

Grey-Box-Modellierung des thermischen Verhaltens von Typgebäuden

Evelyn Sperber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

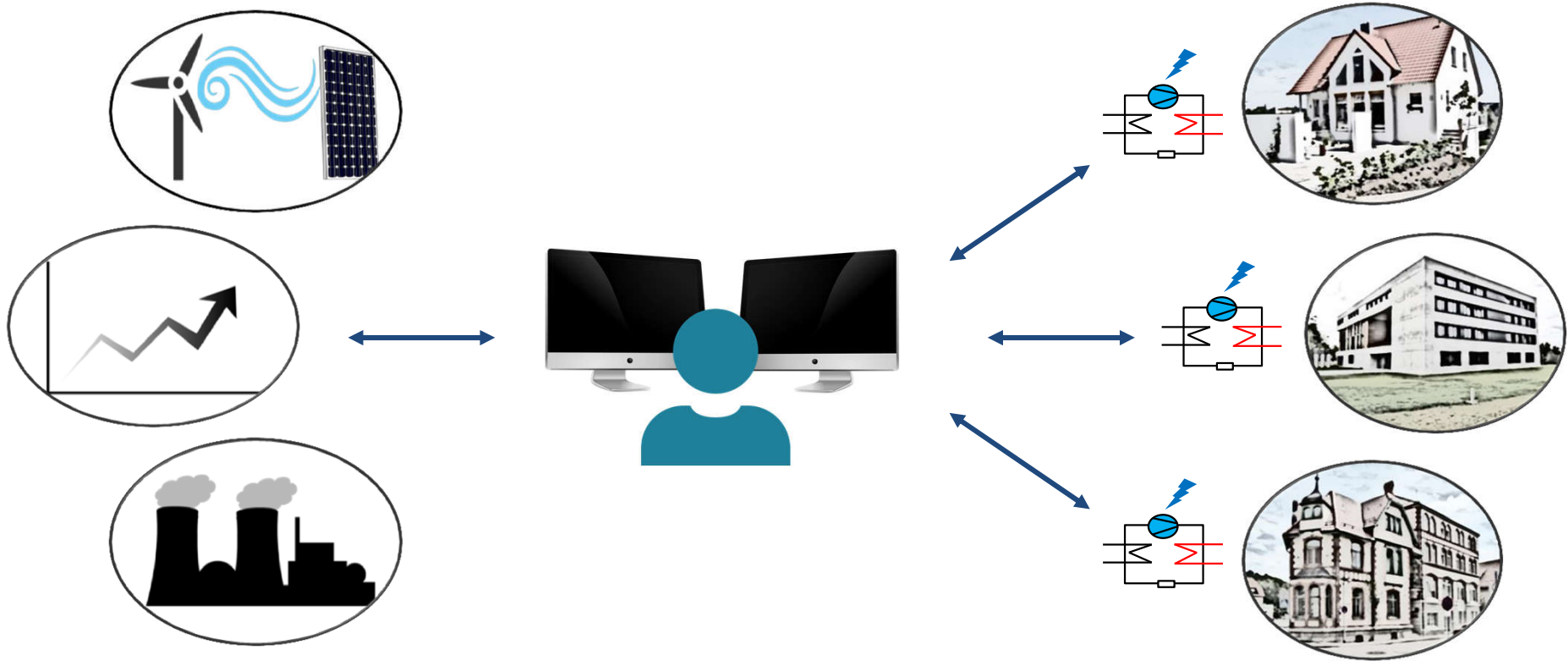
Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Energiesystemanalyse

7th International PhD Day of the AAEE Student Chapter

12. Februar 2019, Wien

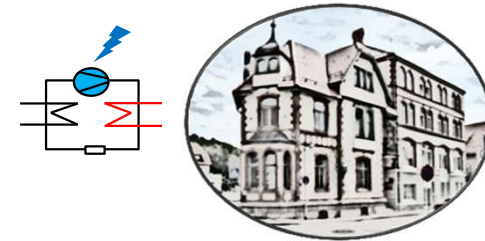
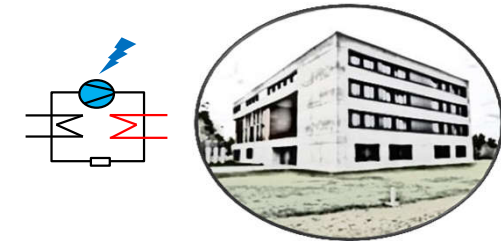
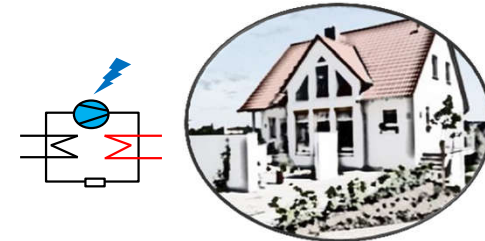


