

# Grey-Box-Modellierung des thermischen Verhaltens von Typgebäuden

**Evelyn Sperber**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

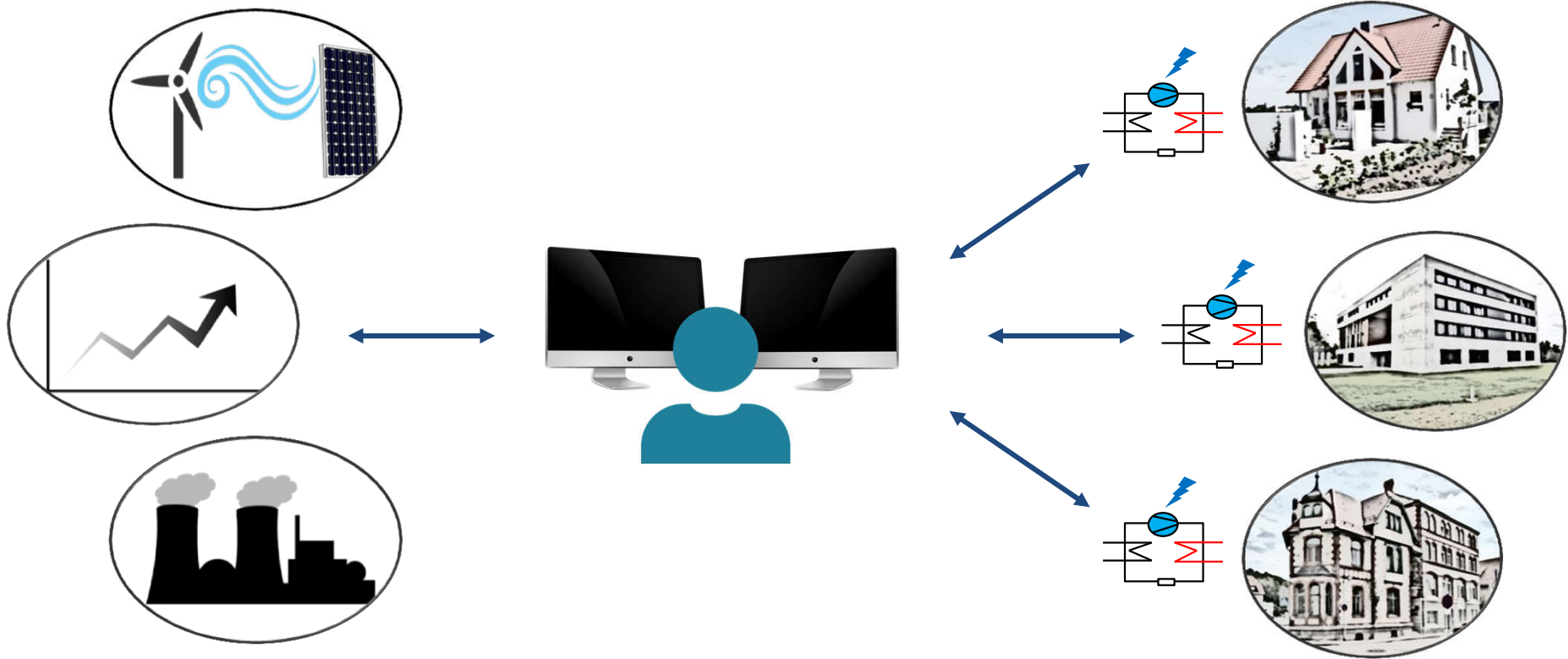
Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Energiesystemanalyse

11. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT

13.-15. Februar 2019, Wien

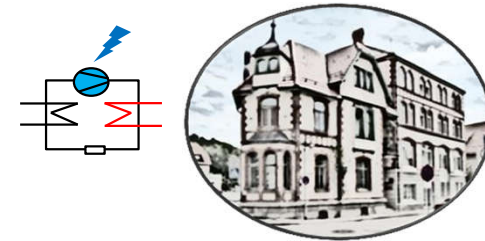
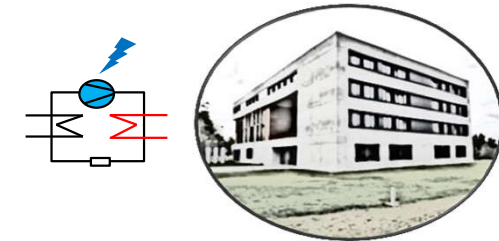
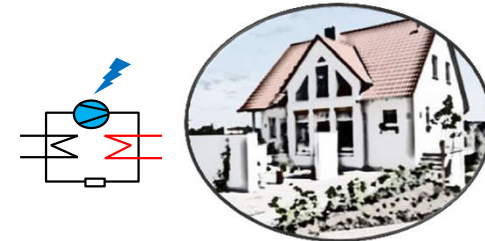


