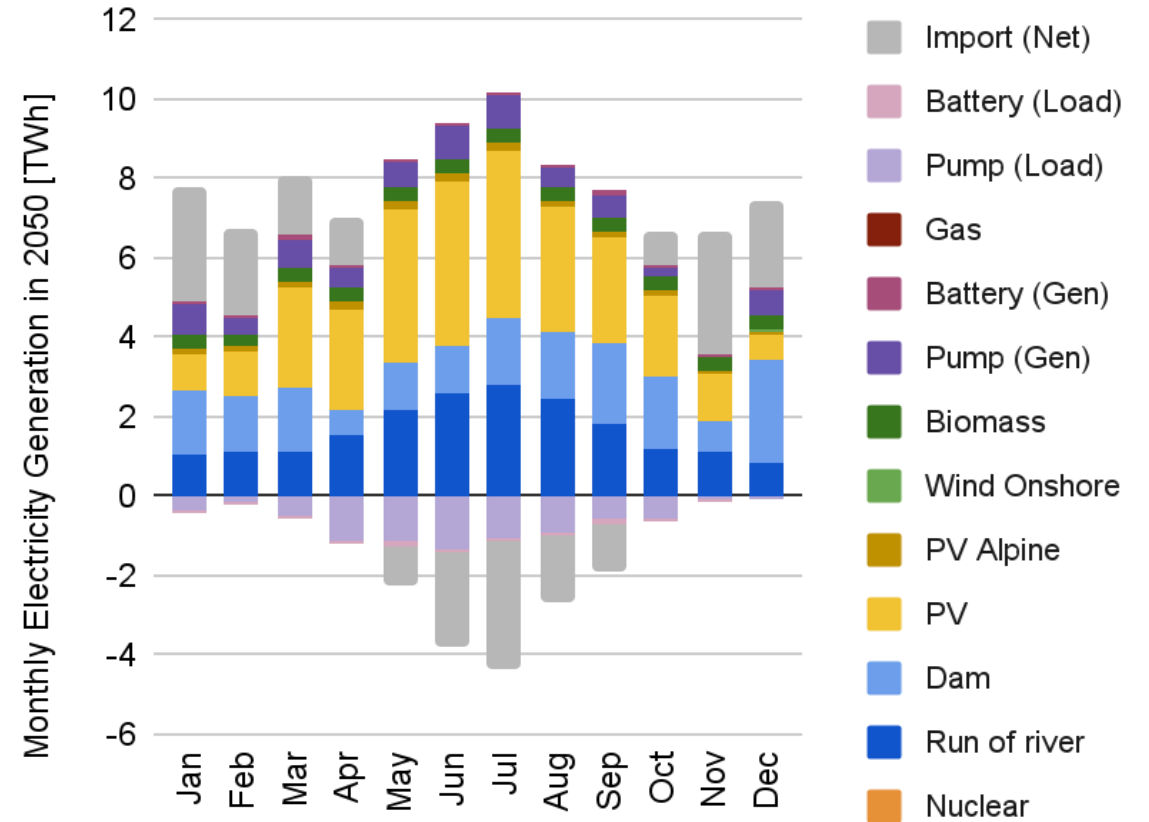
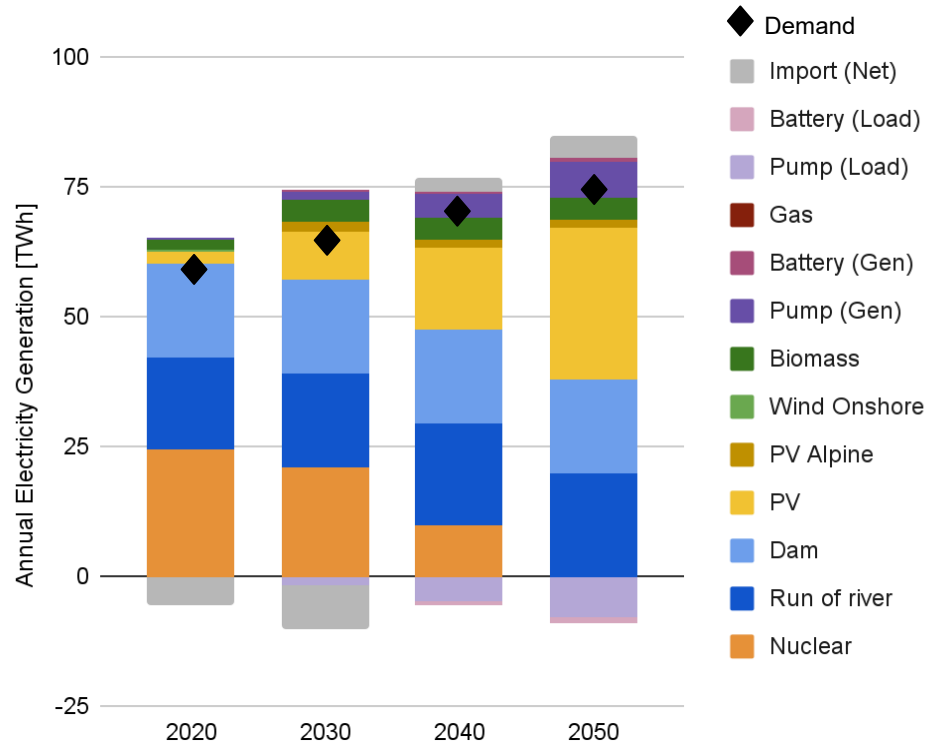
# Mögliches Szenario – Schweiz 2020 - 2050

- Ausstieg aus Kernenergie 2050 (gemäss Energiestrategie)
- Starker Anstieg in Dach-PV Kapazität, kleiner Beitrag Alpine PV und Wind
- Nutzung von (Pump-)Speicherkraft und Import/Export zum Ausgleich
- Gaskraftwerk als Backup
- Anstieg des Verbrauchs durch E-Mobilität und Wärmepumpen



