



Flexibilitätsbeitrag verschiedener Technologien im deutschen Energiesystem bis 2045

Jael Sepúlveda Schweiger

Mitarbeit von Christoph Kost, Patrick Jürgens, Nourelden Gaafar
Die Ergebnisse sind Teil des BMBF geförderten Projektes Ariadne.

18. Symposium EnergiInnovation
Graz/Österreich, 14.-16. Februar 2024
www.ise.fraunhofer.de

Motivation und Zielsetzung

- Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045 in Deutschland
- Umsetzung der Energiewende nur mit entsprechenden Flexibilitätsoptionen möglich
- Betrachtung des stündlichen Einsatzes von Flexibilitäten

Untersuchung des Zusammenspiels von:

Energieerzeugung, -speicherung, -umverteilung und -nachfrage

Unflexible
Stromerzeugung



Unflexible
Stromnachfrage



Modell und Szenario

REMod – Sektorenübergreifendes Energiesystemmodell

Modellierung mit Hilfe des Ein-Knoten-Modells REMod:

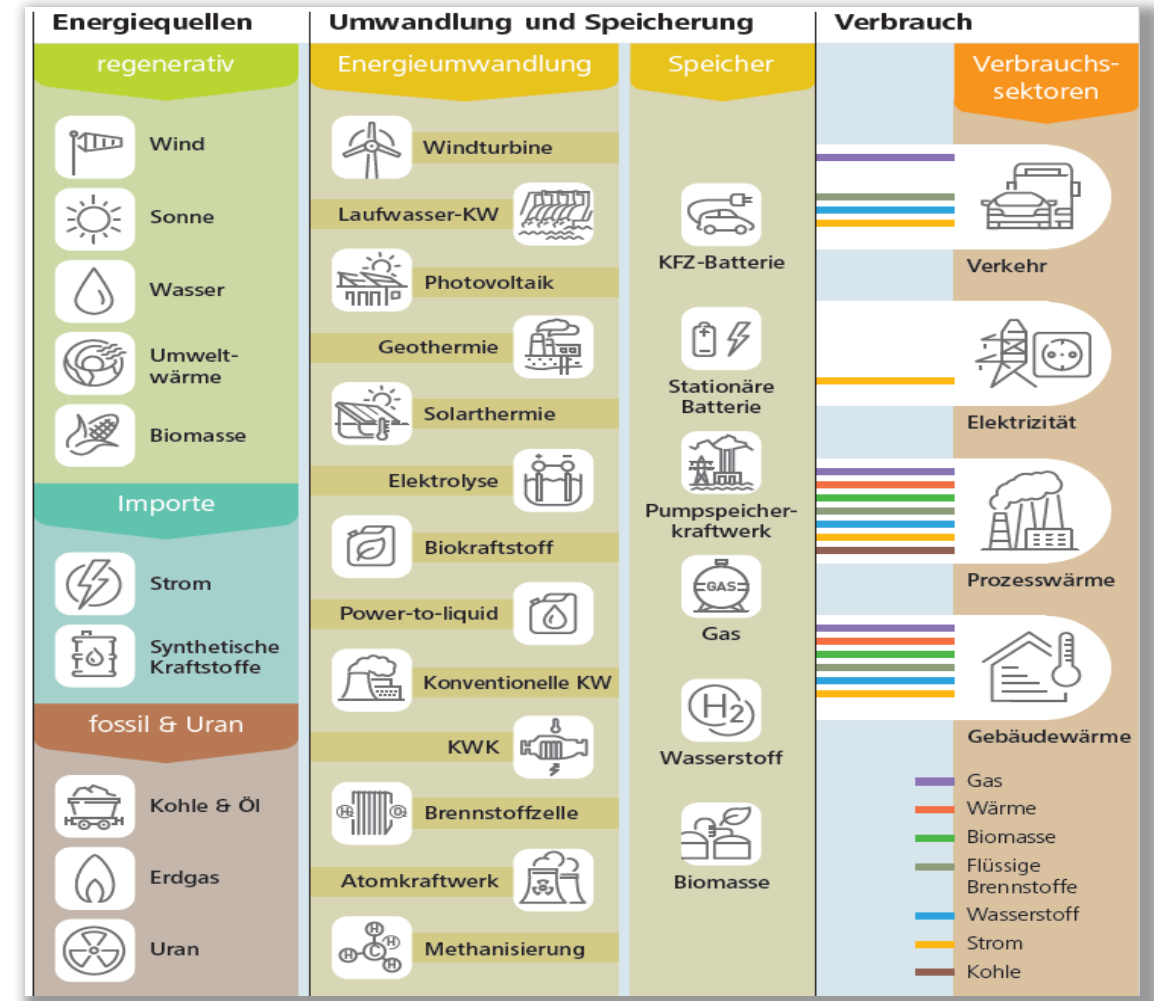
Modellkern

Simulationsbasierte Optimierung. Nicht-linear.
Abbildung aller Energieträger, -wandler, -speicher und
-verbrauchssektoren.

Zielfunktion: Minimierung der Gesamtsystemkosten

Randbedingungen: stündliche Versorgungssicherheit
und

Einhaltung der CO₂-Ziele



Sterchele et al. 2020, Studie „WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM“

Modell und Szenario

Szenario

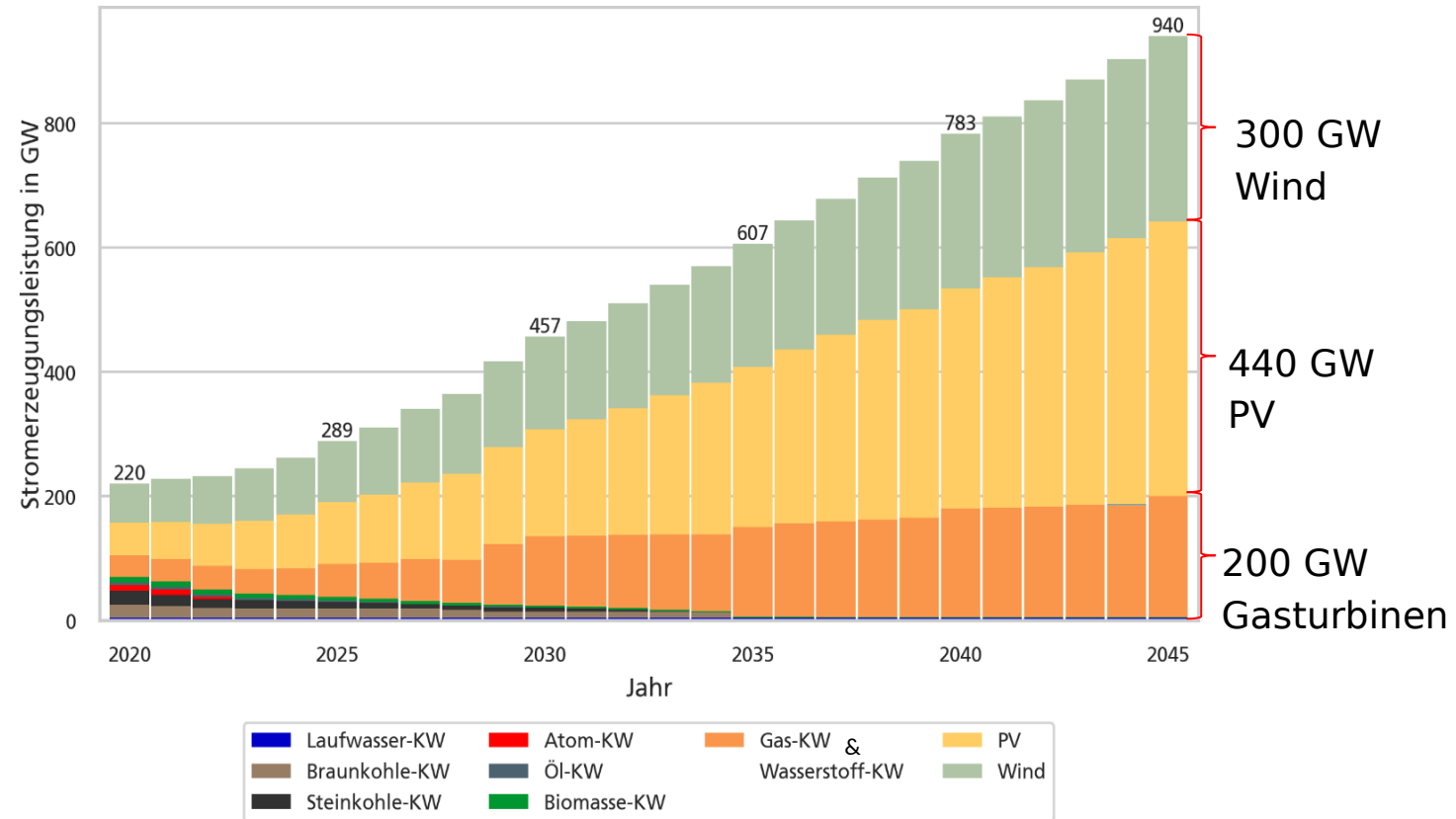
Szenario

Ausgewogener Technologiemix

- Verbrauch **klassischer Stromanwendungen** annähernd **konstant**
- **Leicht abnehmender Prozesswärmebedarf** in der **Industrie** durch Effizienzsteigerung
- **Steigende Verkehrsanwendungen**
- **Steigende Nachfrage der Gebäudewärme** durch größere Wohnraumflächen