# Motivation und Fragestellung



# Motivation und Fragestellung

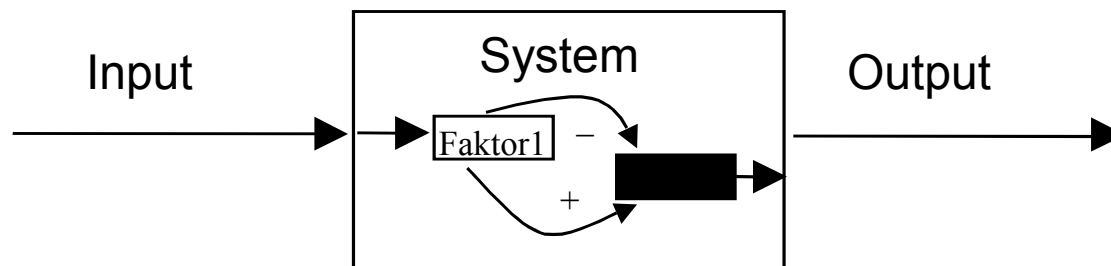
Wie kann Demand Response mit Wärmepumpen unter Berücksichtigung der Heterogenität des deutschen Gebäudebestands und seiner Bewohner in Energiesystemmodellen adäquat abgebildet werden?



# Grey-Box-Modellierung

## Hybride Modellierung:

- Vereinfachte Modellierung der relevanten Systemzusammenhänge  
(→ *White-Box*)
- Schätzung der Modellparameter aus Messdaten  
(→ *Black-Box*)

