

Stochastische Programmierung in Energiegemeinschaften: Wärmepumpen als Flexibilität

Bernd Mildt, Paul Bauer, Benedikt Herold,
Stefan Wilker, Thilo Sauter

19. Symposium Energieinnovation 2026

ICT Energy&IT Group
introducing smart to the electricity grid



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

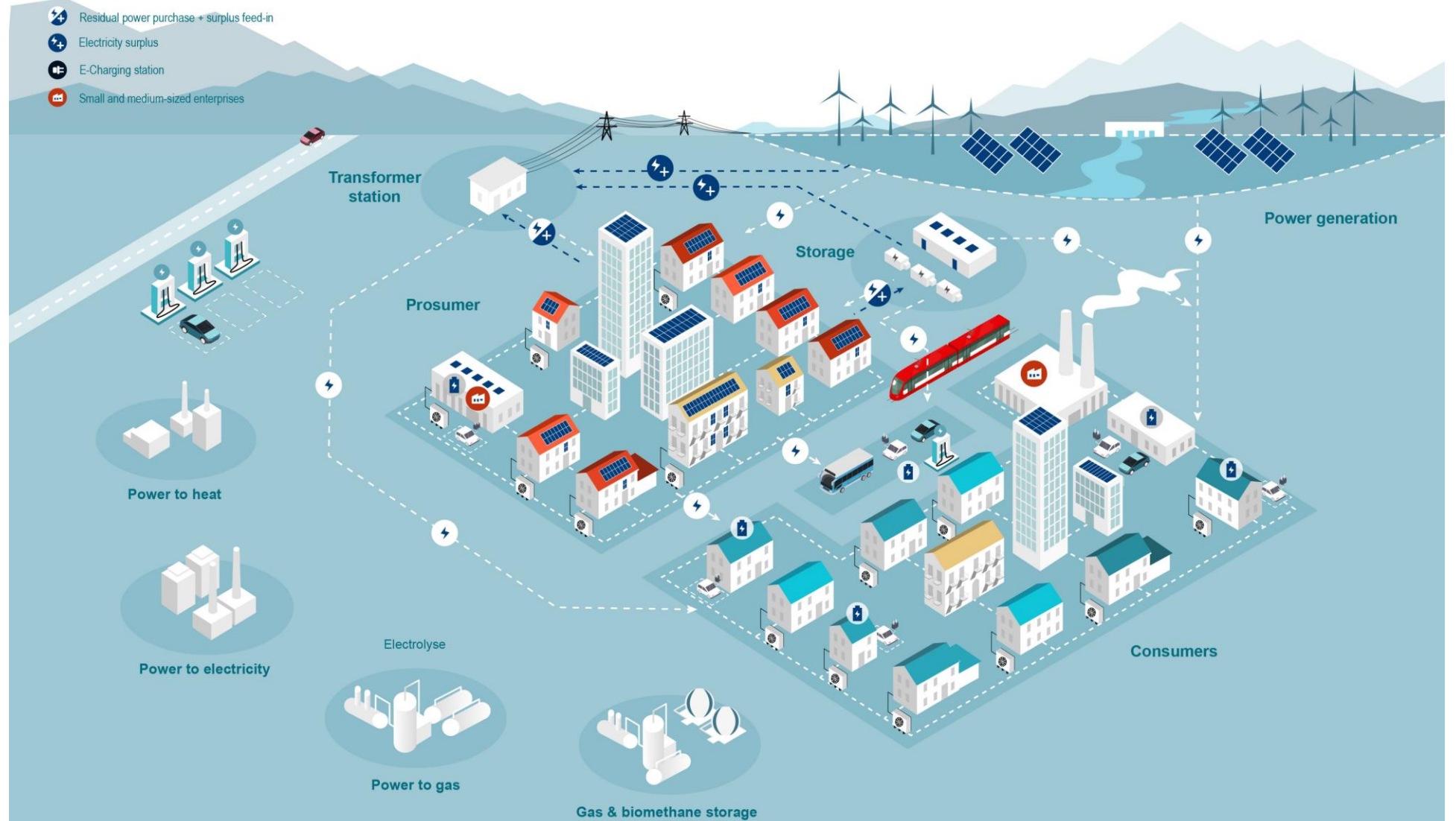
ICT

Institute of
Computer Technology





- Prosumer
- Consumer
- Electricity consumption
- Residual power purchase + surplus feed-in
- Electricity surplus
- E-Charging station
- Small and medium-sized enterprises





Energiewende im Gebäudesektor

- EU-Klimaziele und Klimaschutzstrategie Österreichs
- bis 2050 CO₂-neutraler Gebäudesektor
- Aktuell 25,9% des Energieeinsatzes aus emissionsintensiven, fossilen Energiequellen

Flexibilisierung nötig

- Prognostizierter Anstieg der Gleichzeitigkeitsfaktoren durch volatile Energieerzeugung
- Batteriespeicher bereits etabliert

Idee: Energiegemeinschaften, nutzernahe Smart-Grid Struktur, lokale Flexibilität durch Sektorkopplung

- Einsetzen von Wärmespeichern und Gebäudewärme als Flexibilität
- Marktdurchdringung von Wärmepumpen steigt
- Energieeinsparungen durch Retrofitting möglich

Nutzervorteile und Netzdienlichkeit kombiniert?

→ **Mathematische Optimierung!**

[1] Umweltbundesamt, „14. Umweltkontrollbericht – Umweltsituation in Österreich,“ Österreichisches Parlament, Wien, 2025.

[2] IEA, „Energy Efficiency 2025,“ International Energy Agency, Paris, 2025.

[3] Klima- und Energiefonds, „Österreichische Koordinationsstelle für Energiegemeinschaften,“ [Online].

Available: <https://energiegemeinschaften.gv.at/>. [Zugriff am 07 01 2026].

