

NUMERISCH STABILES THERMISCHES GEBÄUDEMODELL FÜR DIE ELEKTRISCHE SIMULATION VON NIEDERSPANNUNGSNETZEN

Hannes HANSE¹, Ines HAUER²

Einordnung und Motivation

Durch die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung in Wohngebieten mittels Wärmepumpen gewinnt die thermische Gebäudemodellierung zunehmend an Bedeutung für die Simulation und Optimierung von Niederspannungsnetzen. Mit der Entstehung zusätzlicher Märkte für elektrische Flexibilität und der Möglichkeit, Stromverbrauch und Wärmebereitstellung im Gebäude zeitlich zu entkoppeln, wird eine detaillierte thermische Modellierung zu einer zentralen Voraussetzung, um die Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Stromnetz präzise abzubilden [1]. Dazu gehören die Darstellung thermischer Speicherkapazitäten, dynamischer Effekte und thermischer Trägheiten. Diese spielen eine wesentliche Rolle bei der realistischen Bewertung des Flexibilitätspotenzials von Gebäuden in energiewirtschaftlichen Analysen sowie zur Untersuchung der Netzstabilität.

Problemstellung und Lösungsansatz

Bei der Simulation von Niederspannungsquartieren steigt der Rechenaufwand durch immer komplexer optimierende Energiemanagementsysteme an. Dadurch entsteht die Notwendigkeit, bei der Simulation größerer Quartiere den Simulationsaufwand auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Das impliziert unter anderem die Begrenzung der zeitlichen Auflösung auf Zeitschritte von z.B. 10 oder 15 Minuten.

Bei der herkömmlichen thermischen Gebäudemodellierung über RC-Glieder werden die Differenzialgleichungen (DGL) der Wärmeübertragung durch das einfach zu implementierende, explizite Euler-Verfahren diskretisiert [2], [3]. Dieses Verfahren führt jedoch bei zu großen Zeitschritten zu numerischen Instabilitäten. Eine andere gängige Methode ist die analytische Lösung der DGL mit stückweise linearen Funktionen, die auch in der ISO Norm zur thermischen Berechnung von Gebäuden verwendet wird [4]. Die dort verwendete Methode gilt aber nur für zeitinvariante Systeme und ist damit nicht anwendbar, wenn in der Simulation durch die Steuerung der Heizung in das System eingegriffen wird.

Dieses Paper schlägt einen neuen, zeitvarianten Simulationsansatz für die Modellierung thermischer RC-Modelle vor, in dem die zeitliche Diskretisierung der DGL durch das numerisch stabile Crank-Nicolson-Verfahren erfolgt. Durch dieses Vorgehen sind deutlich größere Zeitschritte möglich und die Genauigkeit steigt.

Aufbau des RC-Gebäude-Modells

Zur Simulation des thermischen Verhaltens eines Gebäudes wurde das RC-Modell von [3] verwendet, welches das 3R2C-Modell von [5] um eine steuerbare Fußbodenheizung erweitert. Das Verhalten der thermischen Speicher wird durch ein geschichtetes Modell dargestellt.

Implementierung und Python-Bibliothek zur Modellerstellung

Zur Implementierung des neuen Modellierungsansatzes wurde die Python-Bibliothek *ThermoBuildPy* entwickelt [6]. Sie übernimmt den Aufbau des Gleichungssystems, die Simulation und die Auswertung. Dadurch lassen sich sowohl explizite als auch implizite Verfahren flexibel erstellen und vergleichen.

¹ Hannes Hanse*, Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, Leibnizstraße 28 38678 Clausthal-Zellerfeld, 05323 72-2595,
hannes.hanse@tu-clausthal.de, iee.tu-clausthal.de

² Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer, Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, Leibnizstraße 28 38678 Clausthal-Zellerfeld, 05323 72-2176,
ines.hauer@tu-clausthal.de, iee.tu-clausthal.de

Ergebnisse: Genauigkeit und Rechenzeit

Die Vergleichsuntersuchungen zeigen deutliche Vorteile des Crank–Nicolson-Verfahrens gegenüber dem explizitem und implizitem Euler-Verfahren. Abbildung 1 (links) verdeutlicht am Beispiel eines Einfamilienhauses, dass das explizite Euler-Verfahren ab Zeitschritten oberhalb von fünf Minuten instabil wird und das implizite Euler-Verfahren bereits bei fünf Minuten Fehler oberhalb von 25 % aufweist. Das Crank–Nicolson-Verfahren bleibt für dieses Beispiel hingegen selbst bei 15 min Zeitschritten unter einer relativen Abweichung von fünf Prozent.

