

# Agentenbasierte Modellierung und Simulation von Demand Response mit Wärmepumpen

16. Symposium Energieinnovation  
12. – 14. Februar 2020

**Evelyn Sperber, Christoph Schimeczek, Ulrich Frey**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Technische Thermodynamik  
Energiesystemanalyse



Wissen für Morgen



# Synergien von Schlüsseltechnologien...



## ... durch passende Anreize schaffen



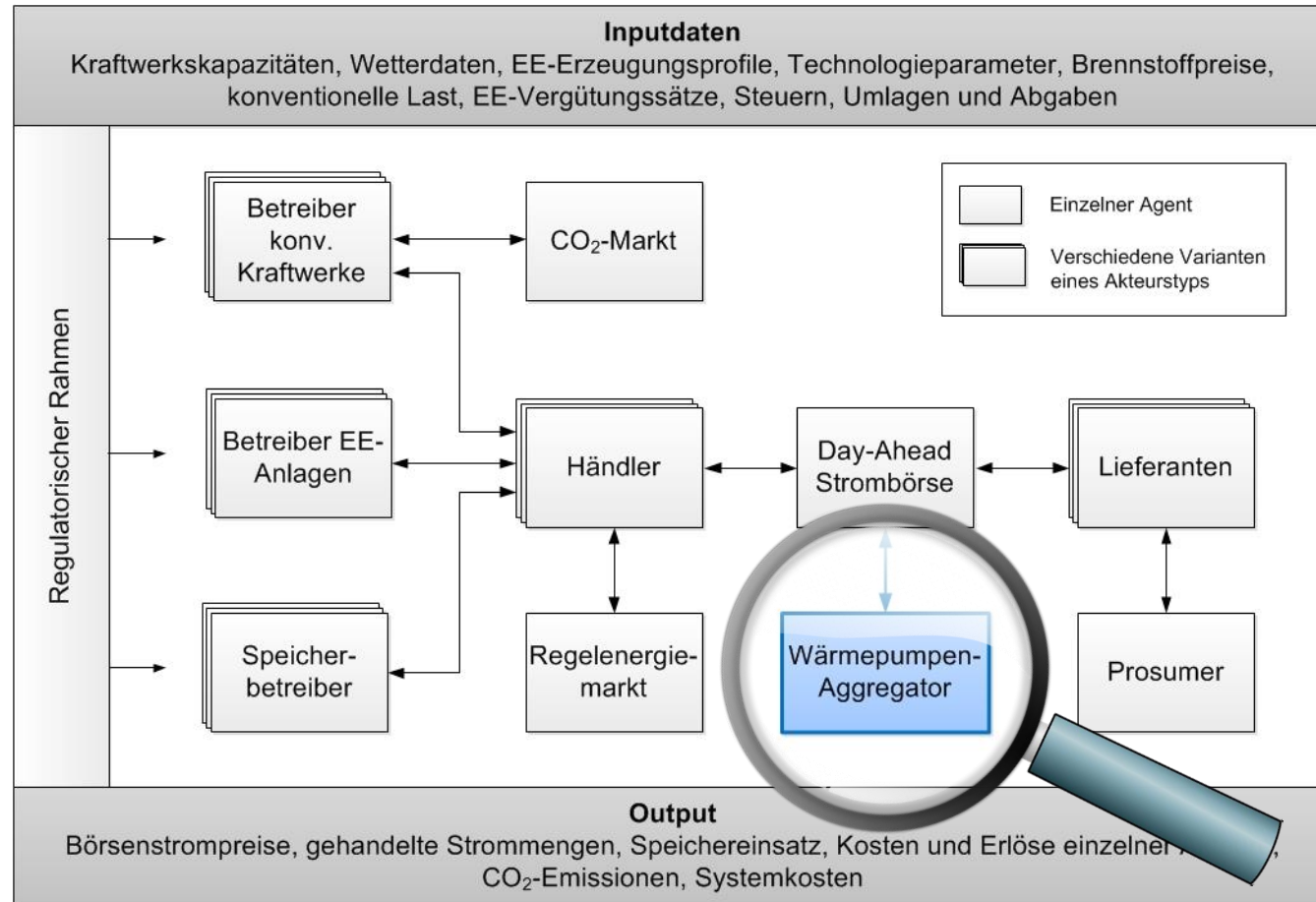
*“Every consumer will be able to offer **demand response** [...]. **Dynamic electricity price contracts** [...] will allow consumers to respond to price signals and **actively manage** their consumption.”*

- Wärmepumpenbetreiber werden zu **aktiven Marktteilnehmern**
- Neue Interaktionen → unbekannte **Markteffekte**
- Neue Herausforderungen: **ausbalancierte Preisanreize** für Endkunden-Flexibilität

- Welche Effekte hat der Betrieb von Wärmepumpen auf die **Strommärkte**?
- Welchen Einfluss haben **Gebäudecharakteristika**?
- Wie **profitieren** unterschiedliche Energiemarktakteure?



