



**BEST**  
Bioenergy and Sustainable Technologies

# ÖKO-OPT-AKTIV

Optimiertes Regelungs- und Betriebsverhalten thermisch aktivierter Gebäude zukünftiger Stadtquartiere

## Abschlussworkshop

Daniel Muschick, Valentin Kaisermayer  
Graz, 16. September 2022



Bundesministerium Digitalisierung und Wirtschaftsstandort

Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie



Für die Stadt Wien



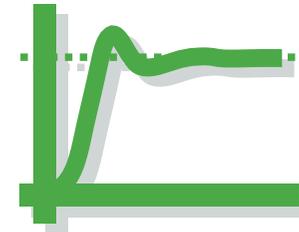
# Agenda



- Vorstellung des Projektes ÖKO-OPT-AKTIV



- Entwickelte Regelungsmethoden

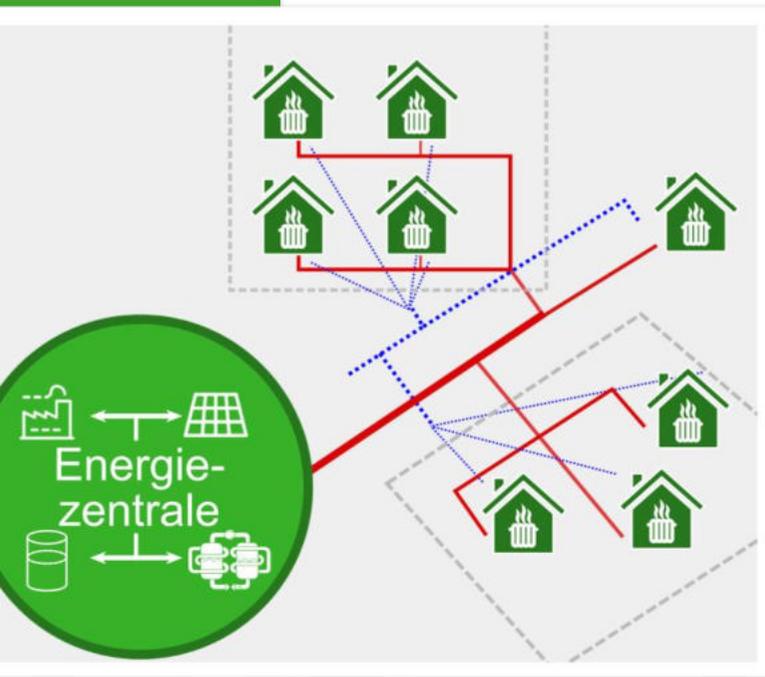


- Präsentation der Ergebnisse



- Praktische Umsetzung





## Vorstellung des Projektes ÖKO-OPT-AKTIV

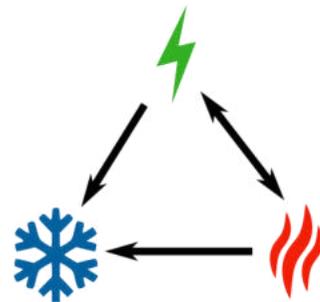
Optimiertes Regelungs- und Betriebsverhalten  
thermisch aktivierter Gebäude  
zukünftiger Stadtquartiere



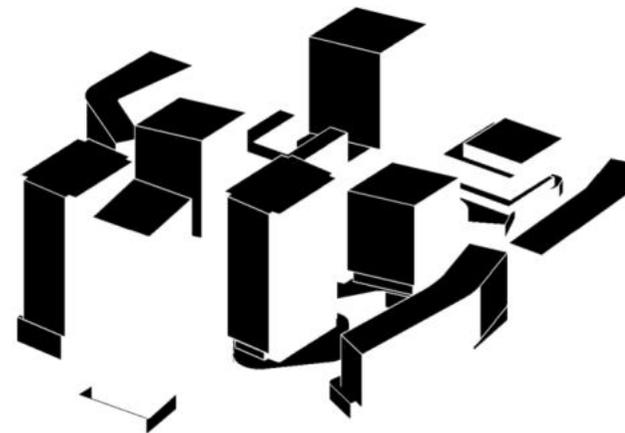
# Herausforderungen bei der Energieversorgung von Stadtquartieren

Steigende Komplexität der **Integration in Netze**  
(variable Tarife, Leistungspreise, Strommärkte)

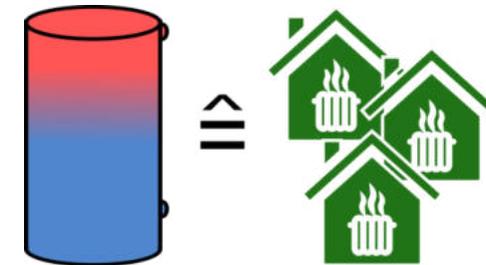
Integration von **erneuerbaren**,  
aber **volatilen** Energiequellen



Verstärkte **Kopplung**  
zwischen den Sektoren



**Stadtquartier**



**Gebüudemasse als Flexibilität**  
in der Form eines Speichers



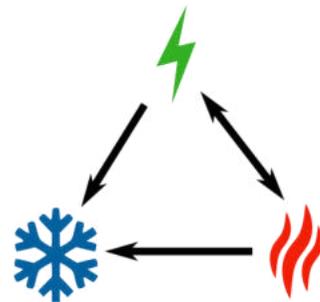
# Herausforderungen bei der Energieversorgung von Stadtquartieren

Steigende Komplexität der **Integration in Netze**  
(variable Tarife, Leistungspreise, Strommärkte)

Integration von **erneuerbaren**, aber **volatilen** Energiequellen

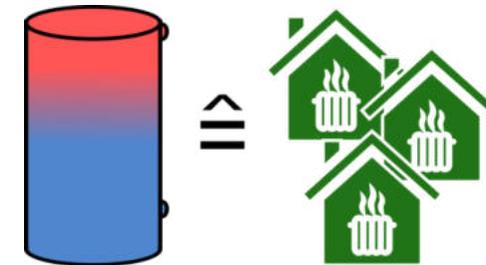


Intelligente Regelungssysteme benötigen Flexibilitäten



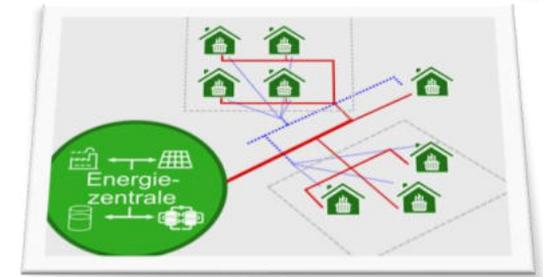
Verstärkte **Kopplung** zwischen den Sektoren

Stadtquartier



**Gebäudemasse als Flexibilität**  
in der Form eines Speichers

# Stufen zur optimalen Energieversorgung



**Übergeordnete Regelung**  
koordiniert Zonenregler  
mit der Energiezentrale

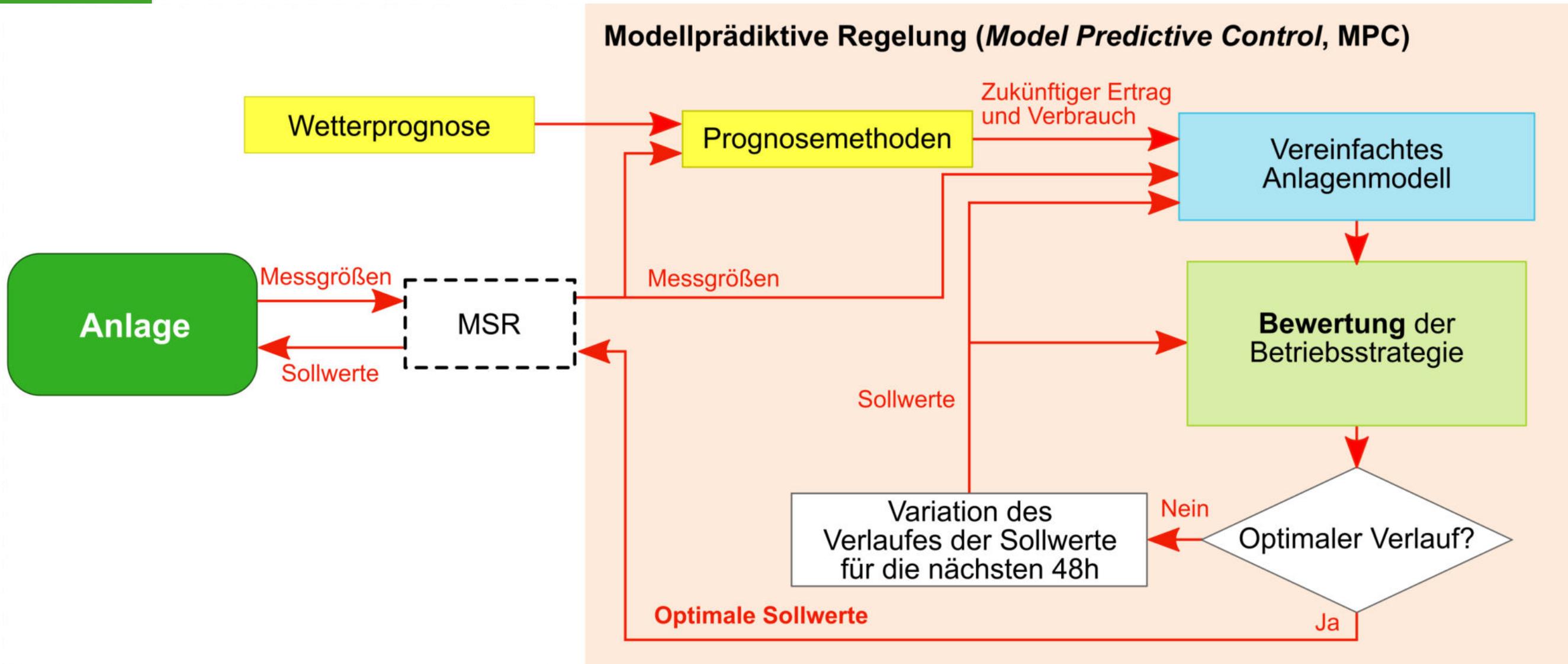
**Energiezentrale** optimiert Wärme- und Kälteerzeugung  
unter Berücksichtigung von Ertrag aus Erneuerbaren

**Zonenregler** stellen Komfort sicher  
und verschieben Lasten

Jede der drei Stufen muss  
vorausschauend agieren können



# Vorausschauende Regelung: MPC





# Fragestellungen

- Wie gelingt die **aktive Berücksichtigung** der thermischen Massen der Gebäude bei der Energieversorgung von **Stadtquartieren** und **welche Vorteile sind damit verbunden?**
  - funktionell
  - energetisch
  - ökologisch
  - ökonomisch

ÖKO-OPT-AKTIV, Kooperatives F&E Projekt, Stadt der Zukunft,  
Jänner 2020 - September 2022





# Partner

## Wissenschaftliche Partner



**BEST**  
Bioenergy and Sustainable Technologies

**AEE INTEC**

**TU Graz**

## Unternehmenspartner



**TB – STARCHEL**

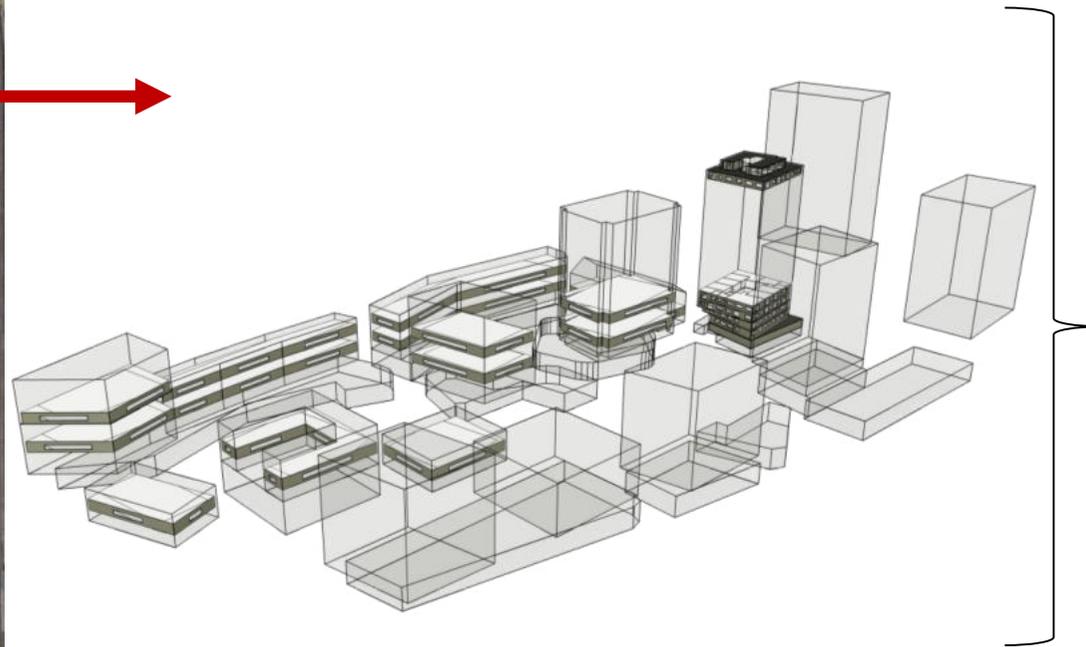
**iswat**  
Industriesoftware & Automatisierung

**PMC**  
projekt management creative

**SENTI**



# Untersuchungsobjekt



Wohnen  
45.200 m<sup>2</sup> BGF

Büro + Gewerbe  
20.191 m<sup>2</sup> BGF

Photovoltaik

Quartiere in Graz Reininghaus

Projekt RAHMENPLAN  
ENERGIE ENERGY CITY  
GRAZ-REININGHAUS

ÖKO-OPT-AKTIV Abschlussworkshop

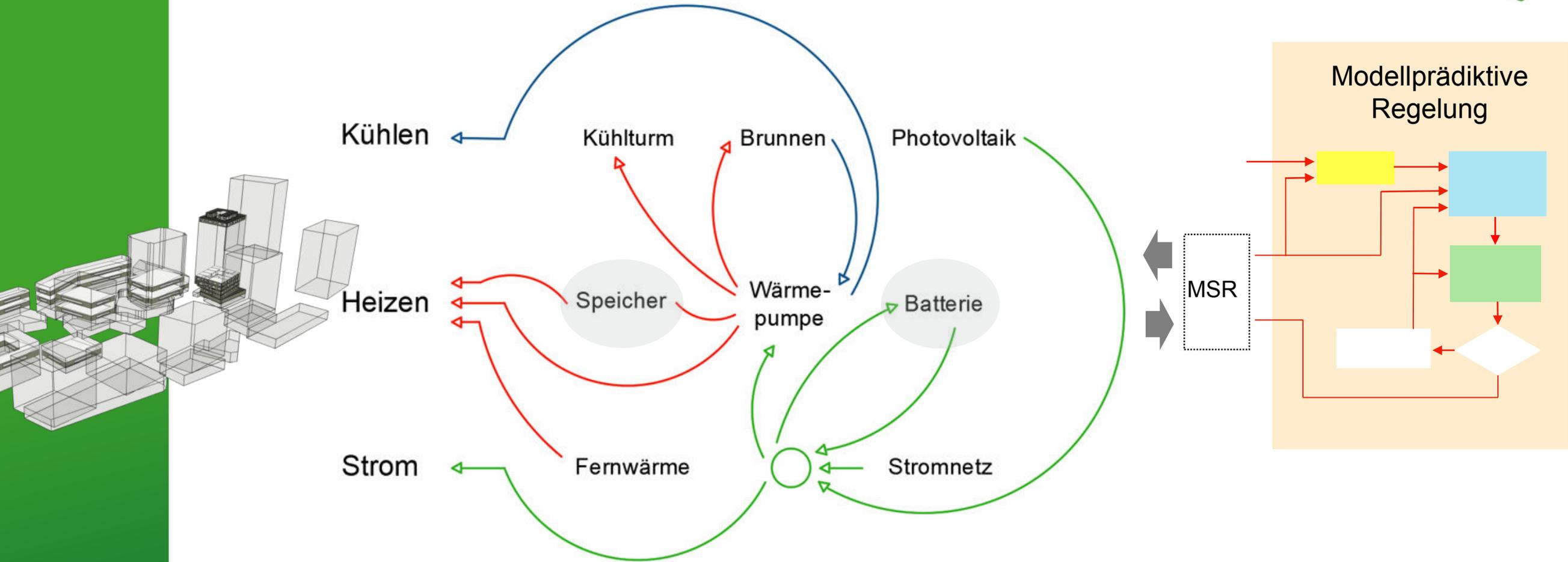
Quartier 1



Quelle: maps.google.at

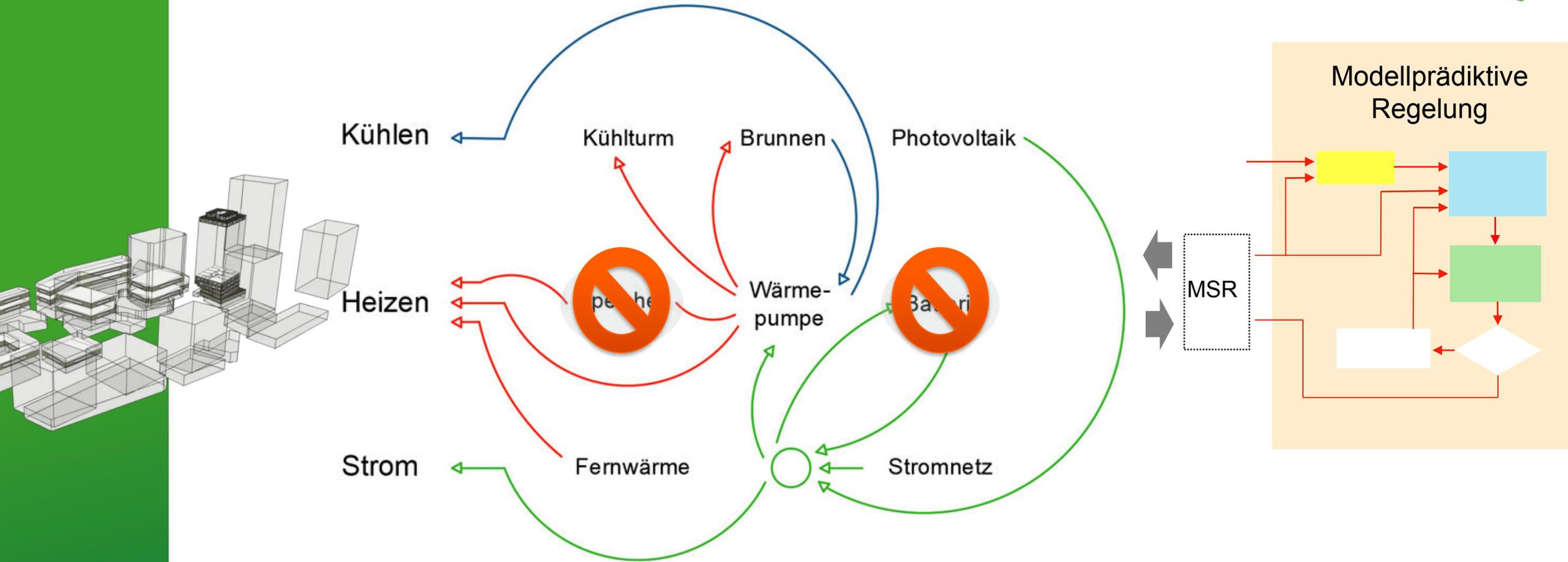


# Projektidee



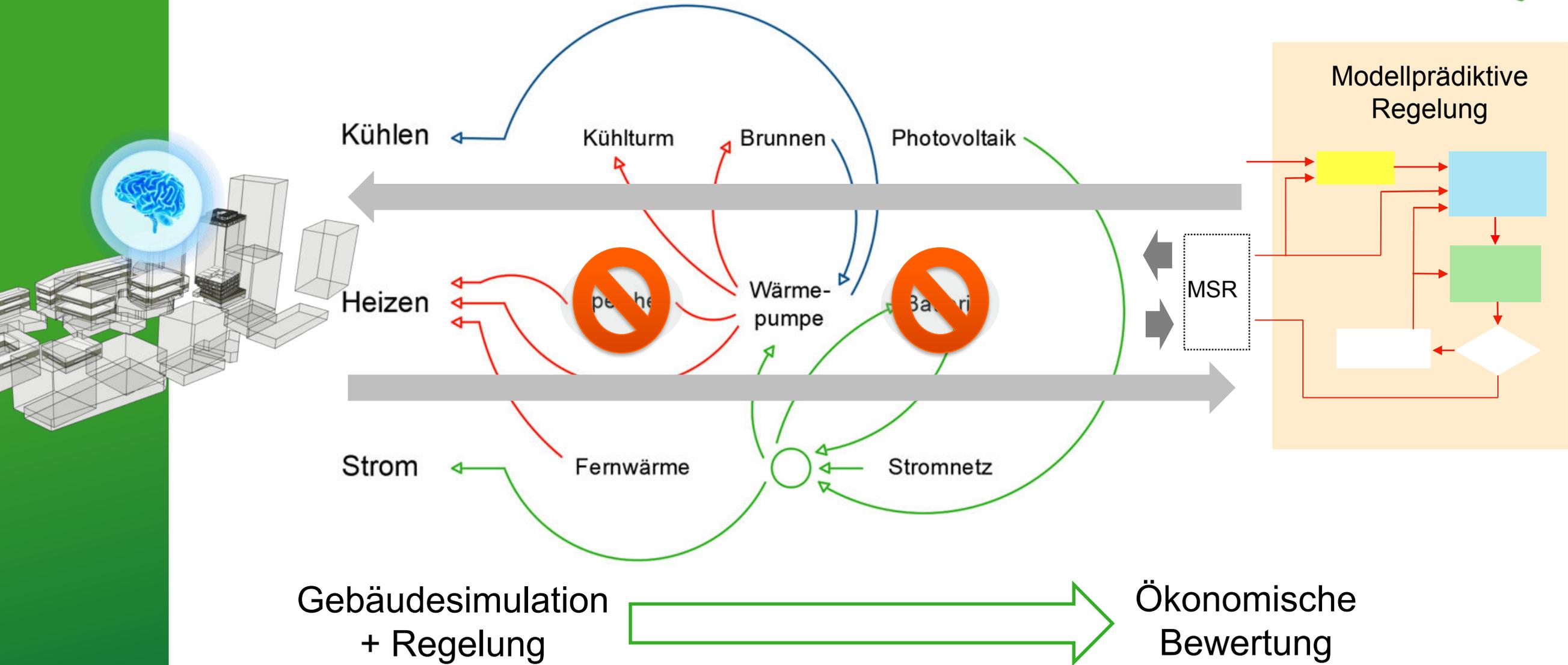


# Projektidee



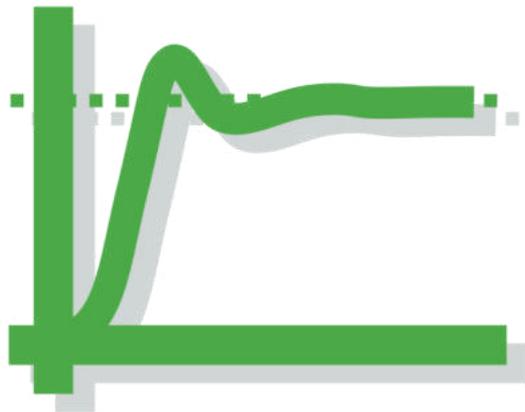


# Projektidee





# Entwickeltes Regelungskonzept



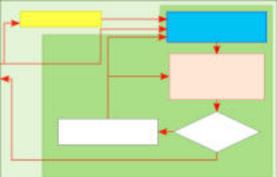
# Entwickeltes Regelungskonzept



**Übergeordnete Regelung**  
koordiniert Zonenregler  
mit Energiezentrale

**Energiezentrale** optimiert Wärme- und Kälteerzeugung  
unter Berücksichtigung von Ertrag aus Erneuerbaren

**Zonenregler** stellen Komfort sicher  
und verschieben Lasten



# Zonenregler

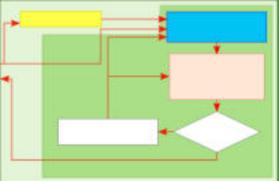
## Thermische Modelle für das EMS

- Vereinfachtes **Grey-box Modell** 3. Ordnung
  - $T_z$  ... Zone,  $T_{\text{wall}}$  ... Wände und  $T_{\text{floor}}$  ... Boden
- **Störungen**
  - $T_{\text{amb}}$  ... Außentemperatur
  - $I_g$  ... projizierte Solarstrahlungen (N/O/S/W)
  - $d$  ... Interne Lasten (Bewohner, PCs, Licht,...)
  - $T_h, T_c$  ... Vorlauftemp. Heizen und Kühlen
- **Stellgrößen**
  - $u_h$  und  $u_c$  ... Ventilstellungen
- Parameterschätzung mittels **Extended Kalman Filter**

$$\frac{dT_z}{dt} = k_{\text{wall},z}(T_{\text{wall}} - T_z) + k_{\text{floor},z}(T_{\text{floor}} - T_z) + k_{\text{sol}}^T I_g + d(t)$$

$$\frac{dT_{\text{wall}}}{dt} = k_{z,\text{floor}}(T_z - T_{\text{wall}}) + k_{\text{amb},\text{wall}}(T_{\text{amb}} - T_{\text{wall}})$$

$$\frac{dT_{\text{floor}}}{dt} = k_{z,\text{floor}}(T_z - T_{\text{floor}}) + k_h(T_h - T_{\text{floor}})u_h + k_c(T_c - T_{\text{floor}})u_c$$



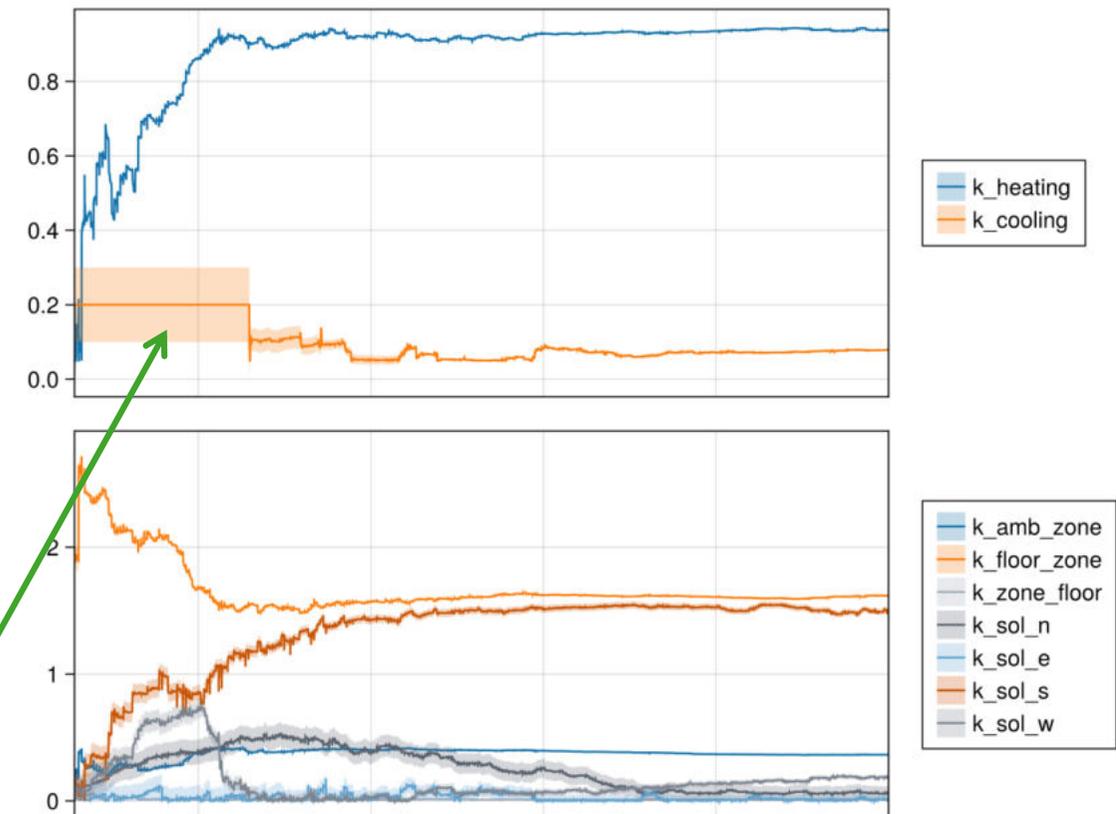
# Thermische Zonenmodelle

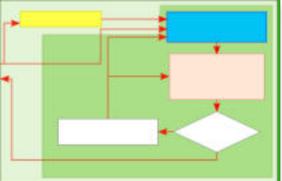
## Identifikation

- Schätzung der Parameter und Zustände des Modells mit Extended Kalman Filter
  - Geringer Rechenaufwand
  - Intuitive Parametrierung des Schätzers
  - Liefert **Schätzung** der **Unsicherheit** gleich mit

Unsicherheit in der Parameterschätzung

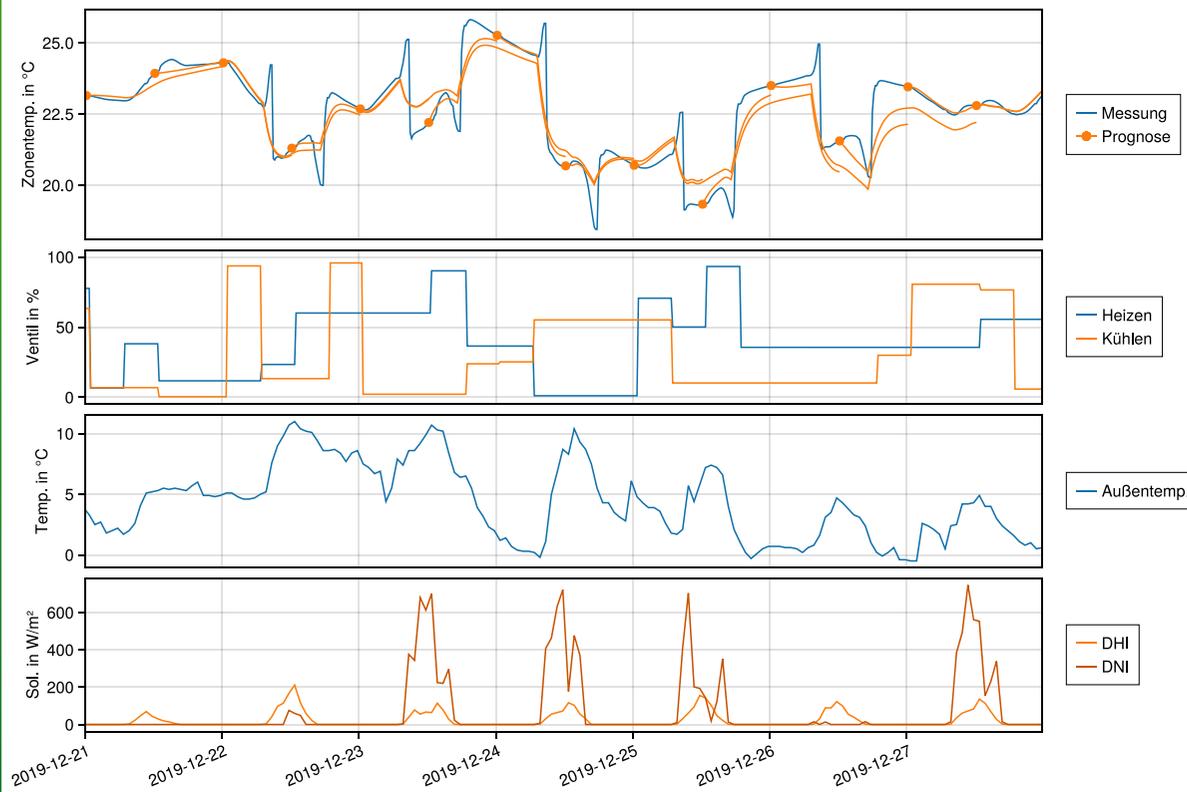
Beispielhafte Konvergenz der Parameterschätzung



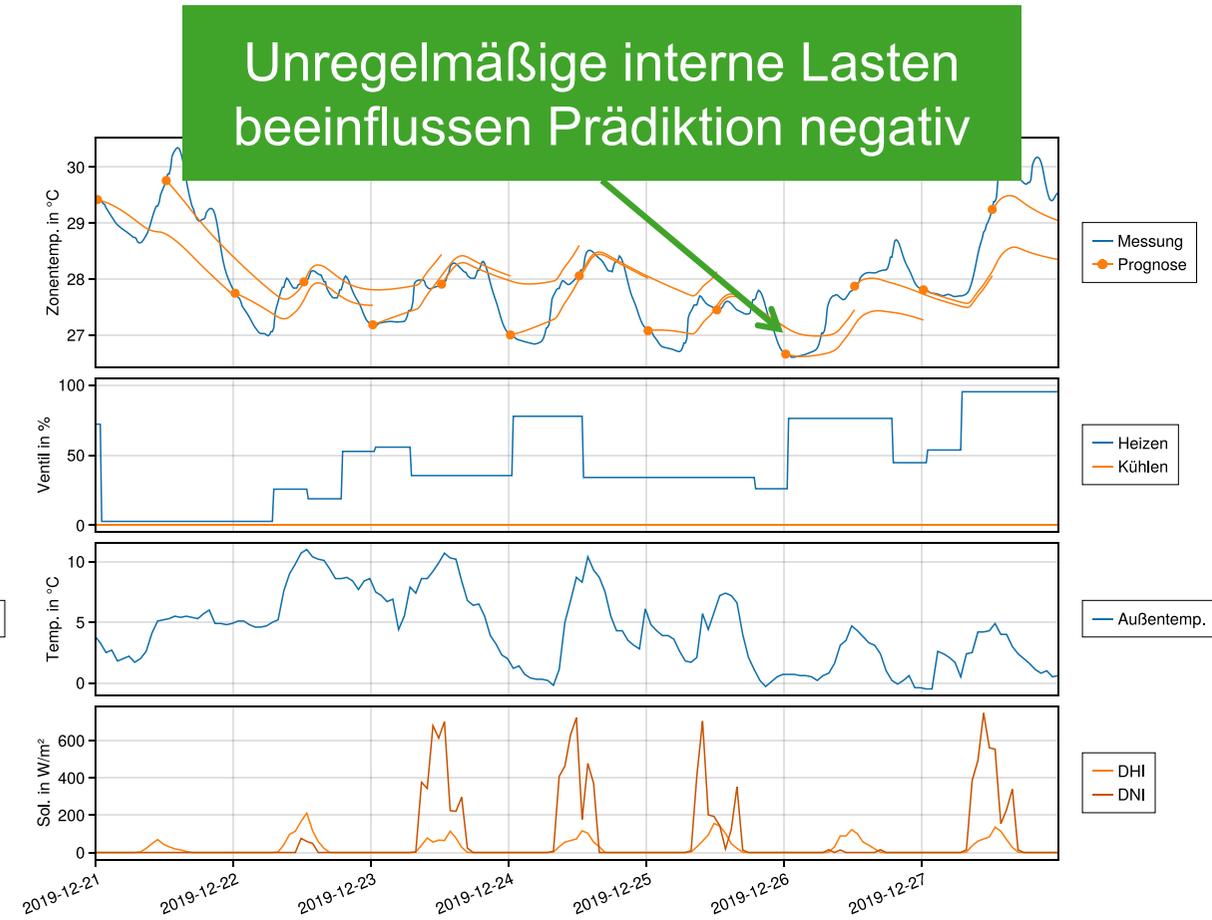


# Thermische Zonenmodelle

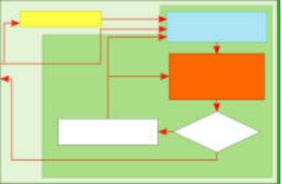
## Ergebnisse der Identifikation



**Büro**



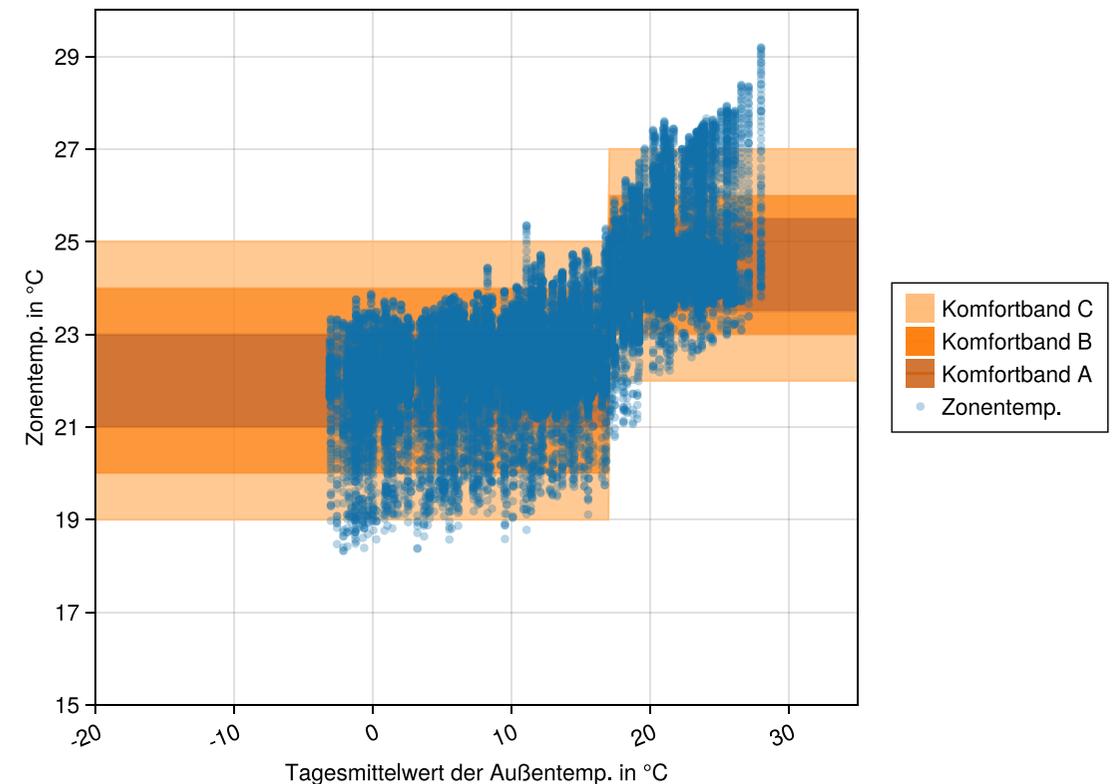
**Wohnung**



# Zonenregler

## Regelziel

- Zonentemperatur soll innerhalb der inneren Komfortbänder bleiben
  - Strafkosten bei Verletzung
  - **Freiraum für Lastverschiebung** (Vorheizen, Vorkühlen)
- Anreiz für Lastverschiebung muss „von außen“ kommen



# Entwickeltes Regelungskonzept



Übergeordnete Regelung  
koordiniert Zonenregler  
mit Energiezentrale

**Energiezentrale** optimiert Wärme- und Kälteerzeugung  
unter Berücksichtigung von Ertrag aus Erneuerbaren

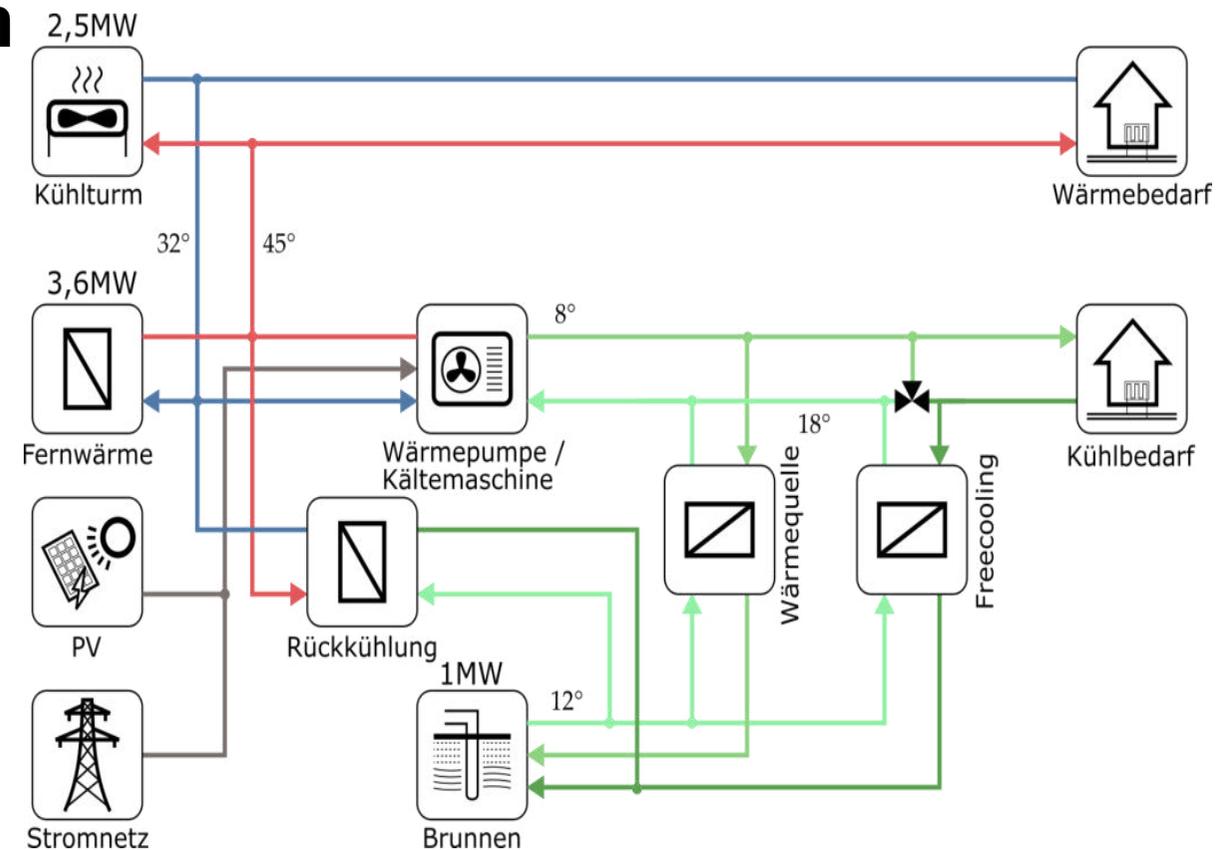
Zonenregler stellen Komfort sicher



# Energiezentrale

## Abbildung für EMS und Co-Simulation

- **Energiemanagementsystem (EMS)** koordiniert Einsatz der Erzeuger
  - Optimiert **Kosten**
  - Berücksichtigt **Vorhersagen**
  - Berücksichtigt **Betriebsbeschränkungen**



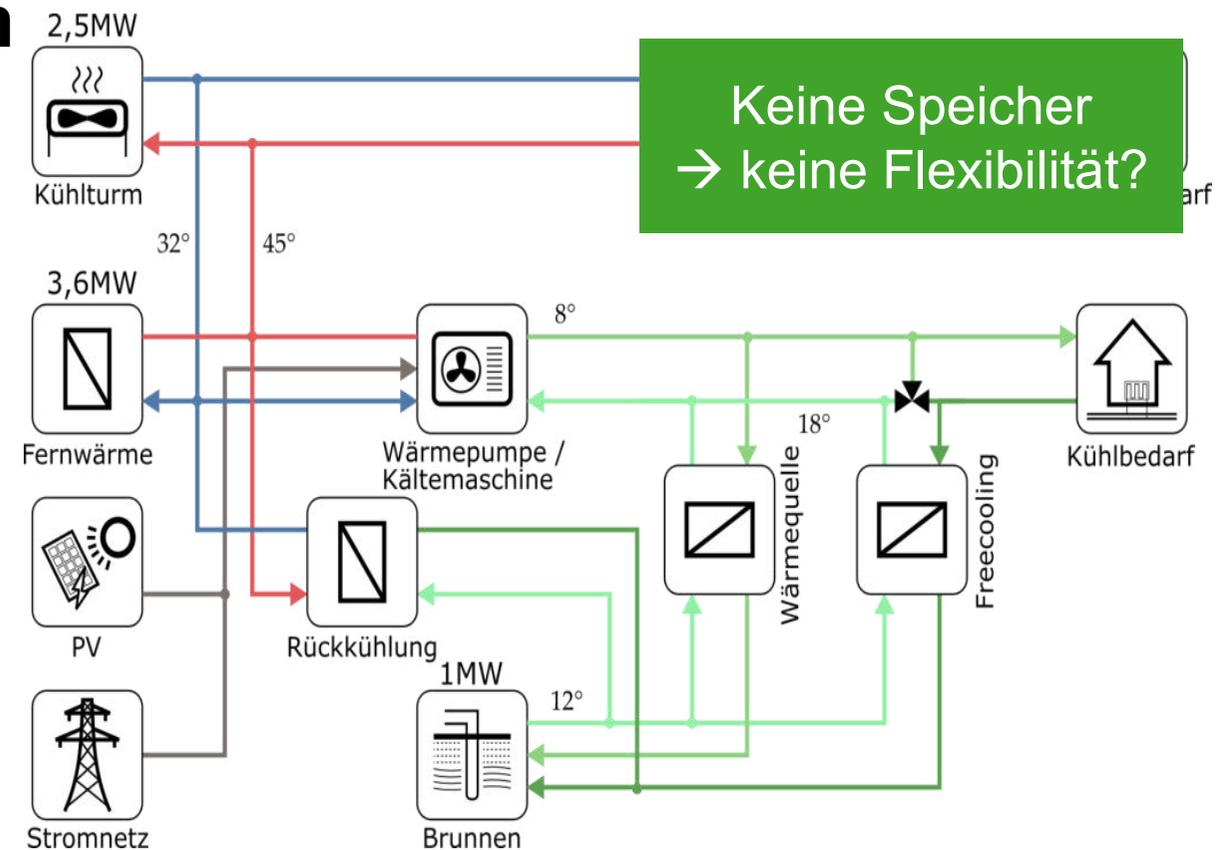


# Energiezentrale

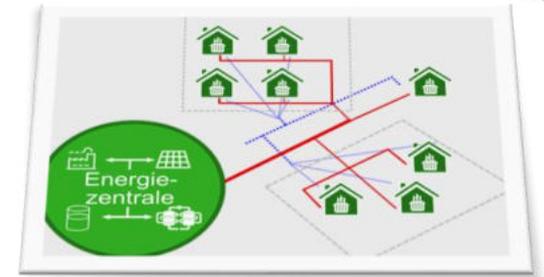
## Abbildung für EMS und Co-Simulation

### ■ Energiemanagementsystem (EMS) koordiniert Einsatz der Erzeuger

- Optimiert **Kosten**
- Berücksichtigt **Vorhersagen**
- Berücksichtigt **Betriebsbeschränkungen**



# Entwickeltes Regelungskonzept



**Übergeordnete Regelung**  
koordiniert Zonenregler  
mit Energiezentrale

**Energiezentrale** optimiert Wärme- und Kälteerzeugung  
unter Berücksichtigung von Ertrag aus Erneuerbaren

**Zonenregler** stellen Komfort sicher

# Übergeordnete Regelung



- Verknüpft die Energiezentrale und die einzelnen Zonen
- Beeinflusst Bedarf so, dass dieser von der Energiezentrale möglichst **kostengünstig** bereitgestellt werden kann
- Abwägung zwischen Kosten und Komfort

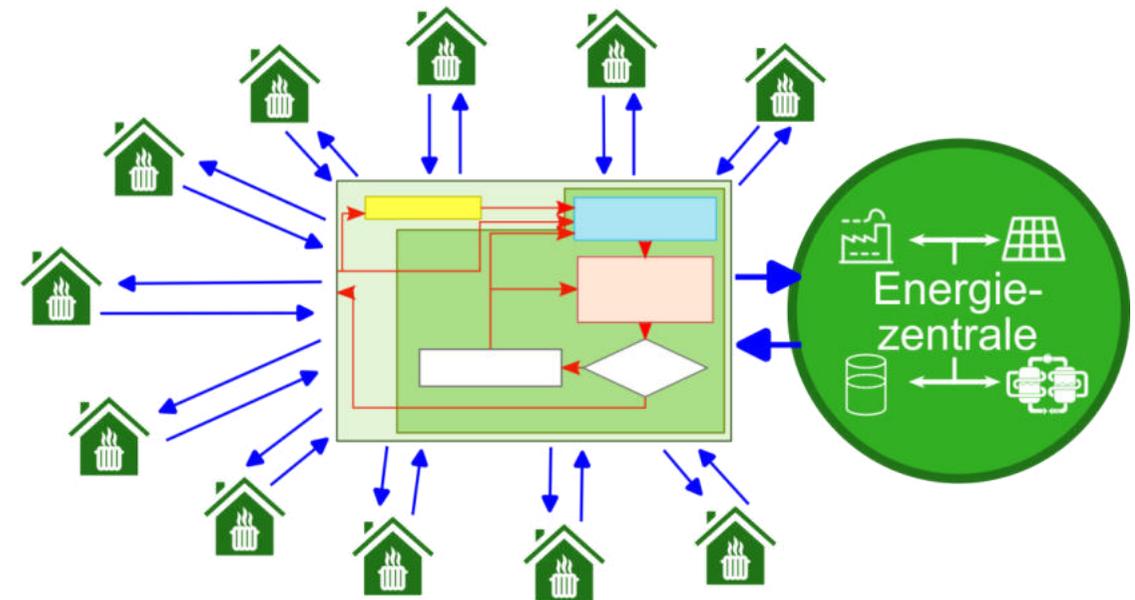




# Übergeordnete Regelung

## Mögliche Umsetzungen – Zentrale Optimierung

- Ein **zentrales EMS** für das gesamte Quartier
  - Minimiert Kosten und stellt Komfort sicher
- **Nachteile**
  - Hoher **Kommunikationsaufwand**
  - **Datenschutzbedenken:** Zentrale muss alles wissen
- **Vorteile**
  - Einfacher zu formulieren
  - Nur eine intelligente Steuerung nötig





# Übergeordnete Regelung

## Mögliche Umsetzungen – Verteilte Optimierung

### ■ Mehrere EMS

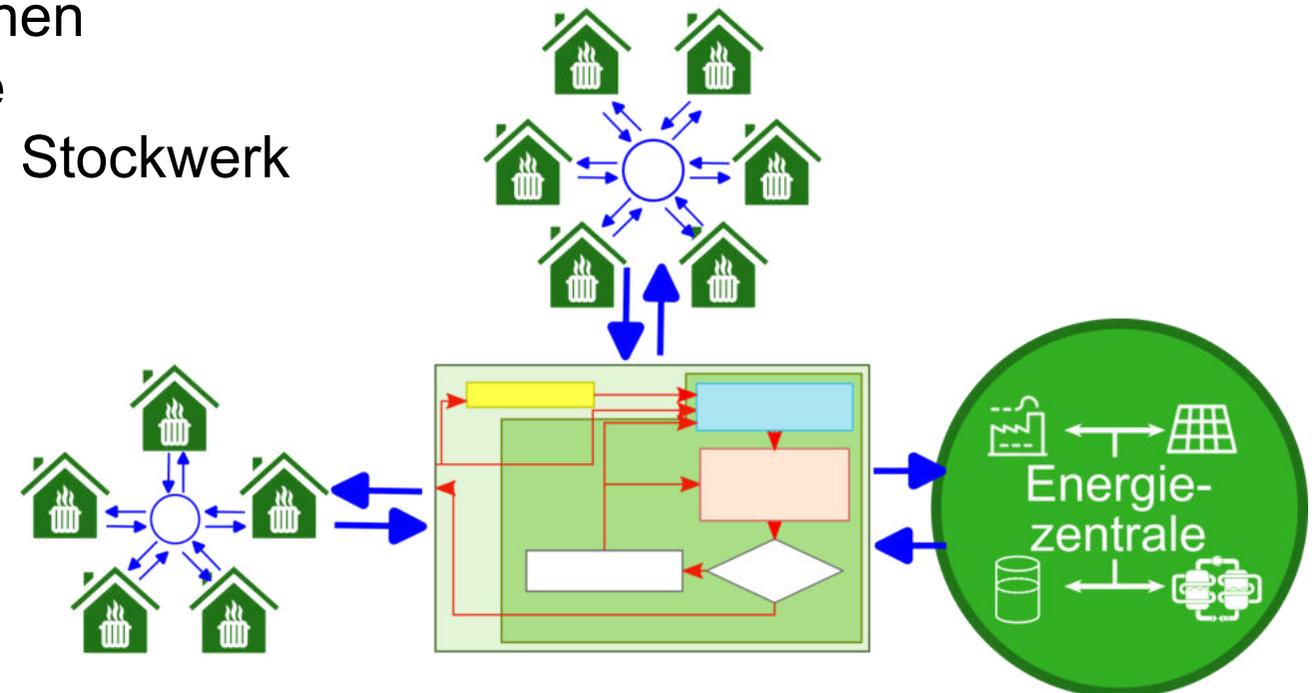
- koordinieren sich gegenseitig um ein **gemeinsames Ziel** zu erreichen
- Ein EMS für **Energiezentrale**
- Ein EMS für **jedes Gebäude**, Stockwerk oder Wohnung

### ■ Nachteile

- Verteilte Recheneinheiten
- Einheitliches **Protokoll** nötig

### ■ Vorteile

- Skalierbarkeit
- **Anonymität**
- Kein Single Point-of-Failure





# Bewertungsmethode

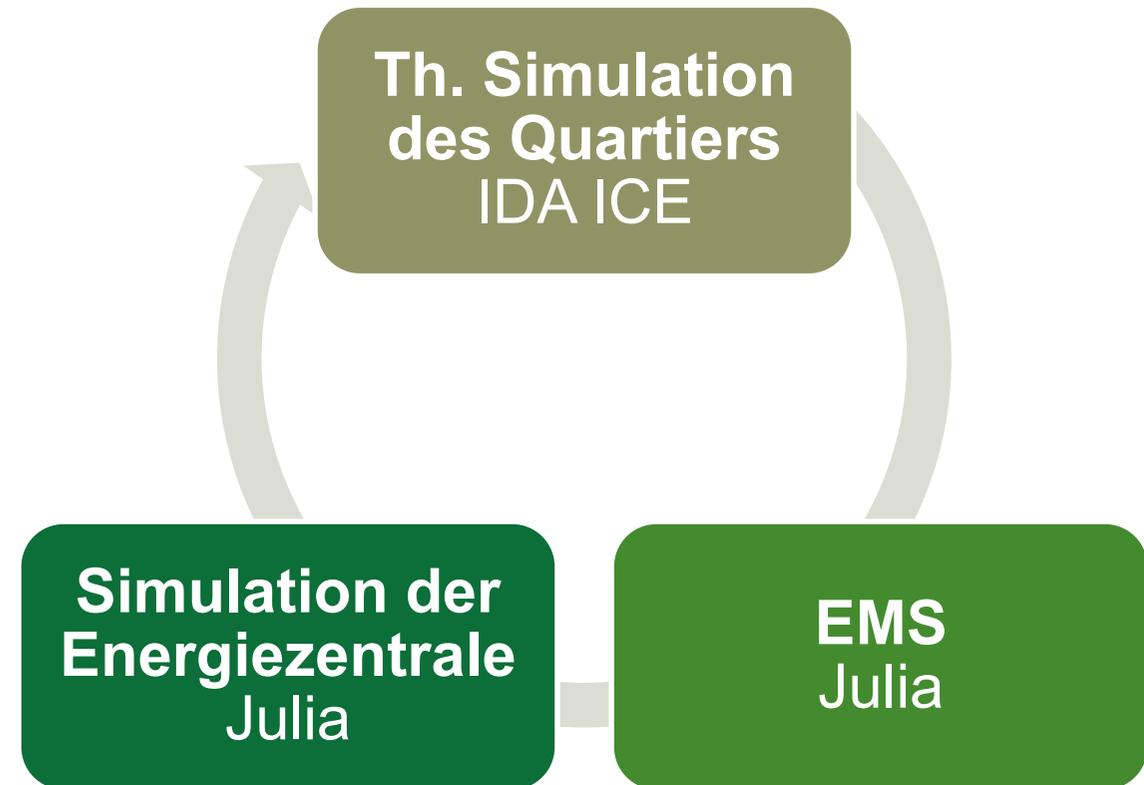




# Bewertung der vorrausschauenden Regelung

## Co-Simulation

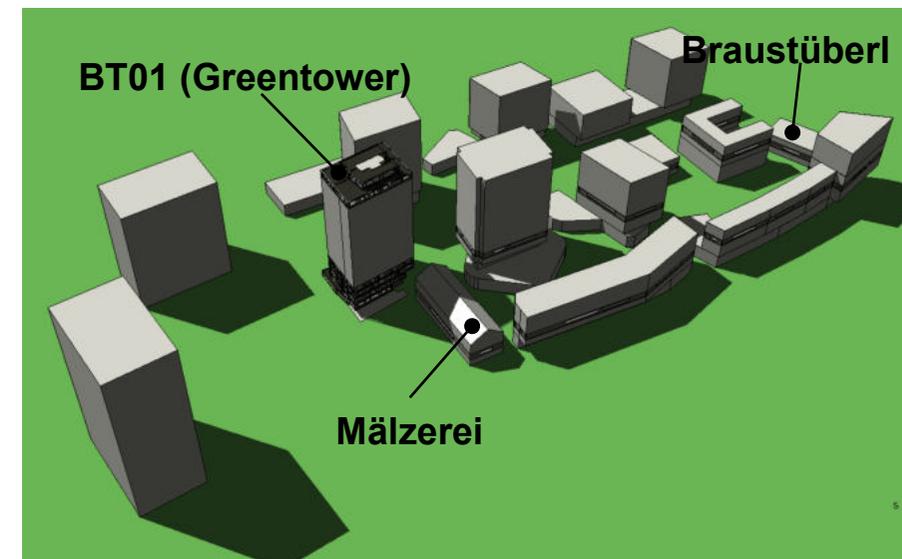
- Die Ergebnisse sind das Resultat einer Co-Simulation
  - **thermische Simulation** des Stadtquartiers
  - **modellprädiktive Regelung** Energiemanagementsystem (EMS)
  - **vereinfachte Simulation** der Energiezentrale





# Gebäude- und Anlagensimulation

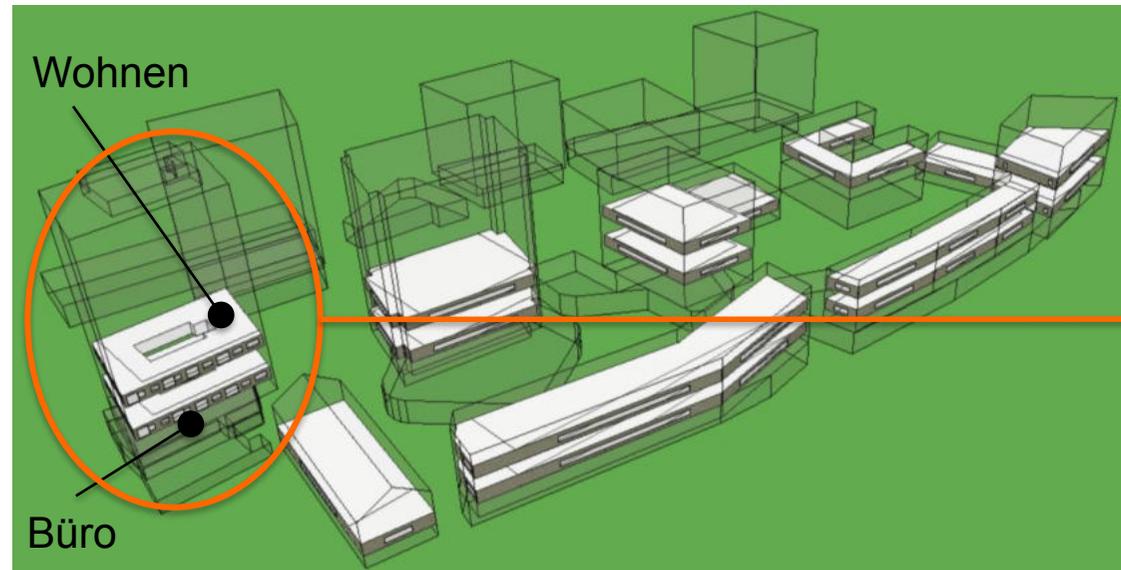
- Abbildung in der Simulationssoftware **IDA ICE** der Firma EQUA (realitätsnahes virtuelles Testobjekt)
- Geplantes Quartier 1 der Reininghausgründe (10 Gebäude)
- Unterscheidung in der Modellierung: Wohnen, Büro und Gewerbe
- Modellvarianten mit **unterschiedlichem Detailgrad**
  - Möglichkeit zur Betrachtung einzelner Räume, Wohnungen, Geschosse, Gebäude bis hin zum gesamten Quartier



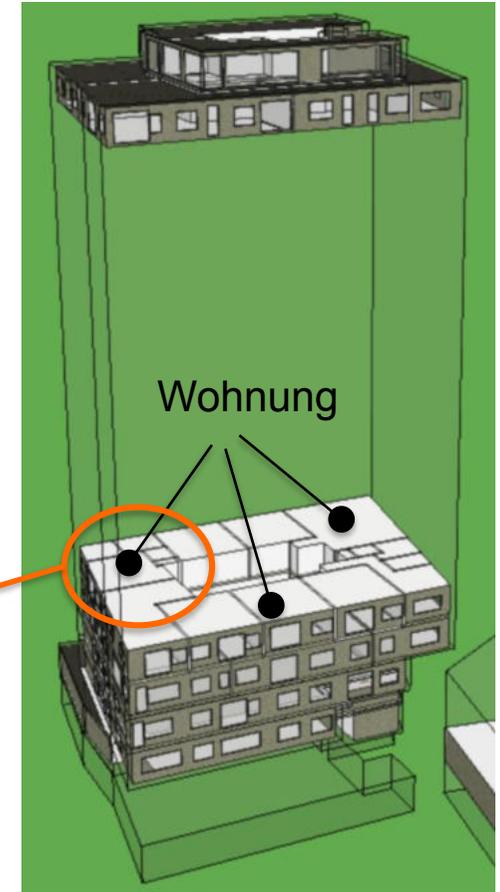
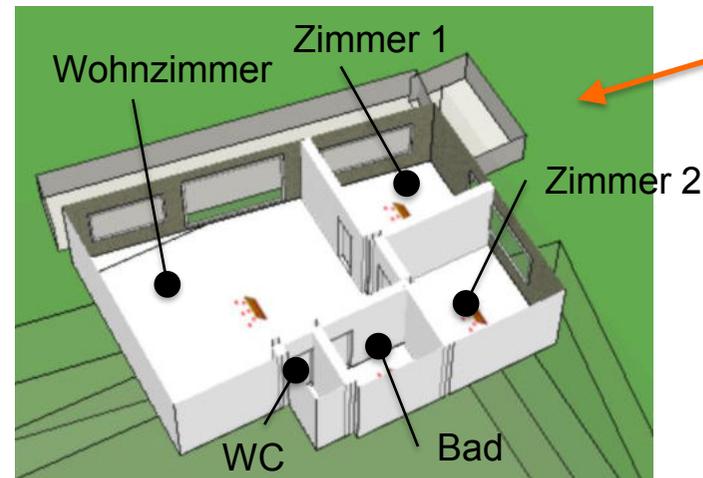
# Gebäudemodelle unterschiedlicher Detailgrade



**Quartier**  
repräsentative Zonen  
Zonenmultiplikator  
16 Zonen



**Wohnung**  
(2 Wohnungen im Greentower)  
eine Zone je Innenraum



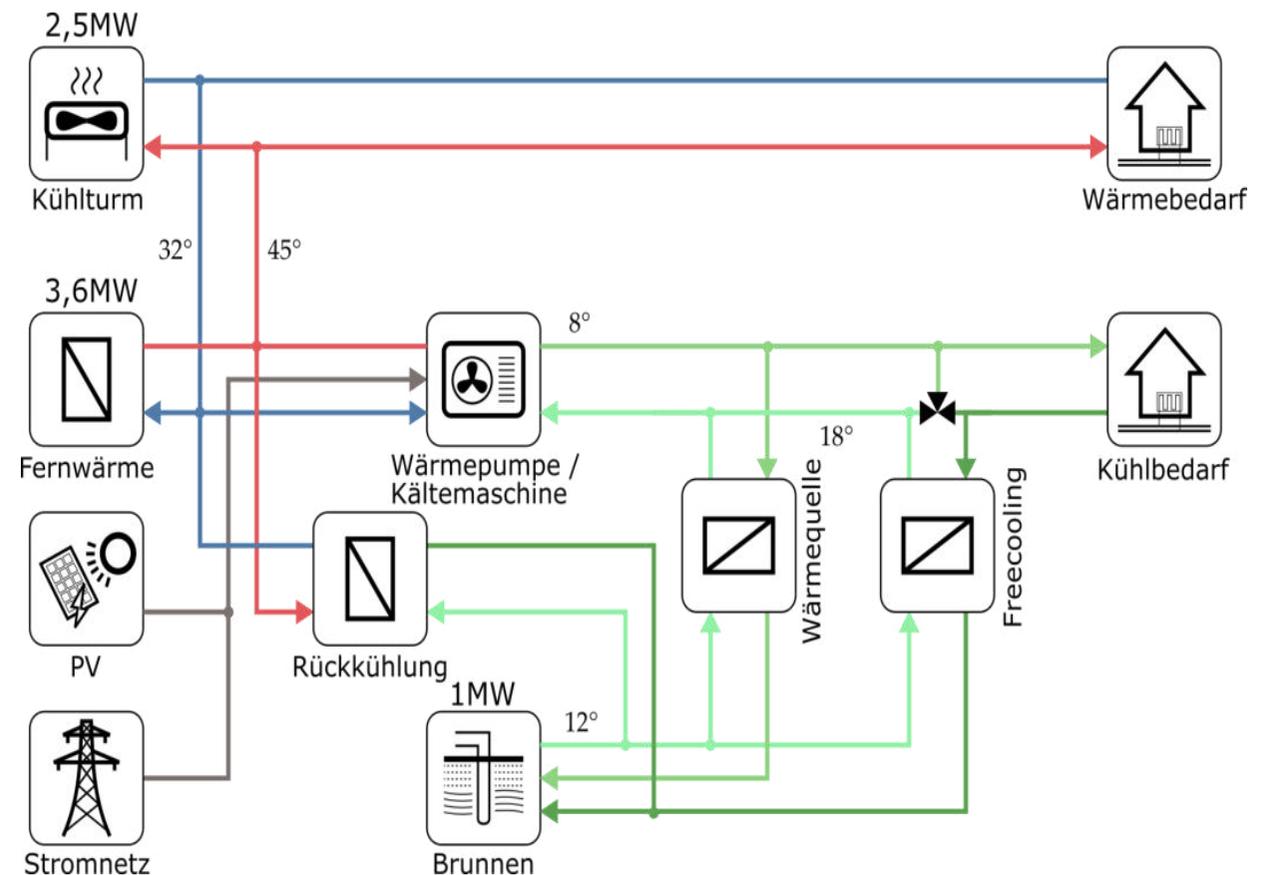
**Gebäude**  
(Greentower)  
eine Zone je Wohnung  
51 Zonen



# Energiezentrale

## Konkrete Parameter

- **Wärmepumpe**
  - COP: 5.22
- **Tarife (Stand 2019)**
  - Stromimport: 7,2 ct/kWh
  - Stromexport: 4,7 ct/kWh
  - Fernwärme: 7,5 ct/kWh
  - Kühlturm: 1 ct/kWh
- **PV-Leistung**
  - 1000 kWp

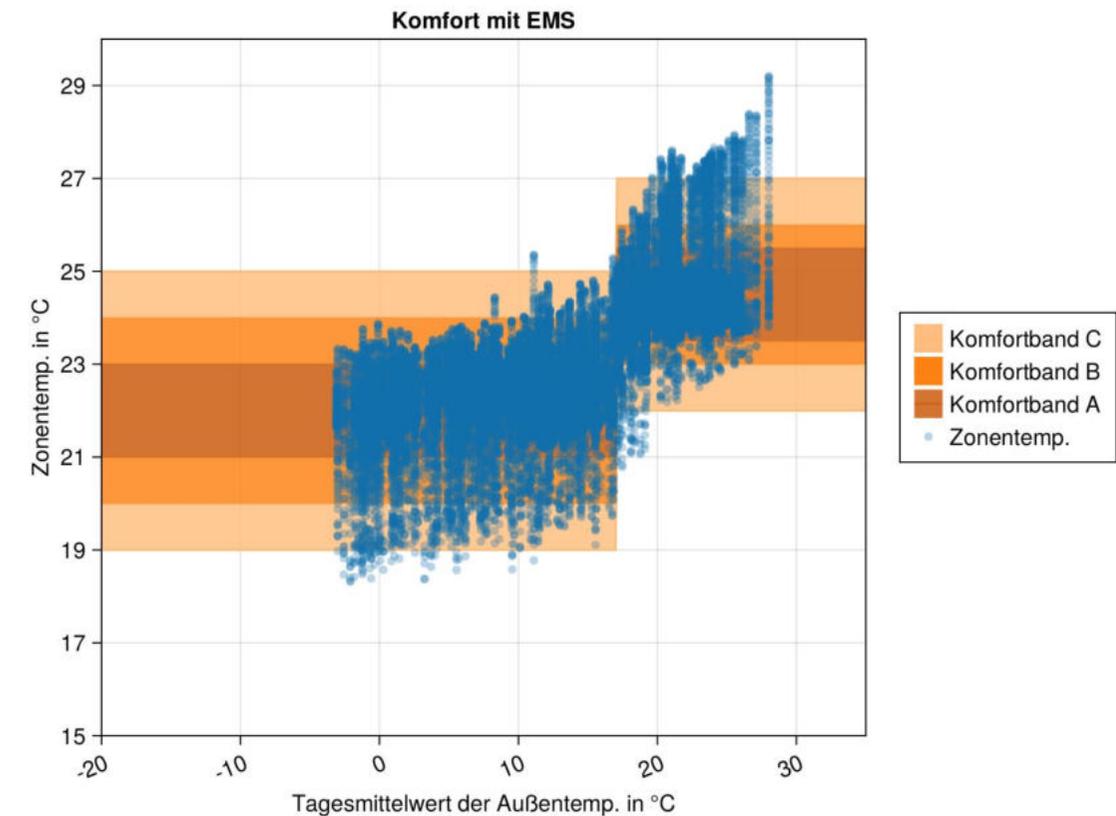




# Bewertung der vorrausschauenden Regelung

## Komfort und Kosten

- Anhand mehreren **Szenarien**
  - **Jahressimulation**
  - **Lastverschiebung**
  - Ausfall im Sinne einer **Wartung**
- Bewertung der **Kosten**
- Bewertung des **Komfort** nach ISO7730





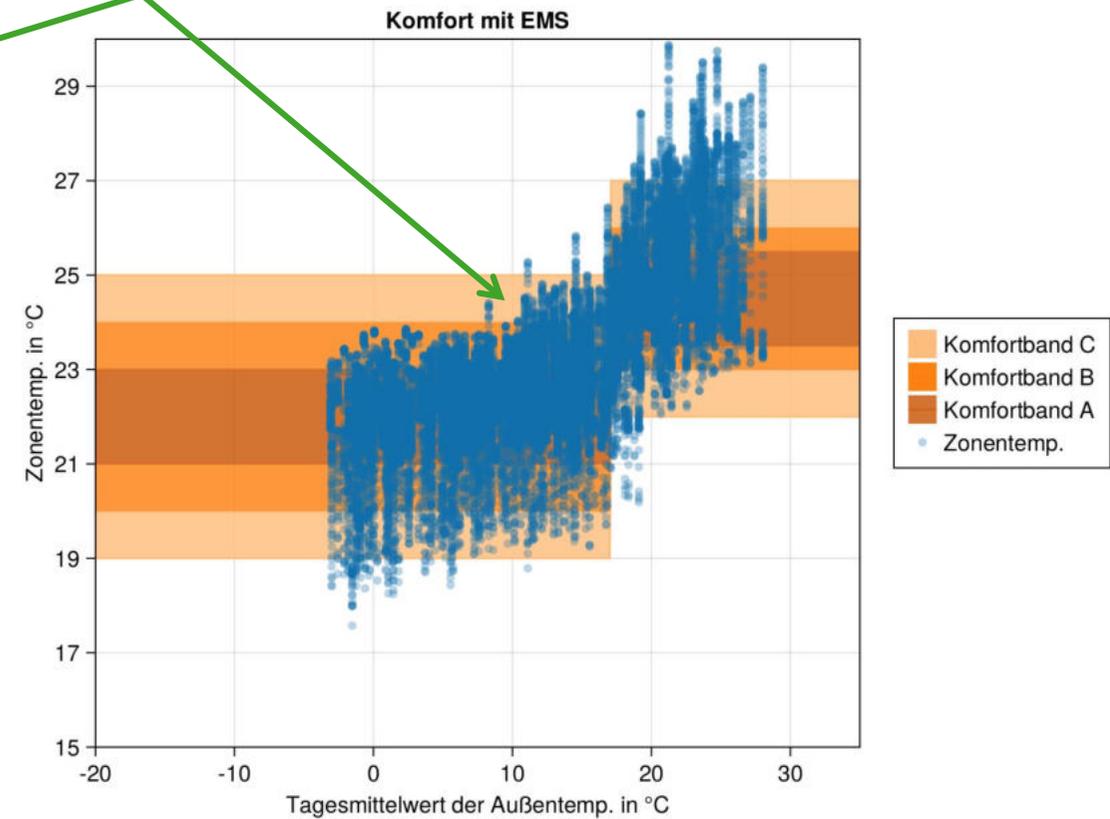
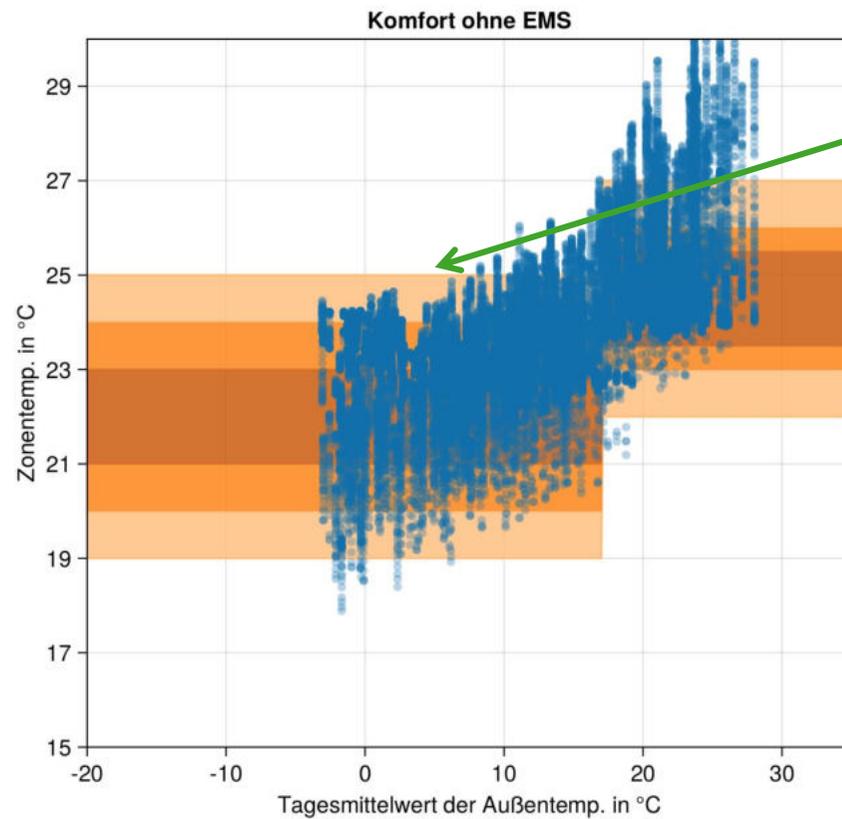
# Ergebnisse





# Jahressimulation Komfort nach ISO7730

Komfort wird von der Standardregelung und vom EMS sehr gut eingehalten

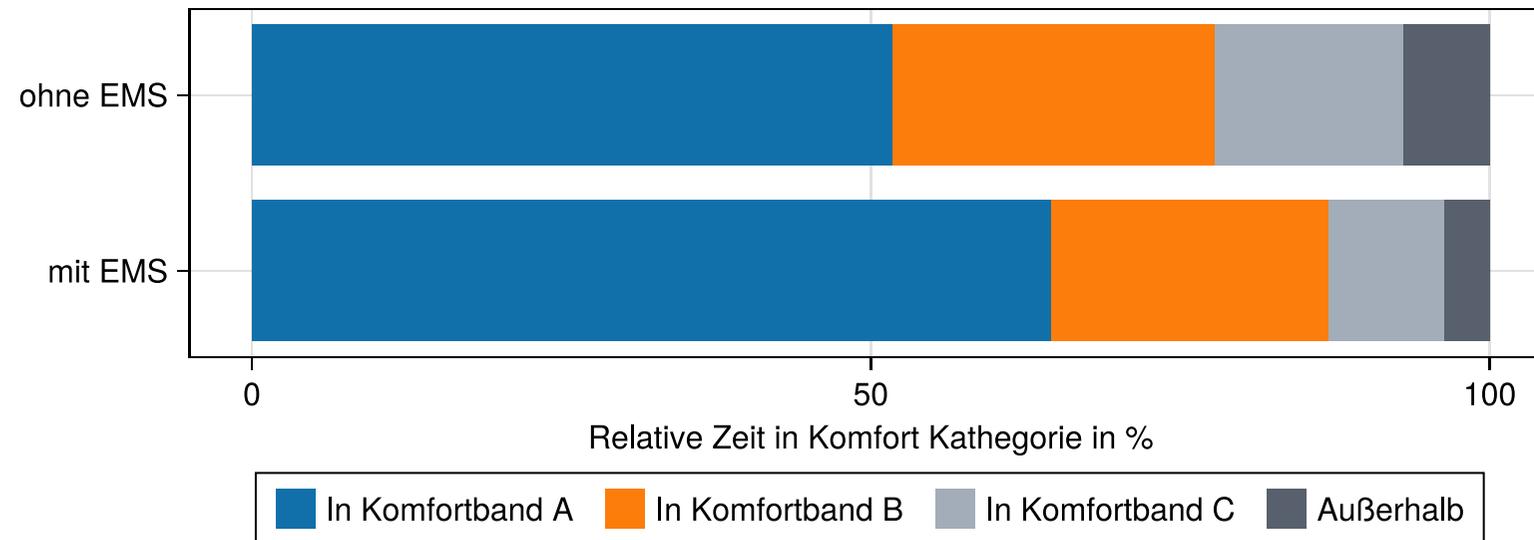




# Jahressimulation

## Komfort nach ISO7730

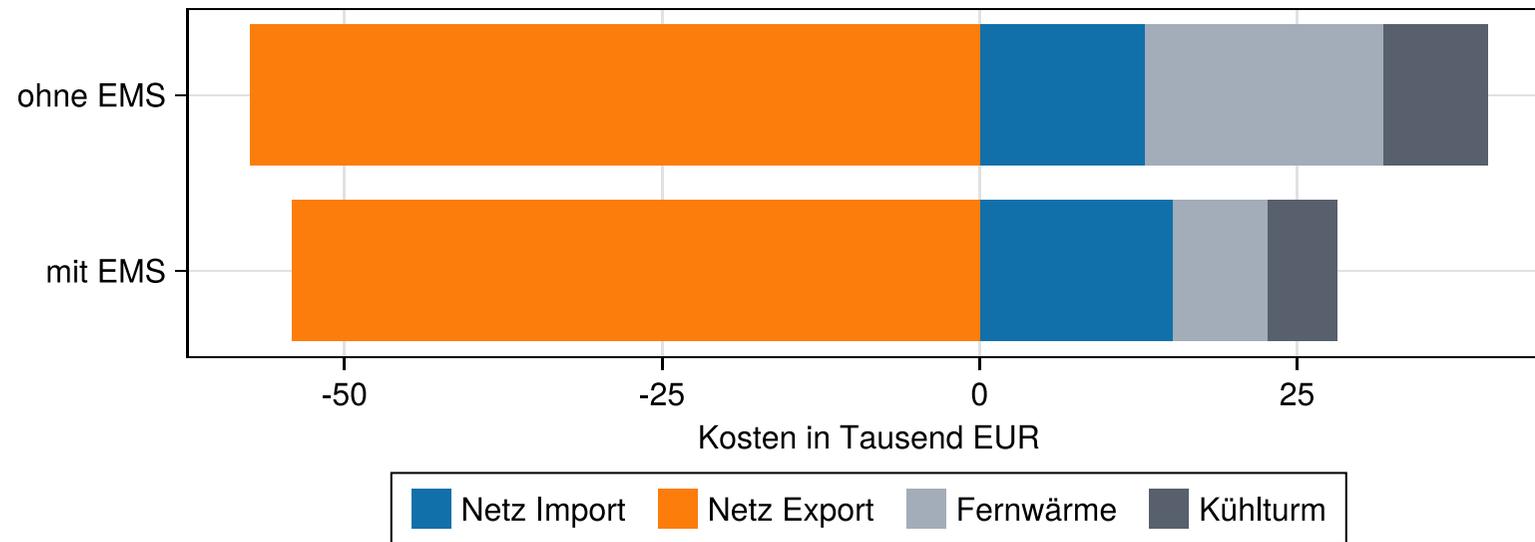
EMS erhöht Komfort





# Jahressimulation Kosten

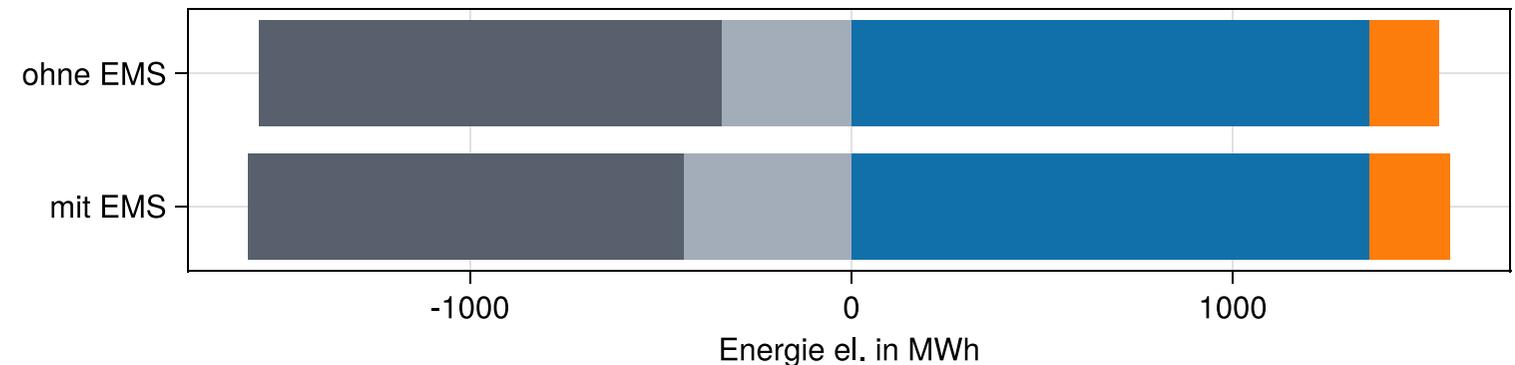
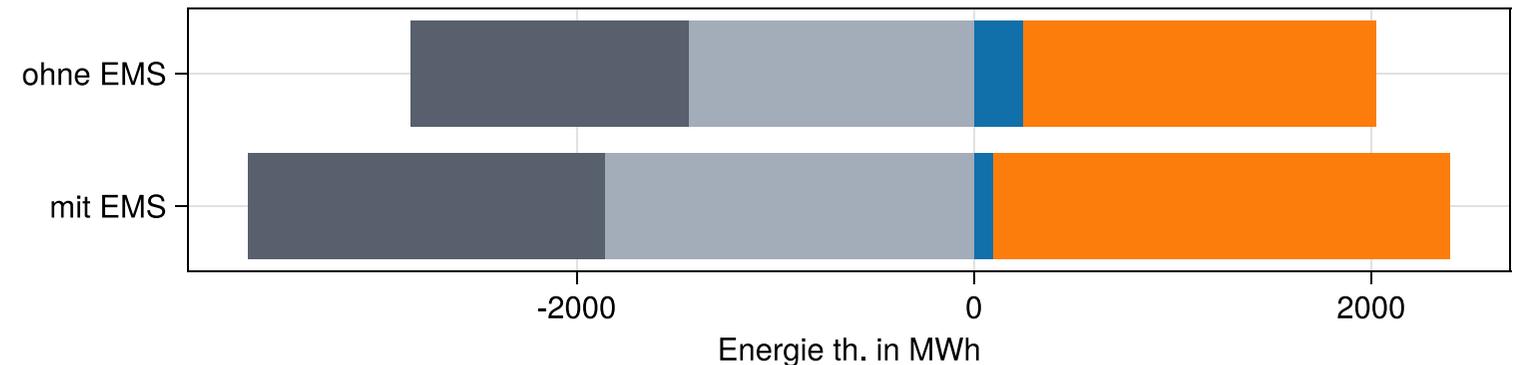
EMS verringert Kosten  
durch geringeren Fernwärmeanteil  
und höheren Eigenverbrauch an PV-Strom



# Jahressimulation Energie



EMS nutzt PV-Ertrag effektiver,  
bei höherem Energieaufwand →  
verbesserter Komfort

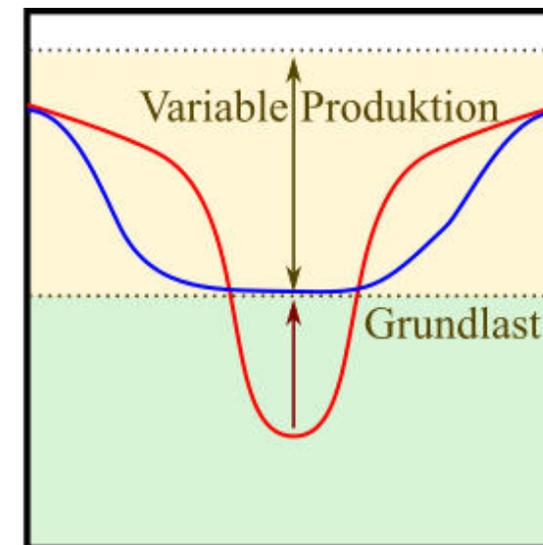
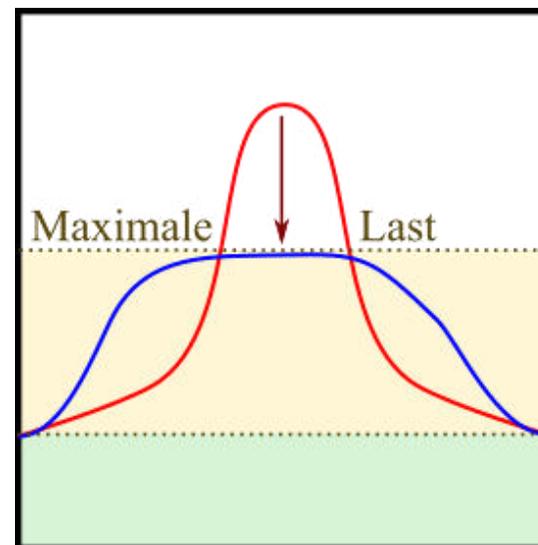




# Lastverschiebepotential

## Definition des Szenarios

- Die Nutzung der Massen erlaubt eine **Reduktion der Lastspitzen**
  - Mehr Anschlüsse bei gleicher Versorgungsleistung
  - Erhöhung des Eigenverbrauchs von PV-Strom
- Kann das EMS die Gesamtlast des Gebäudes **unter Beibehaltung des Komforts** vorteilhaft verschieben?





# Lastverschiebepotential

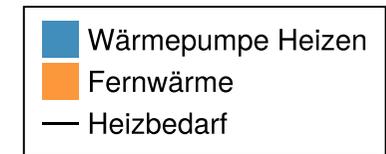
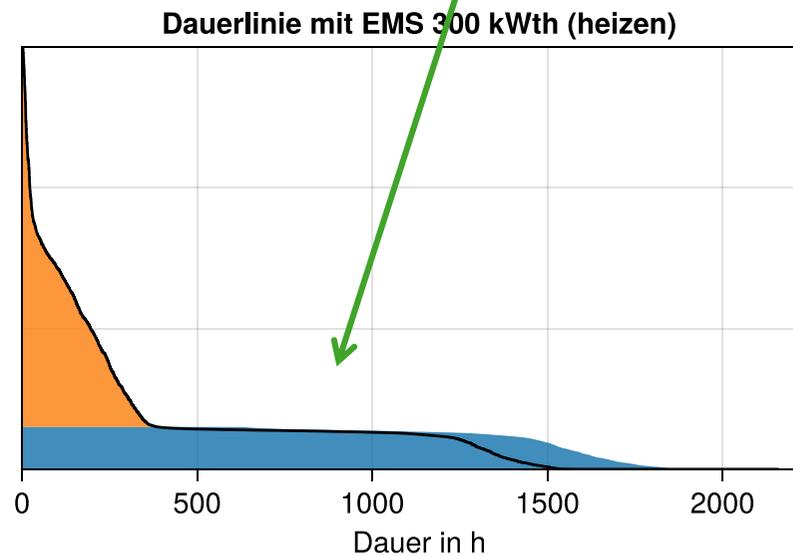
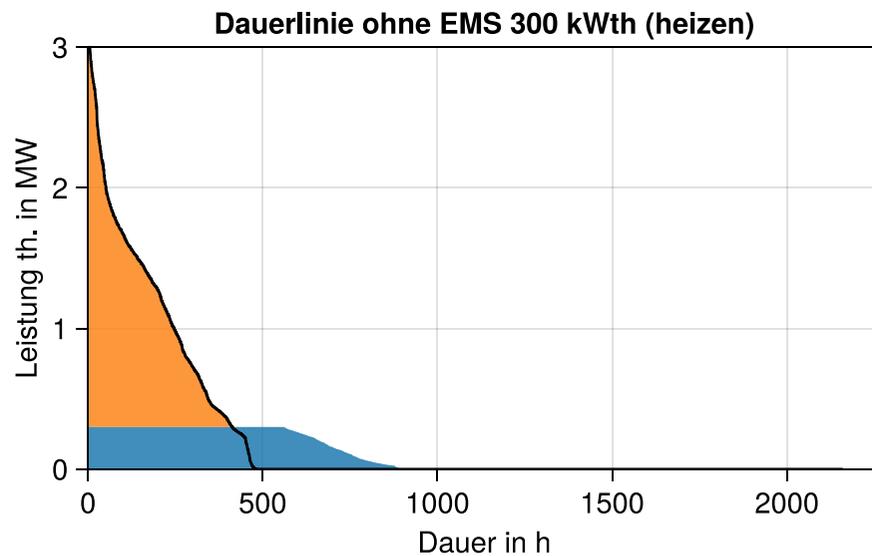
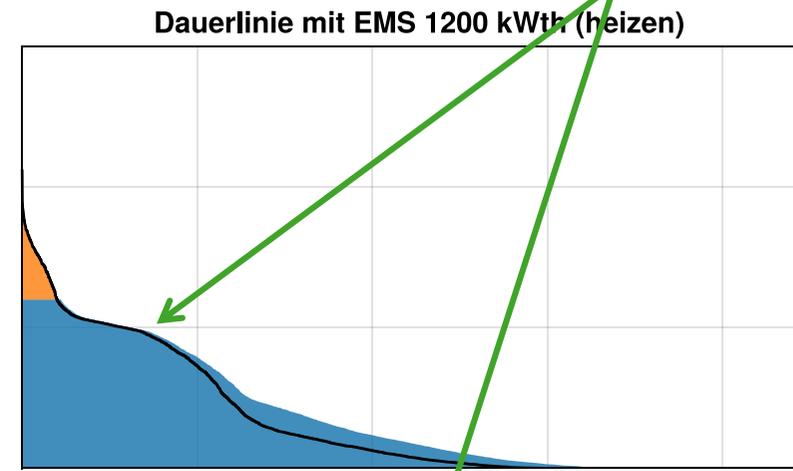
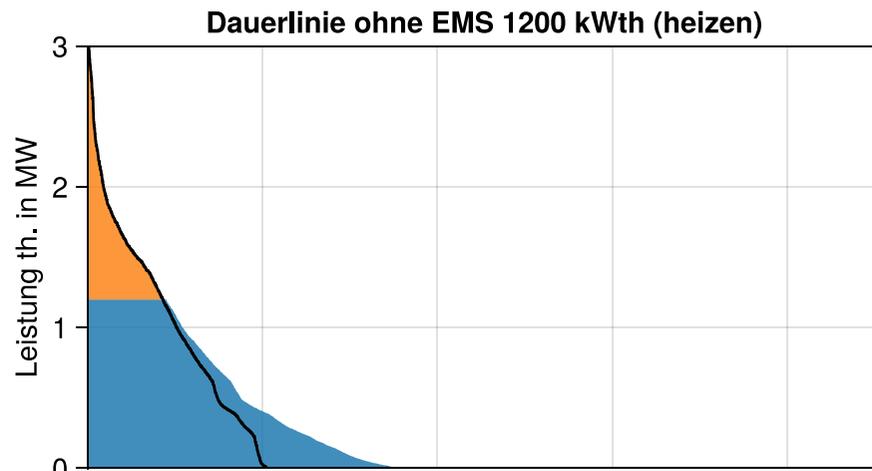
## Idee

- Hinzufügen von Verbrauchern: Aufwändig in Simulation
- Stattdessen: **Schrittweise Absenkung der maximalen Erzeugerleistung der Wärmepumpe**
  - Solange Lastspitzen verschoben werden können, bleiben Kosten und Komfort konstant
- Zeiträume:
  - **Heizperiode:** 01.01. – 31.03.
  - **Kühlperiode:** 01.06. – 31.08.



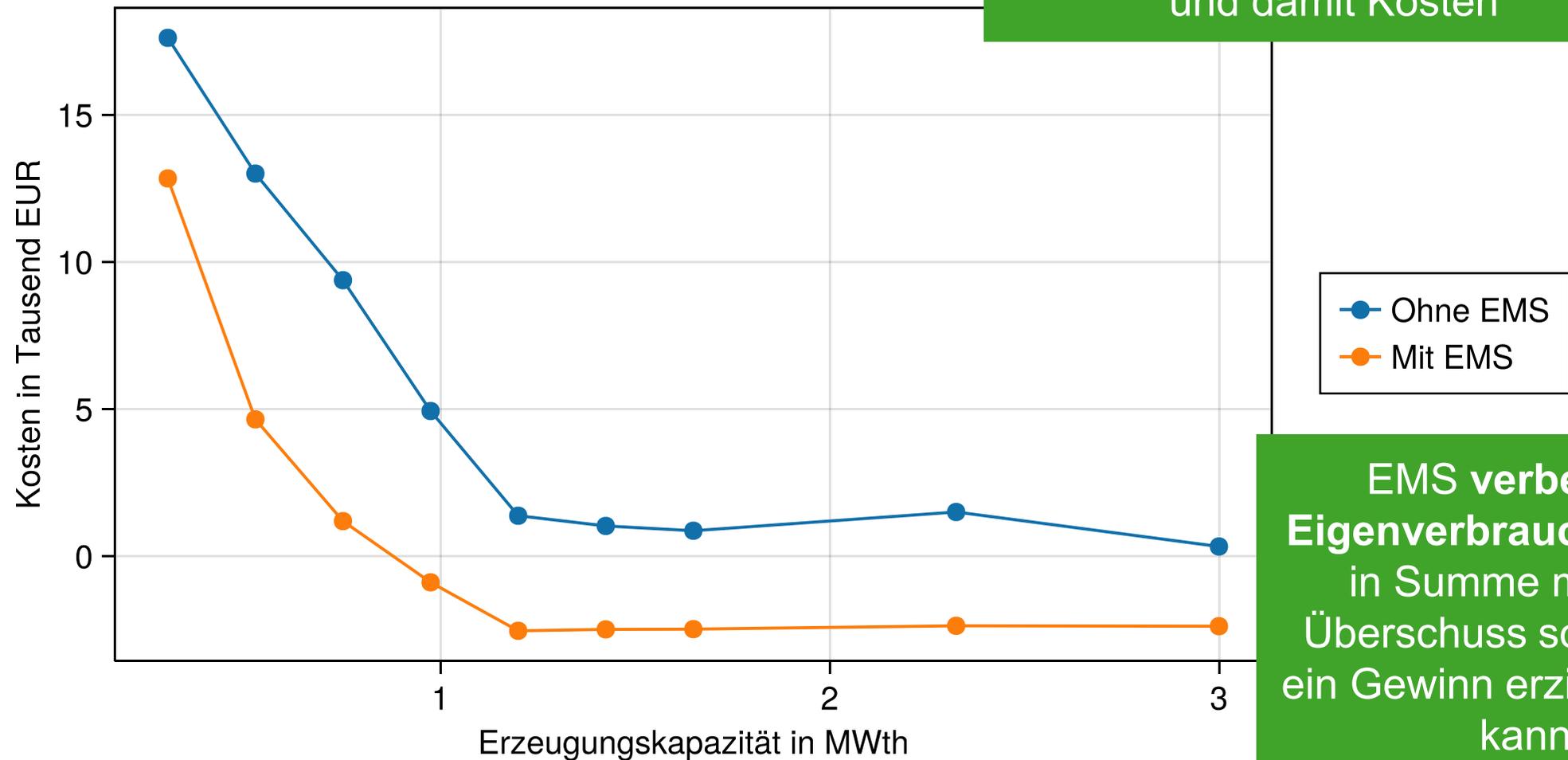
# Lastverschiebepotential Heizperiode - Dauerlinie

EMS formt Bedarf und passt ihn  
an Erzeugungskapazität an





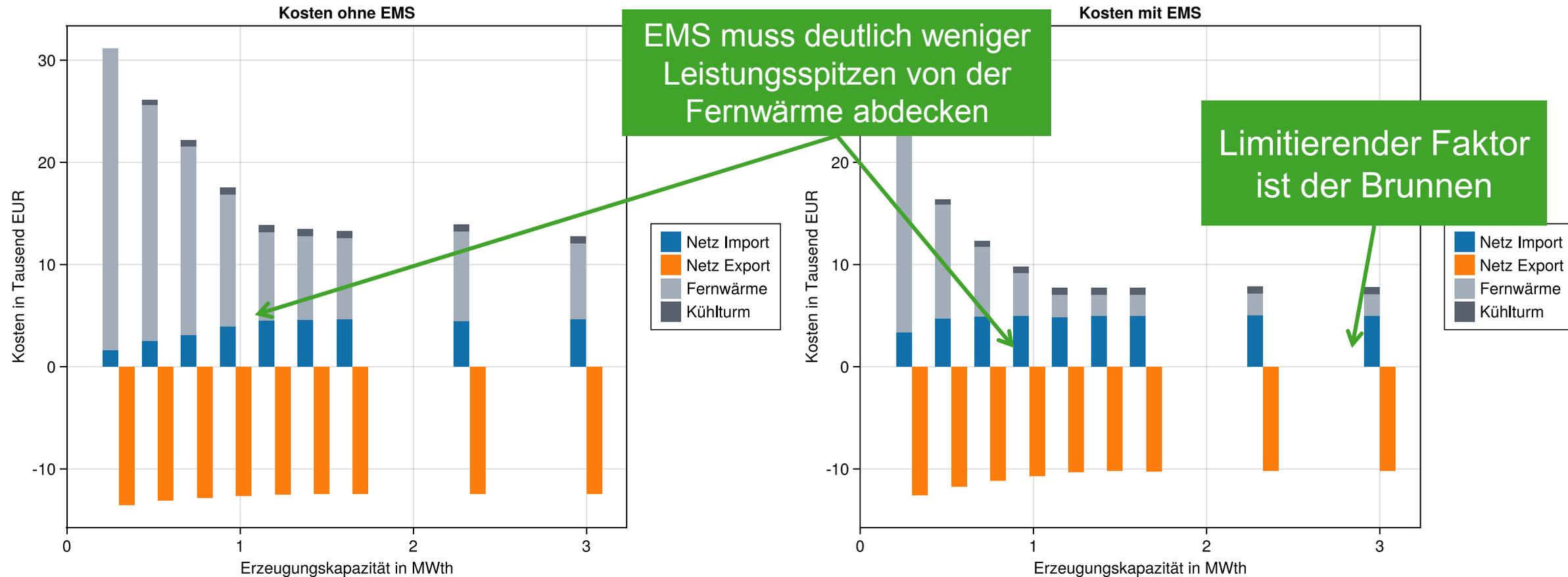
# Lastverschiebepotential Heizperiode - Kosten





# Lastverschiebepotential

## Heizperiode - Detaillierter Vergleich der Kosten



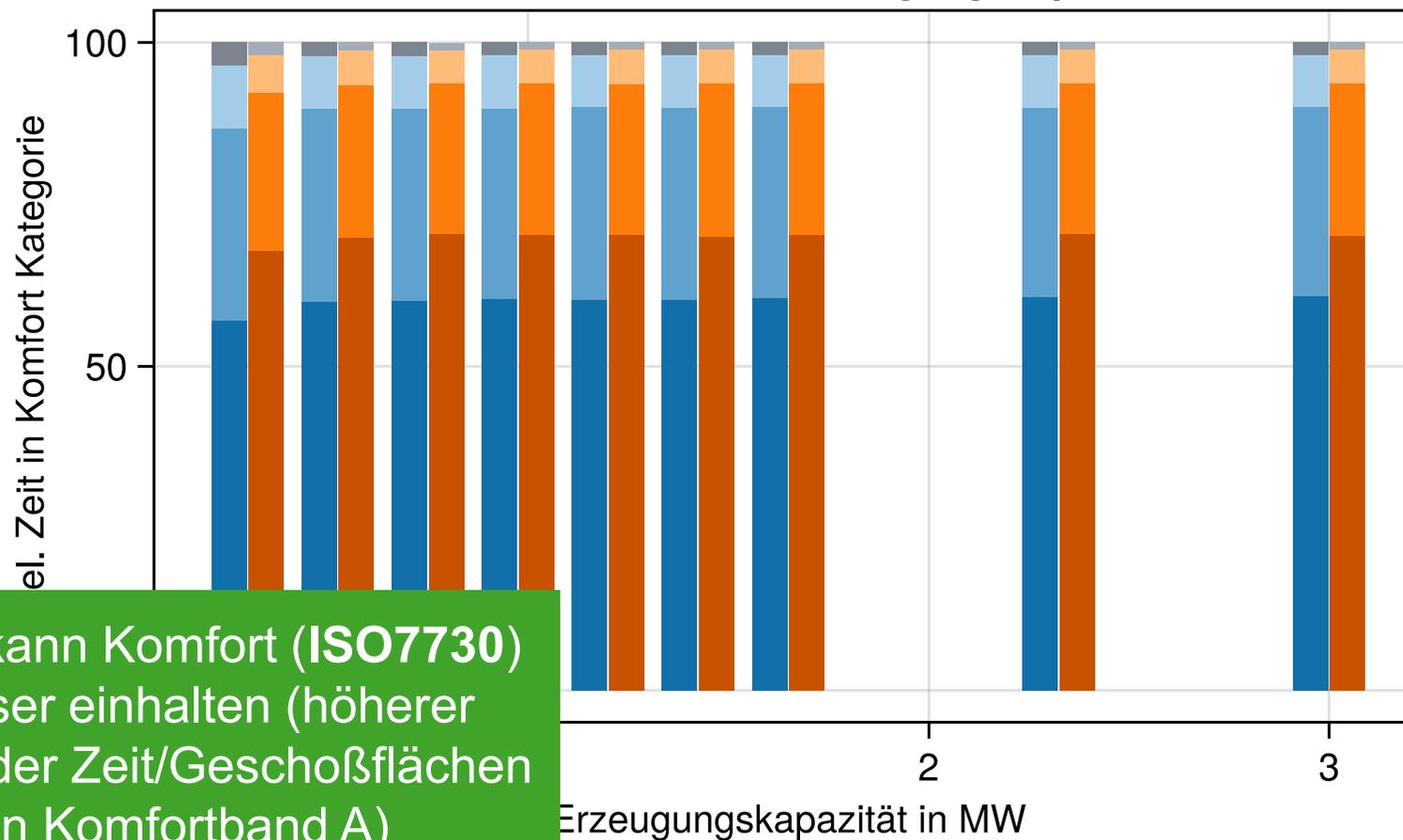
Einsparung auf Kosten des Komforts?

# Lastverschiebepotential Heizperiode - Komfort

Komfort ist unabhängig von der Erzeugungskapazität. Versorgung aus Fernwärme immer möglich.



Komfort über lokaler Erzeugungskapazität

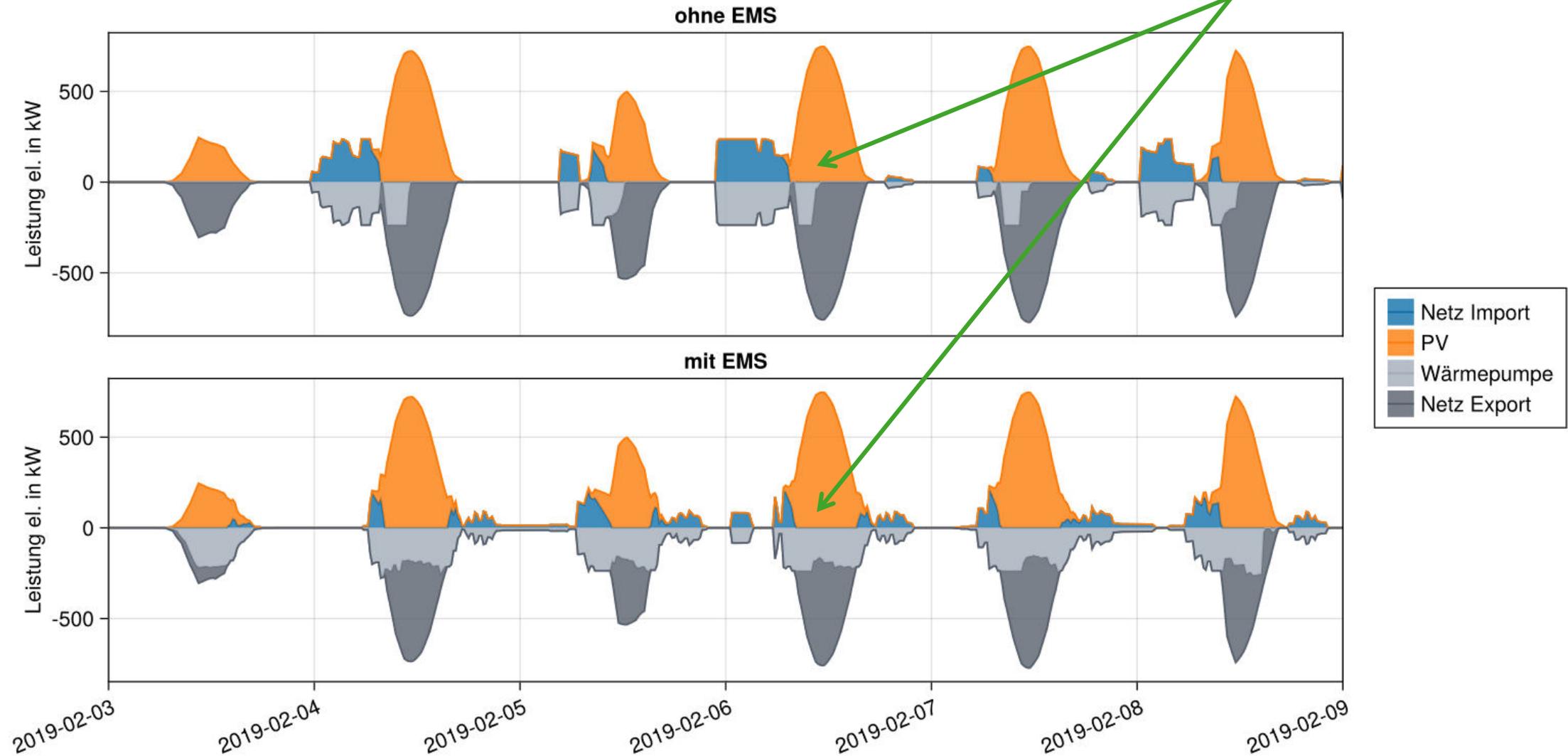


EMS kann Komfort (ISO7730) besser einhalten (höherer Anteil der Zeit/Geschoßflächen in Komfortband A)



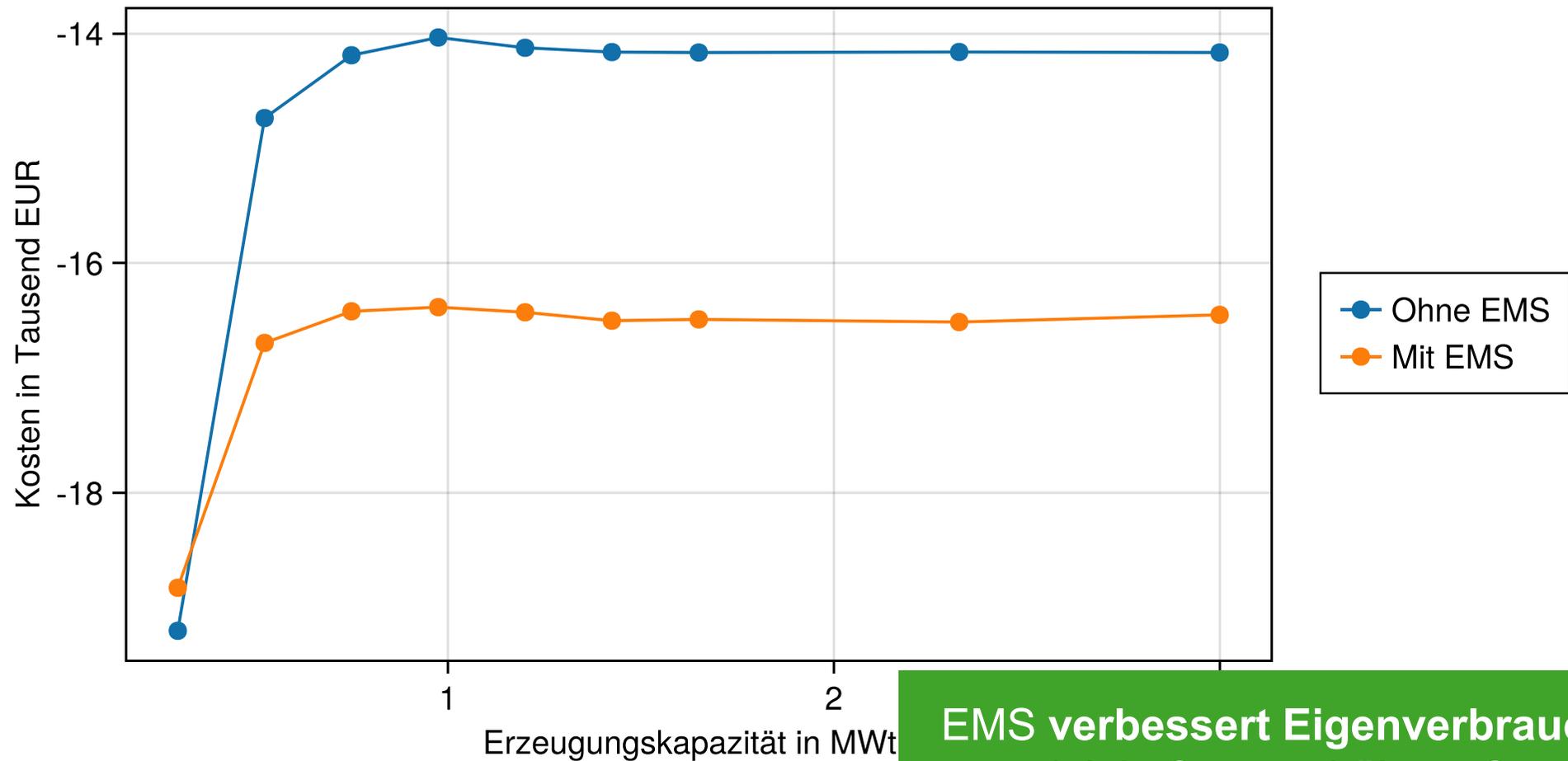
# Lastverschiebepotential Heizperiode – El. Energiefluss

EMS nutzt  
PV-Ertrag effektiver





# Lastverschiebepotential Kühlperiode (01.06. – 31.08.)

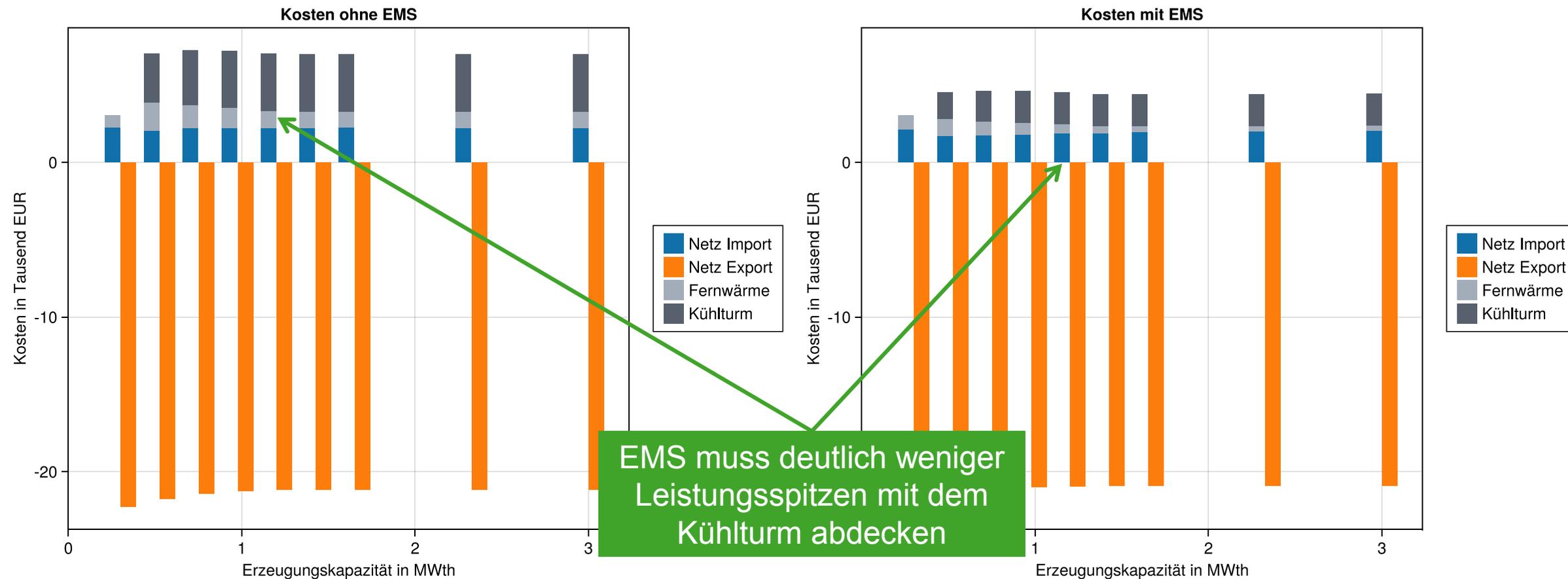


**EMS verbessert Eigenverbrauch und erzielt in Summe höhere Gewinne**



# Lastverschiebepotential

## Kühlperiode - Detaillierter Vergleich der Kosten

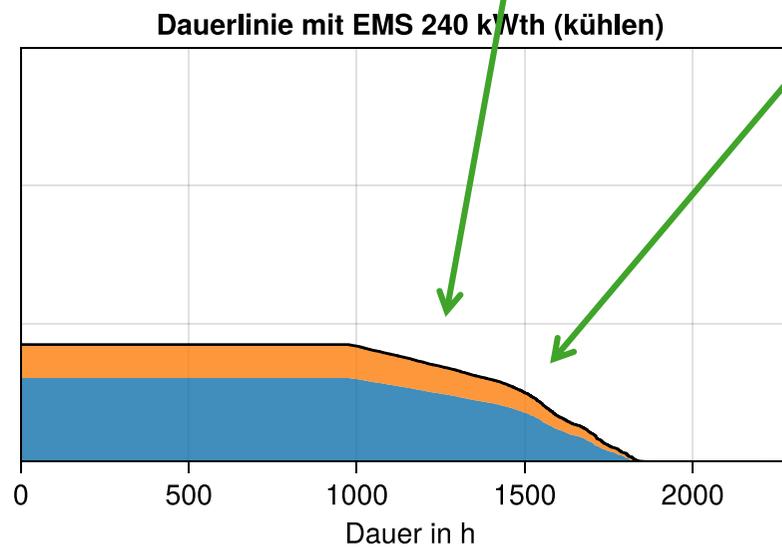
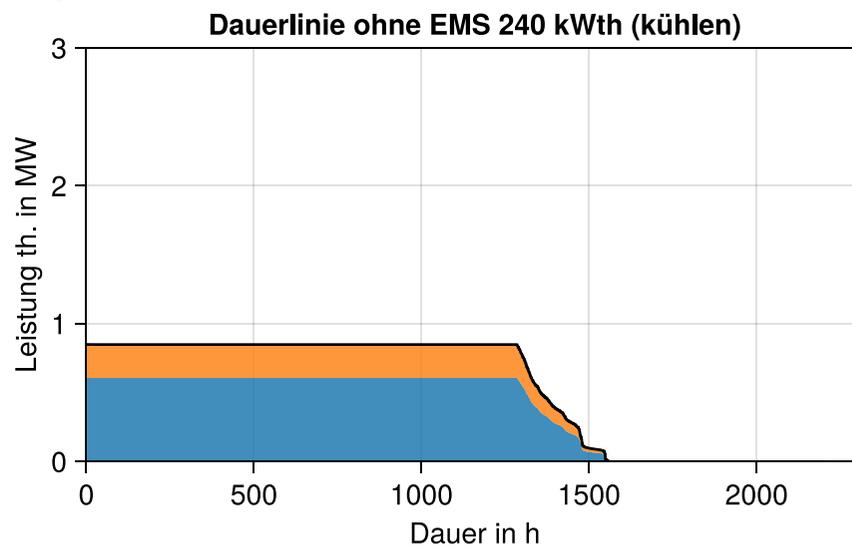
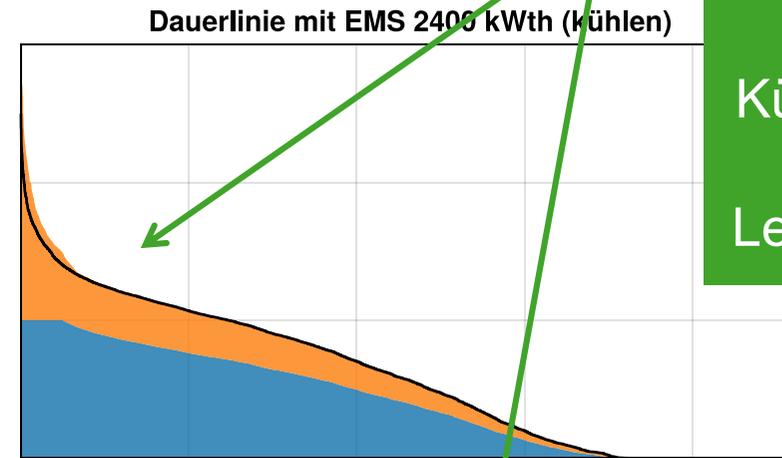
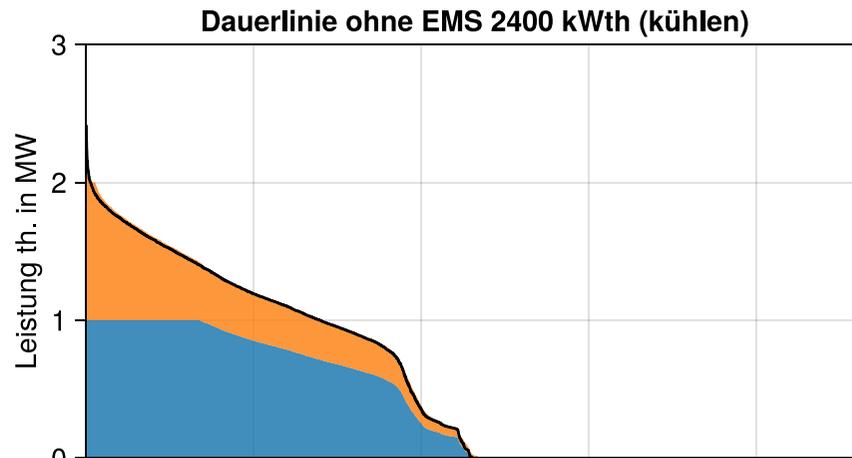




# Lastverschiebepotential Kühlperiode - Dauerlinie

EMS formt Bedarf und passt ihn an Erzeugungskapazität an

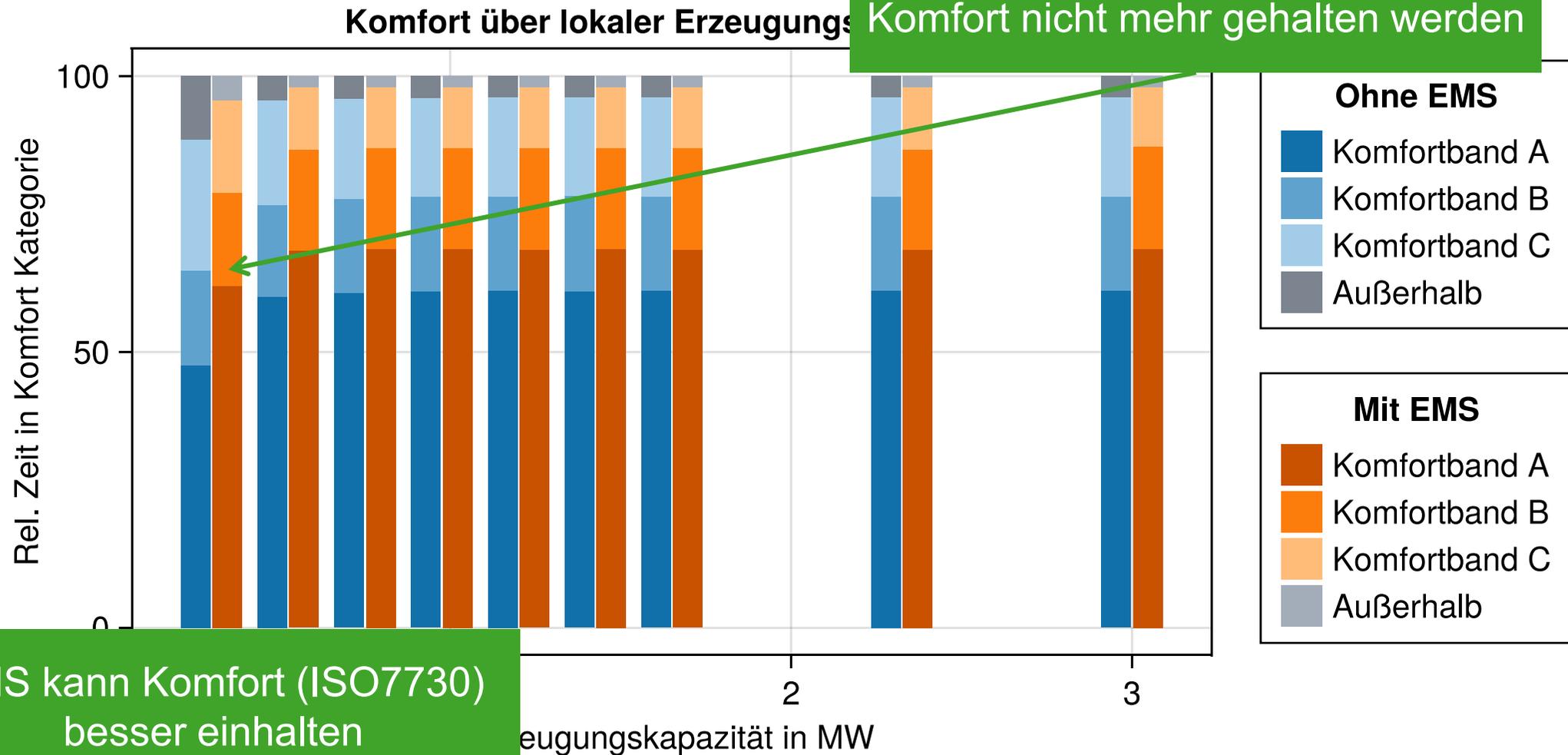
Ausdehnung der Kühlzeiten, um Komfort bei mangelnder Leistung bereitzustellen



- Brunnen Freecooling
- Wärmepumpe Kühlen
- Kühlbedarf



# Lastverschiebepotential Kühlperiode - Komfort





# Ausfallsszenario - Bekannter Ausfall (Wartung)

## Definition des Szenarios

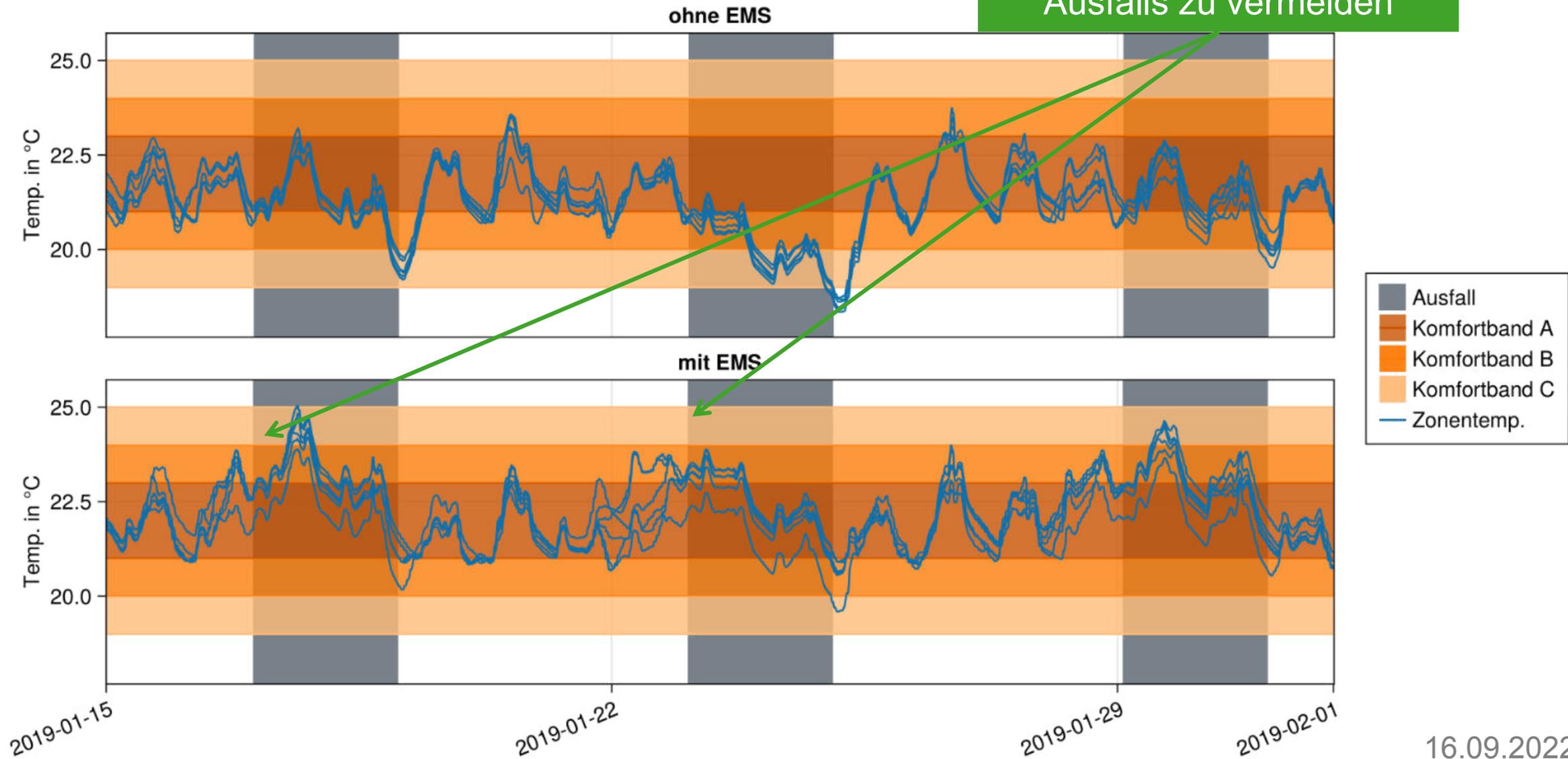
- Wie kann eine **intelligente**, vorrauschauende **Regelung** bei einem **Ausfall durch Wartung** hilfreich sein?
- **Idee:** EMS weiß von dem Ausfall (Wartung) und kann die Information nutzen, um den **Komfort** länger sicherzustellen



# Ausfallsszenario

## Bekannter Ausfall (Wartung)

EMS heizt Zonen vor, um Komfortverlust während des Ausfalls zu vermeiden





# Ausblick

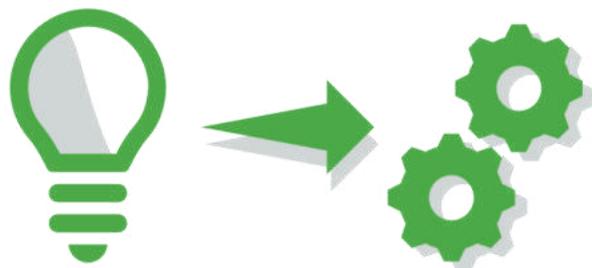




- **COMET: Weiterentwicklung für Einfamilienhäuser**
  - Schwierigkeit der Abschätzung der internen Lasten
  - Variationen schlagen sich direkt auf die Energiezentrale durch
- **UserGRIDs: Umsetzung und Test am Campus Inffeldgasse**
  - Inbetriebnahme im eigenen Bürogebäude Inffeldgasse 21b
  - Berücksichtigung von User Feedback



# Praktische Umsetzung von intelligenten Regelungsmethoden: Chancen und Hindernisse



# SWOT-Analyse



- Typischerweise werden für Technologien sogenannte **SWOT-Analysen** durchgeführt:
  - **Strengths** – Stärken der Technologie / des Ansatzes
  - **Weaknesses** – Schwächen der Technologie / des Ansatzes
  - **Opportunities** – Chancen, die eine Ausbreitung befördern
  - **Threats** – Risiken / Hindernisse, die eine Ausbreitung verhindern



# Stärken und Schwächen

- Die **Stärken** und **Schwächen** von intelligenten Regelungsmethoden sind mehr oder weniger bekannt:

## Stärken

Flexibilität durch Nutzung der thermischen Massen

Eigenverbrauchsoptimierung

Komfortverbesserung

Vorausschauendes Agieren

## Schwächen

Erhöhter Aufwand / Kosten

Schwierigere Inbetriebnahme

Noch nicht marktreif  
bzw. noch nicht ausgereift



# Chancen und Hindernisse

- Was steht einem breite(re)n Einsatz von intelligenten, vorausschauenden Regelungen entgegen?
- Wie könnten bessere Rahmenbedingungen für deren Einsatz geschaffen werden?
- Welche technischen / ökonomischen / rechtlichen Voraussetzungen müssen (noch) erfüllt sein?

# ÖKO-OPT-AKTIV

Optimiertes Regelungs- und Betriebsverhalten  
thermisch aktivierter Gebäude zukünftiger  
Stadtquartiere

Dipl.-Ing. Dr. Daniel Muschick  
[daniel.muschick@best-research.eu](mailto:daniel.muschick@best-research.eu)

Dipl.-Ing. Valentin Kaisermayer  
[valentin.kaisermayer@best-research.eu](mailto:valentin.kaisermayer@best-research.eu)