

Grey-Box-Modellierung des thermischen Verhaltens von Typgebäuden

Evelyn Sperber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik,
Abteilung Energiesystemanalyse, Pfaffenwaldring 38-40, D 70569 Stuttgart,
+49 711 6862 8145, evelyn.sperber@dlr.de, www.dlr.de/tt/system

Kurzfassung:

Wärmepumpen in Gebäuden können in zukünftigen Energiesystemen mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien als wichtige Flexibilitätsoption dienen, da die thermische Gebäudemasse als Speicher genutzt werden kann. Für die Erschließung und energiesystemanalytische Bewertung dieser Flexibilität werden Methoden benötigt, die das thermische Verhalten abhängig von Wetter, Strommarktsignalen, Nutzerpräferenzen und den gebäudephysikalischen Eigenschaften vorhersagen können. In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise zur Erstellung geeigneter Prädiktionsmodelle für das thermische Gebäudeverhalten auf Basis einer Grey-Box-Modellierung vorgestellt. Dabei wird eine vereinfachte Beschreibung der physikalischen Gebäudestruktur mit Messdaten kombiniert. Die Modellierung wird für repräsentative Gebäudetypen anhand der deutschen Wohngebäudetypologie vorgenommen, um Aussagen über das aggregierte Verhalten des deutschen Wohngebäudebestands treffen zu können. Die Ergebnisse der geschätzten Grey-Box-Modelle zeigen eine zufriedenstellende Vorhersage der Innenraumtemperatur von Typgebäuden.

Keywords: Grey-Box-Modellierung, thermisches Gebäudeverhalten, Gebäudetypologie, Demand Response

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Mit zunehmender Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien wird es notwendig, das Energiesystem zu flexibilisieren, um Erzeugung und Verbrauch in Einklang zu halten. Elektrisch basierte Heizsysteme in Gebäuden, z.B. Wärmepumpen, stellen eine wichtige Option für die Flexibilisierung dar. Aufgrund der thermischen Speichermasse der Gebäude kann hier die Stromnachfrage vom Wärmebedarf innerhalb gewisser zeitlicher Grenzen entkoppelt werden. In zukünftigen Smart-Grid-Systemen ist es daher denkbar, Wärmepumpen basierend auf den Signalen der Strommärkte und des prognostizierten Heizwärmebedarfs modellprädiktiv zu regeln.

Um den Nutzen von Demand Response für die Integration erneuerbarer Energien systemanalytisch bewerten zu können, ist ein Verständnis des thermischen Verhaltens von Gebäuden auf variierende Heizsignale essentiell. Für die Berechnung der Wärmelast sind darüber hinaus gebäudephysikalische Aspekte, das Wetter und das Nutzerverhalten der

Bewohner zu berücksichtigen. Bestehende Simulationstools mit detaillierter physikalischer Beschreibung der Gebäude, z.B. TRNSYS [1] oder EnergyPlus™ [2], sind meist zu komplex und rechenintensiv, um in Energiesystemmodelle eingebunden zu werden.

Die vorliegende Untersuchung geht der Frage nach, wie das thermische Gebäudeverhalten möglichst einfach und trotzdem hinreichend genau in Energiesystemmodellen abgebildet werden kann. Als Fallbeispiel wird der deutsche Wohngebäudebestand betrachtet. Ziel ist es, energiesystemanalytische Modelle derart weiterzuentwickeln, dass belastbare Analysen zu den Auswirkungen von Demand Response im Raumwärmebereich auf das Energiesystem durchgeführt werden können.

2 Methodische Vorgehensweise

Um das thermische Verhalten aller Wohngebäude in Deutschland abbilden zu können, werden zunächst repräsentative Typgebäude (Abschnitt 2.1) modelliert. Diese Typgebäude bilden durch Aggregation näherungsweise den deutschen Wohngebäudebestand ab. Zur Modellierung des thermischen Gebäudeverhaltens wird ein Grey-Box-Ansatz verfolgt (Abschnitt 2.2). Die Grey-Box-Modellierung ist ein etabliertes Verfahren im Bereich der modellprädiktiven Regelung von Gebäuden [3–5], dessen breite Anwendung auf möglichst repräsentative Gebäudetypen für landesweite Systemanalysen noch aussteht.