# Das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS



## Autonome Agenten mit eigenen

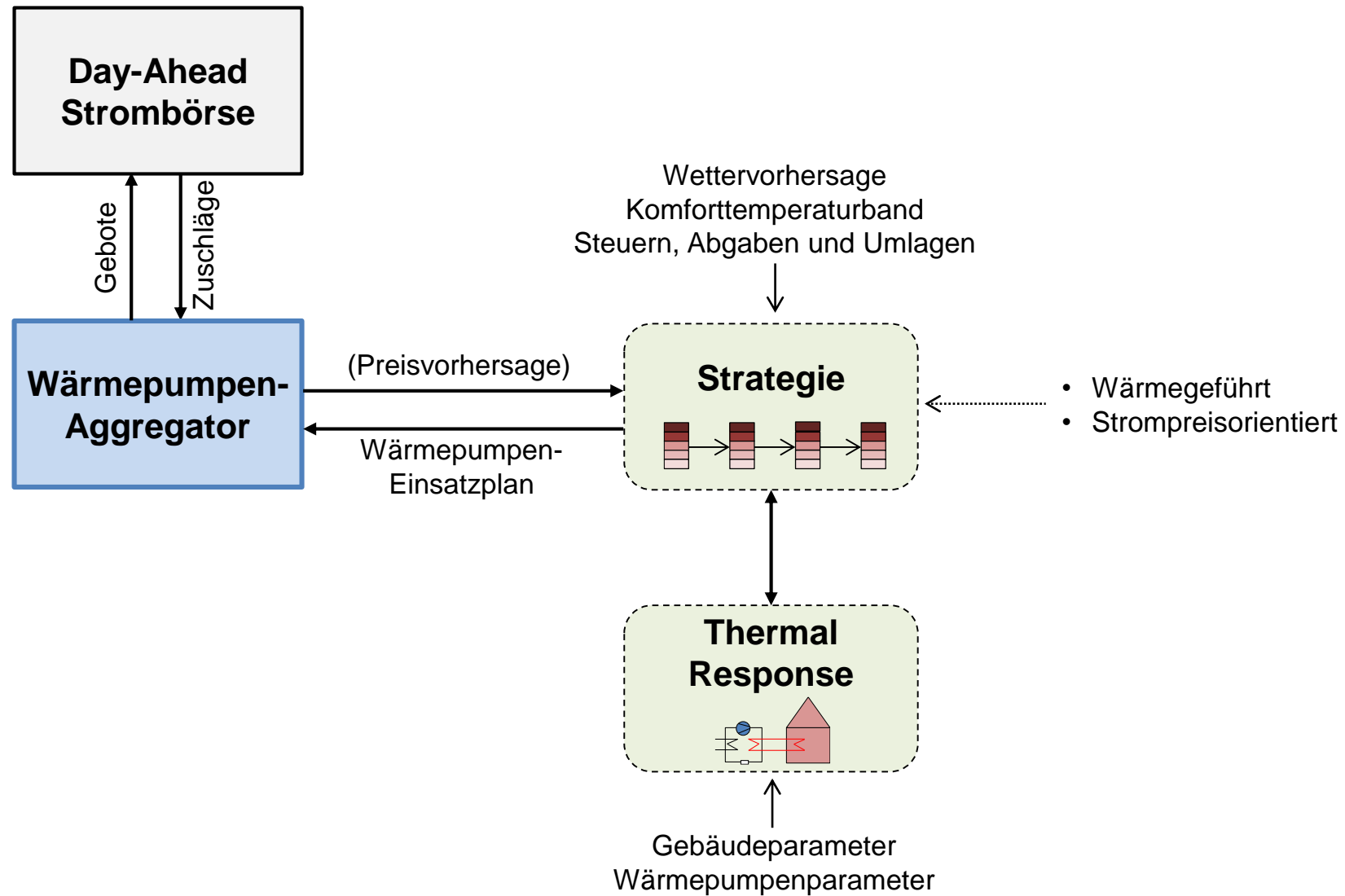
- Attributen
- Entscheidungsalgorithmen
- Beziehungen zu anderen Agenten

Systemverhalten resultiert aus Verhalten der einzelnen Agenten (**Emergenz**)

Rundenbasierte Simulation mit zeitlicher Auflösung von einer Stunde in einem Knoten



# Wärmepumpen in AMIRIS



# Thermal-Response-Modelle innerhalb von AMIRIS

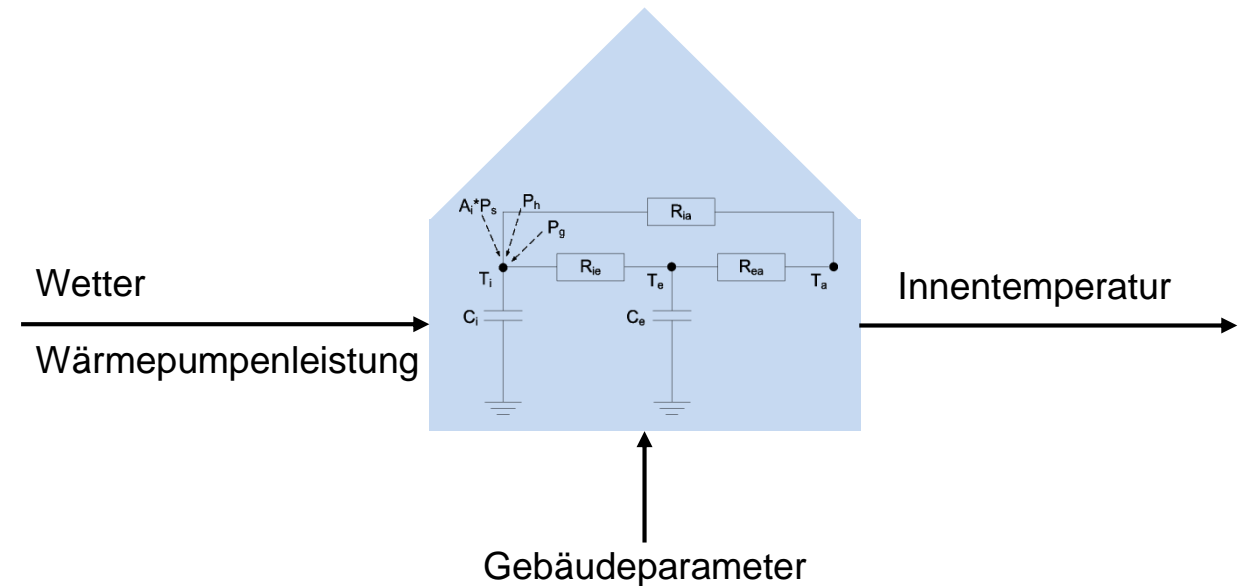
## ▪ Funktionen:

- Aktivierung der Gebäudespeichermasse
- Berücksichtigung des Nutzerverhaltens
- Repräsentativ für Gebäudebestand
- Recheneffizient und genau

## ▪ Thermodynamische Modelle in **RC-Analogie**

- Parameterschätzung auf Basis von TRNSYS-Simulationsdaten  
→ **Grey-Box Modellierung**

- **Validierte** Modelle für **12** typische deutsche Einfamilienhäuser in **3 Sanierungszuständen**  
(RMSE  $\approx 0.6^\circ\text{C}$ )

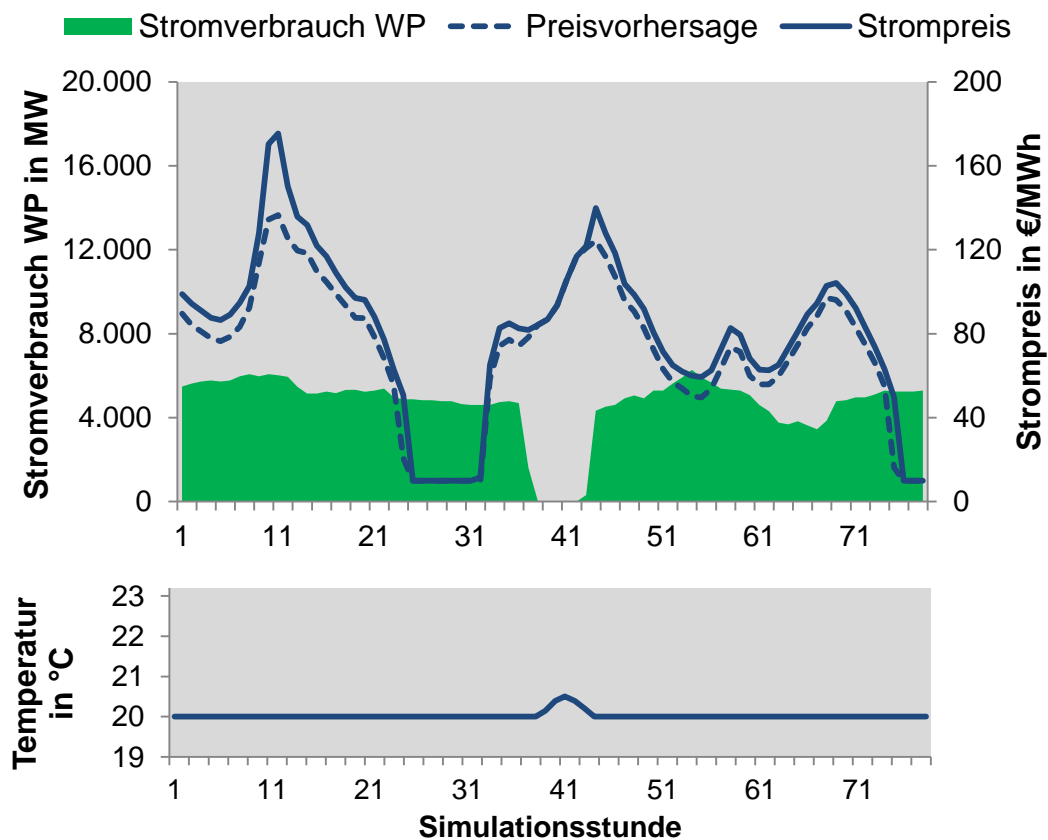


Siehe auch Sperber, Frey, Bertsch: *Buildings as thermal storage: Reduced-order models for system-wide assessment of Demand Response with heat pumps*, preprint, 2019