Bezeichnung	Formelzeichen	Bedeutung
Kostenfunktional	$\arg \min_x J(\mathbf{x}, \mathbf{z}, S)$	Minimierung der Energiekosten
Entscheidungsvariablen	\mathbf{x}	Ladeleistung, Wärmepumpenleistung
Nebenbedingung	$\lambda_i \geq 0$	Gewichtungsterm
Straffunktion 1	c_{el}	Stromimportkosten
Straffunktion 2	c_{sh}	Komfortband Raumtemperatur
Straffunktion 3	c_{dhw}	Komfortband Warmwassertemperatur
Straffunktion 4	c_{bat}	Ent-/Ladebedingung

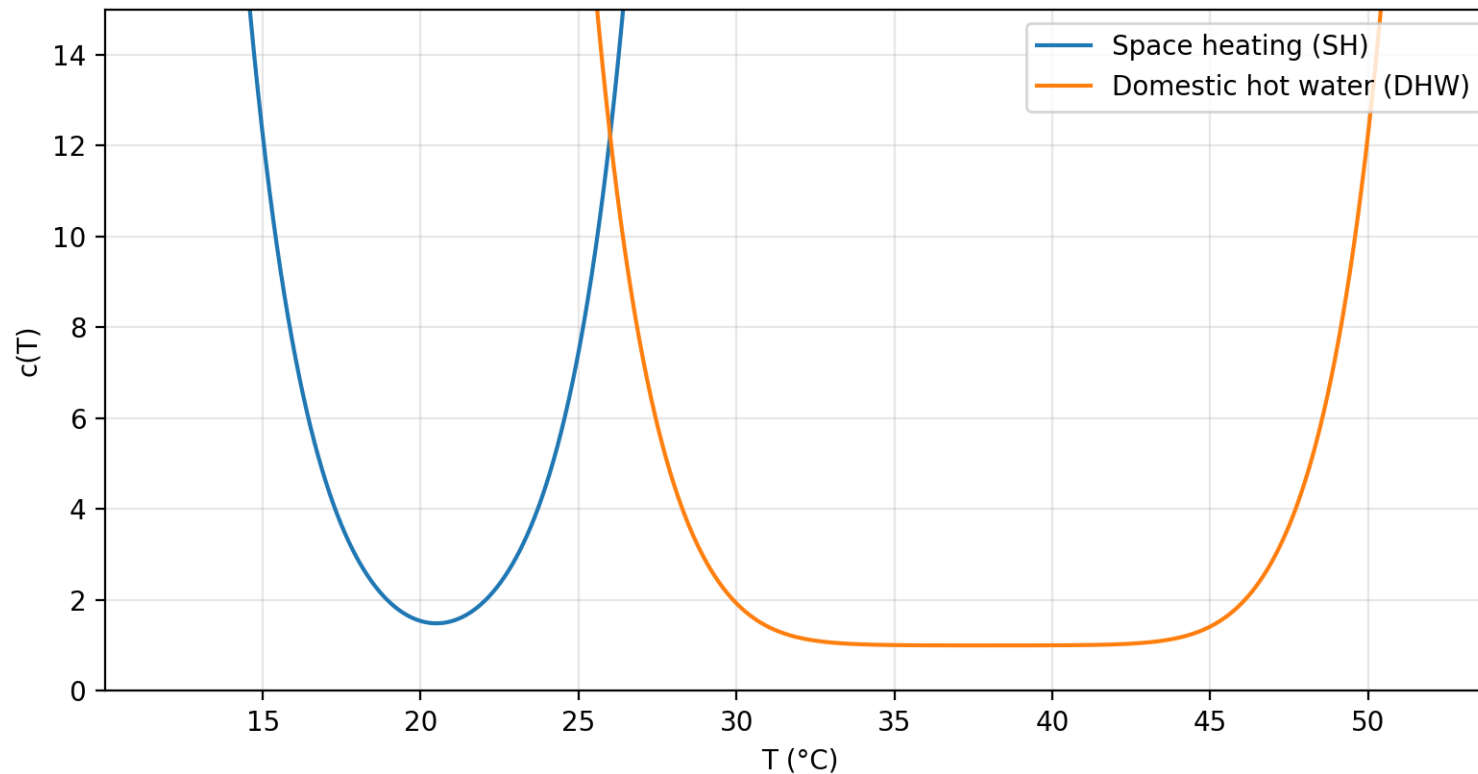
$$\arg \min_x J(\mathbf{x}, \mathbf{z}, S) = \sum_{s=1}^S \vartheta_s \left(\left(\sum_{t=1}^{t_{max}} \lambda_1 c_{el}^2(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}, s) + \lambda_2 c_{sh}(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}, s) + \lambda_3 c_{dhw}(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}, s) \right) + \lambda_4 c_{bat}(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}, s) \right)$$

Strafffunktion Raumtemperaturabweichung

$$c_{sh}(t, x, z, s) = \sqrt{e^{\Delta T_{min,sh}(t,x,z,s)+1} + e^{\Delta T_{max,sh}(t,x,z,s)+1}}$$

Strafffunktion Tanktemperaturabweichung

$$c_{dhw}(t, x, z, s) = \sqrt{e^{\Delta T_{min,dhw}(t,x,z,s)+1} + e^{\Delta T_{max,dhw}(t,x,z,s)+1}}$$



Modell der Energiegemeinschaft:

Elektrische Last – Grundbedarf

- Modelliert als Sinusverlauf + Rauschen

PV-Erzeugung

- Abhängig von Exogenen Wetterdaten

Batterie

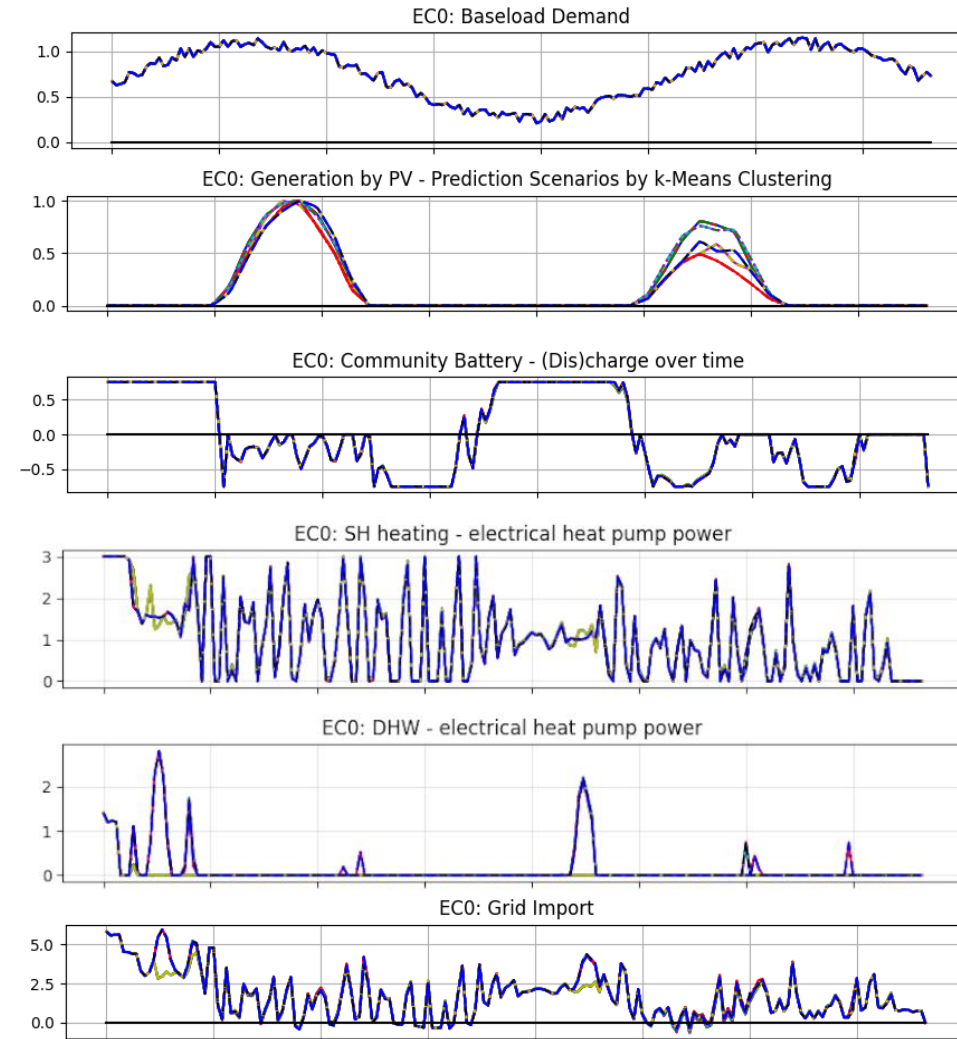
- Temporale Flexibilisierung der Lasten

Wärmepumpen

- Elektrisch-thermische Kopplung
- Zwei Systeme: Raumheizung, Warmwasser

Netzimport

- Residuallast wird über ONT importiert



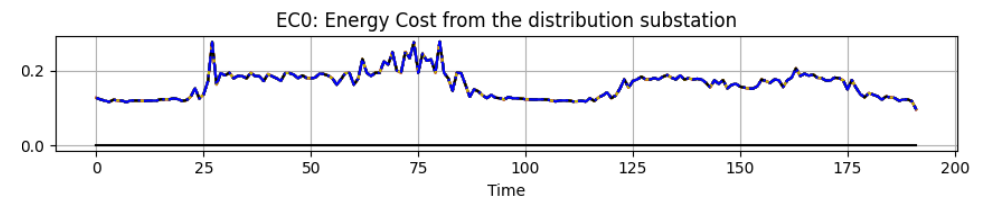
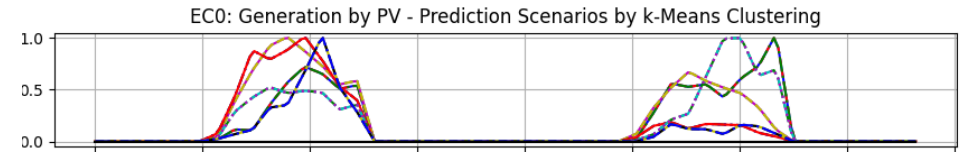
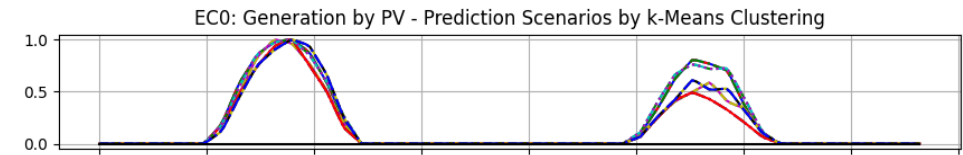
ICON-D2-EPS-Modell des DWD

- **PV-Erzeugung** in 5 Ensembles → 5 Szenarien
- Direkte, diffuse, reflektierte Solareinstrahlung
- **Wärmegewinn** durch Solareinstrahlung
- Gemittelte Wärmeeinstrahlung, keine Ensembles

- Wirkung der Solareinstrahlung winkelabhängig
- Azimut- & Zenitwinkel der Sonne zeitabhängig

Strompreise Austrian Power Grid AG

- Reale Kostenkurve für Prädiktionszeitraum
- Einkauf / Verkauf am Day-Ahead-Markt in 15-min-Schritten



[4] Deutscher Wetterdienst DWD, „DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System,“ [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/nwv_icon_d2_modelldokumentation/nwv_icon_d2_modelldokumentation.html?nn=16102&lsbld=609610. [Zugriff am 27 01 2026]
 [5] APG AG, „Day-Ahead-Preise,“ Austrian Power Grid AG, [Online]. Available: <https://markt.apg.at/transparenz/uebertragung/day-ahead-preise/>. [Zugriff am 15 01 2026]



$$P_{imp}(t) = \underbrace{-P_{PV}(t)}_{\text{Import}} + \underbrace{P_{load}(t)}_{\text{Erzeugung}} + \underbrace{P_{ch}(t) + P_{el,sh}(t) + P_{el,dhw}(t)}_{\text{Last}}$$

$P_{imp}(t)$.. Importleistung

$P_{PV}(t)$.. PV-Erzeugung

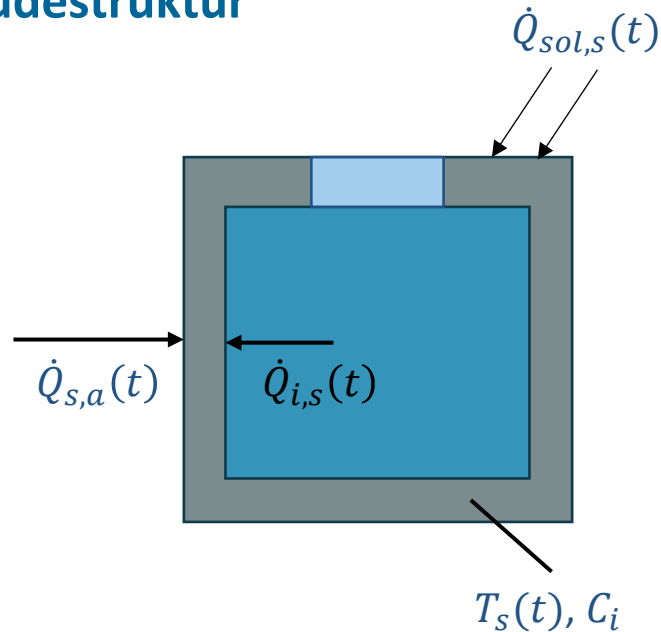
$P_{load}(t)$.. Grundlast der EG

$P_{ch}(t)$.. Batterieladeleistung (+) bzw. –entladeleistung (-)