Modellierung und Optimierung der Jahre 2020-2045

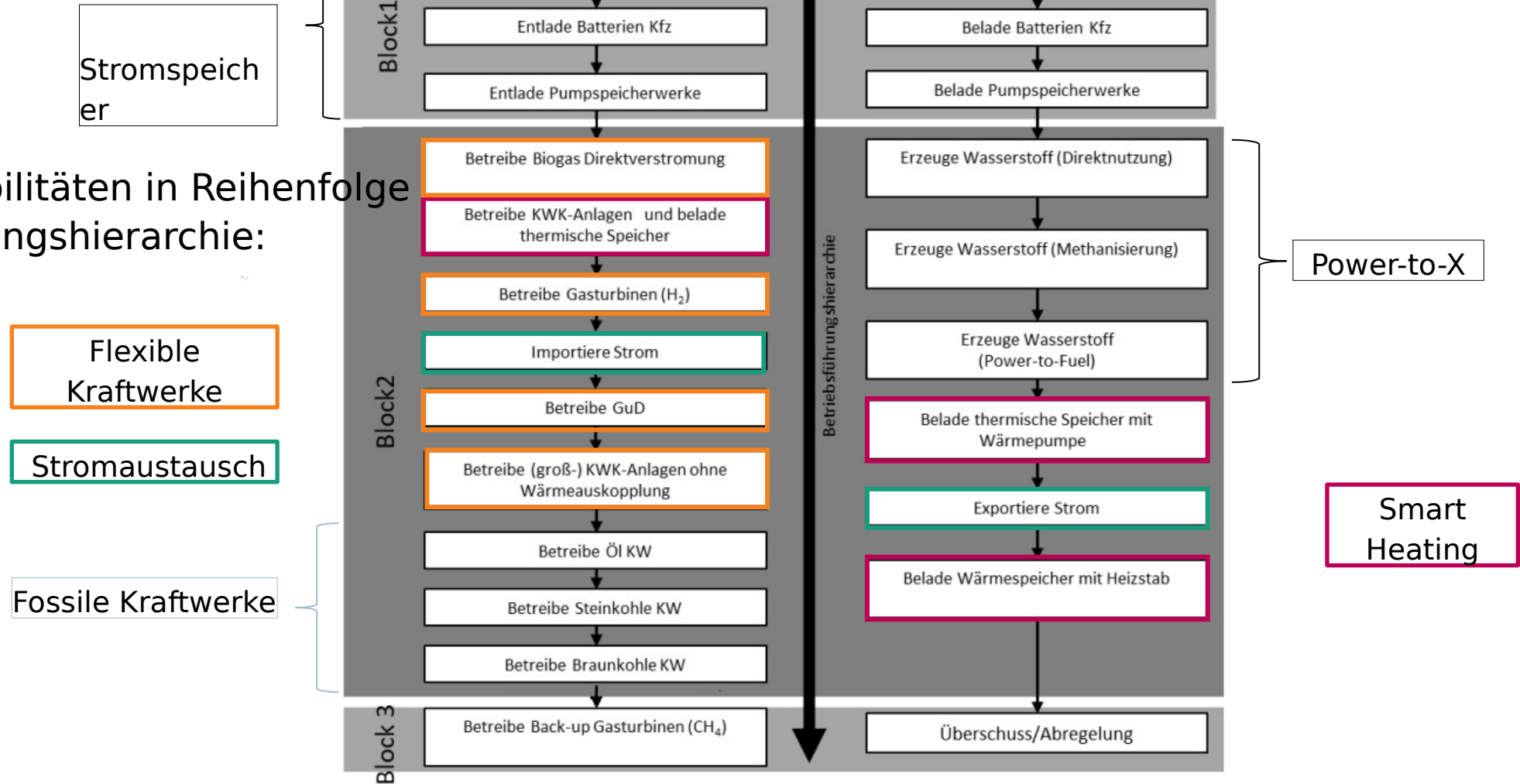
Berechneter PV-, Wind- und Backup-Gasturbinenzubau



Modell und Szenario

Flexibilitäteneinsatz

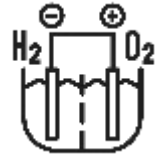
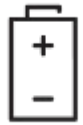
Einsatz der Flexibilitäten in Reihenfolge der Betriebsführungshierarchie:



Nach „TRANSDE: Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2050 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren“, ABSCHLUSSBERICHT, Julian Brandes, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2023

Methodik

Einteilung der Flexibilitäten in Technologiegruppen



Stromspeicher

Power-to-X

Wärmeerzeugung

Stromtausch
Mit den
Nachbarländern

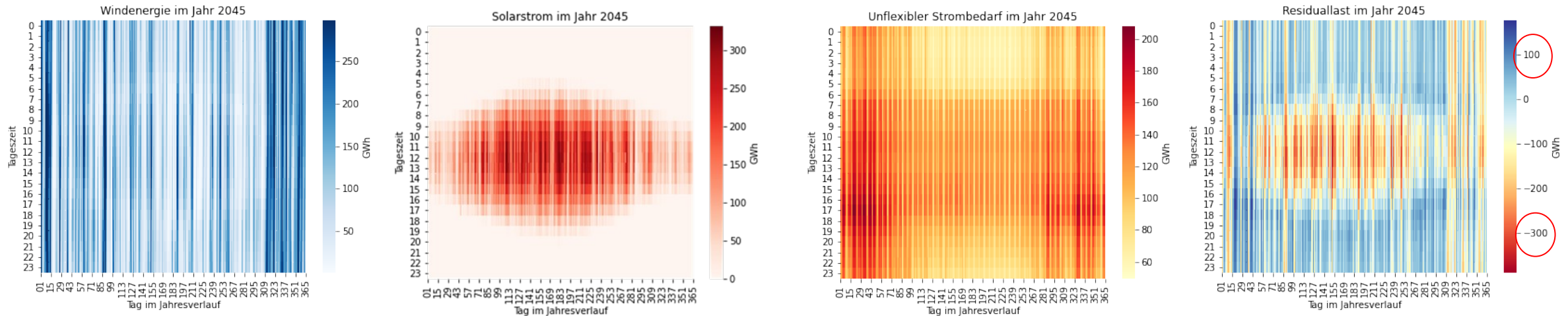
- Mobile Batterien
- Stationäre Batterien
- Pumpspeicherkraftwerke

- Elektrolyseure
- Power-to-Gas
- Power-to-Fuel

- Zentral (z.B. in Fernwärmenetzen)
- Dezentral (Heizungen in Gebäuden)

Ergebnisse

Stündlich modellierte Wind- und Solarstromerzeugung, Lastsituation und Residuallast im Jahr 2045

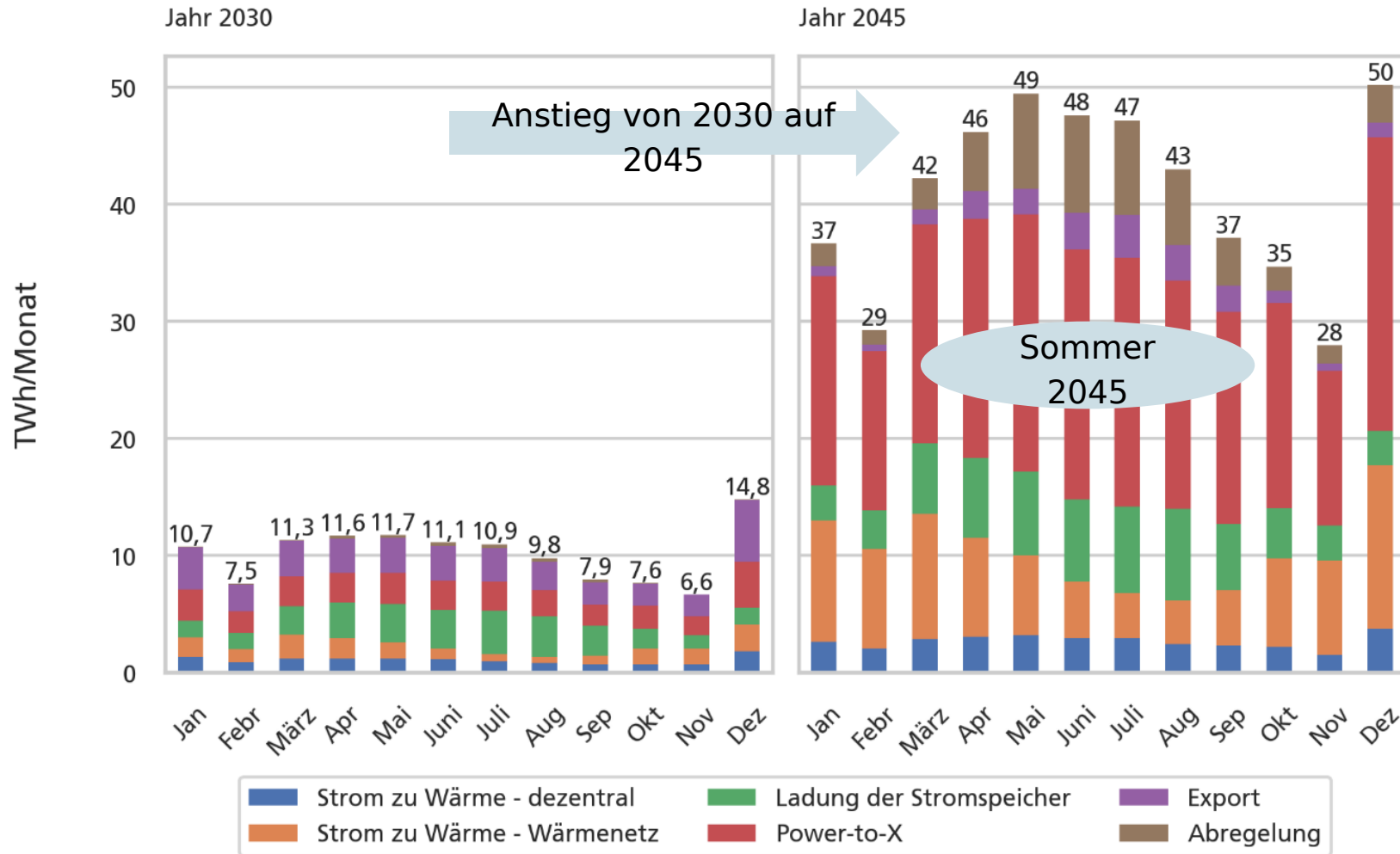


- Schwankungen der Windenergie über mehrere Tage, vorwiegend im Winter vorhanden
- Solarenergie tagsüber verfügbar, vor allem im Sommer

- Zu deckender Strombedarf vorwiegend tagsüber und im Winter
- Höherer Stromüberschuss als Strommangel