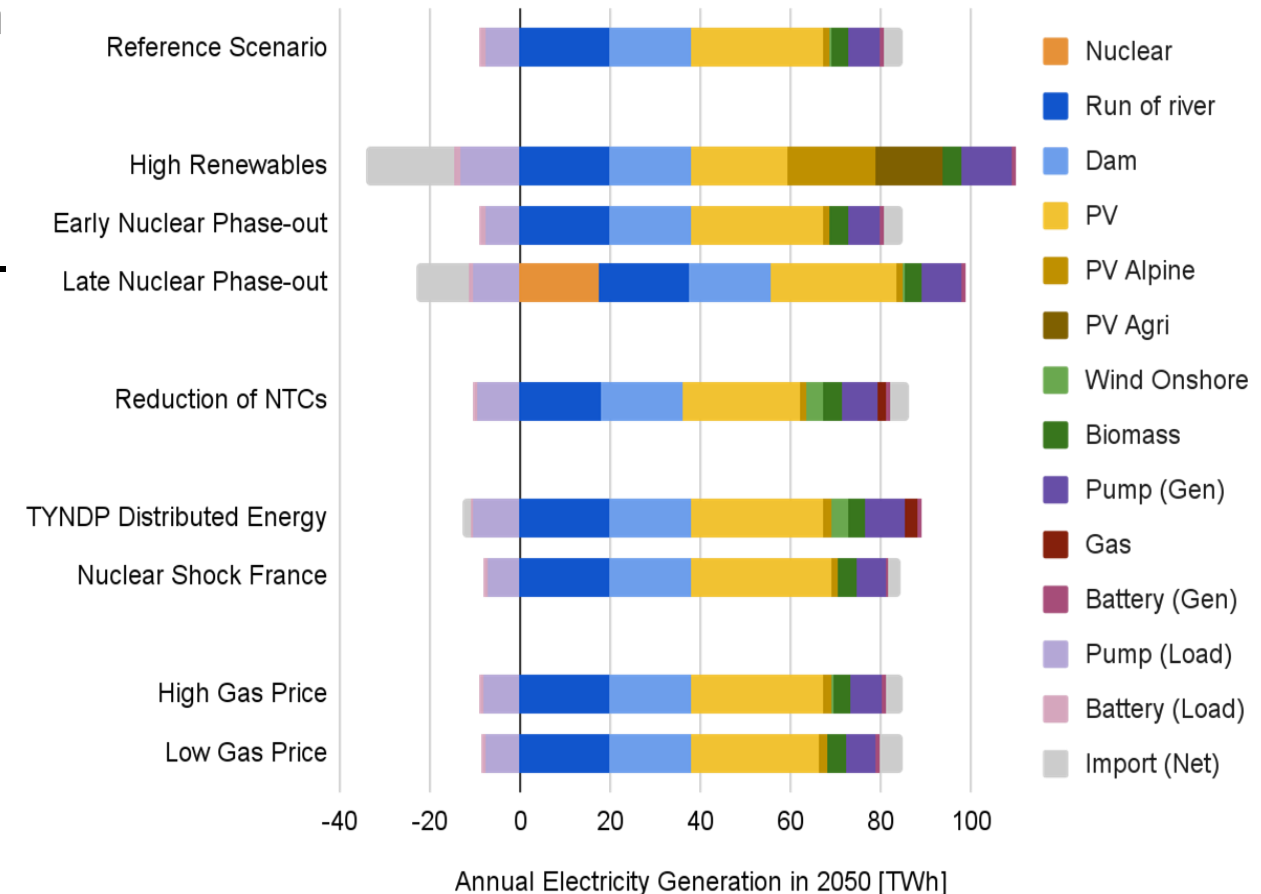
# Mögliches Szenario – Schweiz 2020 - 2050

## ■ Jährliche und Monatliche Produktion



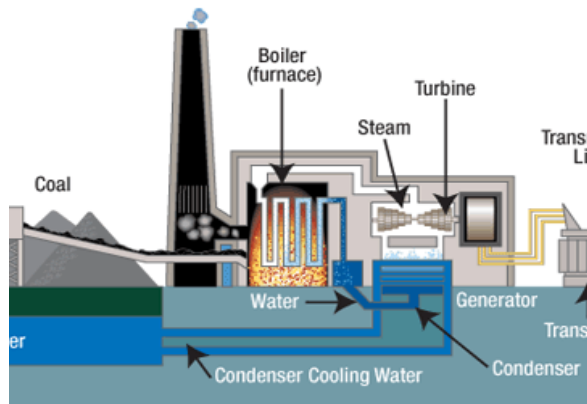
# Szenarioanalyse

- Energiesystem basierend hauptsächlich auf PV, Wasserkraft und Austausch mit Ausland ist machbar und wirtschaftlich
- Es gibt andere mögliche Szenarien, z.B. mehr Zubau von Wind und Alpine PV oder Neubau von Kernenergie
- Kernkraft ist jedoch mit hohen Unsicherheiten in Kosten und Bauzeit verbunden
- «Optimales» System ist abhängig von Entwicklung in Nachbarländern und anderen externen Faktoren
- Ausbau von PV (und Wind) ist/wäre no-brainer



# Herausforderung «Low Inertia System»

- Entwicklung System Charakteristik
    - Ersatz von Synchronmaschinen durch Ressourcen die über Leistungselektronik angeschlossen sind
- ⇒ Schnellere Systemdynamik



<http://www.tva.gov/power/coalart.htm>

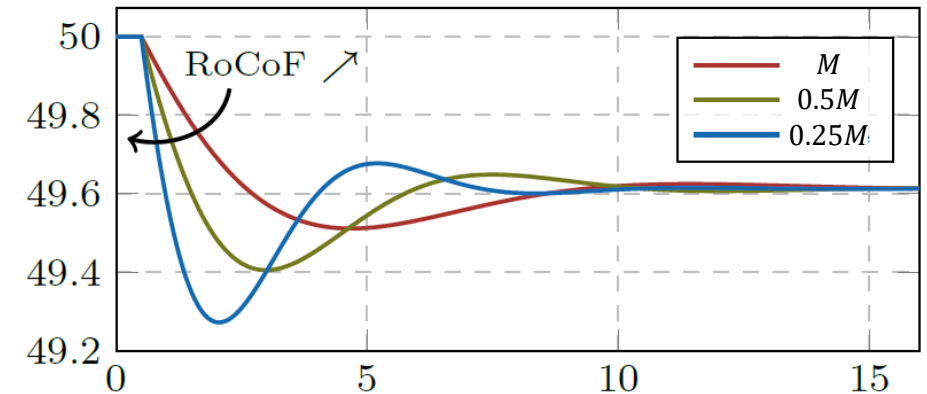


Source: [www.cleanenergyreviews.info](http://www.cleanenergyreviews.info)

$$\dot{f} = \frac{p_M - p_E}{M_1}$$

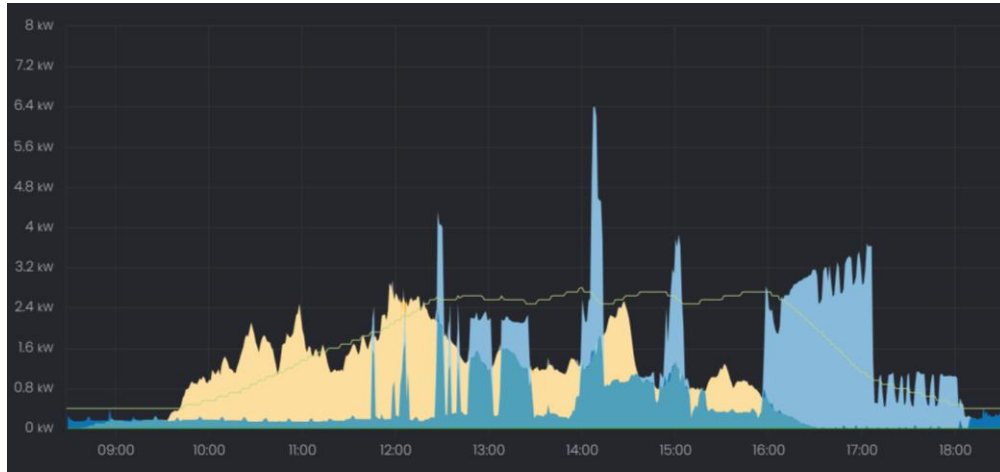


$$\dot{f} = \frac{p_M + p_R - p_E}{M_2}, M_1 > M_2$$



# Herausforderungen Dach-PV

Tage im Winter



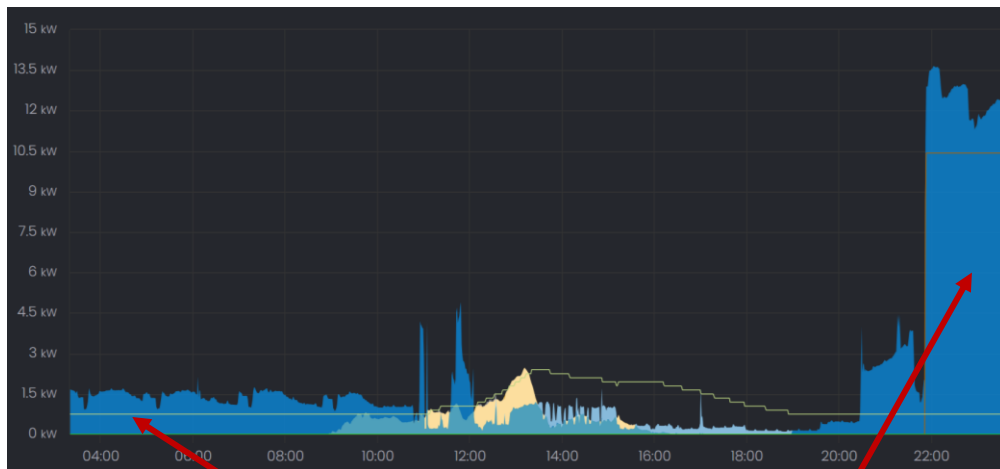
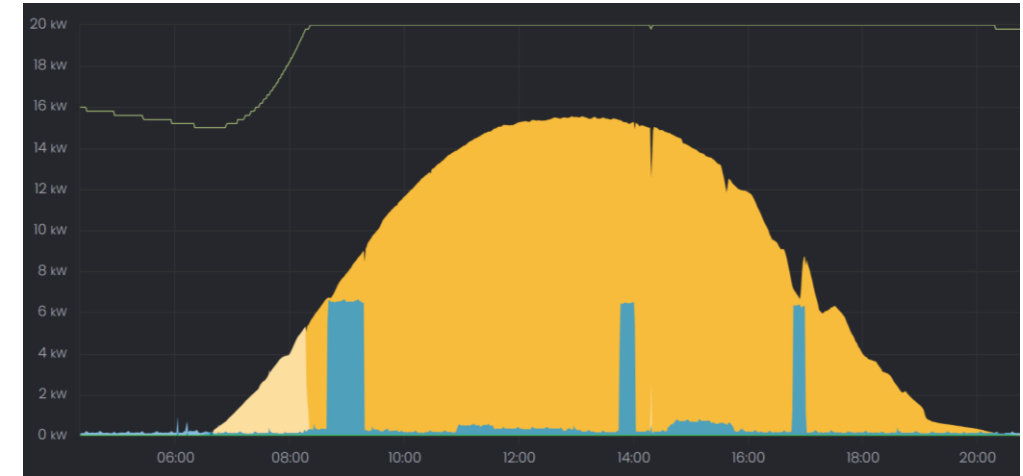
Verbrauch gedeckt durch

- PV
- Batterie
- Netz

PV Überschuss ins/in die

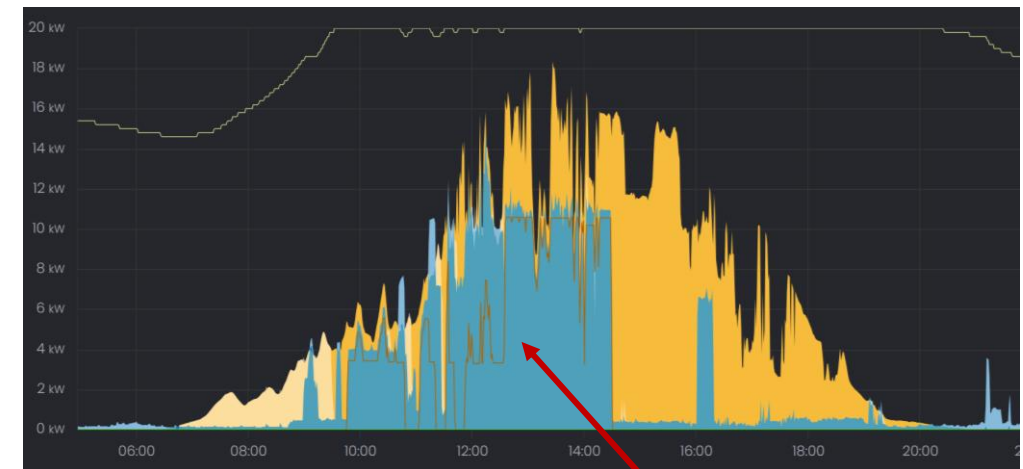
- Netz
- Batterie

Tage im Sommer



Wärmepumpe

Elektroauto + Wärmepumpe

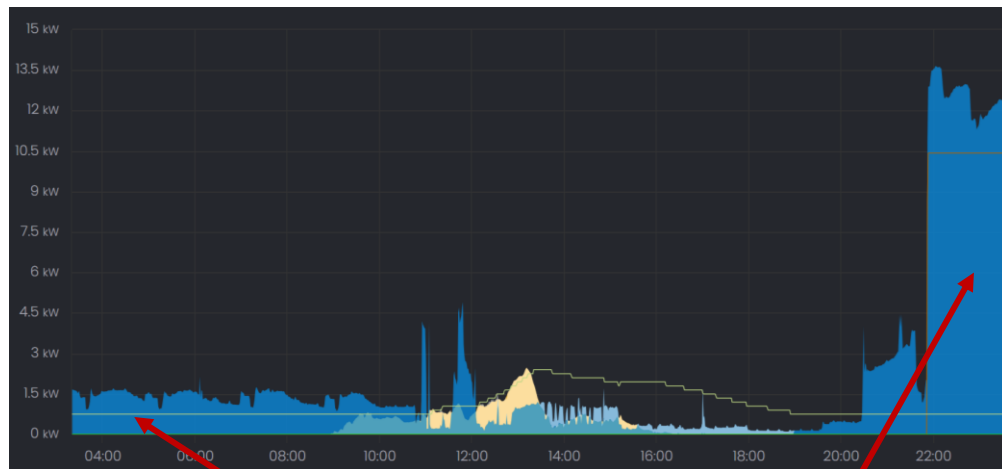


Elektroauto

# Herausforderungen Dach-PV

- Photovoltaik + neue Lasten
  - Starke Saisonabhängigkeit der Last/Einspeisung (von 13.5kW Last bis 17kW Einspeisung)
  - Kurzfristige Änderungen (von 0kW zu 17kW Einspeisung und von 1kW zu 13.5kW Verbrauch innert Minuten)

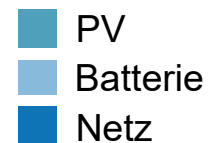
Tag im Winter



Wärmepumpe

Elektroauto + Wärmepumpe

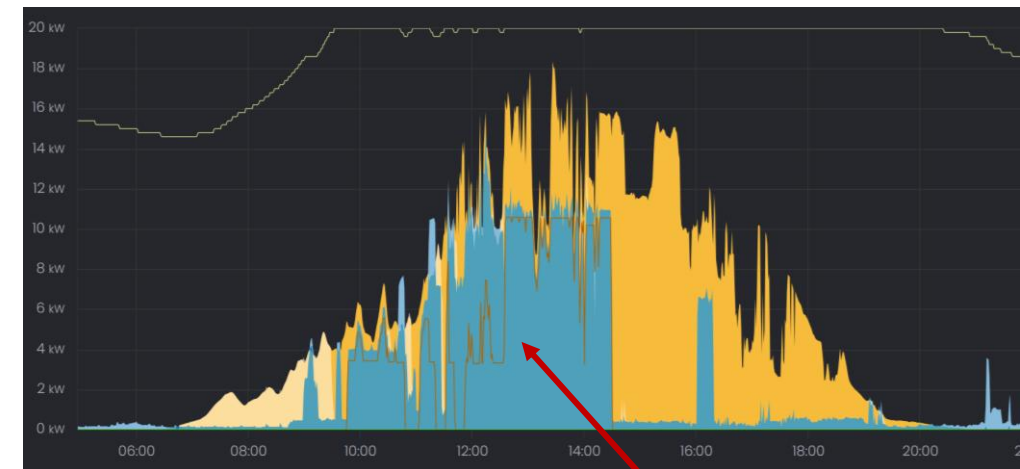
Verbrauch  
gedeckt durch



PV Überschuss  
ins/in die



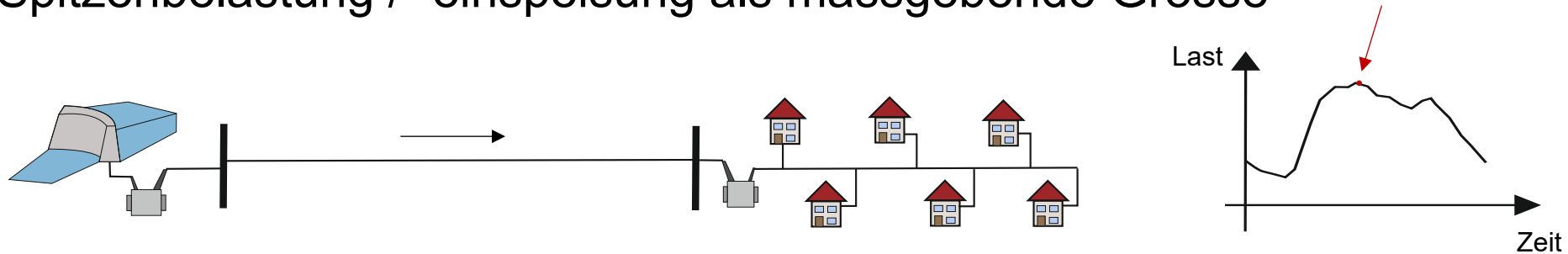
Tag im Sommer



Elektroauto

# Herausforderungen im Verteilnetz

- Planung Netz- und Produktionskapazitäten
  - Spitzenbelastung / -einspeisung als massgebende Grösse



➡ sowohl die Last wie auch die Erzeugung und deren geographische und zeitliche Verteilung spielen eine Rolle

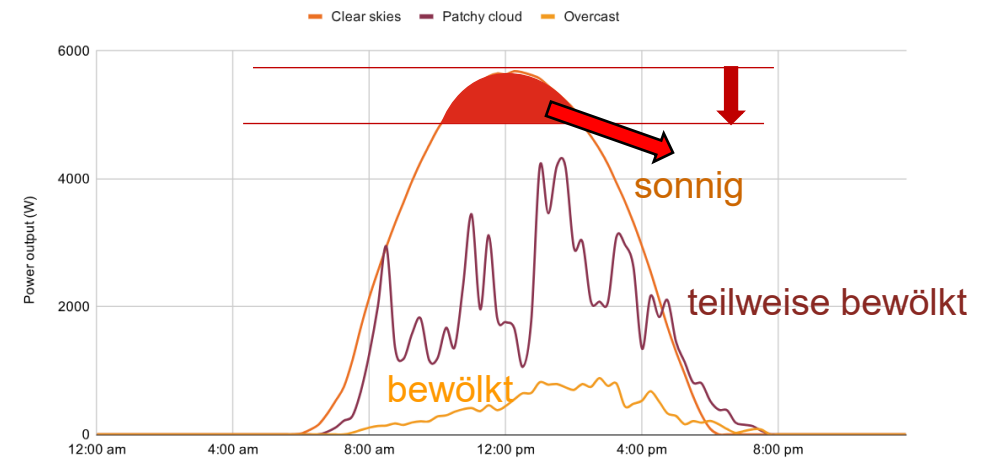
- Betrieb des Netzes
    - Ziel des Kunden: Minimierung der Energiekosten  $\neq$  Ziel des Netzbetreibers: Minimierung der maximalen Belastung (Last oder Einspeisung)
- ➡ Notwendigkeit von schnellen Reserven und Einfluss auf benötigte Netz- und Produktionskapazitäten

# Übersicht

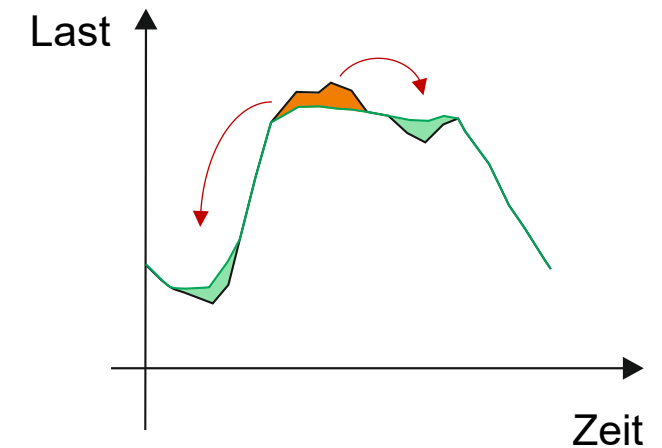
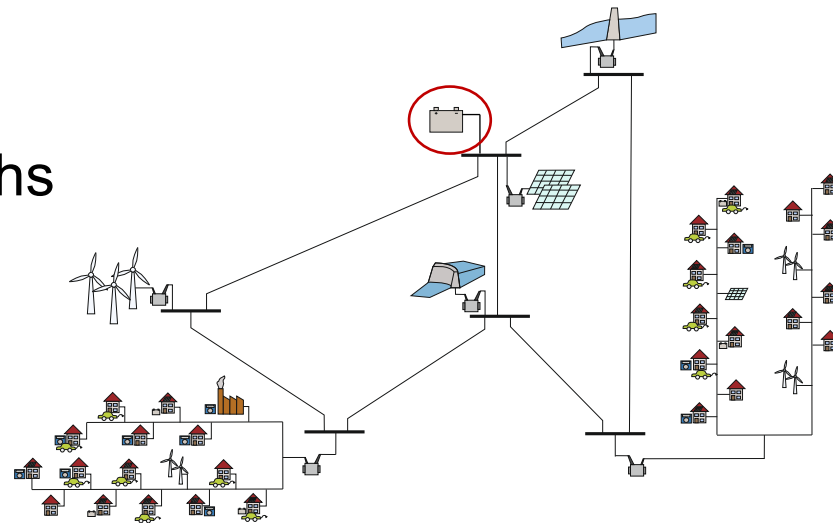
- Elektrisches Energiesystem und dessen Betrieb
- Szenario für die Schweiz und Herausforderungen
- **Nutzung von Flexibilität**
  - Potential E-Mobilität
  - Tarifgestaltung
- Zusammenfassung

# Nutzung von Flexibilität

- Speicher
  - Speicherung der Energie zu Zeiten der maximalen Erzeugung
- Abregelung
  - nicht jede kWh muss genutzt werden
  - kann Ausbaubedarf reduzieren mit minimalem Energieverlust
- Flexible Lasten
  - Anpassung des Verbrauchs an die Netz- und Erzeugungssituation
  - Beispiele: Elektroautos, Wärmepumpen, etc.

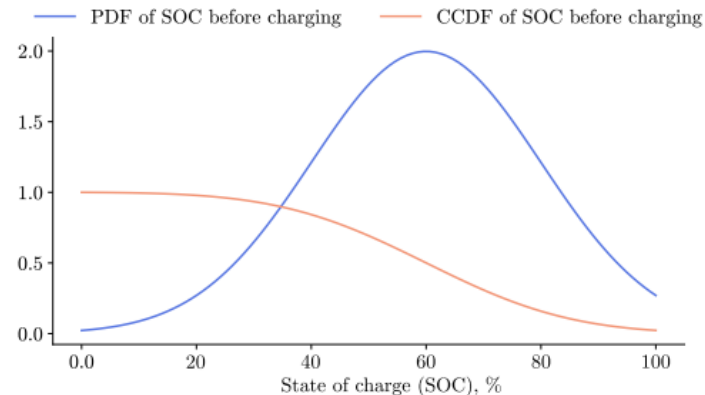


Quelle: <https://blog.spiritenergy.co.uk/>

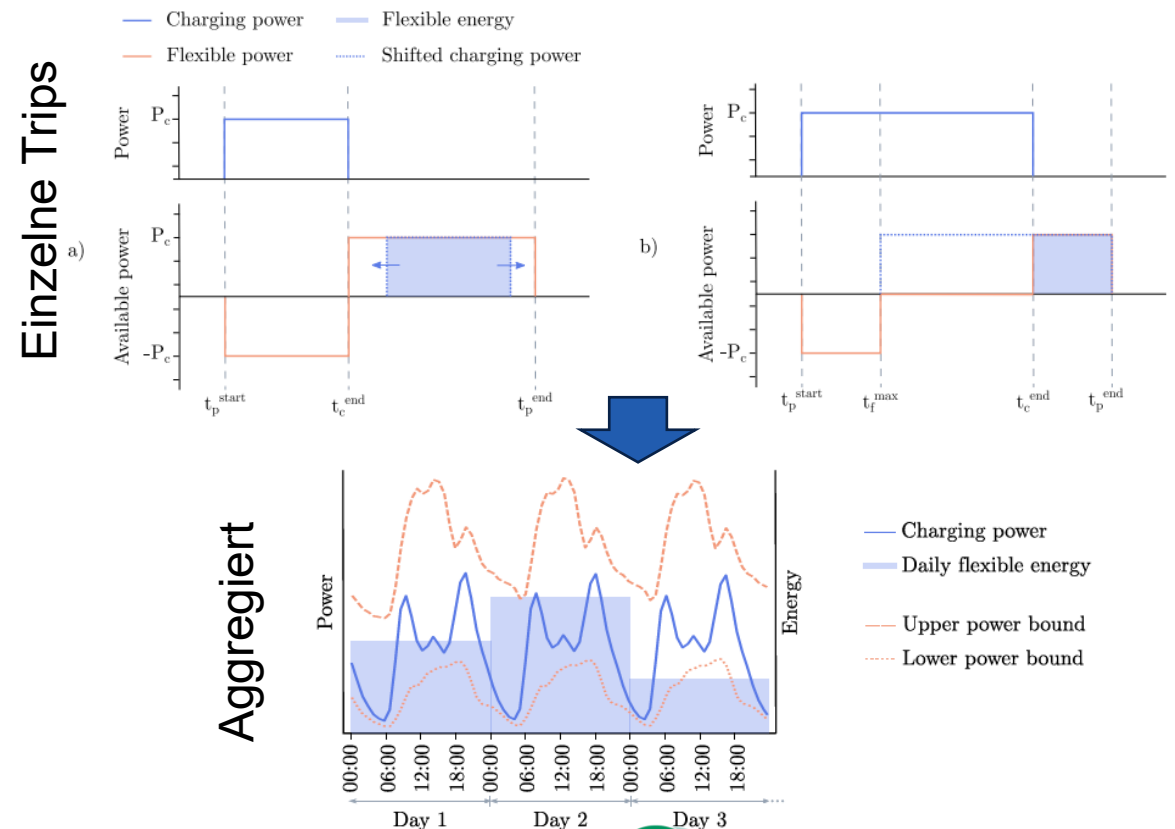


# Flexibilität der E-Mobilität

- Baseline
  - Modell des Mobilitätsverhaltens basierend auf Daten
  - Hohe Verfügbarkeit von Ladestationen als Annahme
  - Entscheid zum Laden basierend auf Ladezustand des Autos

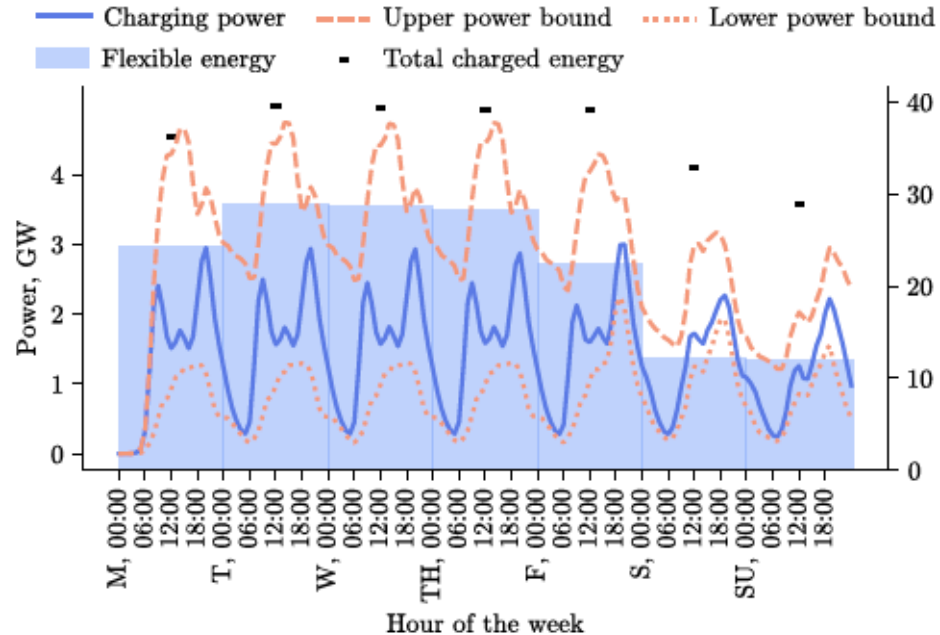


- Flexible Leistung
  - Auf- und Abregelung der Ladeleistung basierend auf Baseline

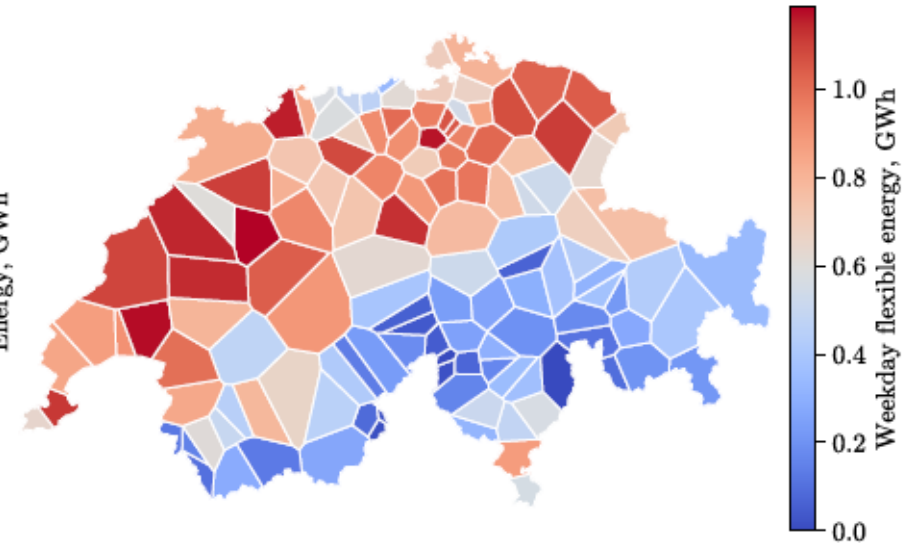


# Resultate

## ■ Verfügbare Flexibilität der E-Mobilität



(a) National charging power and flexibility.



(b) Weekday flexible energy per transmission bus.

➔ Integration der Flexibilität in Energiesystemmodell

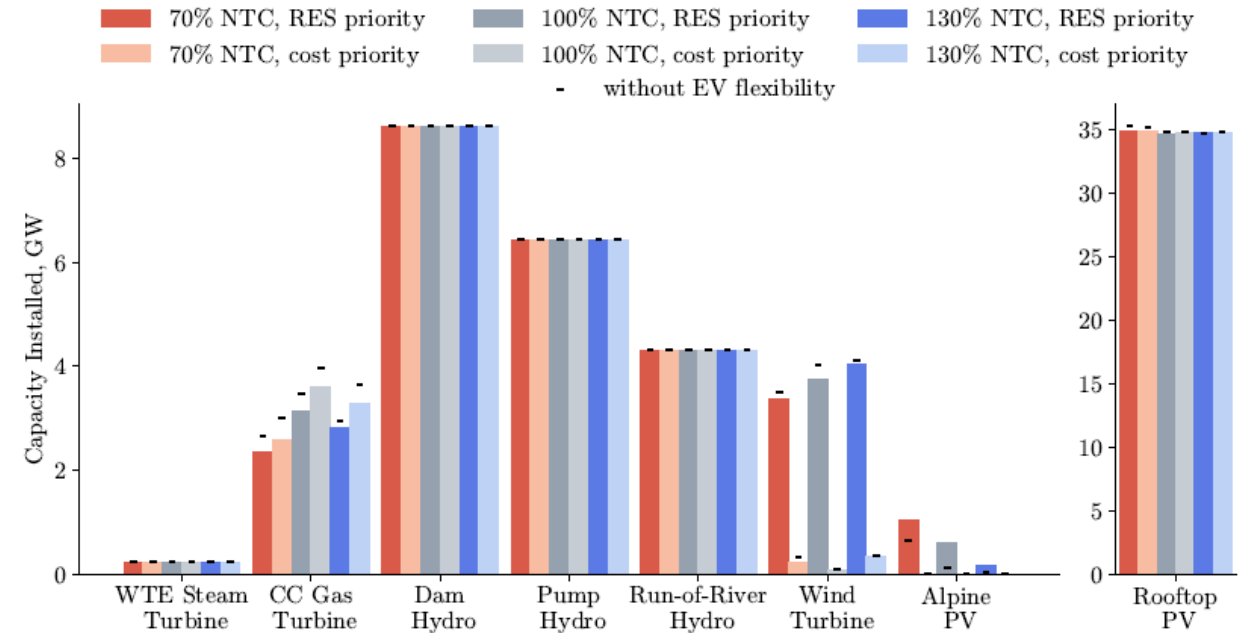
# Flexibilität der E-Mobilität im Energiesystemmodell

- Szenarien

Scenario	33.6 TWh rooftop PV target	45 TWh renewable target	NTC with respect to current capacity		
			70%	100%	130%
70% NTC, RES priority	✓	✓	✓		
70% NTC, cost priority	✓		✓		
100% NTC, RES priority	✓	✓		✓	
100% NTC, cost priority	✓			✓	
130% NTC, RES priority	✓	✓			✓
130% NTC, cost priority	✓				✓

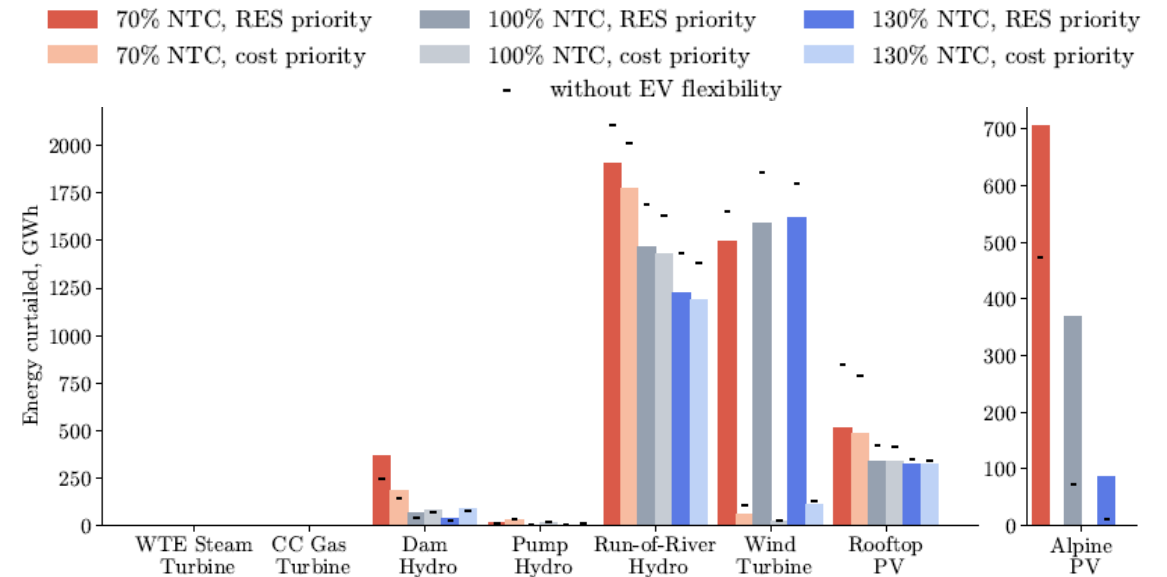
# Resultate

- Installierte Kapazität
  - Reduktion von benötigter Erzeugungsflexibilität (hier Gas)
  - Erhöhung von Alpiner PV Kapazität, da Abregelung im Winter reduziert werden kann
  - Weniger Dach-PV und Windkapazität nötig für gleiche Energiemenge
  - Flexibilität wird auch genutzt, um Handel zu erhöhen, indem Nutzung der Übertragungskapazität durch lokale Produktion reduziert wird
  - NB: Wasserkraft bleibt gleich, da Neubau keine Option



# Resultate

- Abregelung von Erzeugung
  - Weniger Abregelung von Laufwasserkraft, Wind und Dach PV
  - Insgesamt mehr Abregelung Alpiner PV, aber mit signifikant höherer Kapazität

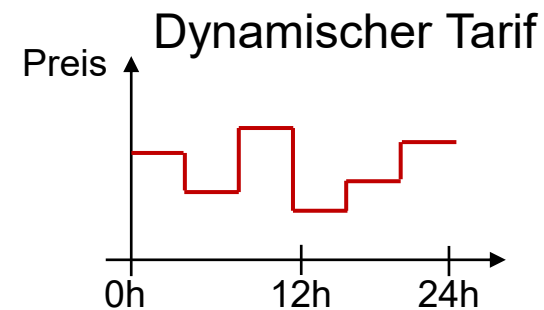
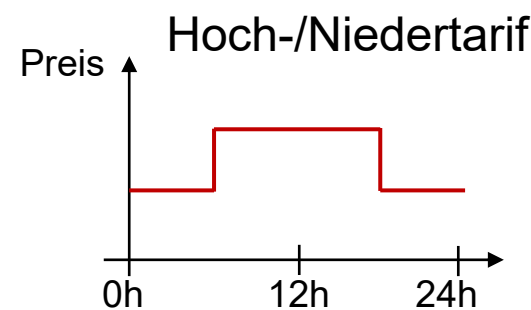
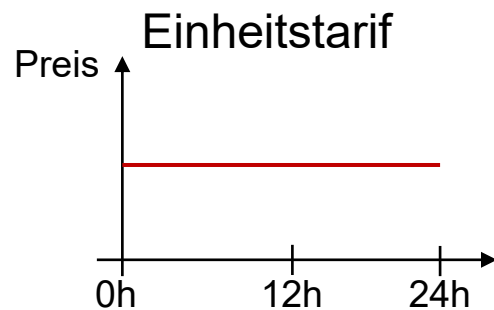


# Übersicht

- Elektrisches Energiesystem und dessen Betrieb
- Szenario für die Schweiz und Herausforderungen
- **Nutzung von Flexibilität**
  - Potential E-Mobilität
  - Tarifgestaltung
- Zusammenfassung

# Nutzung von Flexibilität

- Steuerungsansätze
  - Direkte Steuerung
  - Tarif-basierte Ansätze
    - Jeder Tag gleich oder abhängig von Saison, Wetter, etc.
    - Indirekte Steuerung  $\Rightarrow$  kann zu unerwünschten neuen Spitzen führen



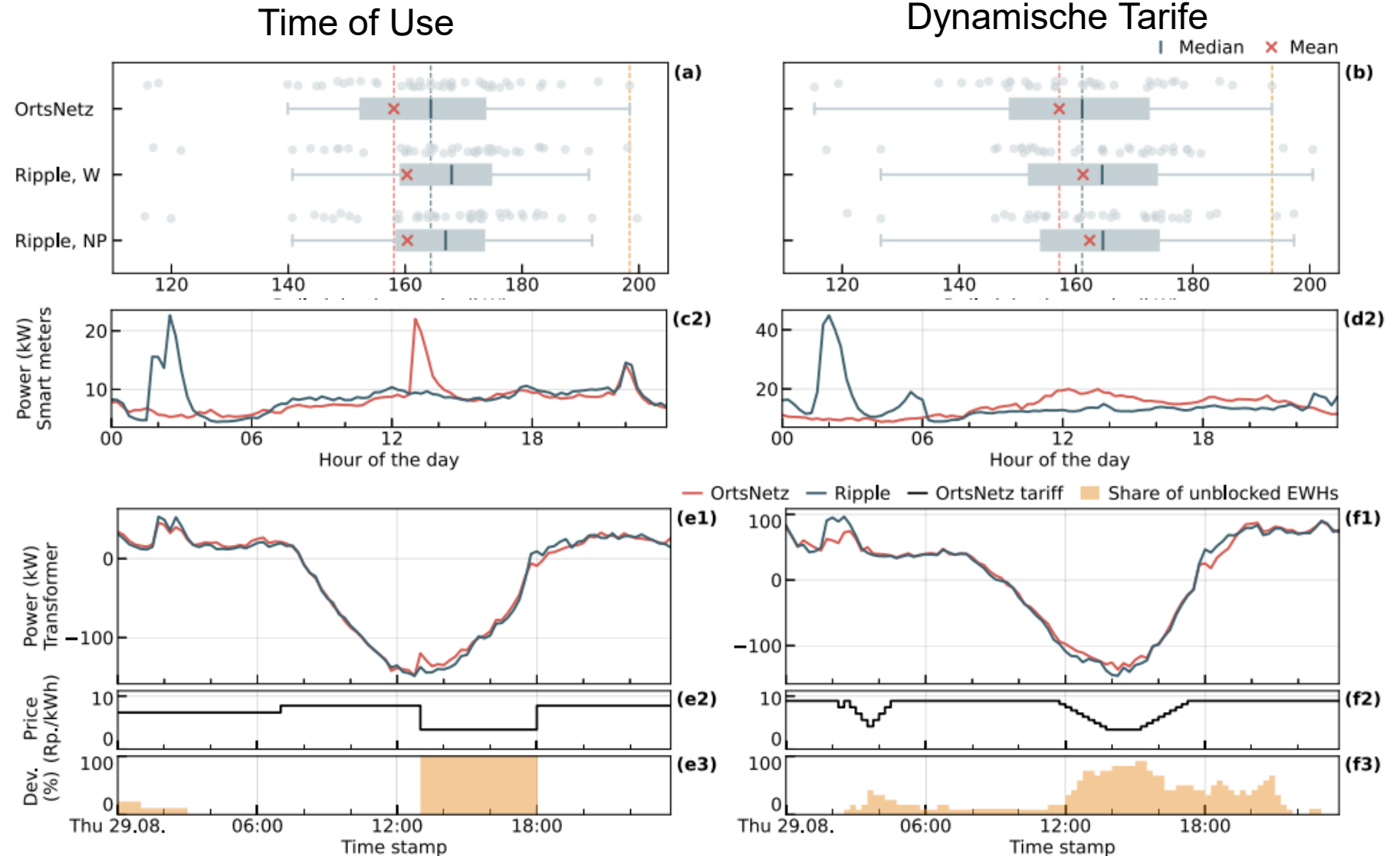
- Pilotprojekt in Winkel (EKZ)
  - 41 teilnehmende Haushalte

# TOU vs. Dynamische Tarife

- Resultate Sommer

Durchschnitt

Typischer Tag



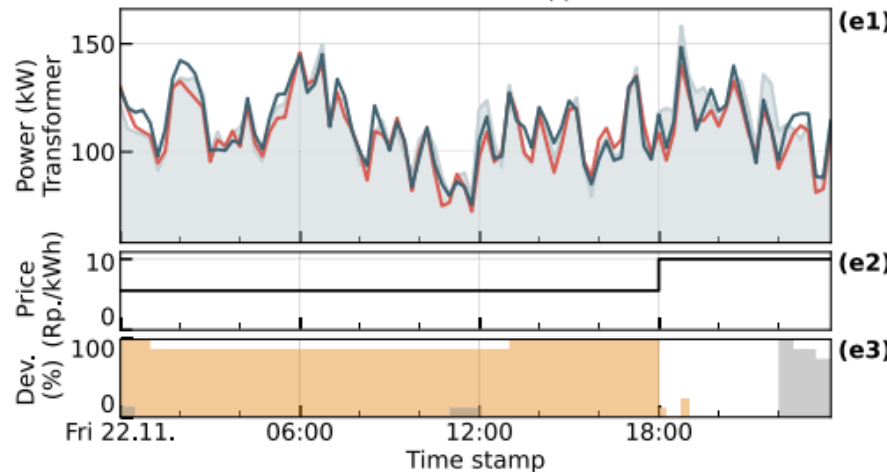
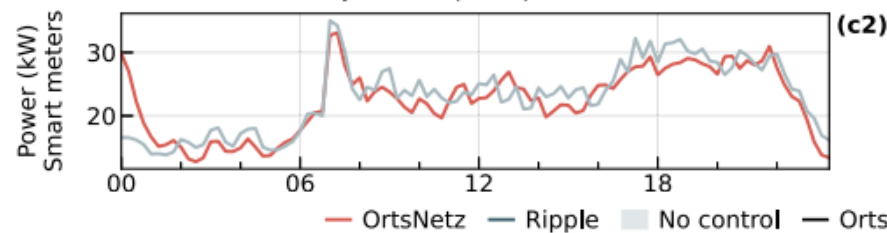
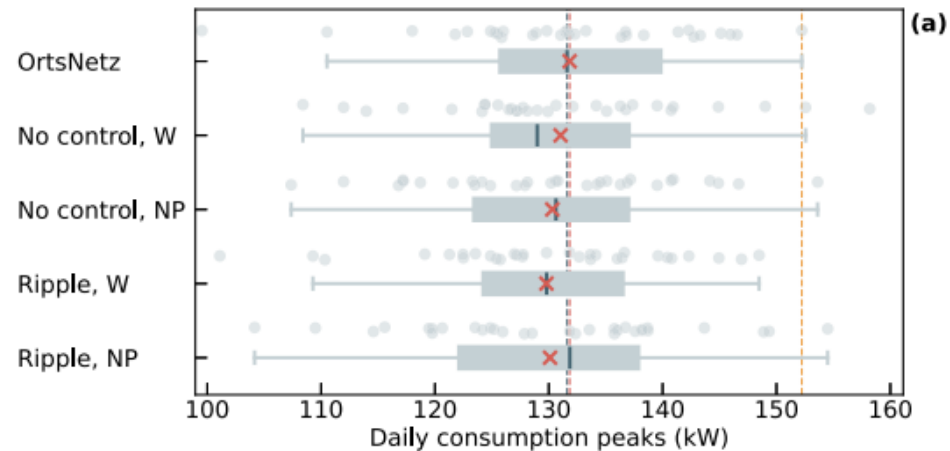
# TOU vs. Dynamische Tarife

- Resultate Winter

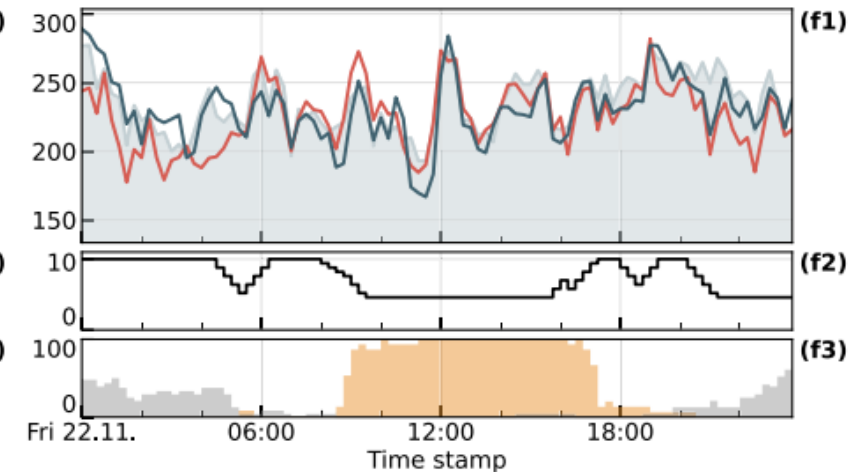
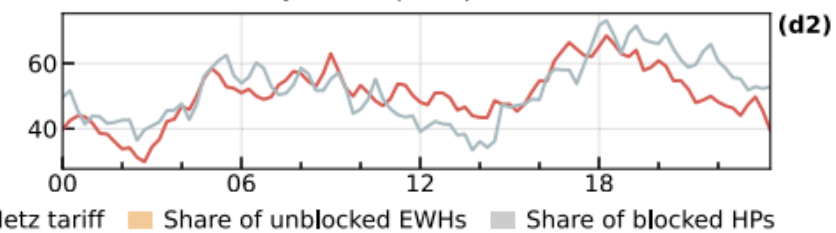
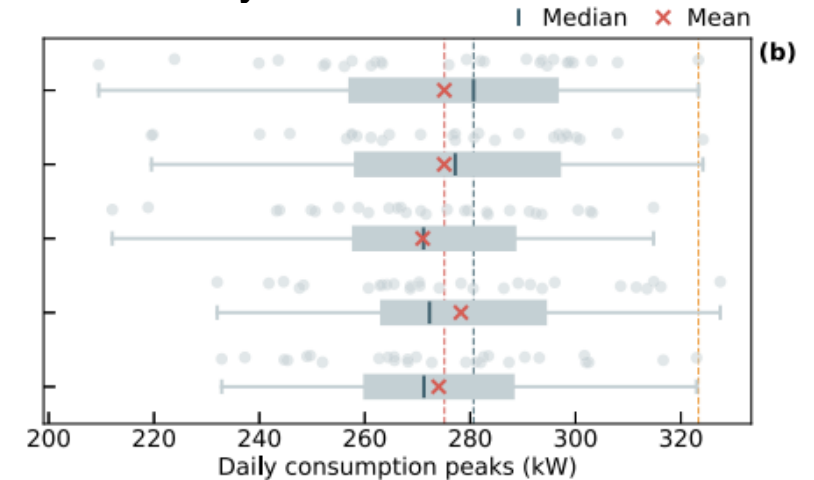
Durchschnitt

Typischer Tag

Time of Use



Dynamische Tarife



# Tarifgestaltung

- Erkenntnisse
  - TOU Tarife können durch Synchronisation neue unerwünschte Spitzen generieren
  - Dynamische Tarife können im Sommer die Einspeisespitzen reduzieren
  - Volatilität der Last im Winter macht es schwierig, Spitzen vorherzusehen und zu brechen
  - Spitzenlasttarifierung (Einspeisung/Last) in Kombination mit dynamischen Tarifen als mögliche Lösung
  - Lasten an Trafostationen sind unterschiedlich, d.h. jede Station bräuchte andere dynamische Tarife zur Reduzierung der Spitze

# Zusammenfassung

- Jederzeit Verbrauch (bzw. Bezug) = Erzeugung (bzw. Einspeisung) anhand von Fahrplan und Reserven für den Ausgleich in Echtzeit
- Trend zu erneuerbaren Energien bringt Herausforderungen, insbesondere Variabilität und Saisonalität, aber auch in Bezug auf die Netzbelastung und die Stabilität
- Elektrifizierung (e-Mobilität, Wärmepumpen) ist ein wichtiger Beitrag für eine nachhaltige Energiezukunft, erhöht aber Belastung des elektrischen Netzes
- Kunde kann durch Flexibilität beim Ausgleich helfen, es braucht aber Automatisierung
- Daten, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie die daraus mögliche Intelligenz sind wichtige Bausteine für eine effiziente Koordination der verfügbaren Ressourcen

**ETH** zürich

Prof. Dr. Gabriela Hug  
Professur für elektrische Energieübertragung  
ghug@ethz.ch

ETH Zürich  
Power Systems Laboratory  
Physikstrasse 3  
8092 Zürich

[www.psl.ee.ethz.ch](http://www.psl.ee.ethz.ch)