$P_{el,sh}(t)$.. Leistung der Raumheizung

$P_{el,dhw}(t)$.. Leistung der Wasserheizung

I) Gebäudestruktur



$$\dot{Q}_{bal,a}(t) = \dot{Q}_{i,s}(t) + \dot{Q}_{s,a}(t) + \dot{Q}_{sol,s}(t)$$

$\dot{Q}_{bal,a}(t)$.. Wärmebilanz der Struktur

$\dot{Q}_{i,s}(t)$.. Wärmefluss Innenraum \rightarrow Struktur

$\dot{Q}_{s,a}(t)$.. Wärmefluss Struktur \rightarrow Außenraum

$\dot{Q}_{sol,s}(t)$.. Wärmegewinn Struktur durch Solareinstrahlung

$$T_s(t) = T_s(t-1) + \frac{\Delta T}{C_i} \dot{Q}_{bal,a}$$

$T_s(t)$.. Temperatur der Struktur

ΔT .. Änderung der Temperatur über Zeitschritt t

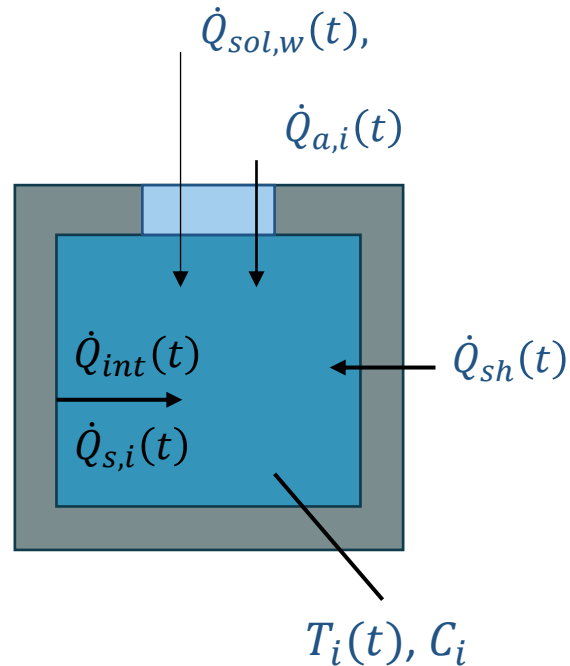
C_i .. Wärmekapazität der Struktur

II) Innenraum

III) Wassertank

I) Gebäudestruktur

II) Innenraum



$$\dot{Q}_{bal,i}(t) = \dot{Q}_{sh}(t) + \dot{Q}_{a,i}(t) + \dot{Q}_{s,i}(t) + \dot{Q}_{sol,w}(t) + \dot{Q}_{int}(t)$$

$\dot{Q}_{bal,i}(t)$.. Wärmebilanz des Innenraums

$\dot{Q}_{sh}(t)$.. Wärmefluss der Raumheizungswärmepumpe

$\dot{Q}_{a,i}(t)$.. Wärmefluss durch Fenster/Türen, Außen- → Innenraum

$\dot{Q}_{s,i}(t)$.. Wärmefluss Struktur → Innenraum

$\dot{Q}_{sol,w}(t)$.. Wärmegewinn Solareinstrahlung durch Fensterflächen

$\dot{Q}_{int}(t)$.. Wärmegewinn durch Personenabwärme

10

$$T_i(t) = T_i(t - 1) + \frac{\Delta T}{C_i} \dot{Q}_{bal,i}(t - 1)$$

$T_i(t)$.. Temperatur des Innenraums

ΔT .. Änderung der Temperatur über Zeitschritt t

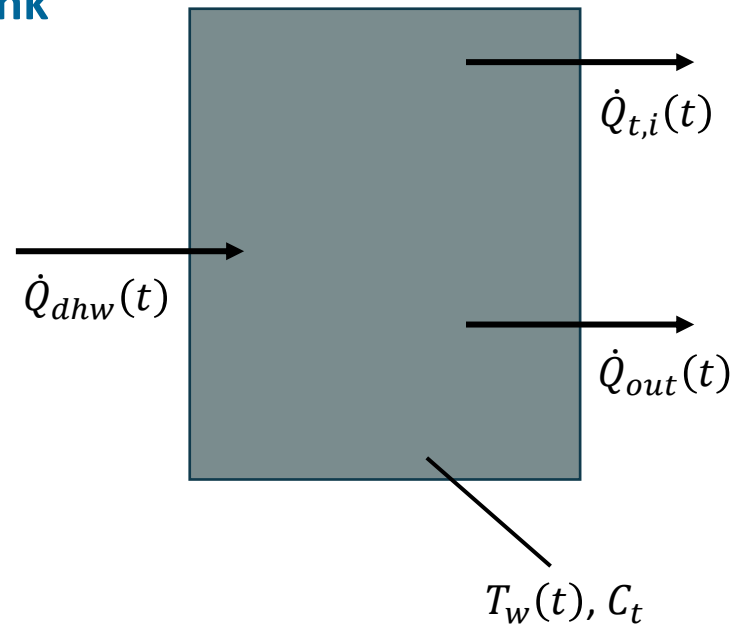
C_i .. Wärmekapazität des Innenraums

III) Wassertank

I) Gebäudestruktur

II) Innenraum

III) Wassertank



$$T_w(t) = T_w(t - 1) + \frac{\Delta T}{C_t} \left(\dot{Q}_{dhw}(t) - \dot{Q}_{out}(t) - \dot{Q}_{t,i}(t) \right)$$