Ergebnisse

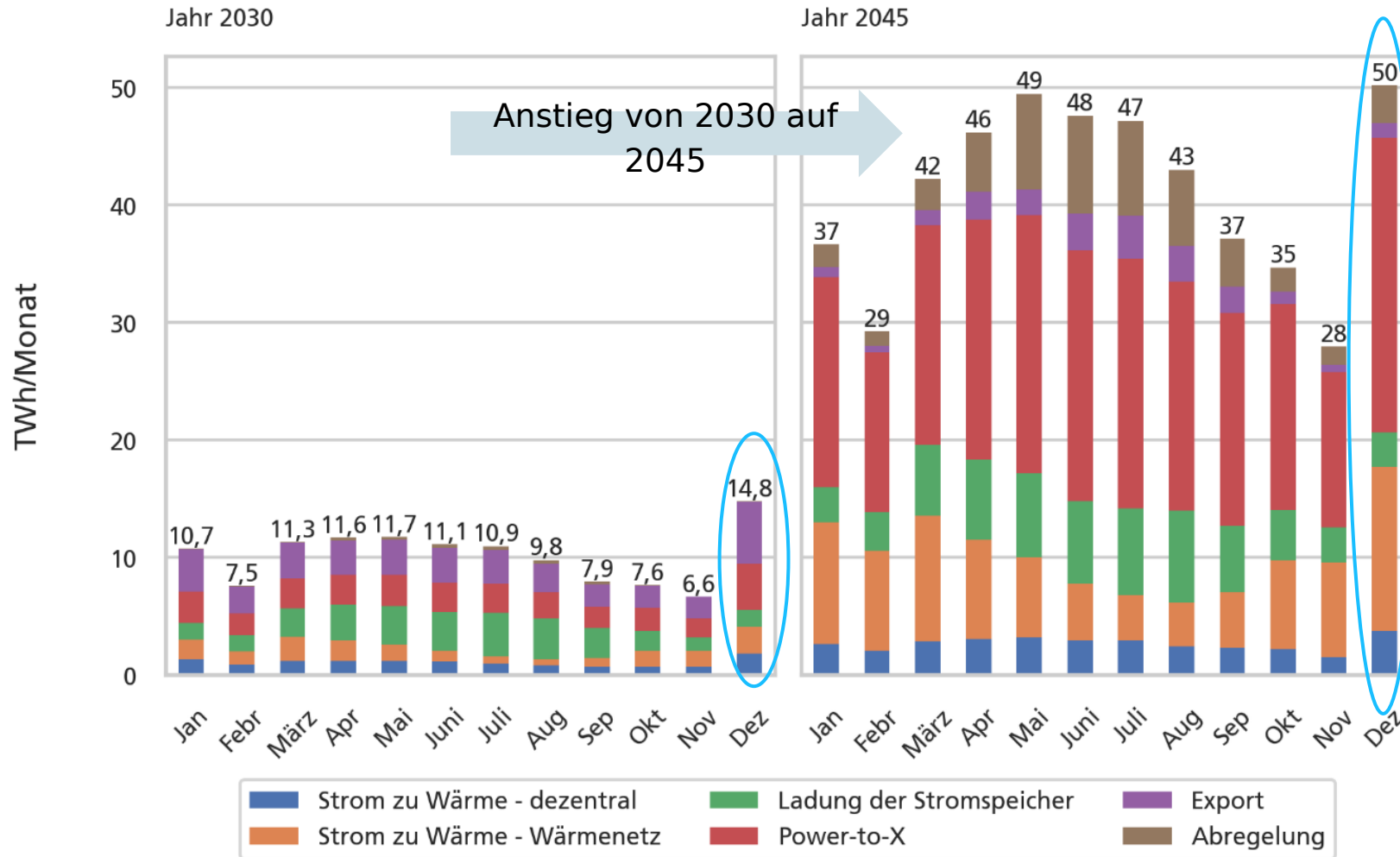
Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei Stromüberschuss im Jahresverlauf



- Größtenteils saisonaler Einsatz
- Steigende Relevanz der Elektrolyse
- Stromabregelung vorwiegend im Sommer
- Geringer Energiebedarf im Dezember führt zu hohem Stromüberschuss

Ergebnisse

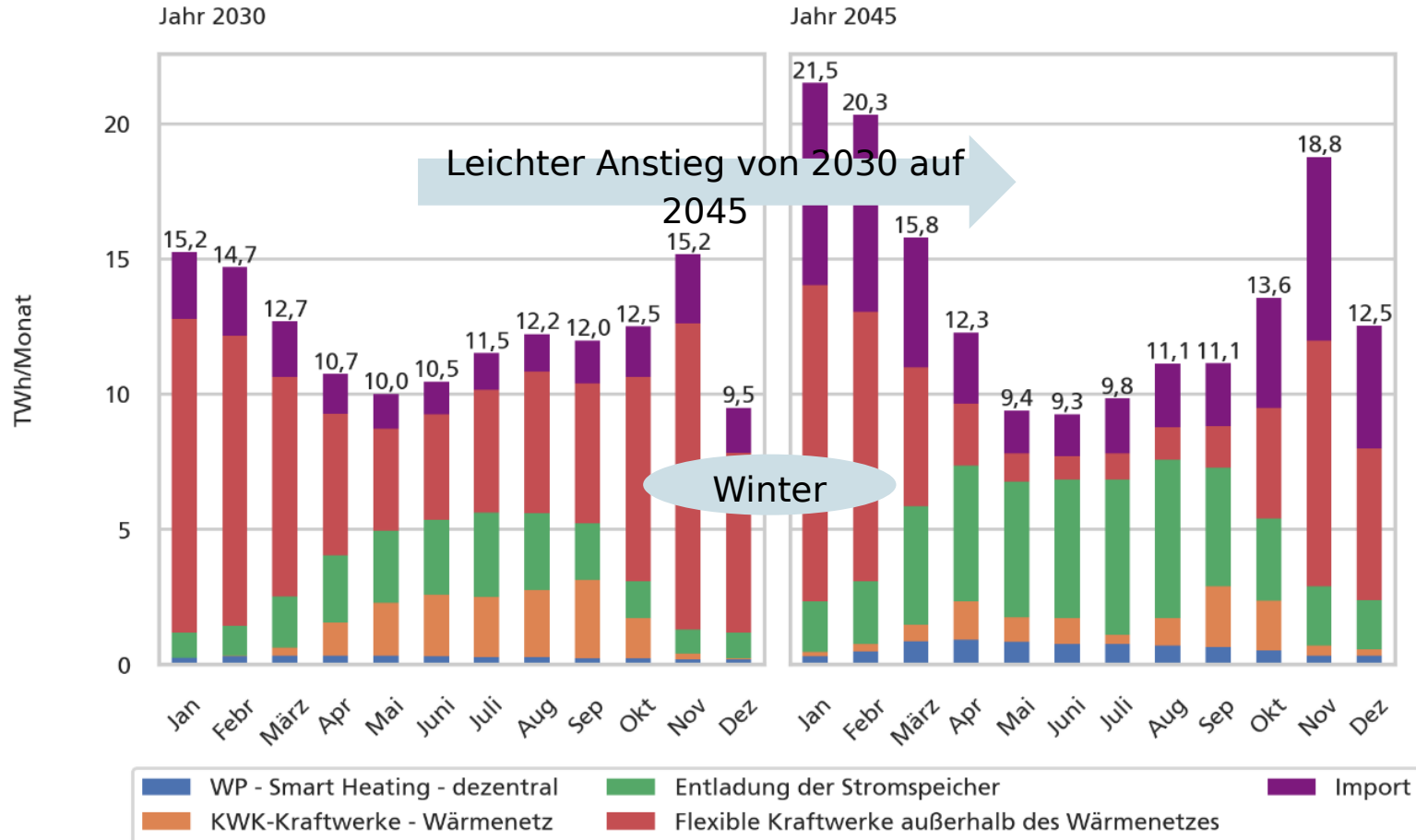
Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei Stromüberschuss im Jahresverlauf



- Größtenteils saisonaler Einsatz
- Steigende Relevanz der Elektrolyse
- Stromabregelung vorwiegend im Sommer
- Geringer Energiebedarf im Dezember führt zu hohem Stromüberschuss

Ergebnisse

Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei Strommangel im Jahresverlauf