2.1 Auswahl und Charakterisierung von Typgebäuden

Als zentrale Quelle für die bauliche und energetische Charakterisierung repräsentativer Wohngebäude wird die deutsche Gebäudetypologie [6] herangezogen. Die Gebäudetypologie gruppiert den deutschen Wohngebäudebestand in Größen- und Baualtersklassen („Basistypen“) mit Fokus auf energetische Gesichtspunkte. Für jede Klasse werden reale Einzelgebäude beschrieben, deren Eigenschaften repräsentativ für die jeweilige Gebäudeklasse ist. Die angegebenen energetischen Charakteristika je Typgebäude umfassen u.a. Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudebauteile, Bauteilflächen, Konstruktionsweisen, Maßnahmen zur Wärmedämmung und resultierenden Heizwärmebedarf. Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt auf Einfamilienhäusern, die für Wärmepumpen den wesentlichen Einsatzort darstellen. Einfamilienhäuser werden in der Gebäudetypologie durch zwölf Basis-Typen mit jeweils drei Sanierungszuständen beschrieben.

2.2 Grey-Box-Modellierung

Grey-Box-Modelle bestehen aus einer vereinfachten, physikalischen Beschreibung des Systemverhaltens von Gebäuden, dessen Parameter mit Hilfe von gemessenen Input- und Outputdaten geschätzt werden. Sie sind damit eine Kombination aus White-Box-Modellen, die auf einer rein theoretischen und komplexen Modellbeschreibung basieren, und Black-Box-Modellen, die rein datengetrieben sind und denen keine Annahme über die Modellstruktur zugrunde liegt.

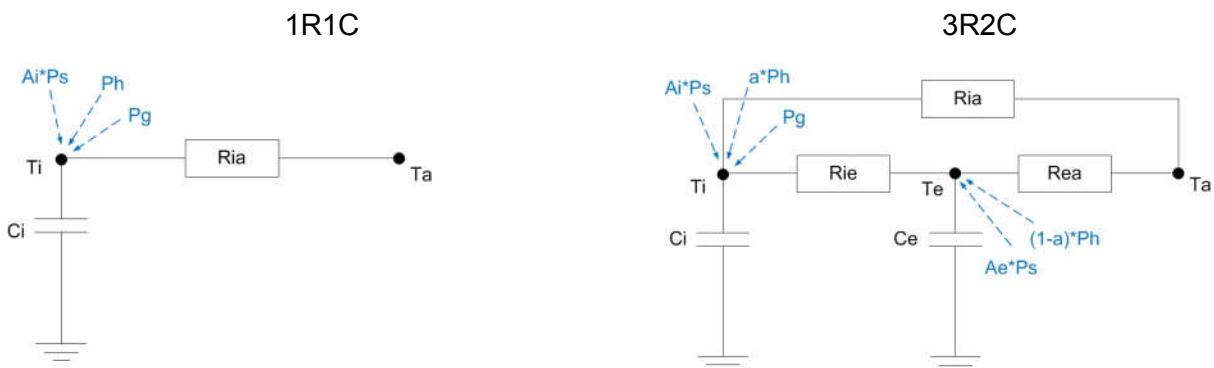
2.2.1 Erstellung eines Referenzdatensatzes

Für die Schätzung der Parameter des Grey-Box-Modells werden Daten zum thermischen Verhalten der repräsentativen Typgebäude benötigt. Reale Messdaten dieser Typgebäude liegen allerdings nicht vor. Daher werden sie in dieser Studie auf Basis eines komplexen physikalischen Gebäudemodells – einem White-Box-Modell – mit der Simulationssoftware TRNSYS ermittelt. Hierzu werden die energierelevanten Angaben zu den Typgebäuden aus der Gebäudetypologie in TRNSYS überführt und um eigene Annahmen insbesondere zur Gebäudeausrichtung, zu Materialeigenschaften der Gebäudekomponenten und zum Heizverteilssystem ergänzt. Vereinfacht werden die Typgebäude in TRNSYS als Einzonenmodelle parametrisiert; zudem werden Infiltration und interne Wärmegewinne als konstant angenommen. Die Simulationen zum Gebäudeverhalten der einzelnen Typgebäude werden in zehnminütiger Auflösung in Abhängigkeit der Heizleistung und des Wetters durchgeführt. Der resultierende Jahresheizwärmebedarf wird jeweils mit den Angaben aus der Gebäudetypologie gegengeprüft.