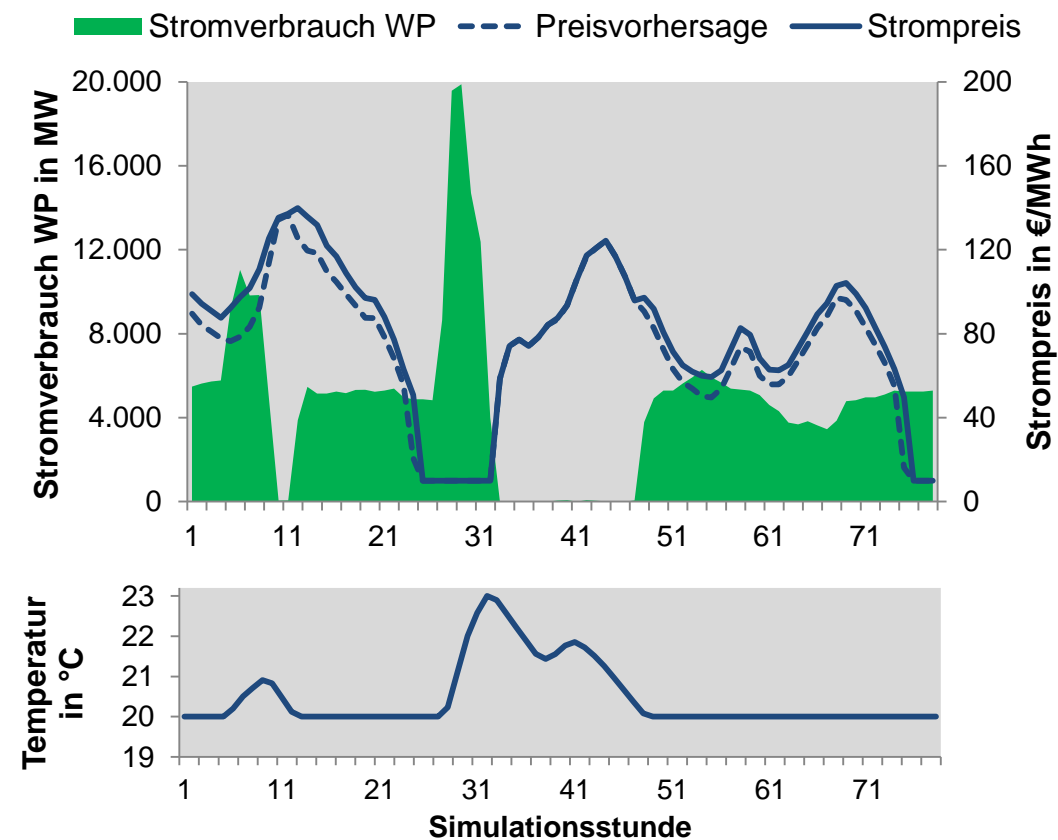


# Betriebsweisen von Wärmepumpen in AMIRIS

## Wärmegeführt



## Strompreisorientiert



# Fallstudie

Energiesystem mit **20 GW<sub>el</sub>** installierter Kapazität an Luft/Wasser-Wärmepumpen

Vergleich der Strommarkteffekte in 4 Szenarien hinsichtlich:

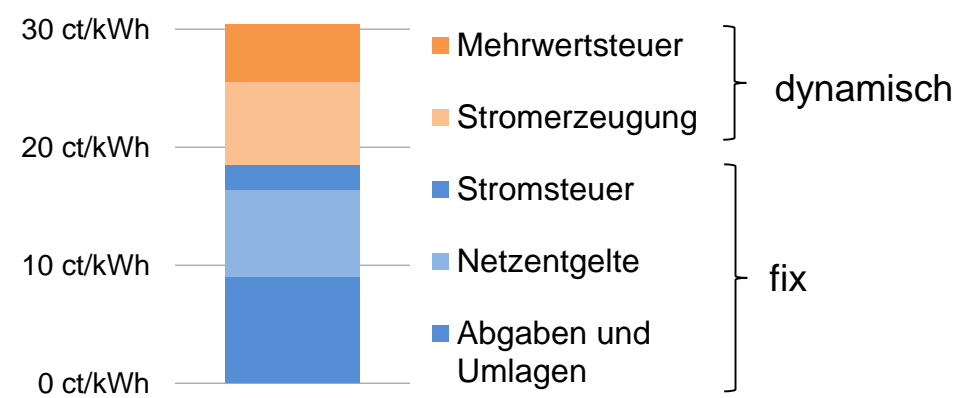
Betriebsweise	
<i>Wärme</i>	Wärmegeführt $T_{set} = 20^{\circ}\text{C}$
<i>RTP</i>	Preisgeführt mit <u>Real Time Pricing</u> $T_{set} = 20\text{-}23^{\circ}\text{C}$

X

Gebäudetyp	
<i>Altbau</i>	Unsanierete Bestandsgebäude (1979 ff) Radiatorenheizung ( $T_{vl} = 65^{\circ}\text{C}$ )
<i>Neubau</i>	Gut gedämmte Neubauten Fußbodenheizung ( $T_{vl} = 35^{\circ}\text{C}$ )

**Szenariorahmen**

- Kraftwerkskapazitäten
  - Konventionelle: 95 GW
  - Wind: 120 GW
  - PV: 100 GW
- “Traditioneller” Stromverbrauch: 520 TWh/a | 85 GW<sub>p</sub>
- EE-Anteil ≈ 50%
- CO<sub>2</sub>-Preis = 60 €/t
- Fördersystem Erneuerbare: gleitende Marktprämie
- Fixe Steuern, Abgaben und Umlagen = 185 €/MWh
- Wetterjahr 2012