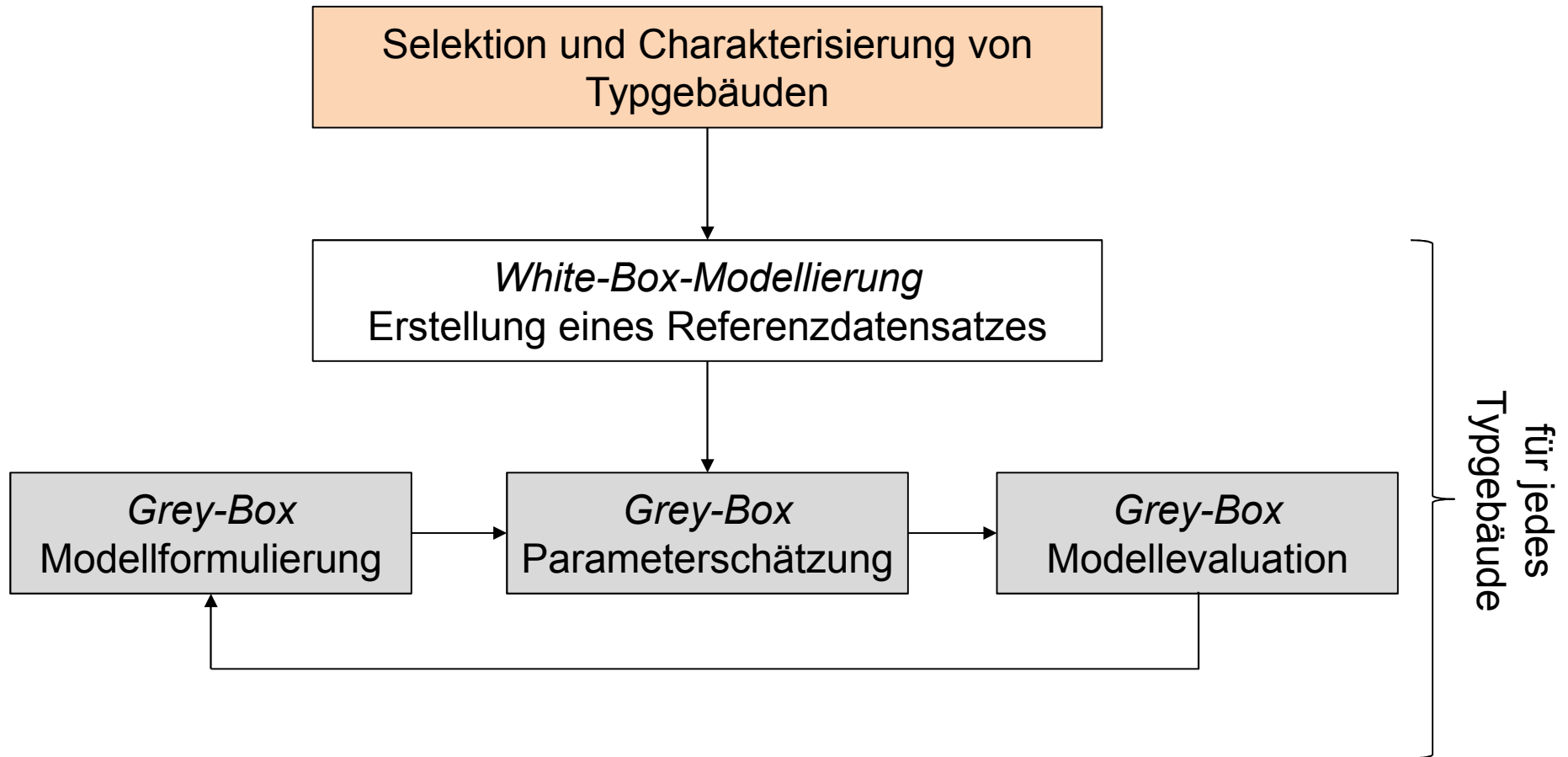


Quelle: Brause 2010

- Vorteile: Recheneffizienz und physikalische Interpretierbarkeit



# Vorgehensweise




# Selektion und Charakterisierung von Typegebäuden



Baualterklasse	EFH	RH	MFH	GMH	HH
	Basis-Typen				
A ... 1859					
B 1860 ... 1918					
C 1919 ... 1948					
D 1949 ... 1957					
E 1958 ... 1968					
F 1969 ... 1978					
G 1979 ... 1983					
H 1984 ... 1994					
I 1995 ... 2001					
J 2002 ... 2009					
K 2010 ... 2015					
L 2016 ...					

**EFH\_G** Heizsystem-Variante 1 1979 ... 1983 DE.N.SFH.07.Gen

**Beispielgebäude**







beheizte Wohnfläche 196 m<sup>2</sup>  
Anzahl Vollgeschosse 2  
Anzahl Wohnungen 1

**Gebäudetyp Klassifizierung (TABULA Code)**

- Land: DE (Deutschland/Germany)
- Typologie Region: N (nicht regional spezifiziert/National)
- Größenklasse: SFH (Einfamilienhaus ("EFH")/Single Family House)
- Baualterklasse: 7 ([G] 1979 ... 1983)
- Zusatz-Kategorie: Gen (Grund-Typ/Generic)

**Charakterisierung des Gebäudetyps**  
typisch 1- bis 2-geschossig mit Satteldach; Betondecken; Mauerwerk aus verputzten Gitterziegeln, Kalksandlochsteinen, Porenbeton o.ä., teilweise mit dünner Außendämmung; bisweilen Taktel-Bauweise mit Leichtbau- oder Beton-Sandwich-Elementen ("Ferlighaus"); in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale

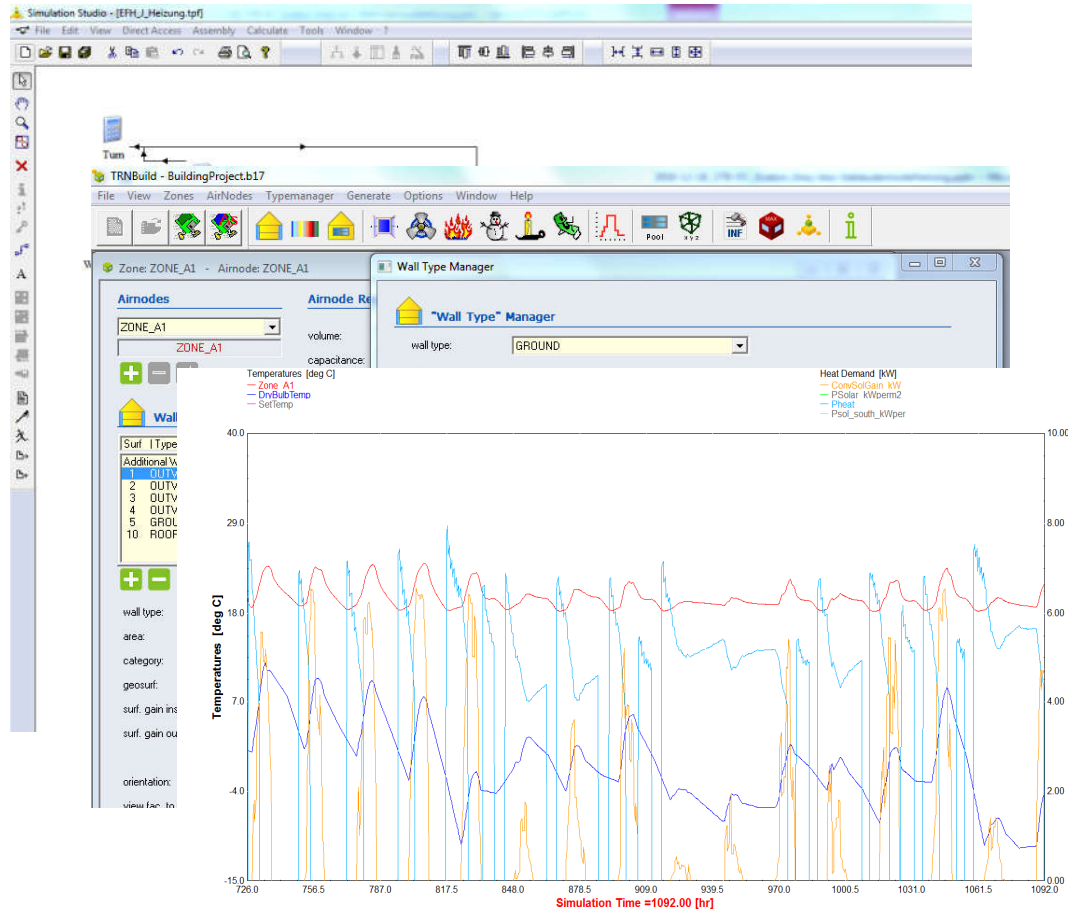
**Beispielgebäude – Ist-Zustand**

Konstruktion	Beschreibung	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)
Dach / oberste Geschossdecke	 Steldach mit 8 cm Dämmung 8 cm Dämmung zwischen den Holz-Sparren	0,50
Außenwand	 Mauerwerk aus Leicht-Hochlochziegeln / Leichtmörtel	0,8
Fenster	 Metallrahmenfenster mit Zweischeiben-Isolierverglasung Zweischeiben-Isolierverglasung im Aluminium- oder Stahlrahmen, ohne thermische Trennung (in späteren Jahren modernisiert, Original-Fenster nicht mehr erhalten)	4,3
Fußboden	 Betondecke mit 4 cm Dämmung Stahlbeton, 4 cm Wärmedämmung, Zementestrich	0,8

Quelle: Loga et al. 2015



# Erstellung eines Referenzdatensatzes mit TRNSYS



- Modellinput:
  - Wetterdaten
  - Heizregime
- Einzonen-Klötzchenmodell
- Parametrierung gemäß TABULA und eigenen Annahmen
- 10 min. Simulation
- Auslesung von Daten:
  - Innentemperatur
  - Heizwärmeleistung
  - Solarstrahlung

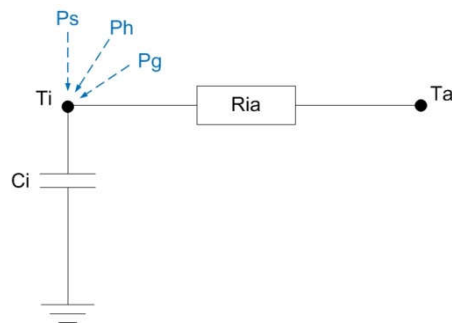
➔ **Referenzdatensatz für jedes Typegebäude**