2.2.2 Grey-Box-Modellformulierung

Grey-Box-Modelle werden durch ein lineares, stochastisches Zustandsraummodell repräsentiert. Die Formulierung der Modelle erfolgt analog zu elektrischen Netzwerken. Dabei werden Annahmen zur Struktur des thermischen Systems in ein Netzwerk aus thermischen Widerständen (R) und Kapazitäten (C) überführt. Im Gegensatz zu White-Box-Modellen sind die Parameter R und C bei Grey-Box-Modellen pauschaliert, d.h. sie fassen das physikalische Verhalten einer Gruppe von thermischen Gebäudekomponenten in einem Parameter zusammen. Ihr geschätzter Wert kann daher nur in gewissen Grenzen mit den theoretischen Werten verglichen werden.

In der vorliegenden Studie werden für jedes Typgebäude verschiedene Grey-Box-Modelle mit zunehmender Komplexität formuliert, trainiert und anschließend getestet und evaluiert. Ihre RC-Netzwerk-Repräsentationen sind in Abbildung 1 dargestellt. Im einfachsten Modell 1R1C werden die thermische Kapazität des Gebäudes in nur einem C und der thermische Widerstand in einem R zusammengefasst. Das Modell 3R2C erweitert das 1R1C-Modell um eine zweite Kapazität, um zwischen der schnellen Dynamik der Raumluft und des trügeren Verhaltens der Gebäudehülle unterscheiden zu können. Im Modell 4R3C wird eine weitere Kapazität für die Heizkörper ergänzt. Das Modell 5R3C erweitert das Modell 4R3C um eine detailliertere physikalische Beschreibung der Wärmeübergänge zwischen den einzelnen Knoten.



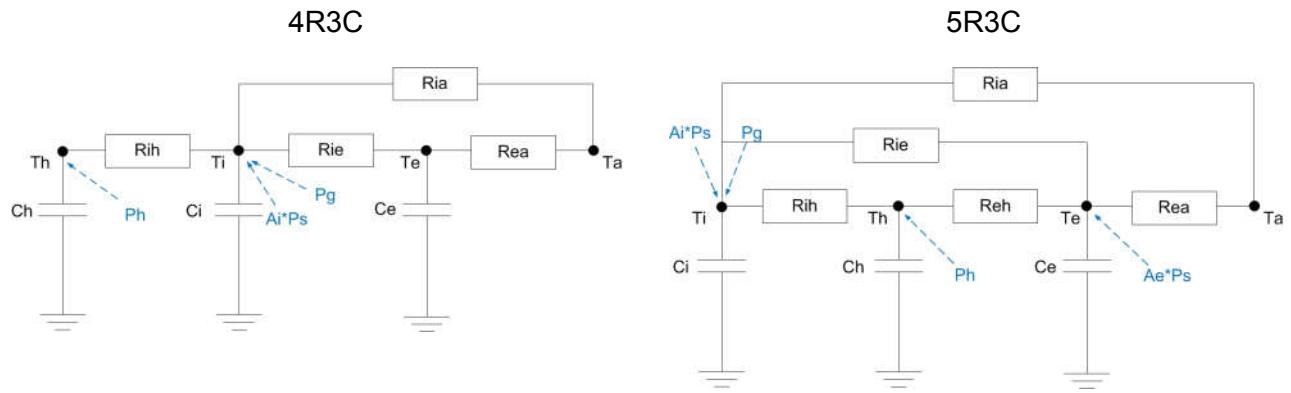


Abbildung 1: RC-Darstellungen der untersuchten Gebäudemodelle

Die thermischen Inputs Heizleistung, Solarstrahlung, Außentemperatur und interne Gewinne werden auf die unterschiedlichen Knoten gemäß Abbildung 1 verteilt. Eine Erläuterung der verwendeten Kürzel findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Erläuterung der verwendeten Variablen in den RC-Modellen