Motivation und Fragestellung



Motivation und Fragestellung

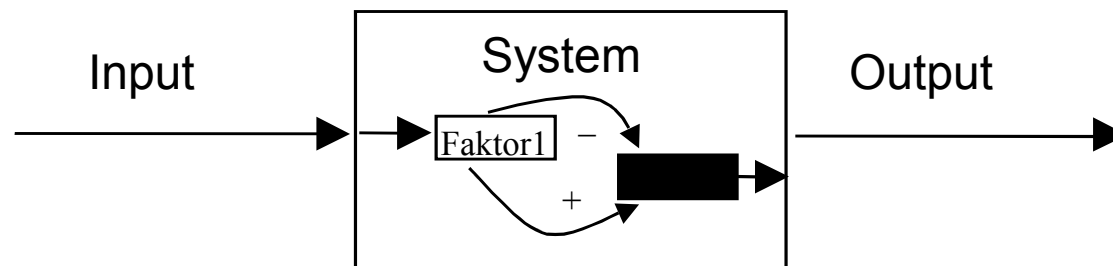
Wie kann Demand Response mit Wärmepumpen unter Berücksichtigung der Heterogenität des deutschen Gebäudebestands und seiner Bewohner in Energiesystemmodellen adäquat abgebildet werden?



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




Selektion und Charakterisierung von Typgebäuden



Baualterklasse	EFH	RH	MFH	GMH	HH
	Basis-Typen				
A	EFH_A		MFH_A		
B	EFH_B	RH_B	MFH_B	GMH_B	
C	EFH_C	RH_C	MFH_C	GMH_C	
D	EFH_D	RH_D	MFH_D	GMH_D	
E	EFH_E	RH_E	MFH_E	GMH_E	HH_E
F	EFH_F	RH_F	MFH_F	GMH_F	HH_F
G	EFH_G	RH_G	MFH_G		
H	EFH_H	RH_H	MFH_H		
I	EFH_I	RH_I	MFH_I		
J	EFH_J	RH_J	MFH_J		
K	EFH_K	RH_K	MFH_K		
L	EFH_L	RH_L	MFH_L		

EFH_G Heizsystem-Variante 1 1979 ... 1983 DE.N.SFH.07.Gen

Beispielgebäude




beheizte Wohnfläche: 196 m²
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, Vollsandlochsteinen, Porenbeton o.ä., teilweise mit dünner Außendämmung; bisweilen Taktel-Bauweise mit Leichtbau- oder Beton-Sandwich-Elementen ("Ferlighaus"); in Norddeutschland meist Klinker-Vorsatzschale