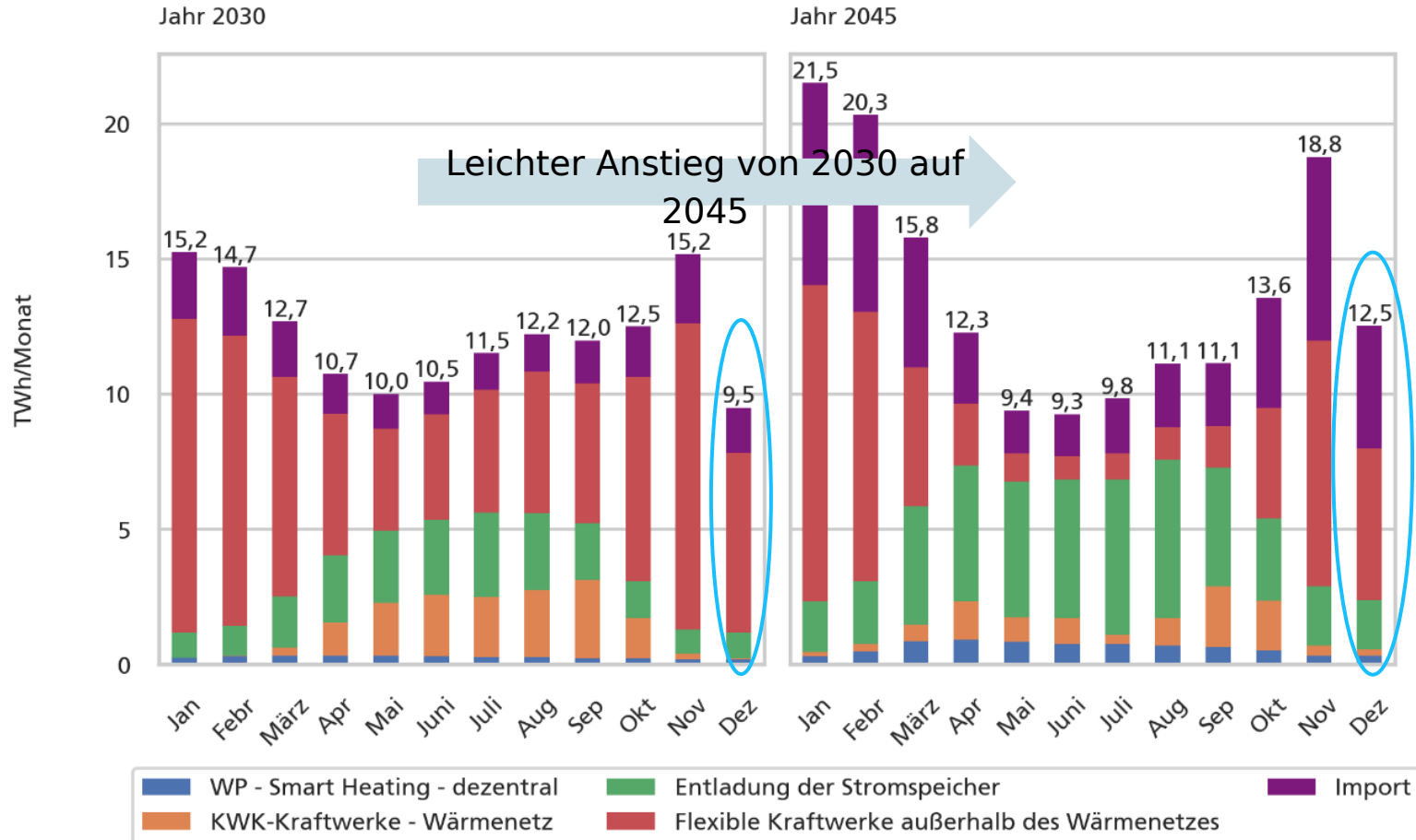


- Stromspeicher vor allem Sommer
- Flexible Kraftwerke und Stromimporte vorwiegend im Winter
- Geringer Energiebedarf im Dezember führt zu geringem Strommangel

Smart Heating beschreibt hier die Lastverschiebung des Einsatzes von Wärmepumpen und den dadurch in Stunden mit Strommangel eingesparten Strombedarf.

Ergebnisse

Monatlicher Flexibilitätseinsatz bei Strommangel im Jahresverlauf

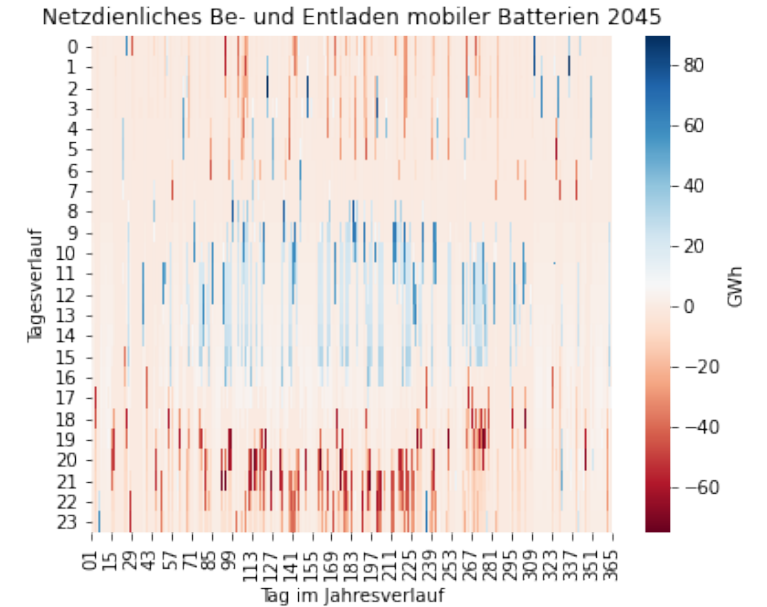
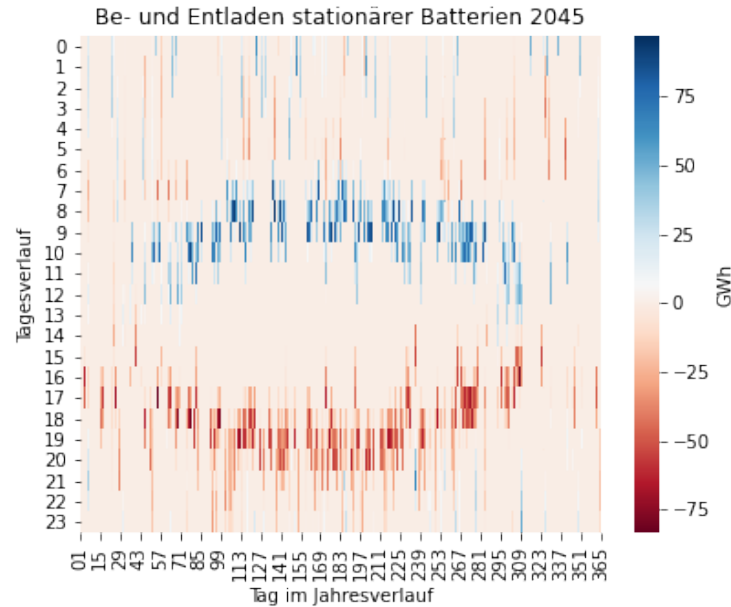
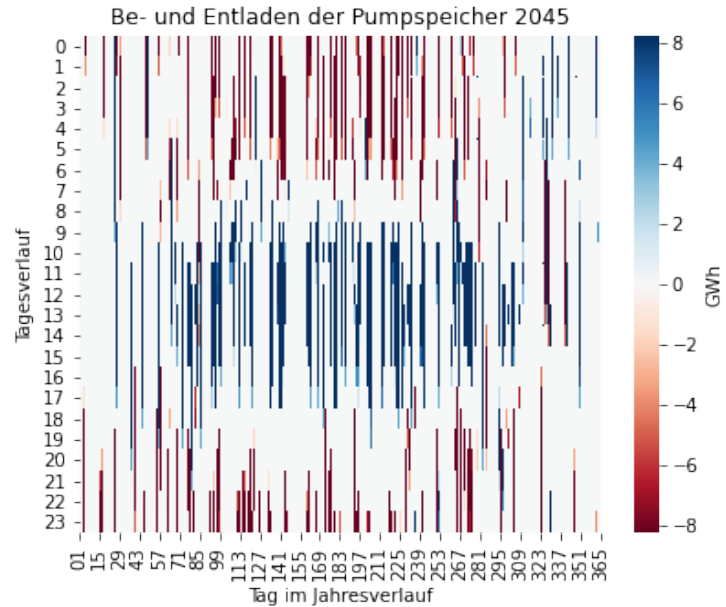


Smart Heating beschreibt hier die Lastverschiebung des Einsatzes von Wärmepumpen und den dadurch in Stunden mit Strommangel eingesparten Strombedarf.

- Stromspeicher vor allem Sommer
- Flexible Kraftwerke und Stromimporte vorwiegend im Winter
- Geringer Energiebedarf im Dezember führt zu geringem Strommangel

Ergebnisse

Stromspeicher: Vergleich der Be- und Entladung



Morgens bzw. tagsüber
Beladung, abends und nachts
Entladung

Ladezyklen stationär

mobil (netzdienstlich)

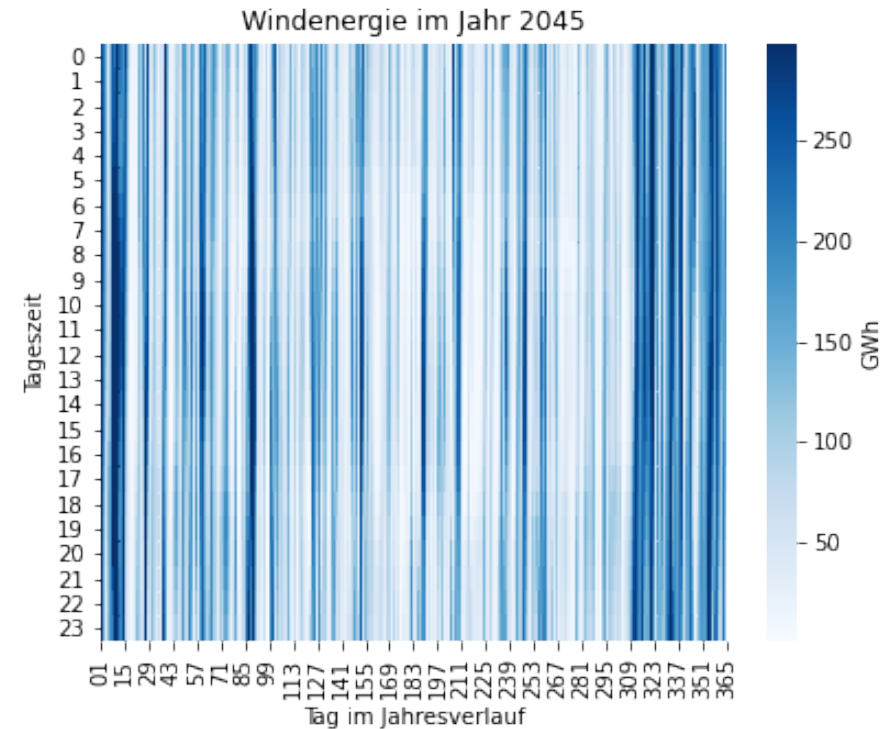
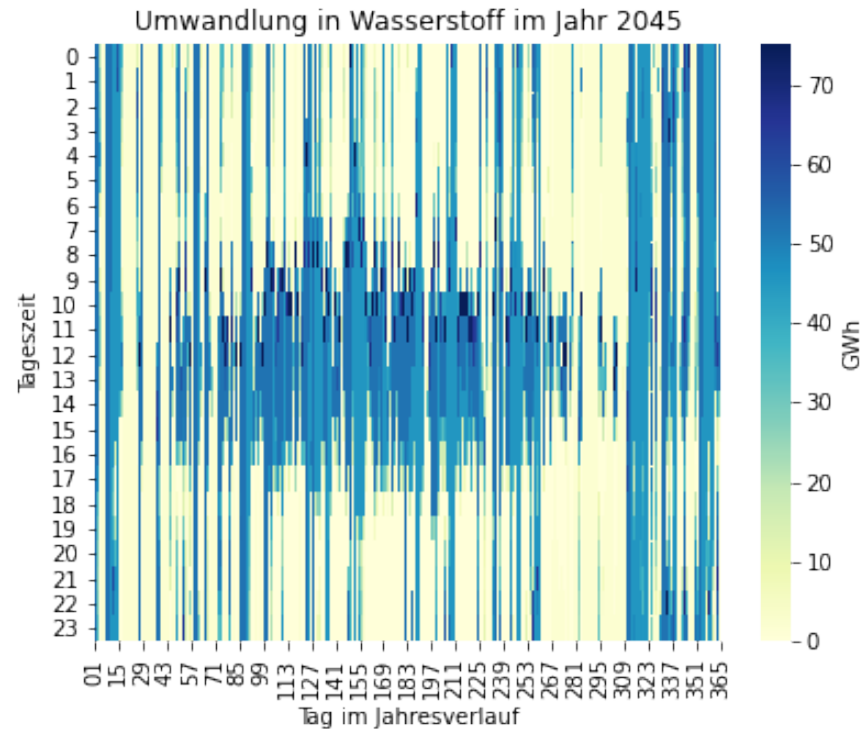
2045

~220

~70

Ergebnisse

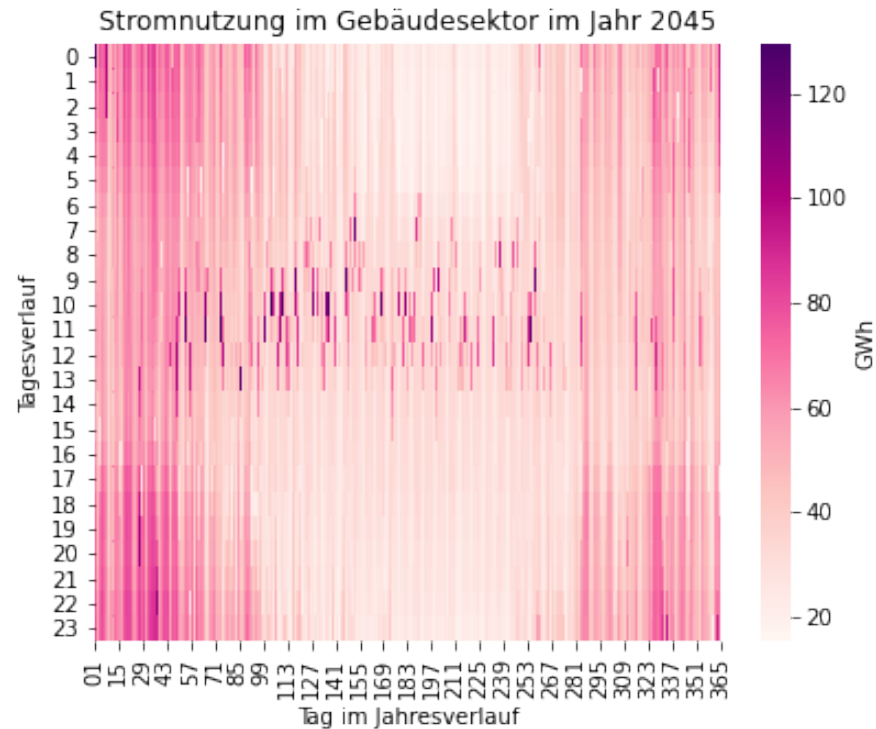
Power-to-X: Wasserstoff bei der flexiblen Aufnahme von Strom



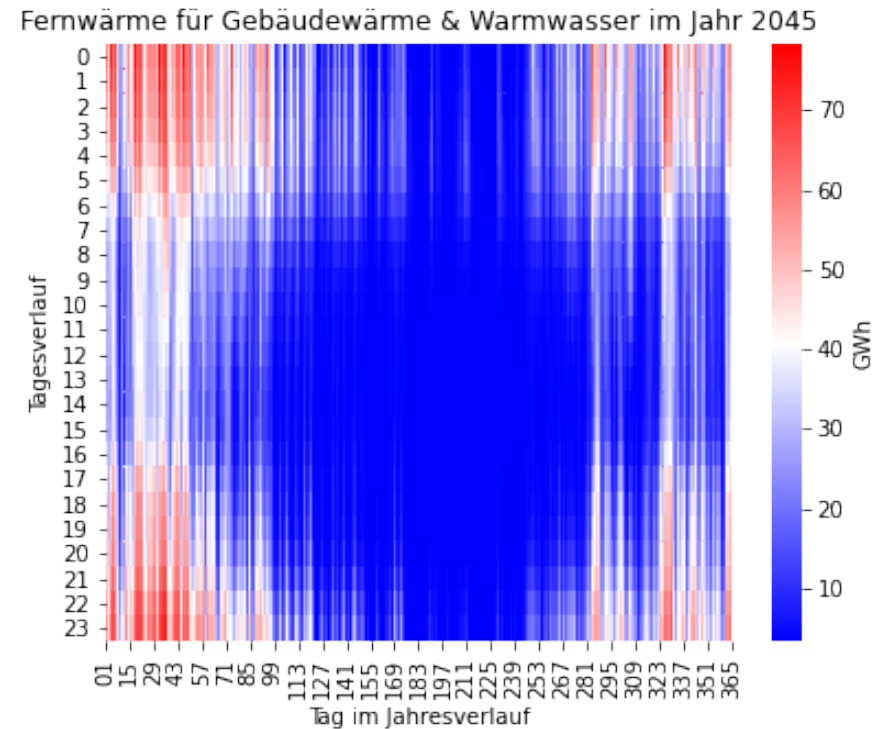
Wasserstoffherzeugung aus
Wind und Solar

Ergebnisse

Wärmeerzeugung: Stromnutzung und Fernwärmenutzung im Gebäudesektor



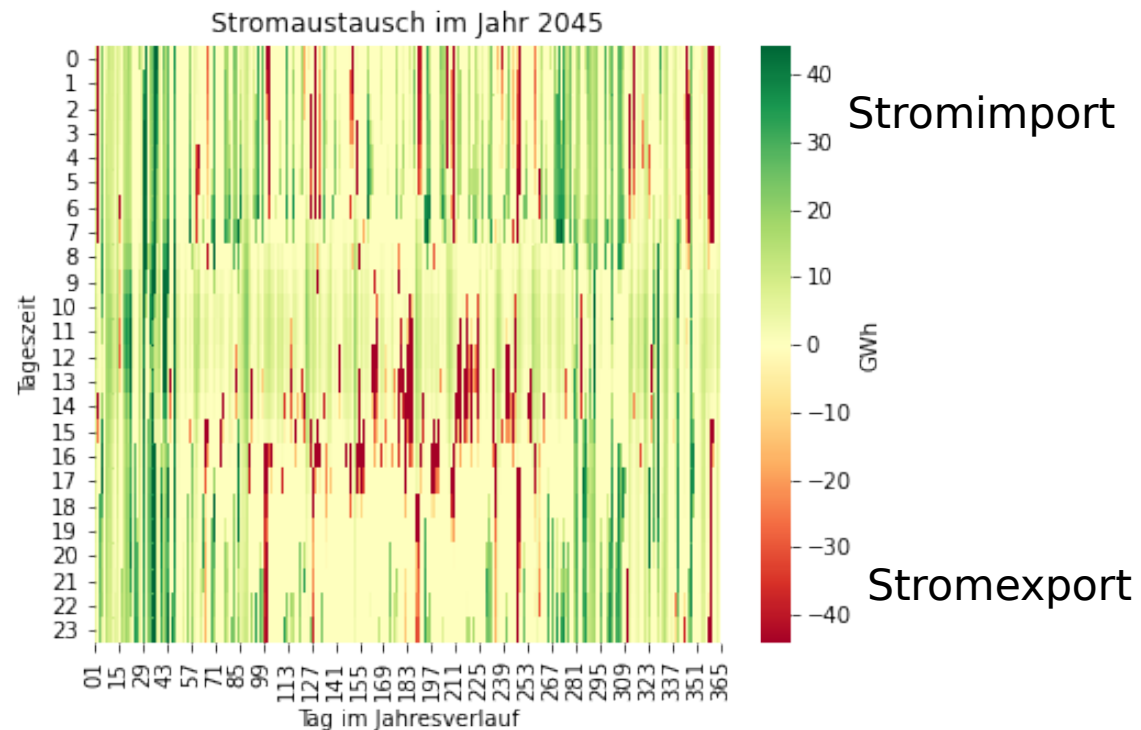
Stromnutzung vorwiegend im Winter und im Sommer morgens



Wärmebedarf vorwiegend morgens und abends im Winter

Ergebnisse

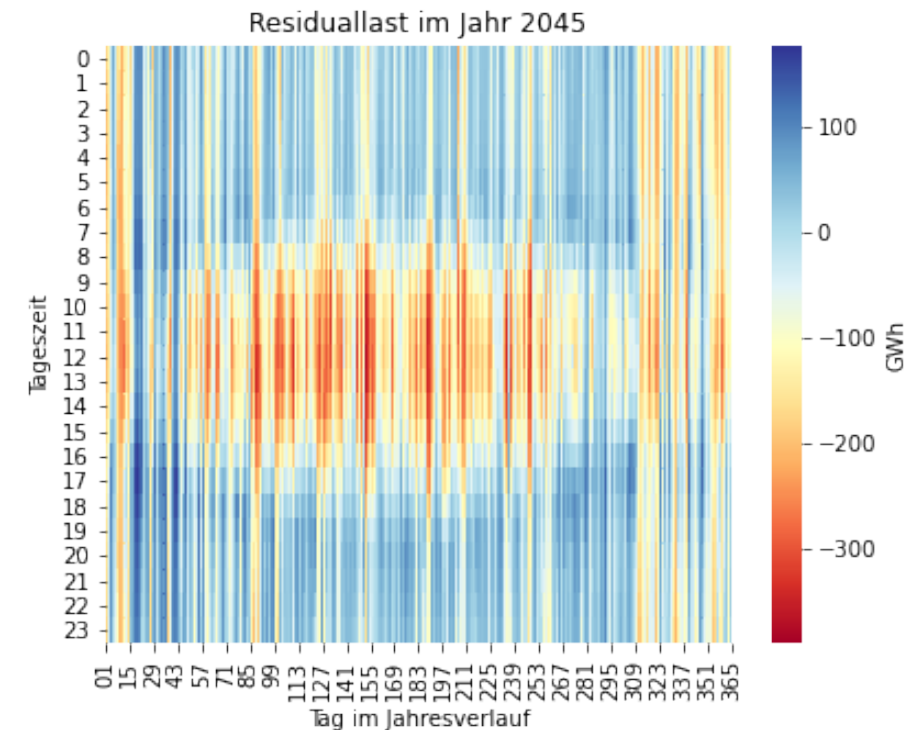
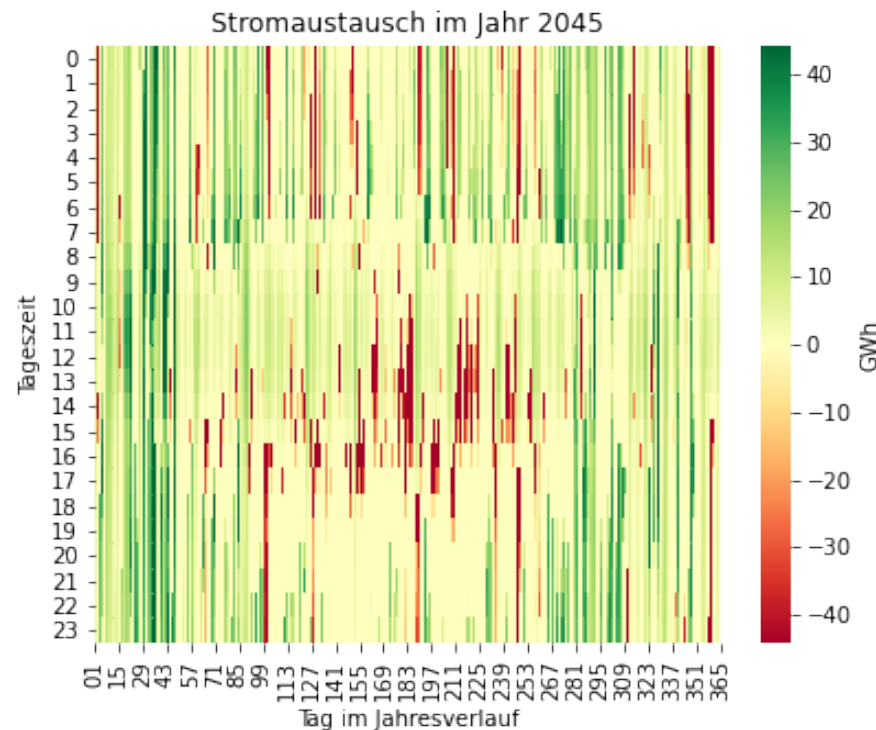
Stromtausch



- Schwaches Muster der Erneuerbaren
- Begrenzte Aufnahmemöglichkeiten und Bereitstellung im Ausland

Ergebnisse

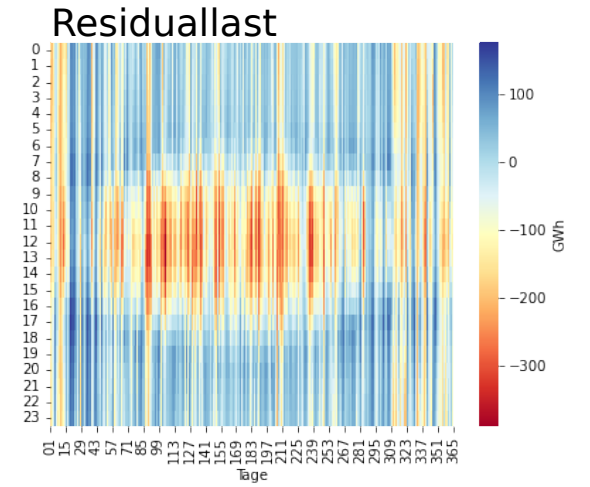
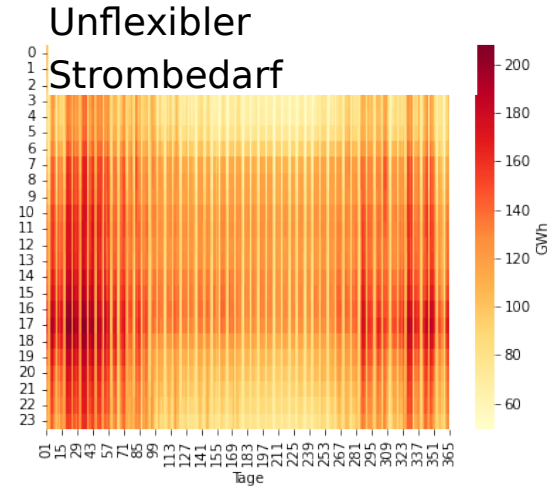
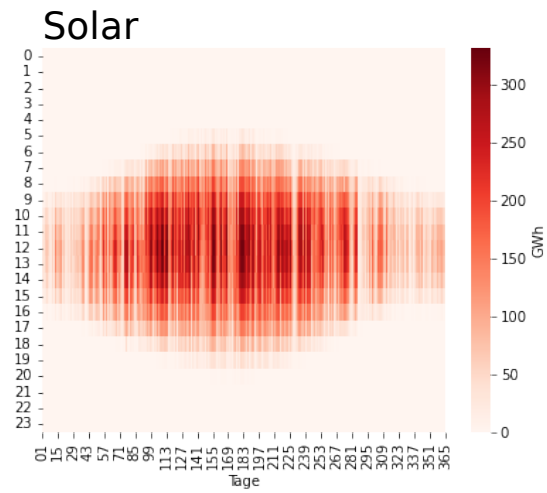
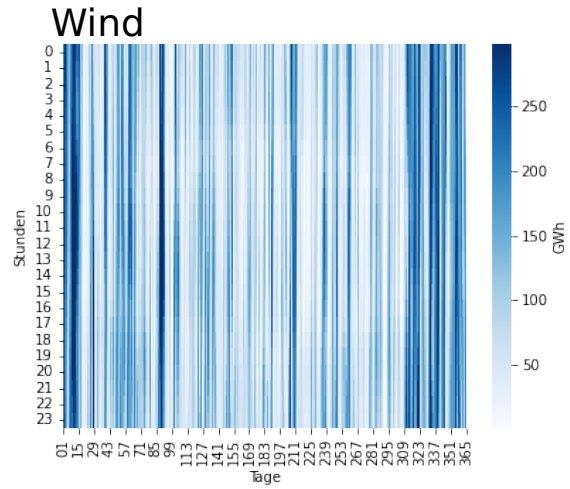
Stromtausch



- Schwaches Muster der Erneuerbaren
- Begrenzte Aufnahmemöglichkeiten und Bereitstellung im Ausland

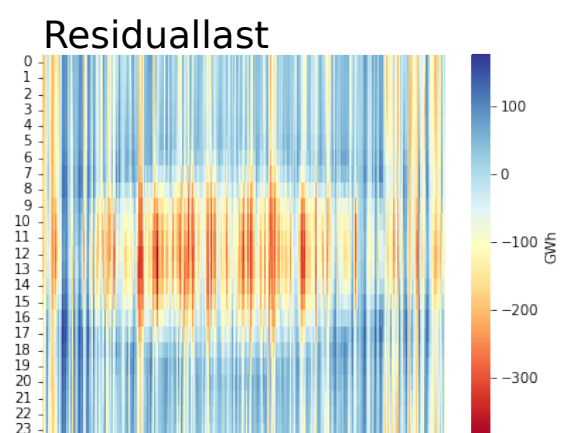
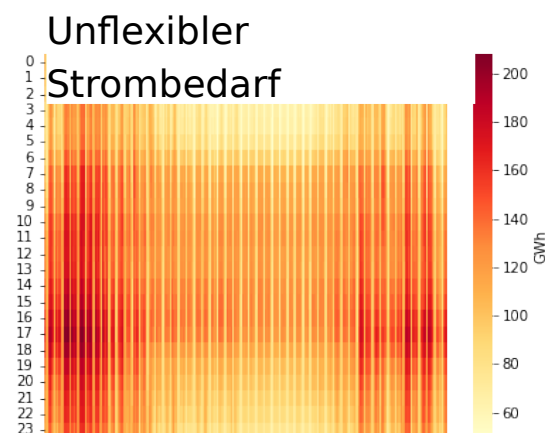
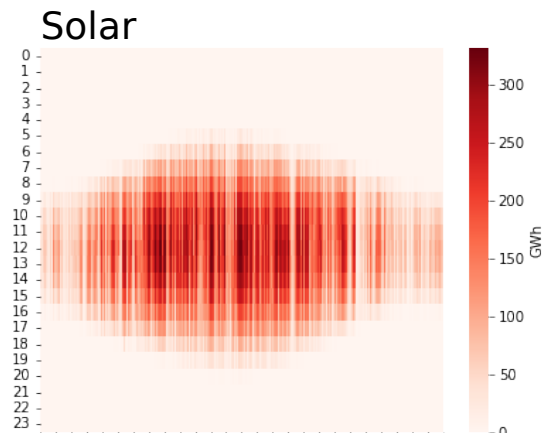
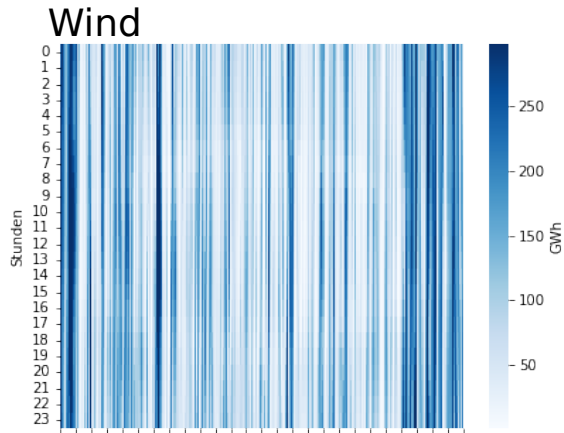
Zusammenfassung