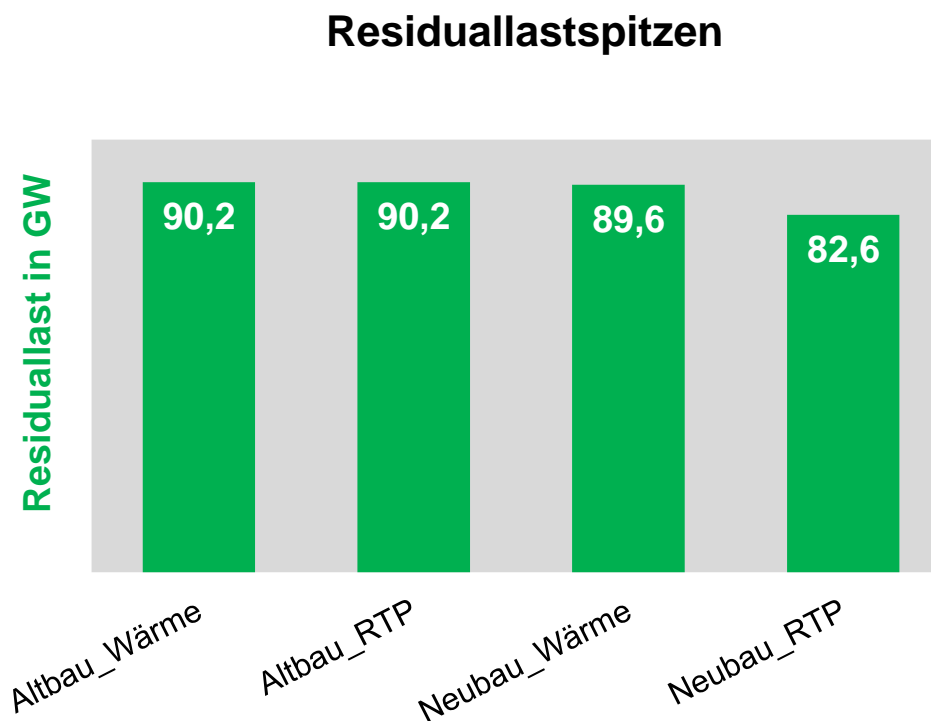
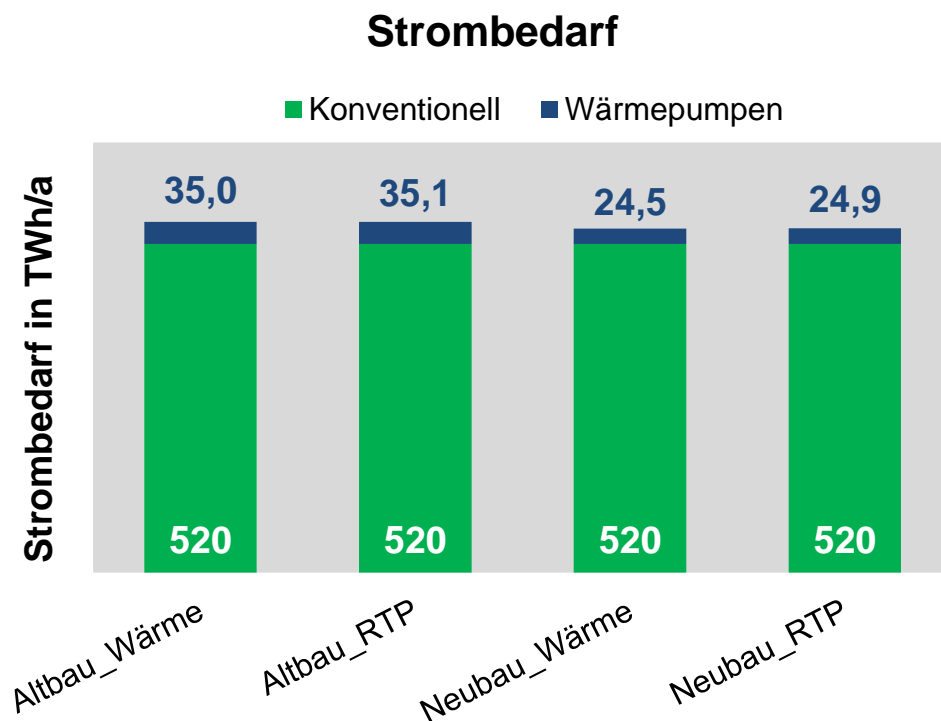
**Modellannahmen und -limitationen:**

- 1 prototypischer Wärmepumpen-Aggregator mit 24 h „perfect foresight“
- Wärmepumpe als einzige Flexibilitätsoption





# Auswirkungen auf Strombedarf und Residuallastspitzen



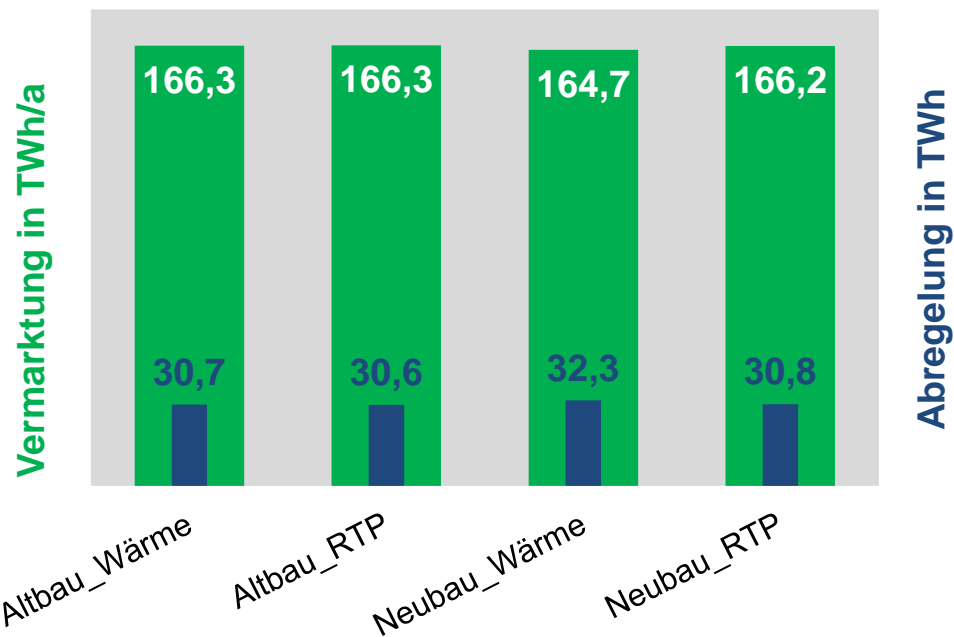
- 30% geringerer Strombedarf von Wärmepumpen im *Neubau*
- Betriebsweise beeinflusst den Strombedarf kaum
- „Speicherverluste“ kosten!