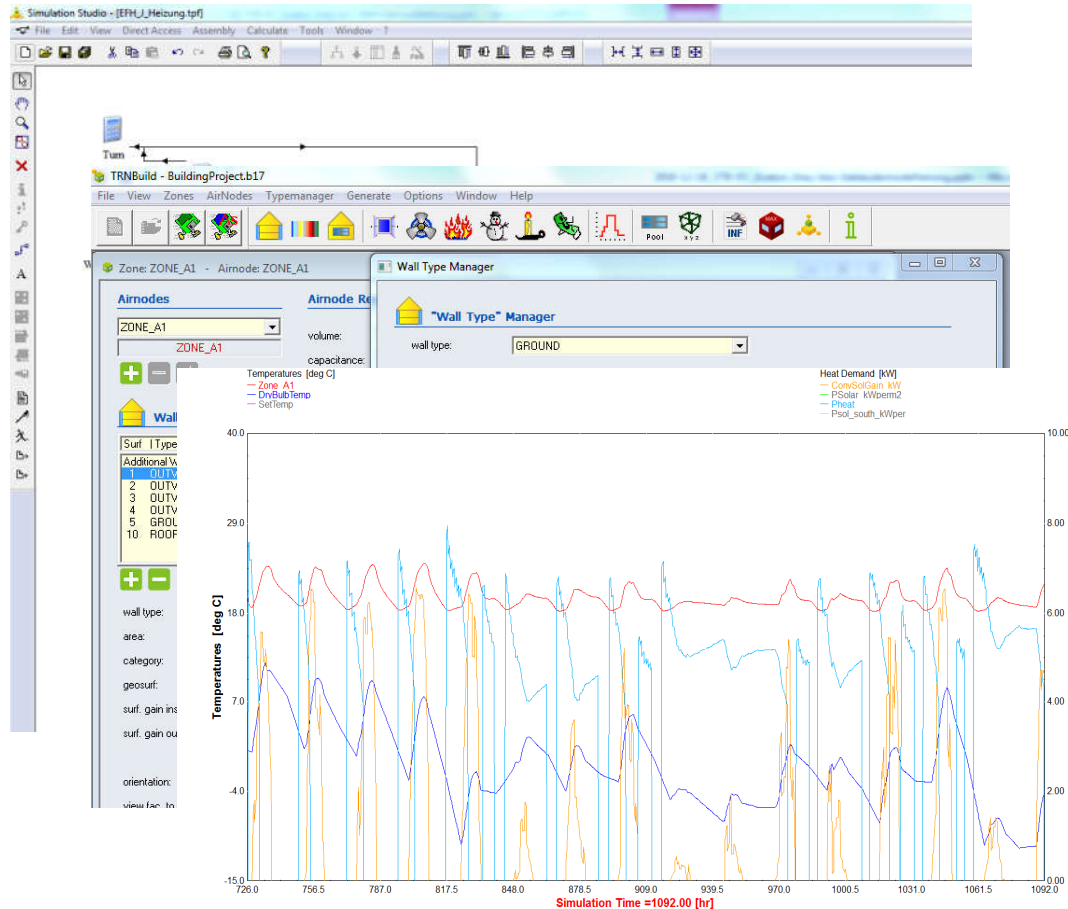
Beispielgebäude – Ist-Zustand

Konstruktion	Beschreibung	U-Wert W/(m ² 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 <small>Zweischeiben-Isolierverglasung im Aluminium- oder Stahlrahmen, ohne thermische Trennung (in späteren Jahren modernisiert, Original-Fenster nicht mehr erhalten)</small>	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



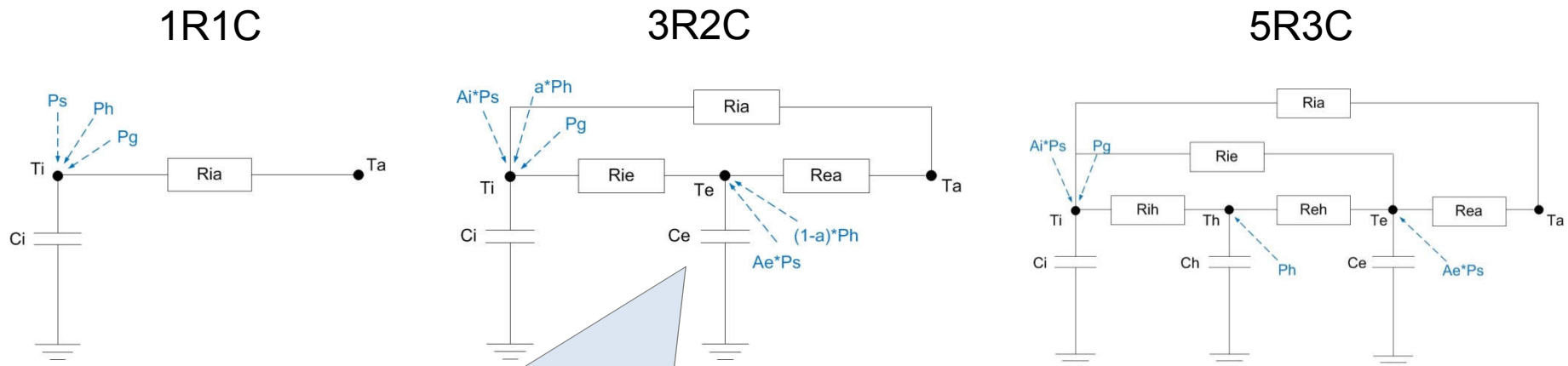
- Modellinput:
 - Wetterdaten
 - Heizregime
- Einzonen-Klötzchenmodell
- Parametrierung gemäß TABULA und eigenen Annahmen
- 10 min. Simulation
- Auslesung von Daten:
 - Innentemperatur
 - Heizwärmeleistung
 - Solarstrahlung

➔ **Referenzdatensatz für jedes Typgebäude**



Grey-Box Modellformulierung

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



$$dT_i = [1/(C_i * R_{ie}) * (T_e - T_i) + 1/(C_i * R_{ia}) * (T_a - T_i) + a_h / C_i * P_h + 1/C_i * P_g + A_i / C_i * P_s] * dt + e_1 * dw_1$$

$$dT_e = [1/(C_e * R_{ie}) * (T_i - T_e) + 1/(C_e * R_{ea}) * (T_a - T_e) + (1 - a_h) / C_e * P_h + A_e / C_e * P_s] * dt + e_2 * dw_2$$



Grey-Box Parameterschätzung

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

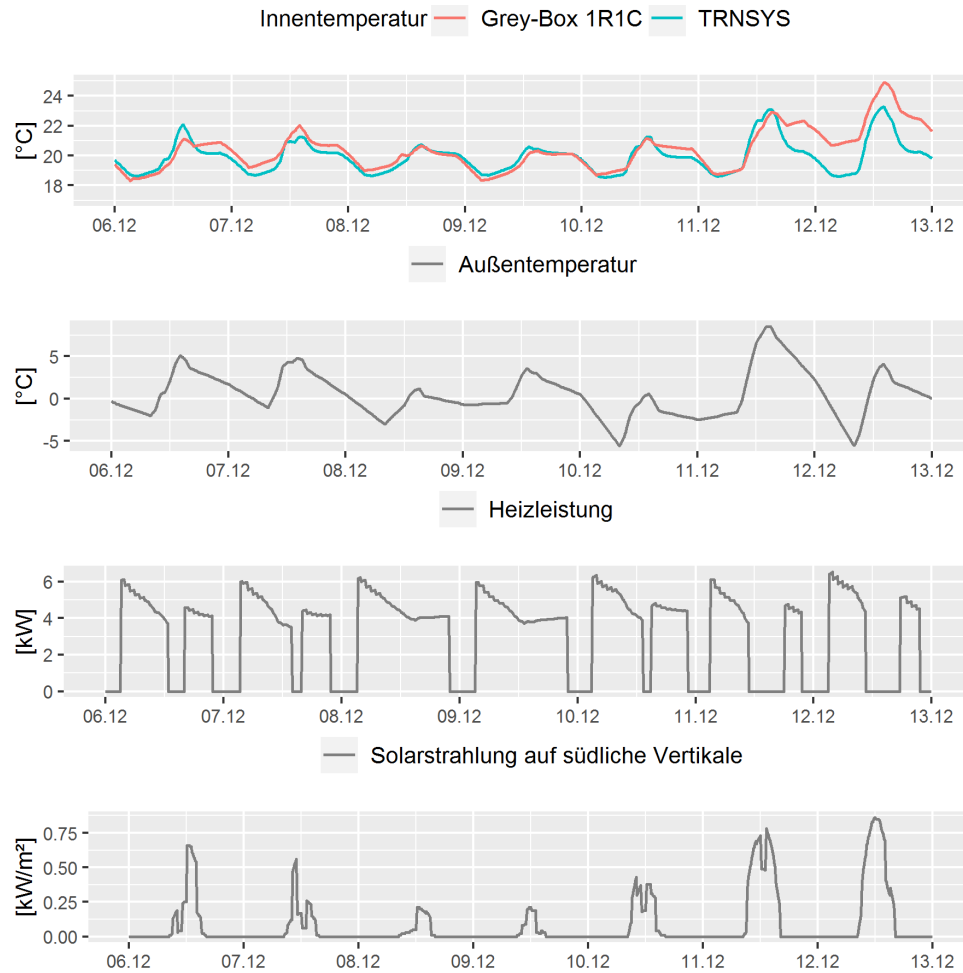
	Trainingsdatensatz	Testdatensatz
Daten 1	1. Januar – 30. Juni	1. – 31. Dezember
Daten 2	1. Januar – 30. Juni	1. – 31. Oktober

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



Ergebnisse der 24h-Vorhersage

1R1C, Gebäudetyp J

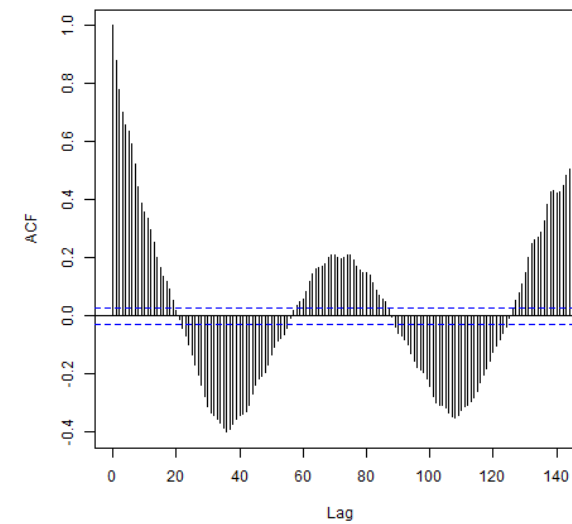


RMSE

Daten 1 0,81 °C

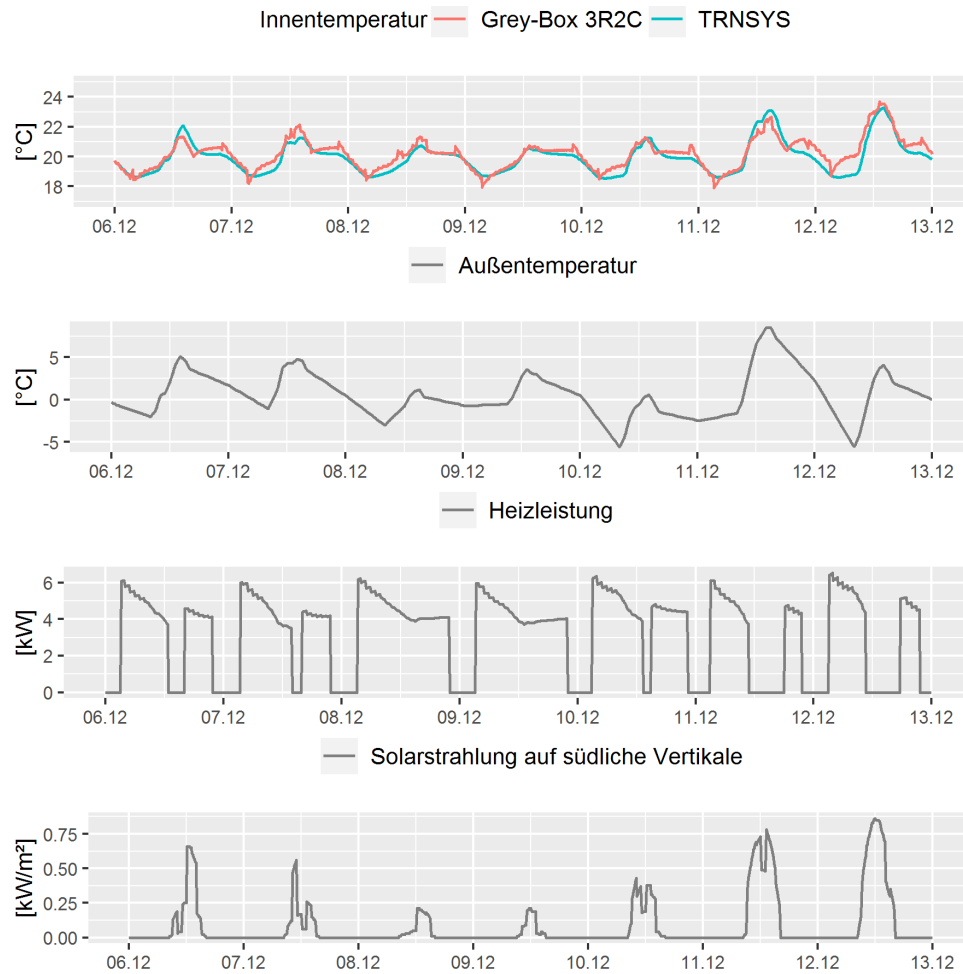
Daten 2 0,98 °C

Autokorrelation Residuen



Ergebnisse der 24h-Vorhersage

3R2C, Gebäudetyp J

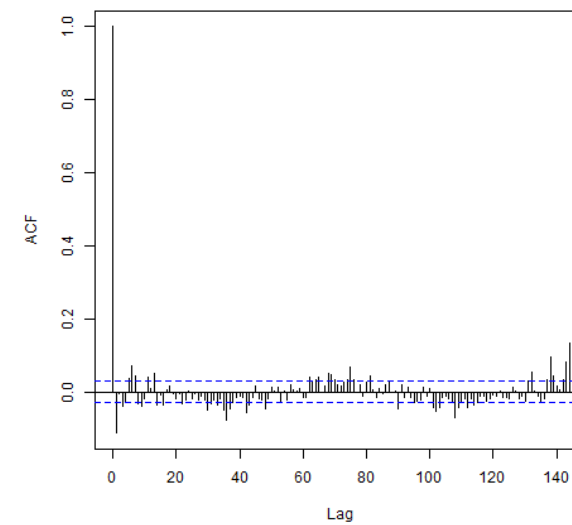