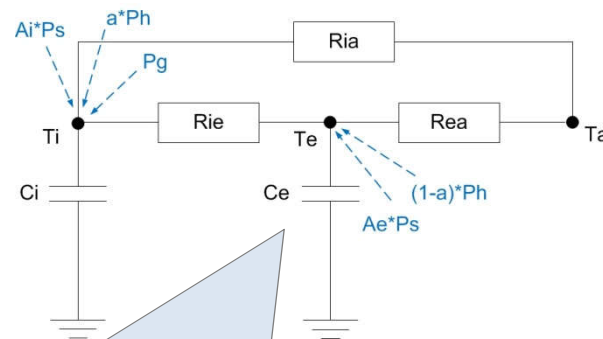
# Grey-Box Modellformulierung

- Stochastisches, lineares Zustandsraummodell
- RC-Netzwerk-Analogie → pauschalisierte Parameter für thermische Widerstände R und Kapazitäten C

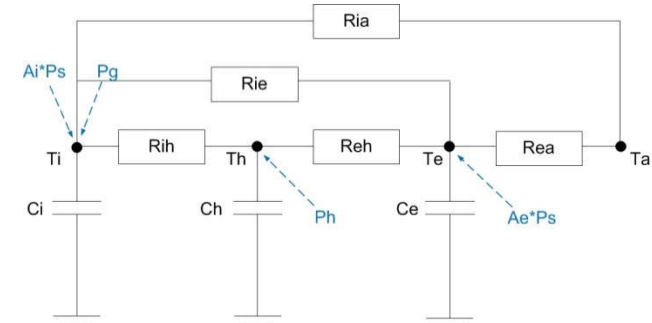
1R1C



3R2C



5R3C



$$dT_i = [1/(C_i \cdot R_{ie}) \cdot (T_e - T_i) + 1/(C_i \cdot R_{ia}) \cdot (T_a - T_i) + a_h/C_i \cdot P_h + 1/C_i \cdot P_g + A_i/C_i \cdot P_s] \cdot dt + e_1 \cdot d\omega_1$$

$$dT_e = [1/(C_e \cdot R_{ie}) \cdot (T_i - T_e) + 1/(C_e \cdot R_{ea}) \cdot (T_a - T_e) + (1-a_h)/C_e \cdot P_h + A_e/C_e \cdot P_s] \cdot dt + e_2 \cdot d\omega_2$$





# Grey-Box Parameterschätzung

- Maximum Likelihood Schätzung mit Kalman Filter
- Inputdaten: Heizleistung, Außentemperatur, Solarstrahlung, interne Gewinne
- Outputdaten: Innenraumtemperatur

---

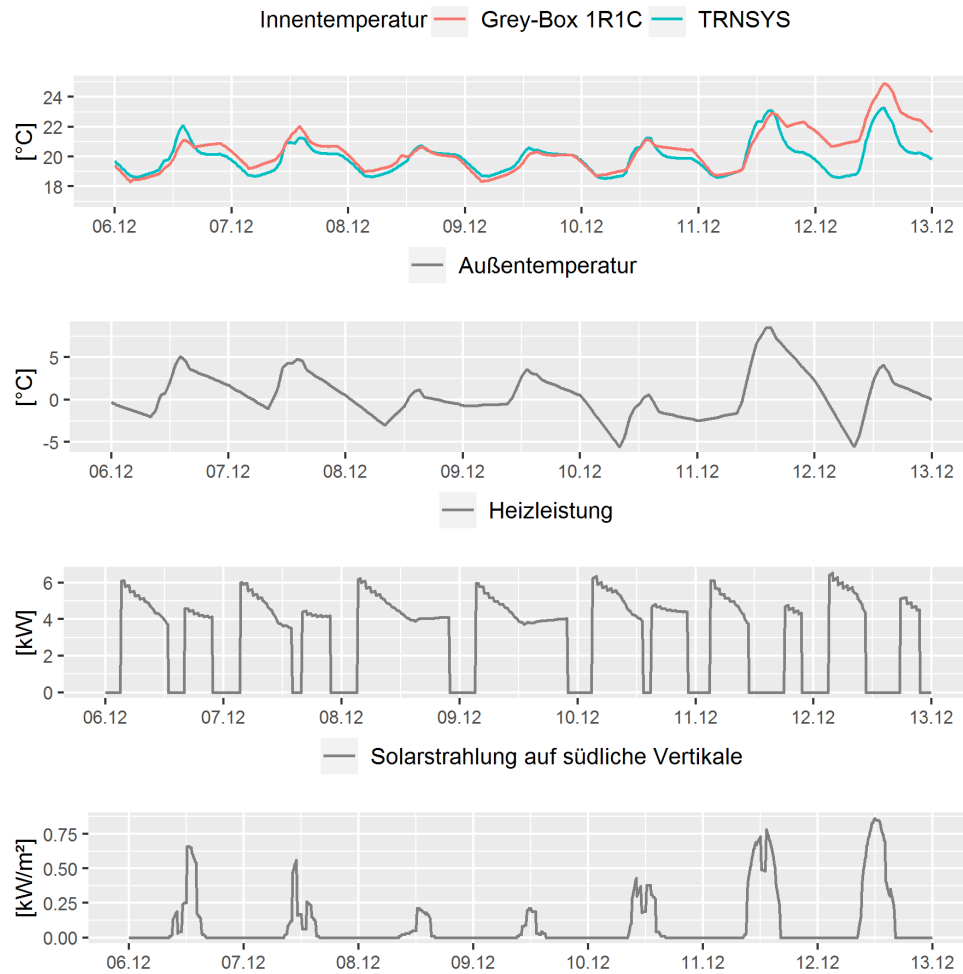
	<b>Trainingsdatensatz</b>	<b>Testdatensatz</b>
Daten 1	1. Januar – 30. Juni	1. – 31. Dezember
Daten 2	1. Januar – 30. Juni	1. – 31. Oktober