$T_w(t)$.. Temperatur des Warmwassertanks

ΔT .. Änderung der Temperatur über Zeitschritt t

C_t .. Wärmekapazität des Wassertanks

$\dot{Q}_{dhw}(t)$.. Wärmefluss der Warmwasserwärmepumpe

$\dot{Q}_{out}(t)$.. Wärmeverlust durch Warmwasserentnahme

$\dot{Q}_{t,i}(t)$.. Wärmefluss Tank \rightarrow Außenraum

Wien & Genua

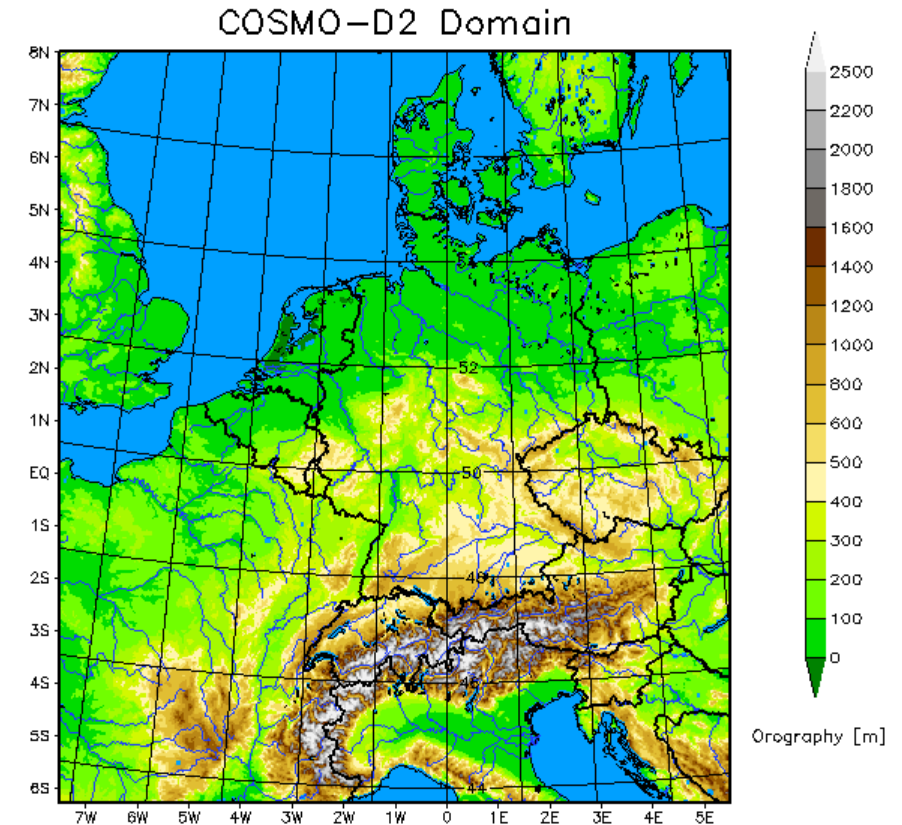
- Wien als Hauptstandort
- Genua als Vergleichsstandort in EPS-D2-Modell

Prädiktionshorizont

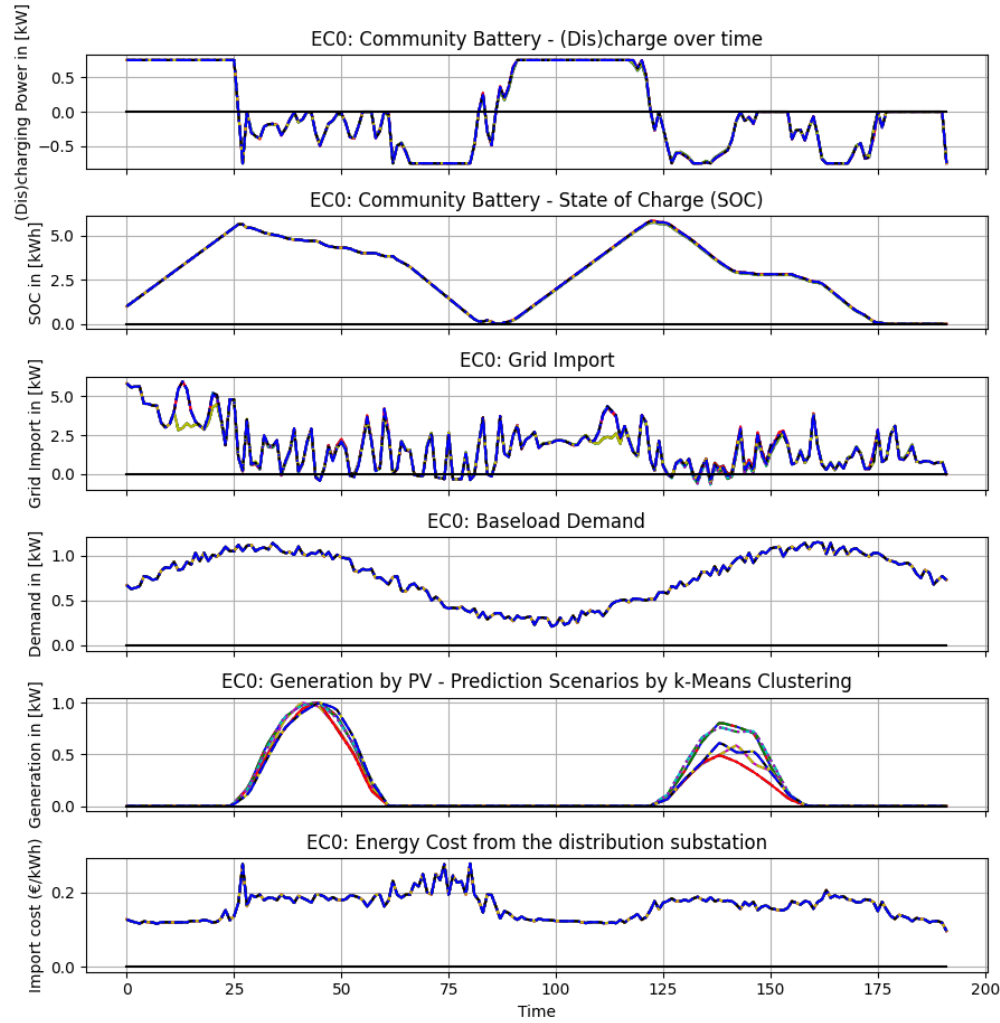
- 12 h, 24 h, 48 h in 15-min Zeitschritten
- Start: 15.01.2026 00:00
- Ende: 17.01.2026 23:45