RMSE

Daten 1 0,53 °C

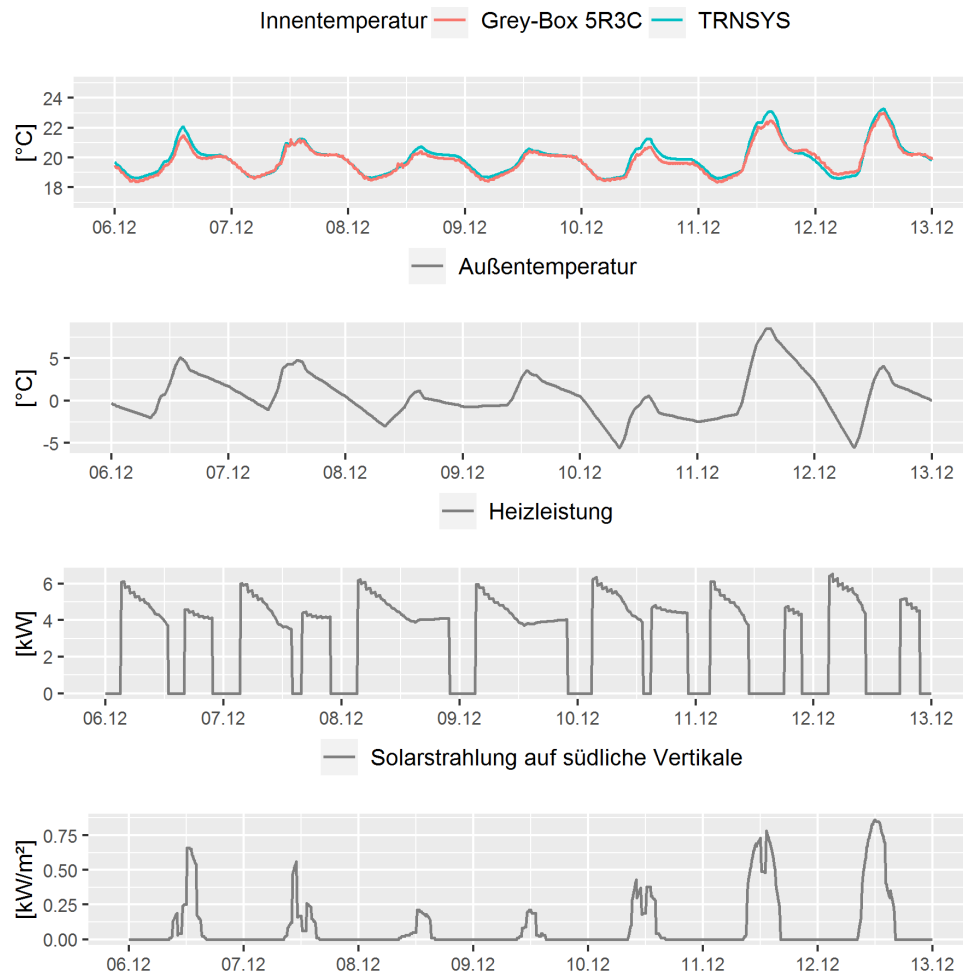
Daten 2 0,37 °C

Autokorrelation Residuen



Ergebnisse der 24h-Vorhersage

5R3C, Gebäudetyp J

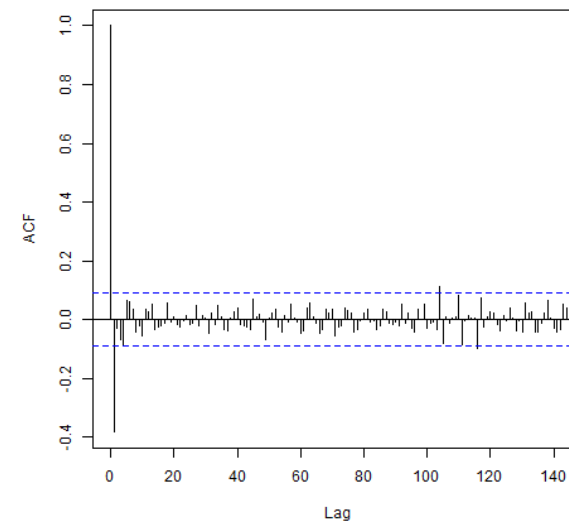


RMSE

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

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/>