Parallel dazu zeigt Abbildung 1 (rechts), dass sich die Simulationszeit des thermischen Modells eines Einfamilienhauses um bis zu 80 % reduzieren lässt, wenn anstelle eines expliziten Euler-Verfahrens mit minütlicher Auflösung ein Crank–Nicolson-Verfahren mit 15-Minuten-Schrittweite eingesetzt wird. Ein deutlich größerer zeitlicher Vorteil ergibt sich zusätzlich durch die Zeitersparnis in anderen Teilmodellen durch größere Zeitschritte, die das Crank-Nicolson-Verfahren ermöglicht.

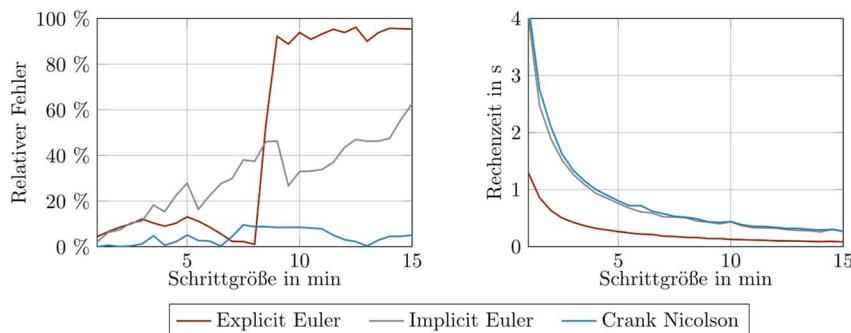


Abbildung 1: Links der relative Fehler und rechts die absolute Rechenzeit für verschiedene Diskretisierungsmethoden in Abhängigkeit von der Zeitschrittgröße für ein beispielhaftes Einfamilienhaus

Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass thermische Modelle auf Basis des Crank–Nicolson-Verfahrens eine robuste und präzise Methode zur Simulation dynamischer WärmeProzesse in Wohngebäuden darstellen. Für die Analyse elektrischer Niederspannungsnetze und die Nutzung thermischer Flexibilität eröffnet dies neue Möglichkeiten: größere Zeitschritte, reduzierte Rechenlast und gleichzeitig hohe Genauigkeit. Perspektivisch soll untersucht werden, wie die Modelle in gemisch-ganzzahlige Optimierungen integriert werden können, um netzdienliches Verhalten von Wärmepumpen, Warmwasserspeichern und hybriden Energiesystemen systematisch zu bewerten und optimal einzubinden.

Referenzen

- [1] H. Hanse und I. Hauer, „Untersuchung der Sensitivität der Netzbelaistung bezüglich der Durchdringung dynamischer Stromtarife“, in *ETG Kongress 2025; Voller Energie – heute und morgen.*, Mai 2025, S. 345–352. Zugegriffen: 24. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11202005>
- [2] T. Dr. Ohrdes u. a., „Abschlussbericht EnEff:Stadt Verbundvorhaben: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WPuQ)“, Aug. 2021.
- [3] E. Schneider, M. Littwin, M. Knoop, P. Pärisch, O. Kastner, und T. Ohrdes, „Entwicklung und messwertbasierte Parametrierung eines vereinfachten Gebäudemodells für die Quartiersmodellierung“.
- [4] D.-N. Heiz, „DIN EN 15316-5, Energetische Bewertung von Gebäuden –Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen –Teil 5: Raumheizung und Speichersysteme für erwärmtes Trinkwasser (keine Kühlung), Modul M3-7, M8-7; Deutsche und Englische Fassung prEN 15316-5:2024“.
- [5] F. Koene, L. Bakker, D. Lanceta, und S. Narmsara, „Simplified Building Model of Districts“, gehalten auf der BauSim Conference 2014, in *BauSim Conference*, vol. 5. IBPSA-Germany and Austria, 2014, S. 152–159. Zugegriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bausim2014_1128
- [6] H. Hanse, *ThermoBuilPy*. Python. Zugegriffen: 15. Oktober 2025. [OS Independent]. Verfügbar unter: <https://github.com/hanneshanse/ThermoBuilPy>