- Große Speichermasse im *Neubau*  
→ Reduktion des Backup-Bedarfs um **7 GW** (8%) mit *RTP*



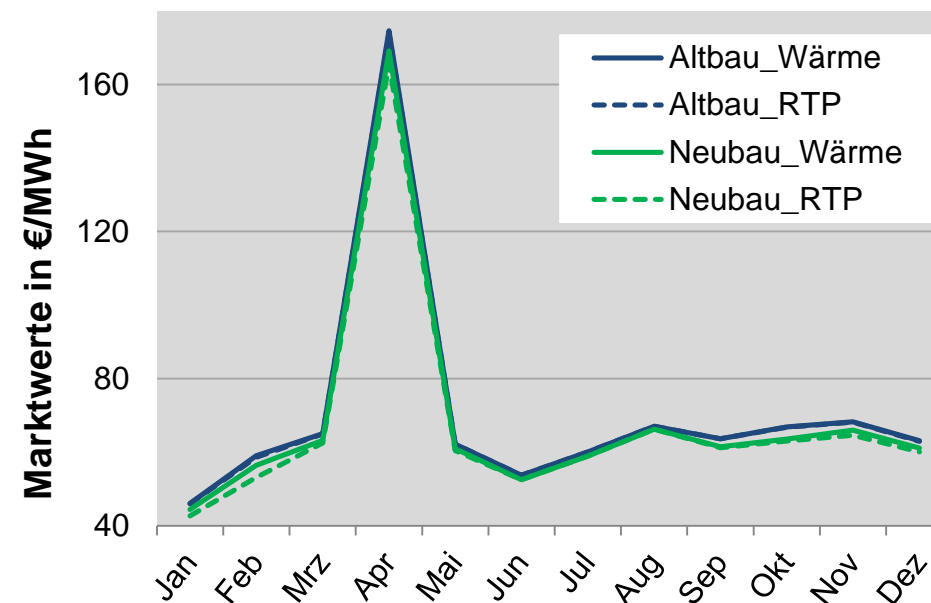
# Auswirkungen auf Integration und Marktwerte von Onshore-Windstrom

## Vermarkteter Windstrom und Abregelung



- *Altbau*: geringe Effekte
- *Neubau*: RTP führt zu Integration von zusätzlichen 1,5 TWh Windstrom ( $\cong$  6 % des Strombedarfs der Wärmepumpen)

## Marktwerte

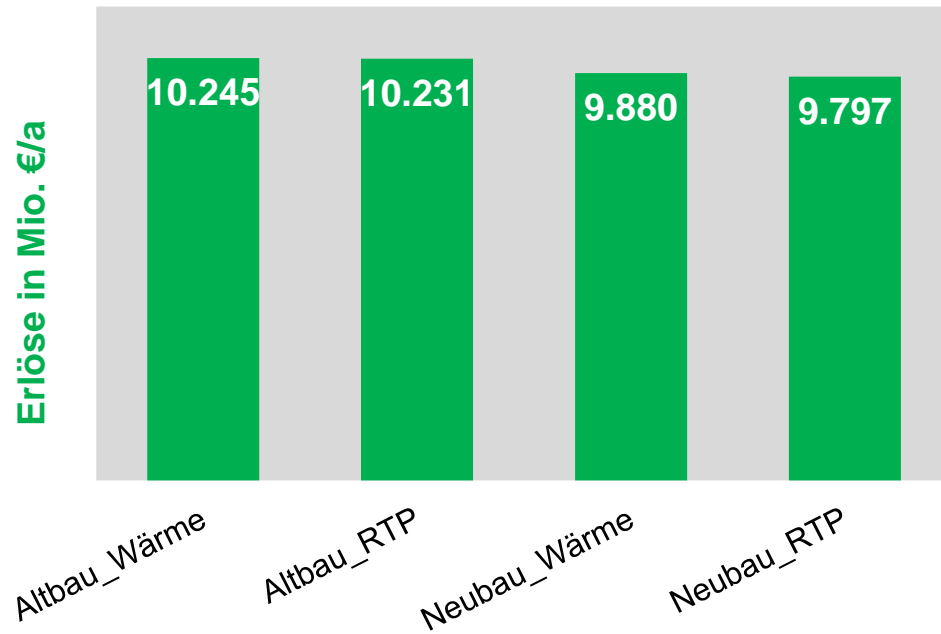


- *Altbau*: höherer Strombedarf  $\rightarrow$  geringfügig höhere Marktwerte
- *Neubau*: RTP reduziert Marktwerte leicht (-3%)



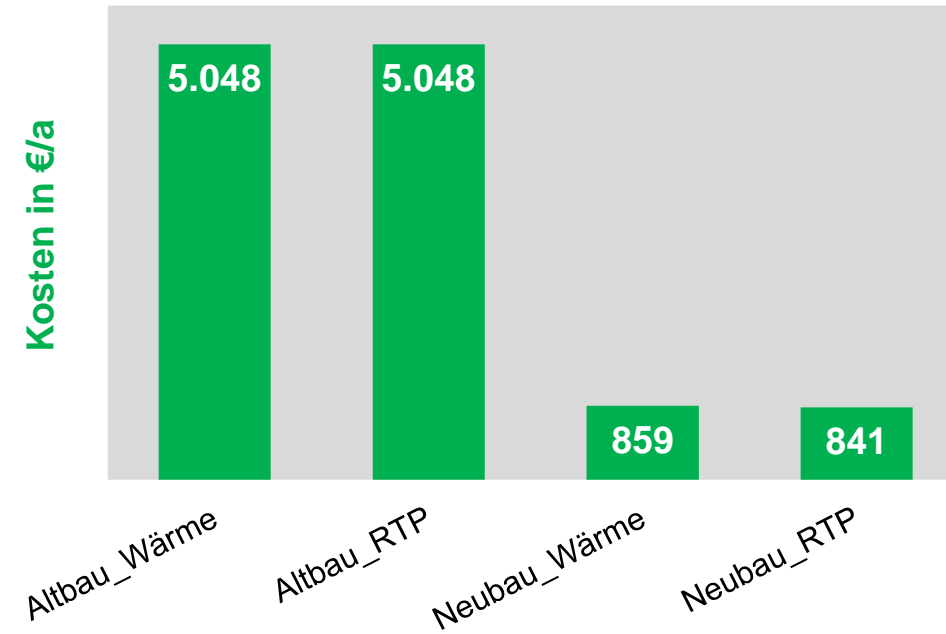
# Mikroökonomische Betrachtung

## Erlöse Windkraftanlagenbetreiber



- Marginale Verluste bei *RTP* im *Neubau* (-0.8%)  
→ Reduzierte Marktwerte überkompensieren höhere Absatzmengen

## Endkundenrechnung\*



- Einsparungen durch *RTP* im *Neubau*: 17 € (2%)  
→ **Geringer Anreiz zur Teilnahme an Demand Response!**

\* Kosten für smart metering nicht berücksichtigt



# Schlussfolgerungen und Ausblick

## ▪ Demand Response mit Real Time Pricing und fixen Abgaben und Umlagen

- Altbau: kaum Marktauswirkungen
- Neubau: reduziert den Bedarf an Backup-Kapazitäten und fördert Windstromintegration
- Marginale Einsparungen bei Endkunden spiegeln Nutzen für das Stromsystem nicht wider

} Gebäudecharakteristika berücksichtigen!

➔ weitere Anreize erforderlich!

## ▪ Nächste Schritte

- Ausdifferenzierung von Wärmepumpen-Aggregatoren
- Integration konkurrierender Flexibilitätsoptionen
- Implementierung dynamischer Abgaben und Umlagen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Kontakt:

Evelyn Sperber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Technische Thermodynamik | Energiesystemanalyse

E-Mail: [Evelyn.Sperber@dlr.de](mailto:Evelyn.Sperber@dlr.de)

Telefon: +49 711 6862-8145

## Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

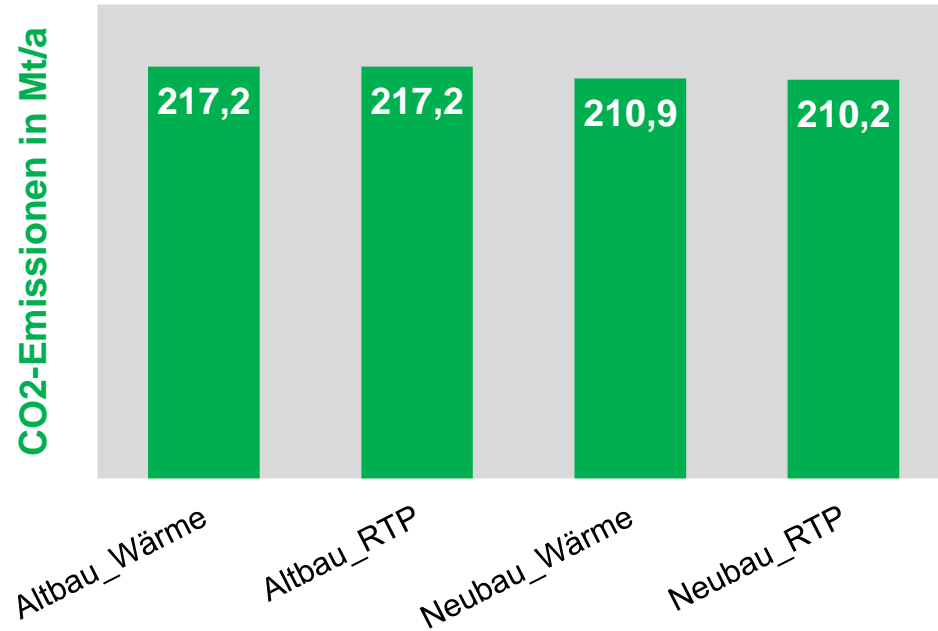
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Dieser Beitrag basiert auf Inhalten des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „Analyse der Integration erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit und dezentraler Flexibilitäten (INTEEVEER 2)“



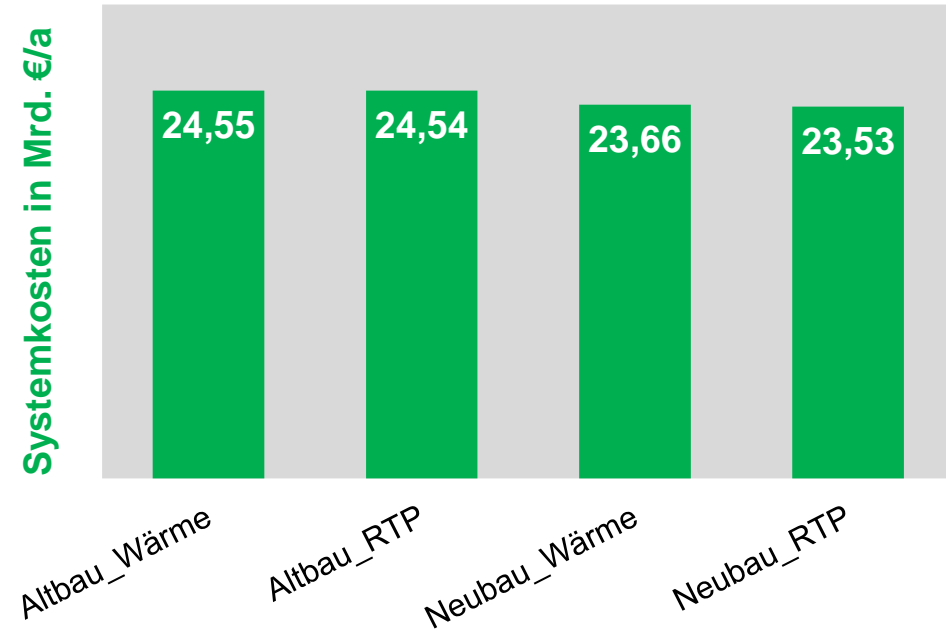
# Auswirkungen auf Klimaschutz und Systemkosten

## Stromseitige CO<sub>2</sub>-Emissionen



- Keine Effekte im *Altbau*
- *Neubau*: RTP trägt zu 0,3% CO<sub>2</sub>-Minderung bei

## Stromseitige Systemkosten



- *Neubau*: Einsparungen i.H. von 130 Mio. €/a durch RTP



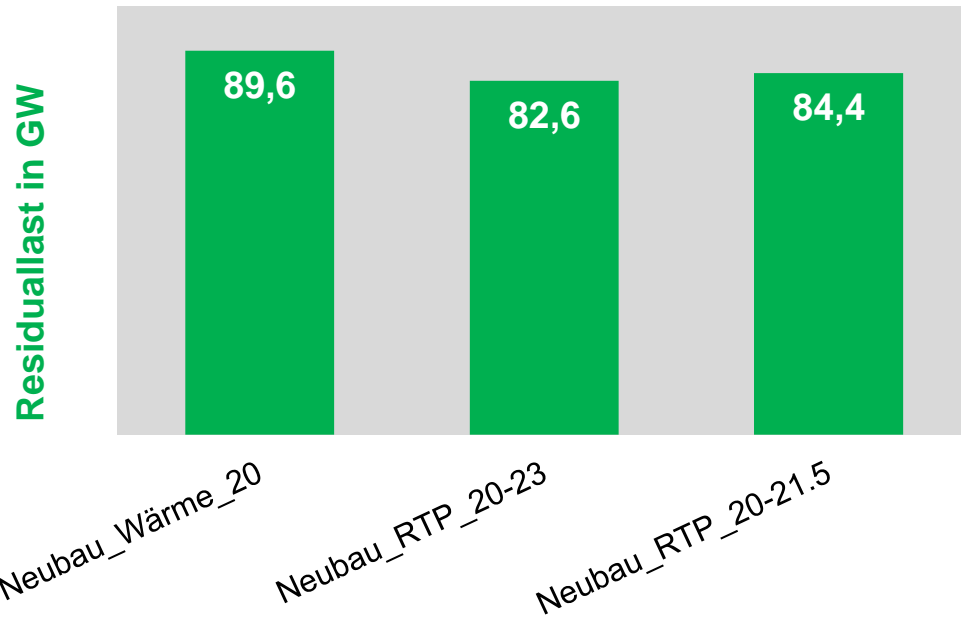
# Einfluss des Komforttemperaturbandes im Neubau

**Neubau\_Wärme\_20:** wärmegeführte Fahrweise,  $T_{\text{set}} = 20^\circ\text{C}$

**Neubau\_RTP\_20-23:** preisgeführte Fahrweise,  $T_{\text{set}} = 20\text{-}23^\circ\text{C}$

**Neubau\_RTP\_20-21.5:** preisgeführte Fahrweise,  $T_{\text{set}} = 20\text{-}21.5^\circ\text{C}$

## Residuallastspitzen



## Vermarkteter Windstrom und Abregelung