---

- Technische Umsetzung: CTSM-Toolbox in R (Juhl et al. 2016)



# Ergebnisse der 24h-Vorhersage 1R1C, Gebäudetyp J



---

## RMSE

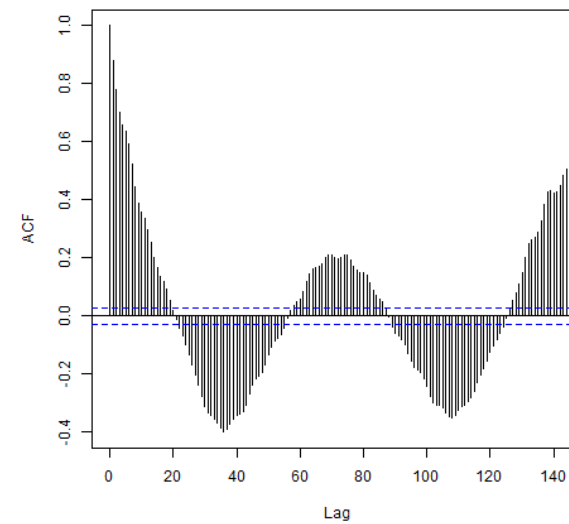
---

Daten 1 0,81 °C

Daten 2 0,98 °C

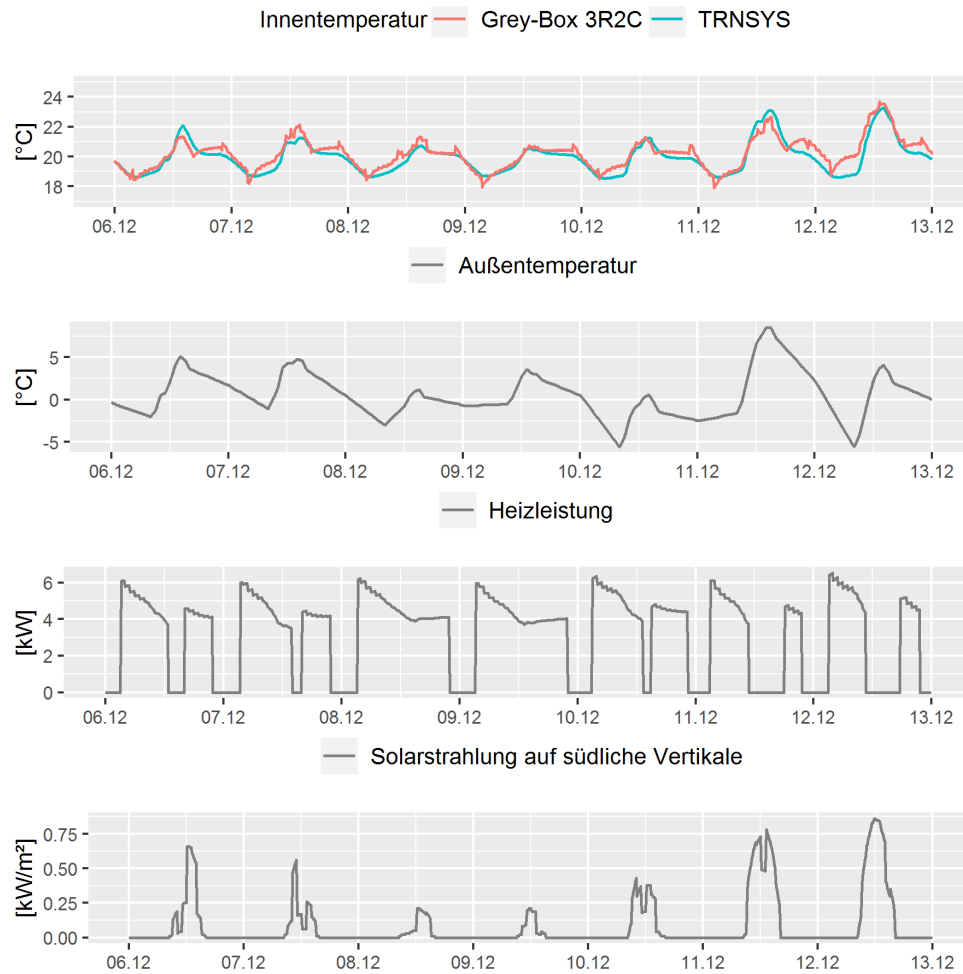
---

## Autokorrelation Residuen



# Ergebnisse der 24h-Vorhersage

## 3R2C, Gebäudetyp J

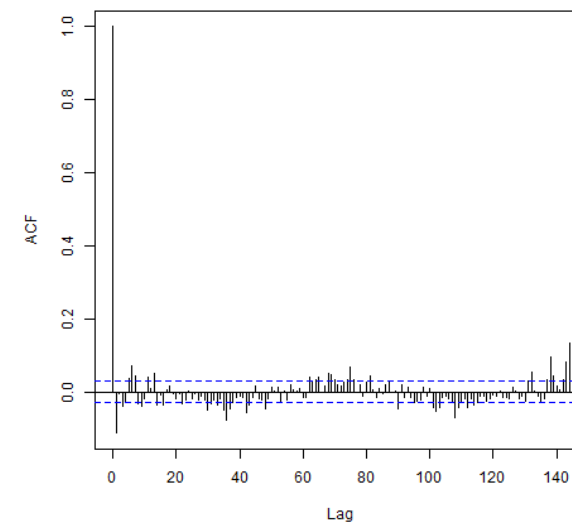


### RMSE

Daten 1 0,53 °C

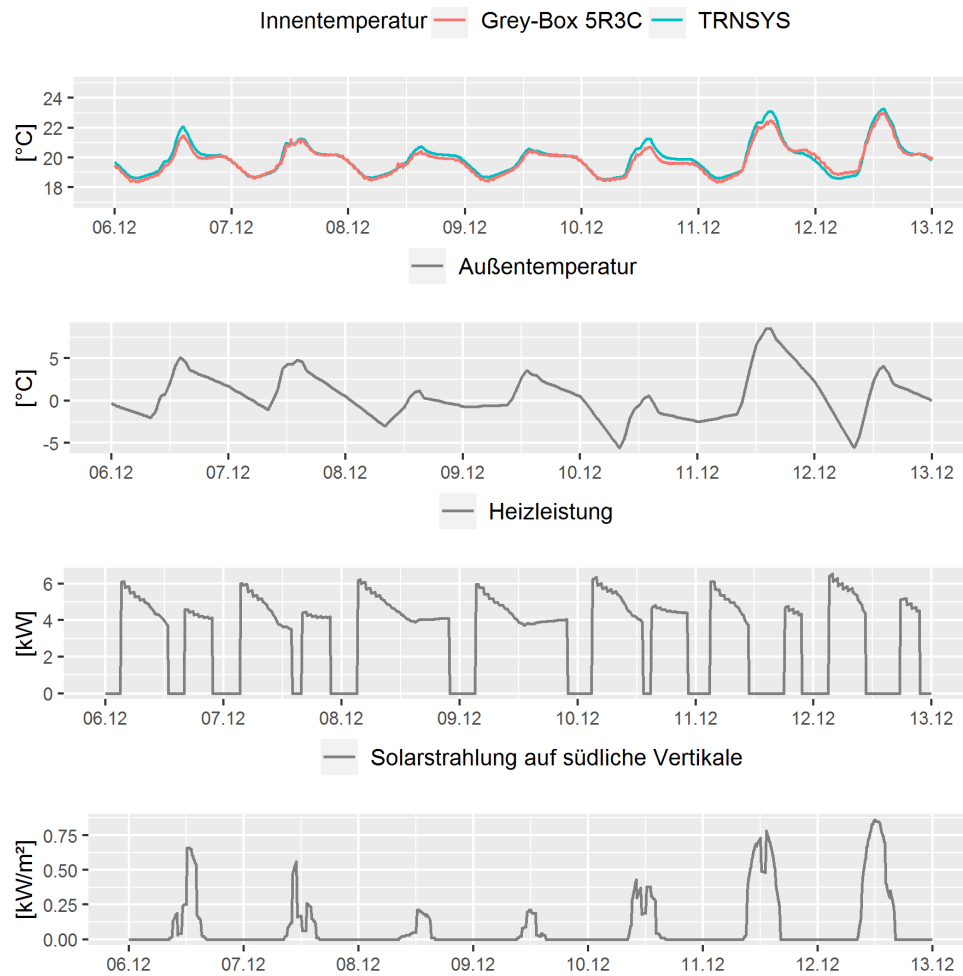
Daten 2 0,37 °C

### Autokorrelation Residuen



# Ergebnisse der 24h-Vorhersage

## 5R3C, Gebäudetyp J



---

### RMSE

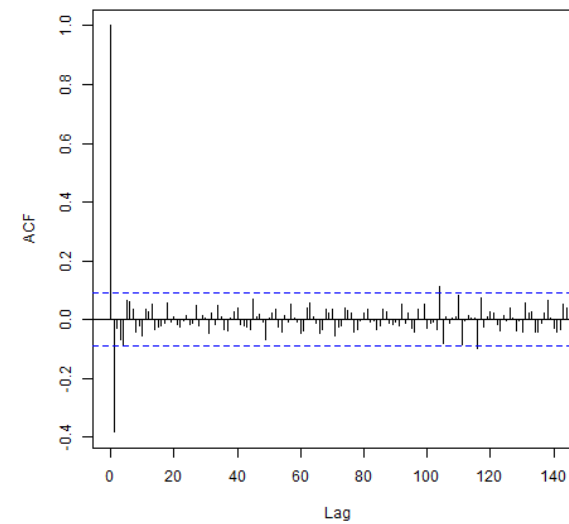
---

Daten 1 0,25 °C

Daten 2 0,27 °C

---

### Autokorrelation Residuen



## Schlussfolgerungen und Ausblick

- Analyse der **Systemauswirkungen von Power-to-heat-Anwendungen** erfordert adäquate