Modellierung über je 15 Szenarien

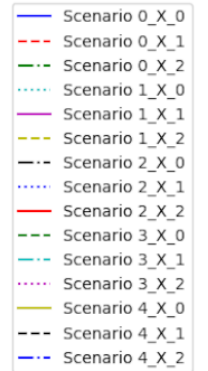
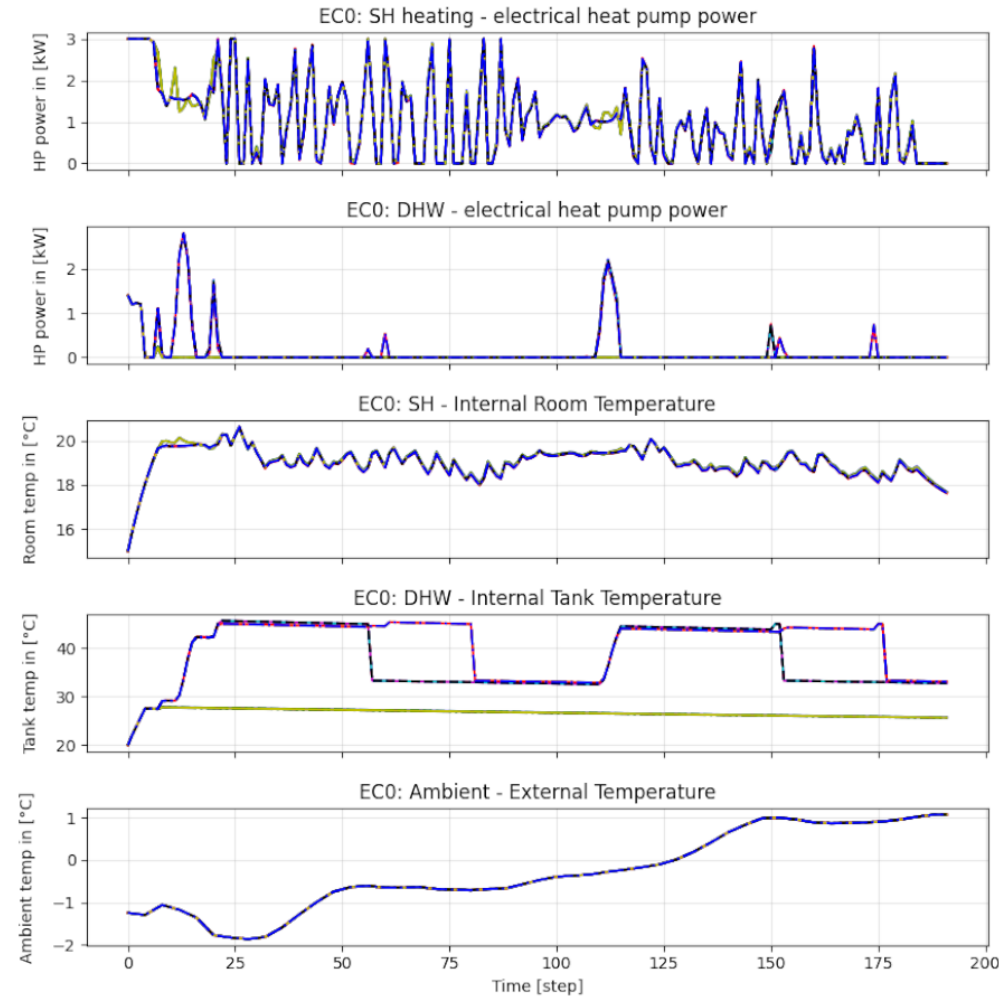
- 5 PV-Ensembles
- 3 Personen-Events
- N = 10 Simulationsläufe