unflexibel

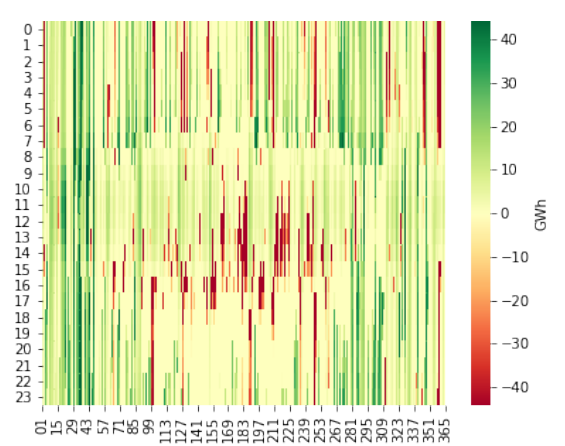
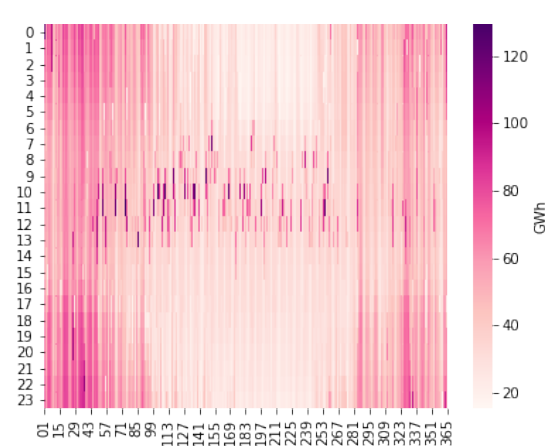
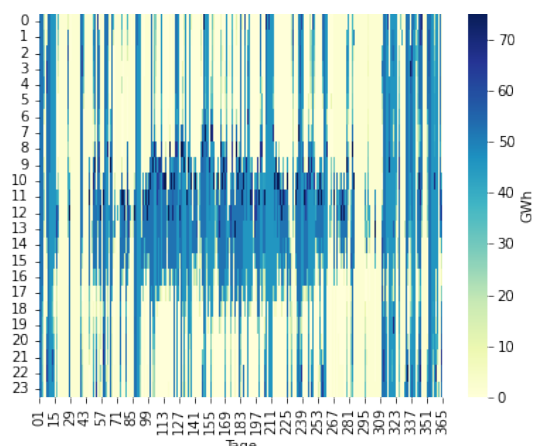
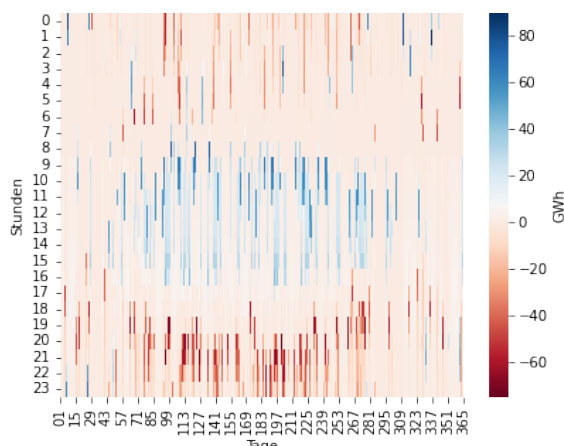


Zusammenfassung

unflexibel



flexibel



mobile Batterien (netzdienlich)

Elektrolyse

Gebäudewärme

Stromtausch

Zusammenfassung

Analyse von Flexibilitäten in einem geschlossenen Energiesystemmodell für alle Sektoren

1



Strommangel vor allem nachts und im Winter

▫ Einsatz von flexiblen Kraftwerken

2



Vorwiegend im Sommer kommt es zu Stromüberschuss

▫ Einsatz der Stromspeicher

3



Kurzfristiger und langfristiger Flexibilitäteneinsatz

Kurzfristig: Batterien, smartes Heizen und Stromaustausch

Langfristig: Elektrolyse

4



Flexibilitäten werden in Zukunft vor allem für die Nutzung des hohen Überschussstroms benötigt.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Jael Sepúlveda Schweiger

Jael.Sepulveda.Schweiger@ise.fraunhofer.de

Abteilung für Energiesystemanalyse am Fraunhofer ISE, Freiburg

Methodik

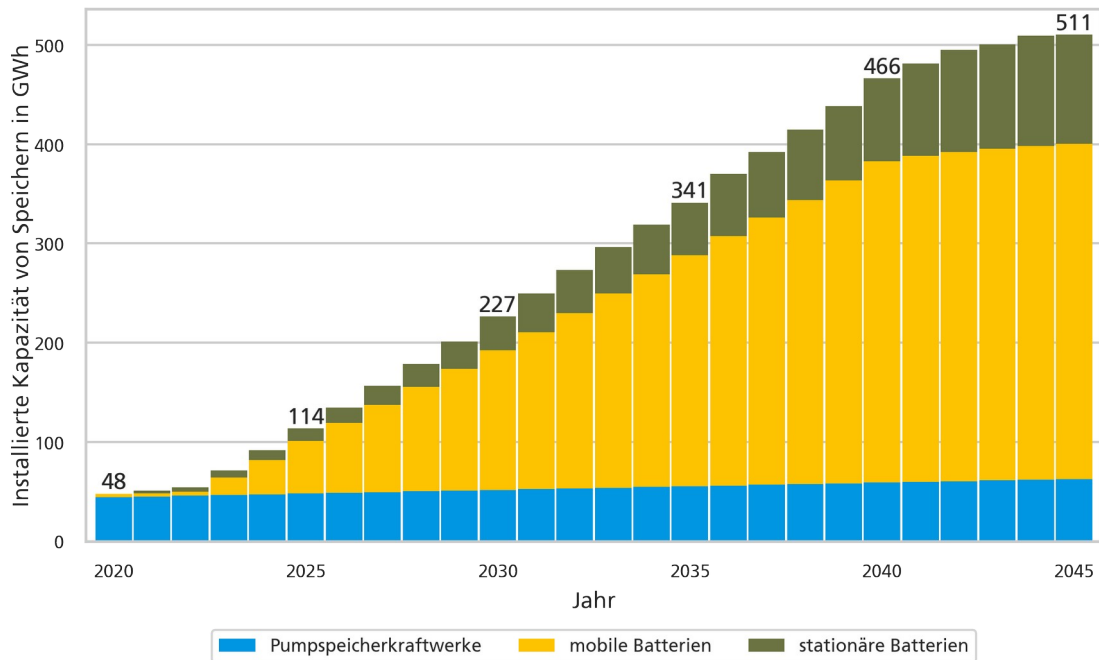
Einteilung der Flexibilitäten in Technologiegruppen



Stromspeicher

Power-to-X

Wärmeerzeugung



Methodik

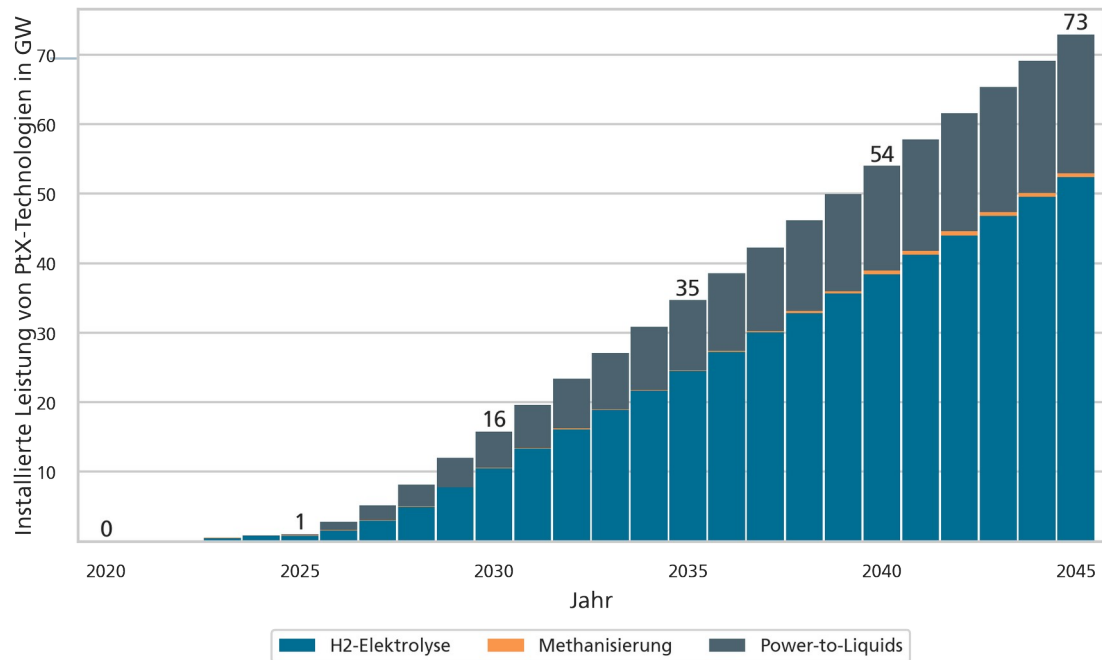
Einteilung der Flexibilitäten in Technologiegruppen