Methoden zur Bestimmung des thermischen Gebäudeverhaltens – unter Berücksichtigung von Gebäudephysik, Wetter und Nutzerverhalten
- **Grey-Box-Modelle** für das thermische Gebäudeverhalten bieten guten Kompromiss aus Vorhersagegenauigkeit (RMSE < 0,3°C ggü. TRNSYS) und Recheneffizienz
- **Ausblick:**
  - Erstellung und Veröffentlichung von Grey-Box-Modellen für weitere Wohngebäudetypen
  - Integration des aggregierten Gebäudeverhaltens in ein agentenbasiertes Modell des deutschen Strommarktes für Demand-Response-Analysen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Kontakt:

Evelyn Sperber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Technische Thermodynamik | Abteilung Energiesystemanalyse

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

Telefon: +49 711 6862-8145

Dieser Beitrag basiert auf Inhalten des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekts „Systemintegration“: Energiewende-Navigationssystem (ENavi) (Förderkennzeichen 03SFK4D1), <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/systemintegration>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Literatur

- R. Brause, Adaptive Modellierung und Simulation, Rüdiger Brause, Ed., Frankfurt, 2010
- T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, Deutsche Wohngebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt, 2015
- TRNSYS, Transient System Simulation Program, University of Wisconsin, 2000
- R. Juhl, J.K. Møller, H. Madsen, ctsmr-Continuous Time Stochastic Modeling in R, arXiv Preprint arXiv:1606.00242, 2016
- R.C. Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018, <https://www.R-project.org/>