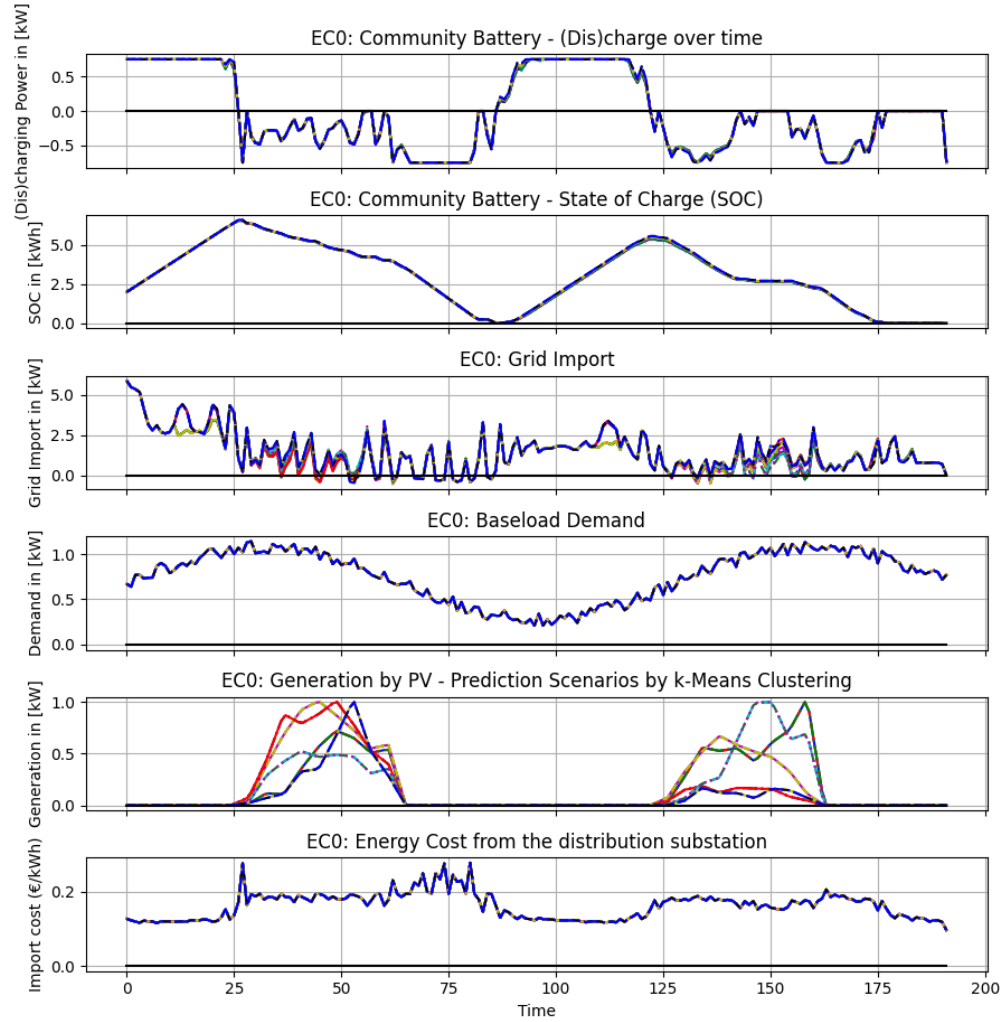
EC Overview



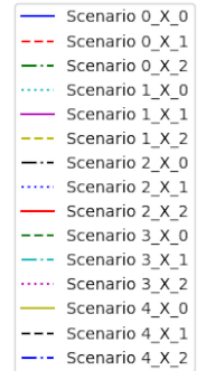
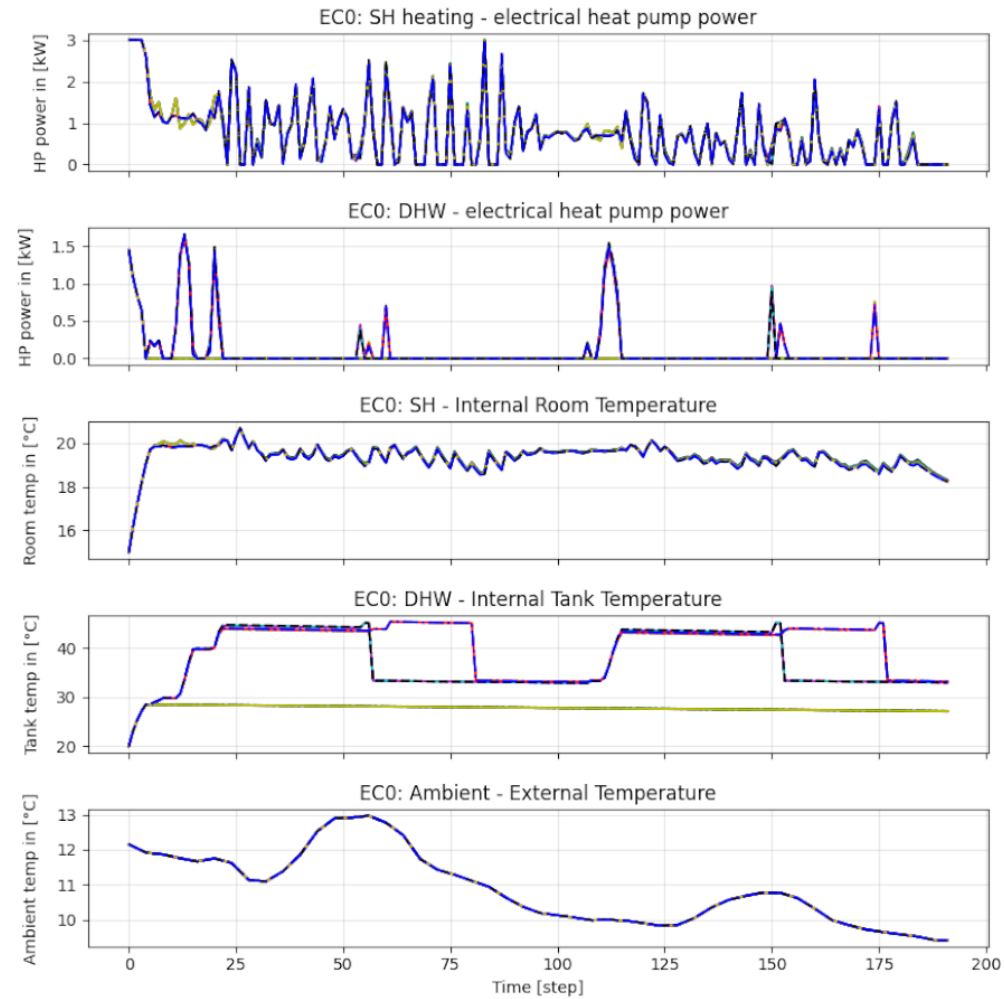
Heat Pump Overview