Stromspeicher

Power-to-X

Wärmeerzeugung



Methodik

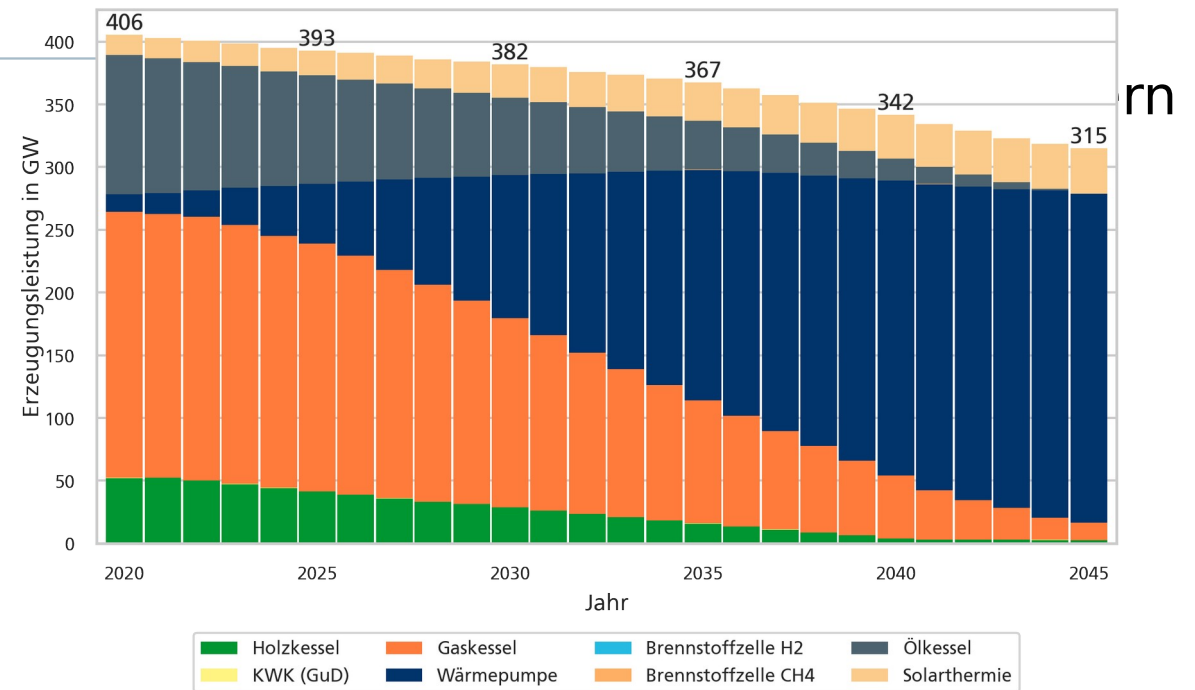
Einteilung der Flexibilitäten in Technologiegruppen



Stromspeicher

Power-to-X

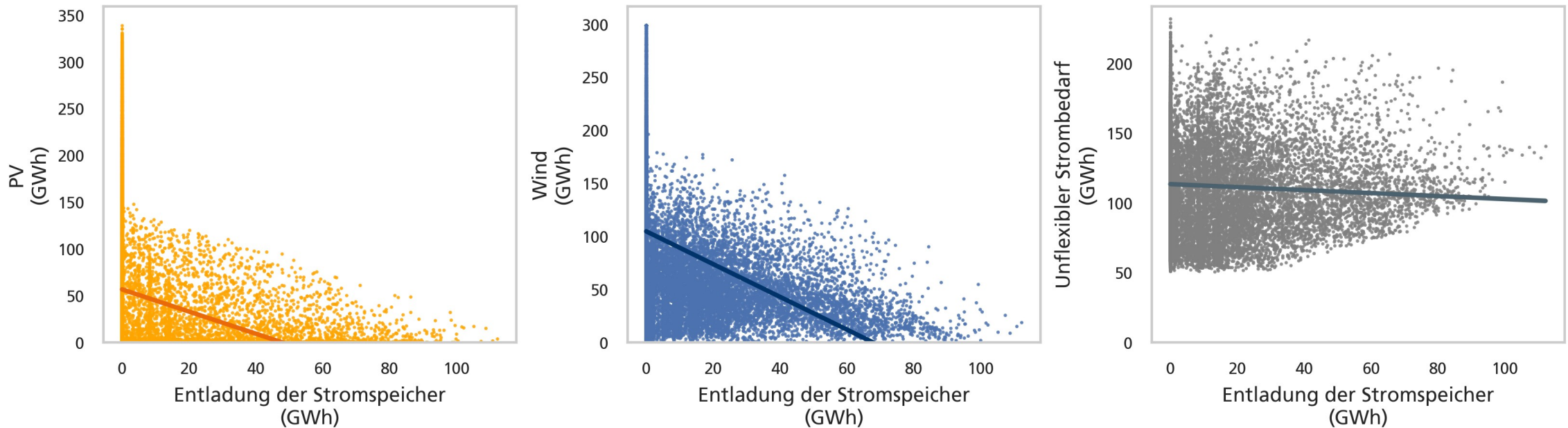
Wärmeerzeugung



Ergebnisse

Korrelationsanalyse für die Entladung von Batteriespeichern

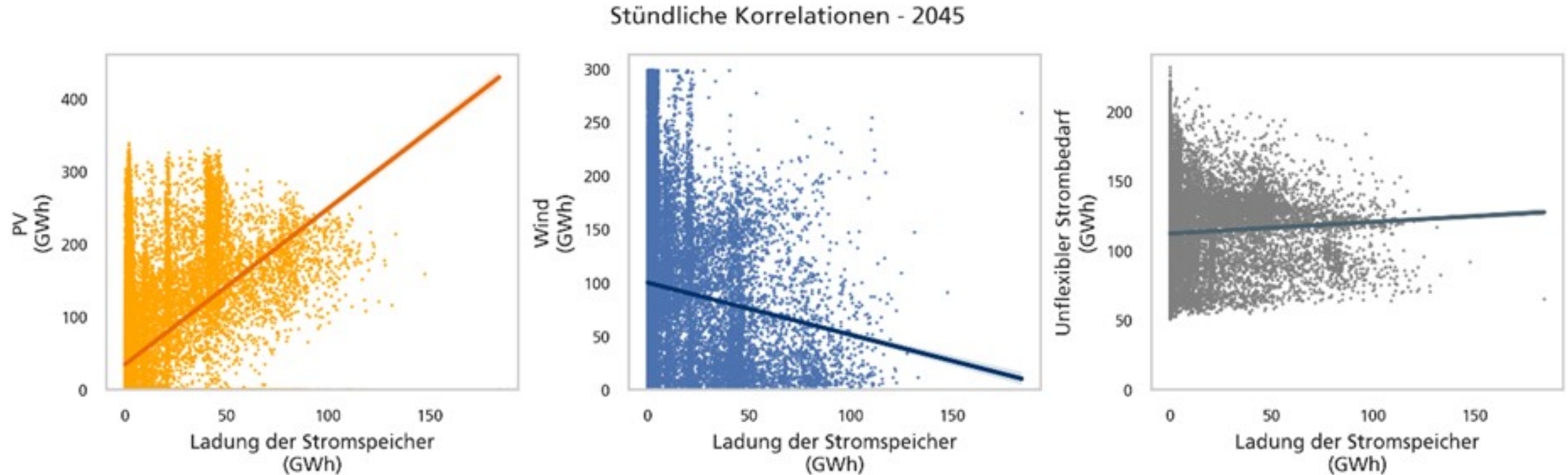
Stündliche Korrelationen - 2045



- Negative Korrelation der Entladung zur Stromerzeugung aus PV und Wind
- Nur leicht negative Korrelation zum Strombedarf

Ergebnisse

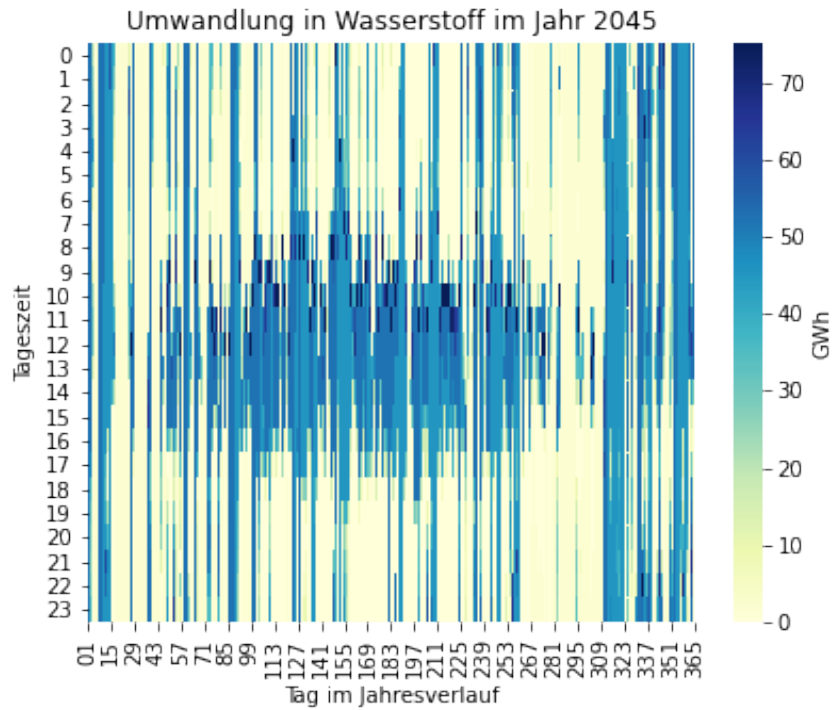
Korrelationsanalyse für die Beladung von Batteriespeichern



- Positive Korrelation der Beladung zur Stromerzeugung aus Solar
- Negative Korrelation der Beladung zur Stromerzeugung aus Wind
- Nur leicht positive Korrelation zum Strombedarf

Ergebnisse

Power-to-X: Wasserstoff bei der flexiblen Aufnahme von Strom



- Wasserstoffherzeugung aus Wind und Solar

Stündliche Korrelationen - 2045