Kürzel	Beschreibung	Einheit
Ti	Temperatur innen (Raumluft)	[°C]
Te	Temperatur extern (Gebäudehülle)	[°C]
Th	Temperatur der Heizkörper	[°C]
Ta	Temperatur außen	[°C]
Ph	Heizleistung	[kW]
Pg	Interne Gewinne	[kW]
Ps	Solarstrahlung auf südliche Vertikale	[kW/m²]
Ria	Wärmewiderstand innen-außen	[°C/kW]
Rie	Wärmewiderstand innen-Gebäudehülle	[°C/kW]
Rea	Wärmewiderstand Gebäudehülle-außen	[°C/kW]
Reh	Wärmewiderstand Gebäudehülle-Heizung	[°C/kW]
Rih	Wärmewiderstand innen-Heizung	[°C/kW]
Ci	Kapazität innen	[kWh/°C]
Ce	Kapazität Gebäudehülle	[kWh/°C]
Ch	Kapazität der Heizkörper	[kWh/°C]
Ai	Effektive Fensterfläche, durch die Solarstrahlung im Gebäudeinneren nutzbar gemacht wird	[m²]
Ae	Effektive Fensterfläche, durch die Solarstrahlung an der Gebäudehülle nutzbar gemacht wird	[m²]
a	Faktor zur Aufteilung der Heizleistung auf die Knoten	[-]

Aus den angegebenen RC-Darstellungen der Modelle werden Differentialgleichungssysteme abgeleitet und für die Modellschätzung angesetzt.

2.2.3 Parameterschätzung

Die Parameterschätzung für die Grey-Box-Modelle jedes Gebäudetyps erfolgt mittels der Maximum-Likelihood-Methode. Hierzu wird das Paket „Continuous Time Stochastic Modeling“ (CTSM-R) [7] in R [8] genutzt.

Die Eingangsdaten für die Parameterschätzung sind Heizleistung, Außentemperatur, Solarstrahlung auf südliche Vertikale sowie interne Gewinne. Diese wurden bereits als Inputdaten für TRNSYS genutzt (Außentemperatur, interne Gewinne) bzw. als Prozessgröße mit TRNSYS berechnet (Heizleistung, Solarstrahlung auf südliche Vertikale). Als Outputdaten wird der mit TRNSYS berechnete Verlauf der Innenraumtemperatur genutzt.

Das Grey-Box-Modell wird mit einem Datensatz im Umfang von 6 Monaten in zehnminütiger Auflösung trainiert. Für den Test des Modells werden einmonatige Datensätze jeweils für Dezember (volle Heizperiode) und Oktober (Übergangszeit mit längeren Perioden ohne Heizwärmebedarf) verwendet, um die Generalität des Modells zu prüfen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Trainings- und Testdatensatz

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

2.2.4 Modellevaluation

Die Modellgüte wird anhand folgender Indikatoren bewertet:

- Root Mean Square Error (RMSE)
- Autokorrelation der Residuen
- Interpretation der Plots der Prädiktion
- Plausibilität der identifizierten Parameter

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellschätzung exemplarisch für das Typgebäude J (Bauperiode 2002-2009) dargestellt.

In Abbildung 2 werden die 24 h-Prädiktion der Innenraumtemperatur gemäß den vier geschätzten Grey-Box-Modellen und der durch TRNSYS ermittelten Referenzdaten für eine Winterwoche (Ausschnitt aus Daten 1) gegenübergestellt. Die zugehörigen Inputdaten des Testdatensatzes sind in Abbildung 3 dargestellt. Das Modell 1R1C zeigt bereits relativ gute Übereinstimmungen bezüglich der Innentemperaturen für Perioden, die durch geringe Schwankungen der Inputs gekennzeichnet sind (8. – 9. Dezember, gleichmäßige Heizung, wenig Solarstrahlung). Es ist jedoch nicht geeignet, um das thermische Verhalten in Folge hoher Fluktuationen der Inputs abzubilden (11. – 12. Dezember). Das Modell 3R2C kann diese Dynamiken bereits besser erfassen, zeigt aber insbesondere beim An- und Ausschalten der Heizung sprunghafte Verhalten und damit Abweichungen von TRNSYS. Die Modelle 4R3C und 5R3C, die eine zusätzliche Kapazität für die Heizkörper berücksichtigen, zeigen eine gute Übereinstimmung mit TRNSYS.

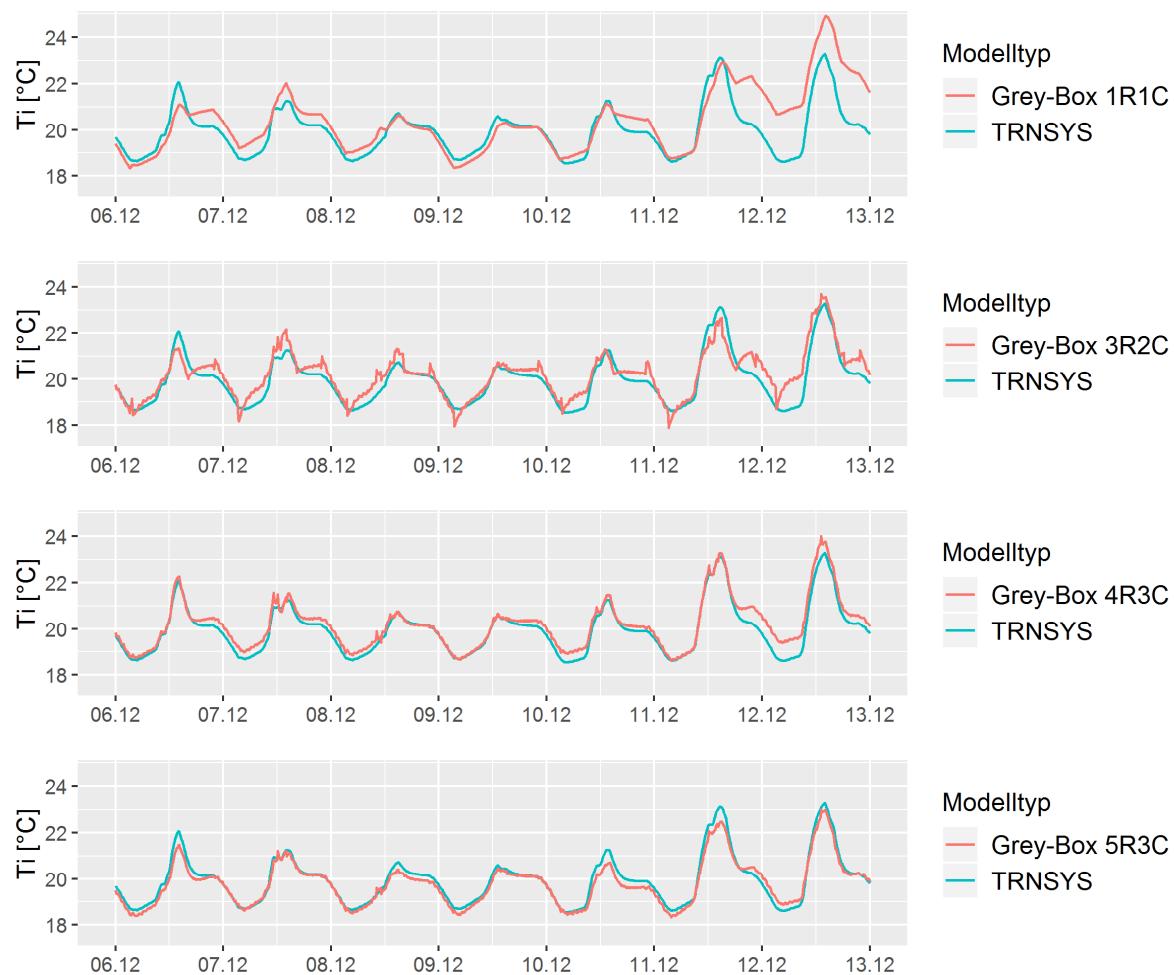


Abbildung 2: 24 h-Vorhersage der Innenraumtemperatur gemäß den vier betrachteten Grey-Box-Modellen (rot) gegenüber der TRNSYS-Referenz (türkis), Daten 1

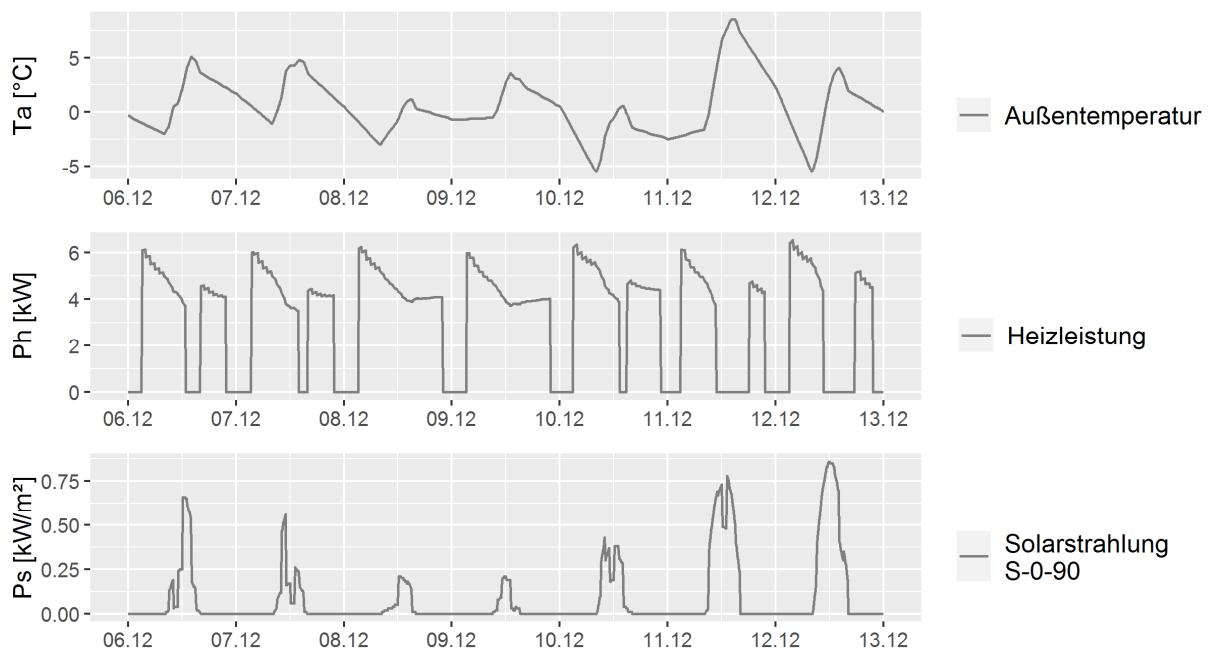


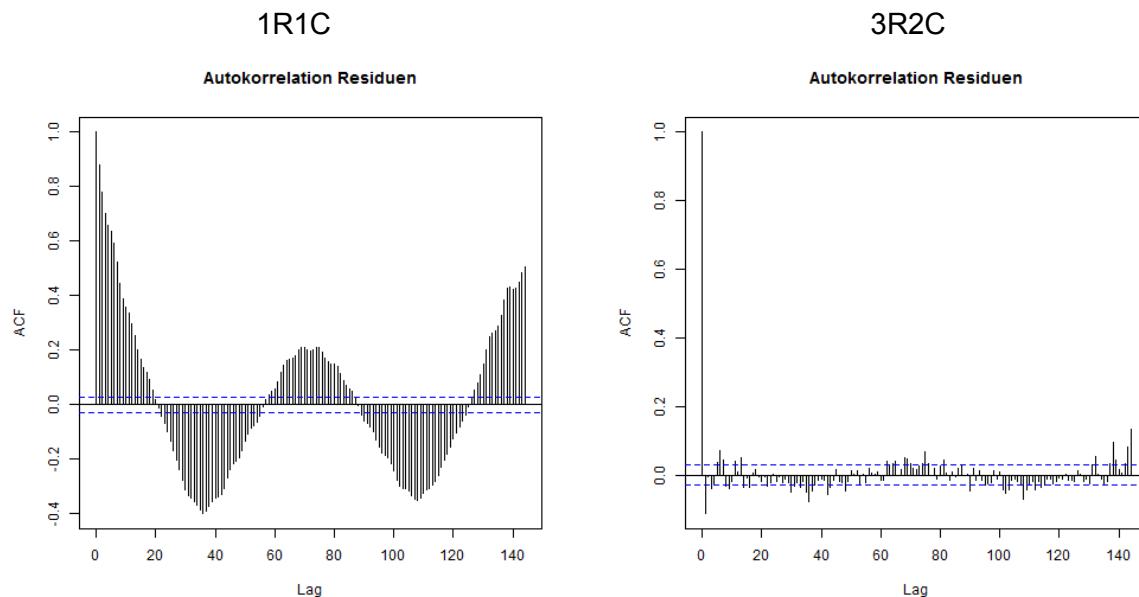
Abbildung 3: Inputdaten des Testdatensatzes (Ausschnitt), Daten 1

Tabelle 3 zeigt die RMSE-Werte für die 24 h-Vorhersage der Innenraumtemperatur der unterschiedlichen Modelle für die beiden betrachteten Testdatenperioden. Die beste Modellgüte für den Datensatz der Heizperiode (Daten 1) erreicht das Modell 5R3C mit einem RMSE von 0,25 °C. Wie ersichtlich ist, verbessert sich der RMSE zwischen den Modellen 4R3C und 5R3C nicht mehr deutlich. Die RMSE-Werte unterscheiden sich zwischen den beiden Datenperioden für die einfacheren Modelle recht deutlich, was auf mangelnde Generalisierbarkeit dieser Modelle hinweist. Für das Modell 5R3C sind die RMSE-Werte für beide Datenperioden jedoch ähnlich.

Tabelle 3: RMSE-Werte für die 24 h-Vorhersage der verschiedenen Modelle

RMSE	1R1C	3R2C	4R3C	5R3C
Daten 1	0,81 °C	0,53 °C	0,33 °C	0,25 °C
Daten 2	0,98 °C	0,37 °C	0,20 °C	0,27 °C

Die bessere Modellgüte der komplexeren Modelle wird auch durch die Autokorrelation der Residuen bestätigt (Abbildung 4). Während die Residuen der Modelle 1R1C und 3R2C zum Teil deutliche Muster aufweisen, sind die Residuen der Modelle 4R3C und 5R3C eher zufällig verteilt und zeigen für das komplexeste Modell 5R3C kaum Autokorrelation.



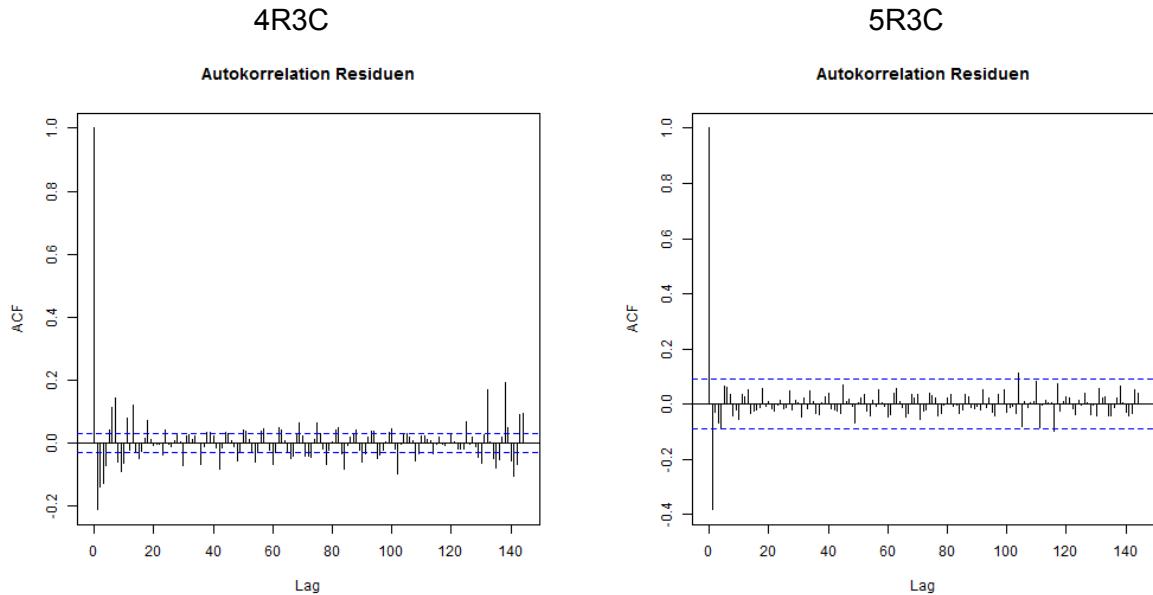


Abbildung 4: Autokorrelation der Residuen der getesteten Modelle

Die Werte der geschätzten Parameter sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Die Parameter haben für die verschiedenen Modelle teilweise unterschiedliche Bedeutungen und können daher nicht direkt miteinander verglichen werden. Sie weisen jedoch zumindest für die Modelle ab zweiter Ordnung ähnliche Größenordnungen auf, die auch plausibel in Bezug auf die theoretischen Werte sind.

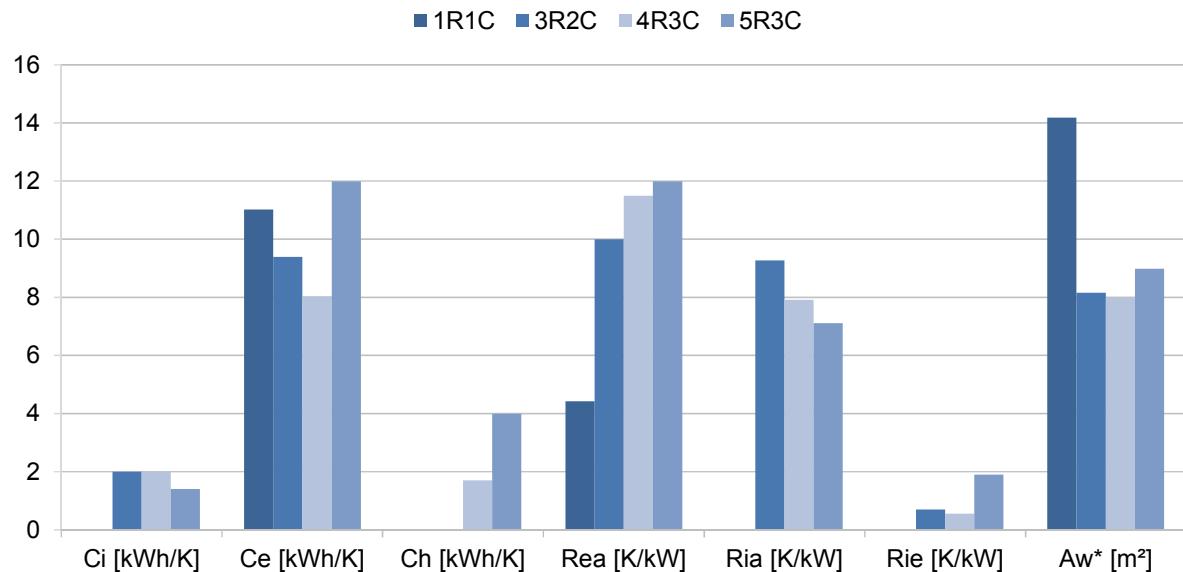


Abbildung 5: Ergebnisse der Schätzung der wesentlichen Parameter der getesteten Modelle. A_w entspricht A_i für die Modelle 1R1C und 4R3C, und entspricht $A_i + A_e$ für die anderen beiden Modelle.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass reduzierte Gebäudemodelle auf Basis einer Grey-Box-Modellierung zwar kleinere Diskrepanzen bezüglich der Vorhersage des thermischen Gebäudeverhaltens gegenüber dem komplexen Simulationswerkzeug TRNSYS aufweisen. Diese können jedoch zugunsten der einfachen Einbindung von Grey-Box-Modellen in

komplexe und landesweite Energiesystemmodelle in Kauf genommen werden. Mit dem genauesten Grey-Box-Modell wird ein RMSE von 0,25 °C erreicht, was für den Zweck der energiesystemanalytischen Modellierung hinreichend genau ist.

In weiterführenden Arbeiten werden Grey-Box-Modelle für alle Einfamilienhaustypen der deutschen Gebäudetypologie erstellt und veröffentlicht. Dies wird es ermöglichen, systemanalytische Demand-Response-Studien im Raumwärmebereich möglichst genau für einen relevanten Anteil des deutschen Wohngebäudebestands durchzuführen.

5 Danksagung

Dieser Beitrag basiert unter anderem auf Inhalten des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekts „Systemintegration“: Energiewende-Navigationssystem (ENavi) (Förderkennzeichen 03SFK4D1).

Literatur

- [1] A. Trnsys, Transient System Simulation Program, University of Wisconsin. (2000).
- [2] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, C.O. Pedersen, F.C. Winkelmann, Energy plus: energy simulation program, ASHRAE Journal. 42 (2000) 49–56.
- [3] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, Energy and Buildings. 43 (2011) 1511–1522.
- [4] H. Harb, N. Boyanov, L. Hernandez, R. Streblow, D. Müller, Development and validation of grey-box models for forecasting the thermal response of occupied buildings, Energy and Buildings. 117 (2016) 199–207.
- [5] G. Reynders, J. Diriken, D. Saelens, Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals, Energy and Buildings. 82 (2014) 263–274.
- [6] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt, 2015.
- [7] R. Juhl, J.K. Møller, H. Madsen, ctsmr-Continuous Time Stochastic Modeling in R, arXiv Preprint arXiv:1606.00242. (2016).
- [8] R.C. Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018. <https://www.R-project.org/>.