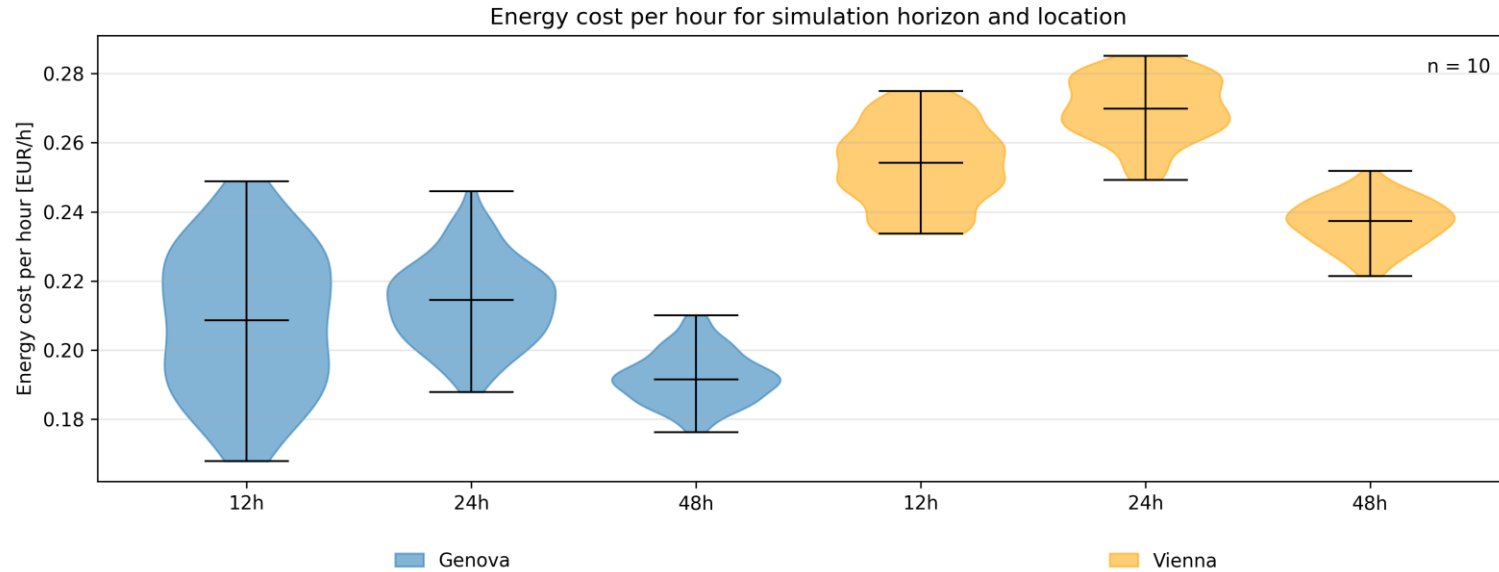


EC Overview

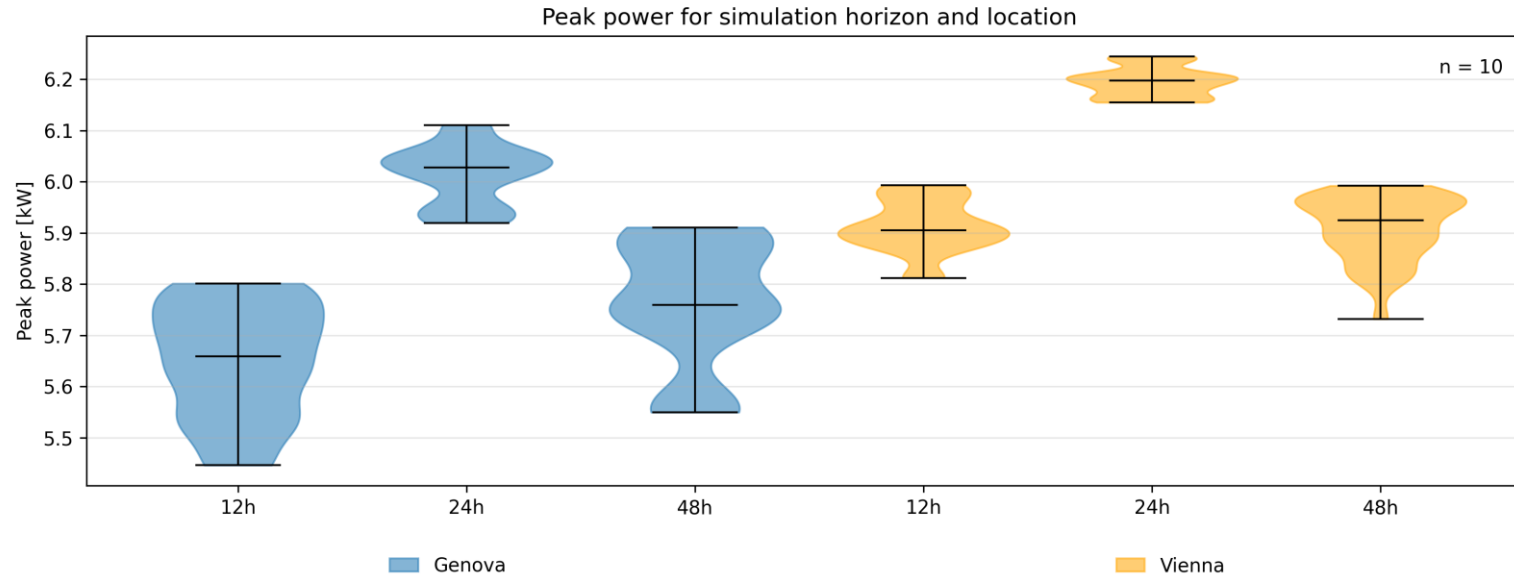


Heat Pump Overview





- Normierte Energiekosten [EUR/h]
- Kosten für Genua generell niedriger als für Wien
→ **Abhängigkeit Außentemperatur & PV-Erzeugung**
- Kosten für 12h ohne Wärmebedarfe, Szenarien werden nicht ausgelöst
→ **höhere Variabilität der Kosten**
- Importkosten für 48h niedriger als 24h
→ **höhere temporale Flexibilität**



- Lastspitzen der Modellläufe [kW]
- Lastspitzen für Genua generell geringer als für Wien → **temperaturbedingt geringere Last nötig**
- Für 12h-Modell keine Wärmebedarfe → **Schwankungen nur durch PV & Raumheizung**
- Variabilität der Lastspitzen bei 48h deutlich höher
- Lastspitzen bei 48h deutlich geringer, als bei 24h

} **Temporale Flexibilität**



Kostenoptimaler, prädiktiver Betrieb kann Last in günstige Fenster verschieben

Endnutzer

- Kostenreduktion möglich
- Reduktion des Eigenverbrauchs
- Komfort wird durch prädiktive Automatisierung eingehalten

Ortsnetz

- Lastspitzenflexibilität und -Verschiebung
- Potenzielle netzseitige Spitzenbündelung

Maßnahmen

- Netzdienliche Signale: dynamische Netztarife und Netzrestriktionen
- Robustere Unsicherheitsbehandlung: Mehr Szenarien → bessere Extremfallprädiktion
- Echtzeit-Implementierung

Stefan Wilker
 Thilo Sauter
 Thomas Leopold
 Thomas Reisinger
 Paul Bauer
 Valentin Bauer
 Jonathan Kapfinger
 Dominic Hoffmann
 Claudia Benesch
 Carina Schöfl
 Verena Gartner
 Benedikt Herold
 Jakob Buchmeier
 Johannes Blaha
 Fiona Layes
 Dlovan Salim



ALUMNI IN RESEARCH

Peter Palensky, TU Delft
 Friederich Kupzog, AIT
 Albert Treytl, UWK
 Gerald Franzl, UWK

Aleksey Bratukhin, UWK
 Gerhard Zucker, AIT

Industriepartner (Exzerpt)



Wissenschaftliche Partner



Organisationen



19

Städtische und regionale Partnerschaften



Excited for more!

Bernd Mildt

bernd.mildt@student.tuwien.ac.at

Paul Bauer

paul.bauer@tuwien.ac.at

20

This research was funded by CETPartnership, the European Partnership under Joint Call 2022 for research proposals, co-funded by the European Commission (GA N° 101069750) and the Austrian Research Promotion Agency (FFG).



ICT Energy&IT Group
introducing smart to the electricity grid



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN