

WOHNGEBÄUDE ALS FLEXIBILITÄTSBAUSTEIN IM QUARTIERSVERBUND - ENTWICKLUNG EINES MODELLIERUNGSANSATZES

L. Bogischef¹, M. De-Borja-Torrejon¹ und C. Hemmerle¹

¹TU München, München, Deutschland

KURZFASSUNG

Die thermische Gebäudemasse stellt ein großes Flexibilitätspotenzial für die zukünftige Energieversorgung dar. Als ein Baustein unter weiteren im Quartiersverbund muss für Simulationen eine geeignete Modellrepräsentation gefunden werden. Unterschiedliche Aspekte legen eine detaillierte Untergliederung in Zonen auch bei Gebäuden mit ausschließlicher Wohnnutzung nahe. Der Beitrag stellt die Anforderungen systematisch zusammen und leitet daraus einen Modellierungsansatz ab, welcher auf einer Zonierung in einzelne Wohneinheiten und einem anschließenden Clustering basiert.

ABSTRACT

An enormous flexibility potential for future energy supply systems lies within the thermal building mass. In order to represent it in district energy models, a suitable model has to be found. Various aspects support the need for segmentation of residential buildings into separate thermal zones. A systematic summary of the requirements regarding thermal models in district context is given and the resulting modelling approach is discussed.

EINFÜHRUNG

Der Gebäudebestand ist eine der großen Herausforderungen bei der Dekarbonisierung des Wärmesektors. Einer der Lösungsansätze auf dem Weg zu Energieeffizienz und einer erneuerbaren Versorgung wird in der Vernetzung mehrerer Gebäude gesehen. Die Größenordnung des „Quartiers“ bietet hier eine geeignete Ebene für die Entwicklung von Energieversorgungskonzepten (Zhang et al. 2018; Weißmann 2017). Nicht nur für die interne optimale Auslegung eines solchen Verbunds, sondern auch für die Bereitstellung von Flexibilität an das übergeordnete Energiesystem sind alle multisektoralen Verschiebepotenziale des Verbunds zu erschließen.

Als Definition von Flexibilität eignet sich im vorliegenden Zusammenhang die folgende nach Dall’Anese et al. (2017, S. 43): „[...] *ability of a system to provide secure and economical supply-demand balance across spatial and temporal scales by leveraging and seamlessly coordinating various controllable assets.*“ Dieses Flexibilitätsverständnis geht über eine ausschließliche last- oder erzeugerseitige Anpassung hinaus und setzt die Flexibilität als eine Systemeigenschaft fest, wobei das System im Rahmen dieser Anwendung ein Quartiersverbund sein soll. Diese Größe lässt sich also nur unter Einbezug aller Systemkomponenten bewerten.

Dazu gehören auch die thermischen Lasten von Gebäuden. Neben einer Glättung des Wärmelastprofils kann deren Verschiebung über Power-to-Heat Technologien wie Wärmepumpen auch dem Stromsystem Flexibilität anbieten. Dass durch die Gebäudemasse in Kombination mit einer gewissen Bandbreite für den thermischen Komfort hohe theoretische Flexibilitätspotenziale bestehen, wurde bereits nachgewiesen (Auer et al. 2017). Die hohe Attraktivität dieses funktionalen Speichers liegt darin begründet, dass das Speichermaterial bereits vorhanden ist und damit keinen weiteren Platzbedarf, keine Investitionskosten und negativen Umweltwirkungen für die Herstellung verursacht. Um nun die Lücke von den theoretischen Potenzialen zu einer tatsächlich erzielbaren Wirkung im Energieverbund zu schließen, wird eine entsprechende Repräsentation des thermischen Gebäudeverhaltens benötigt.

Bei der Modellierung des thermischen Gebäudeverhaltens stand bisher nicht die Flexibilität auf Quartiersebene im Vordergrund. Die zum Zweck der Ermittlung des thermischen Gesamtenergiebedarfs übliche Abbildung von Wohngebäuden als Einzonen-Modell erscheint für eine realistische Einschätzung des Flexibilitätspotenzials von Mehrfamilienhäusern

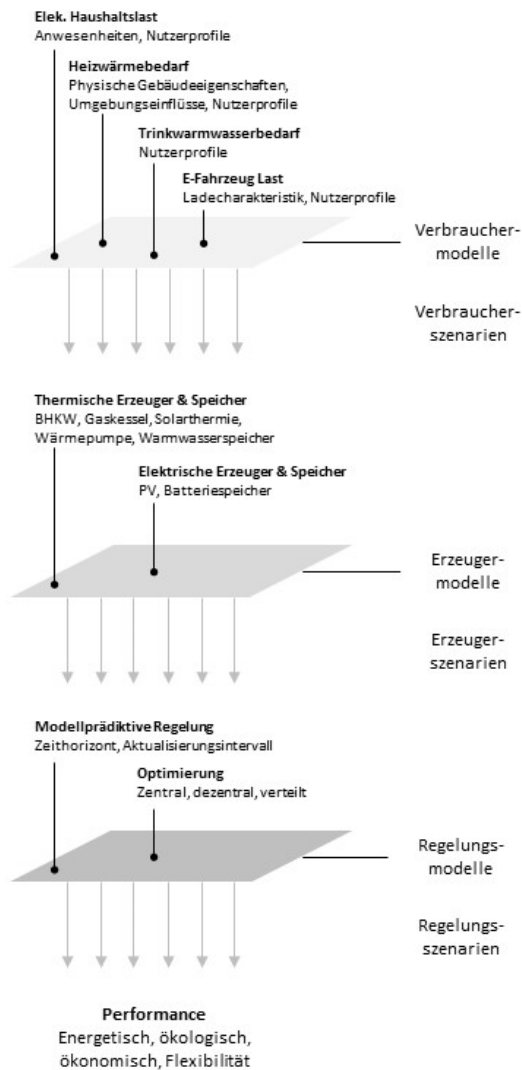


Abbildung 1: Quartiersmodell

unzureichend. Daher wird im Folgenden die Entwicklung eines Modell- und Zonierungsansatzes für diesen Einsatzzweck vorgestellt. Die theoretischen Anforderungen an das Modell werden hierfür aus dem Kontext des übergeordneten Quartiersmodells abgeleitet. Danach erfolgt eine begründete Wahl des Modells zur Repräsentation des Quartiers in zwei Teilschritten. Auf die Entscheidung für ein geeignetes Modell des thermischen Verhaltens einer einzelnen Einheit folgt die Wahl der Zonierung des Quartiers in solche Einheiten. Der resultierende Ansatz wird mit einem Fokus auf Wohngebäude erläutert.

MODELLENTWICKLUNG

Das übergeordnete Quartiersmodell ist der Rahmen, in dem das Modell für das thermische Gebäudeverhalten zum Einsatz kommen soll und daher auch der Ausgangspunkt für die Ermittlung der Anforderungen. Die weiteren Schritte der Modellentwicklung basieren hierauf und daher soll zunächst ein Überblick über das Quartiersmodell gegeben werden.

Quartiersmodell

Der Gesamtworkflow des Quartiersmodells wurde im Rahmen des Projekts Cleanvelope entwickelt (Bogischef et al. 2019). Dieser lässt sich in die drei Bereiche Verbraucher, Erzeuger und Optimierung gliedern (Abb.1).

Neben den thermischen Lasten liegen auf der Verbraucherebene wegen der Sektorkopplungsmöglichkeiten auch elektrische Lasten, die aus konventionellen Haushaltsstromlasten sowie Lasten durch das Laden von Elektrofahrzeugen bestehen.

Auf der Erzeugerebene befinden sich Modelle für wärme- und stromerzeugende Komponenten, um die Simulation unterschiedlicher Erzeugungskonzepte zu ermöglichen. Auch wenn mit Quartiersenergiekonzepten in der Regel eine hohe Versorgung aus lokalen erneuerbaren Quellen angestrebt wird, soll keine autarke Situation abgebildet werden. Vielmehr soll das Modell perspektivisch auch netzdienliche Interaktionen mit dem Energiesystem erfassen. Auf dieser Modellebene wird daher auch die Anbindung an die übergeordnete Energieinfrastruktur dargestellt. Außerdem werden hier Speicherelemente berücksichtigt, wobei anzumerken ist, dass auch Elemente der Verbraucherebene als funktionale Speicher dienen können. Eine separate Modellkomponente für elektrische oder thermische Netze wird nicht erstellt, weil eine reduzierte Betrachtung im Sinne einer bilanziellen Bedarfsdeckung im Quartier erfolgen soll.

Die letzte Ebene dient einer Optimierung des Gesamtverbunds, wobei beispielsweise auch modellprädiktive Regelungsansätze untersucht werden sollen. Es werden sowohl eine zentrale Optimierung als auch verteilte Optimierungsstrategien berücksichtigt. Da die Optimierung auf eine Einsatzoptimierung und nicht auf eine Kapazitätsplanung abzielt, wird ein Zeithorizont von wenigen Tagen gewählt.

Die kombinierte Betrachtung mit den Erzeugerkomponenten und anderen Verbrauchern ist wichtig, um Flexibilitätskennwerte für den gesamten Verbund zu erhalten. Die separat betrachteten Lastmanagementpotenziale werden hierdurch durch Leistungsgrenzen der Erzeuger und weitere Anforderungen im Betrieb eingeschränkt und damit näher an ein realistisches Potenzial herangeführt. Insbesondere lassen sich dezentrale und quartierszentrale Versorgungskonzepte nach der neuen Kenngröße der Flexibilität gegeneinander vergleichen.

Dieser Gesamtworkflow zielt auf eine Untersuchung von vielfältigen Randbedingungen ab. Im vorliegenden Fall werden auf jeder Modellebene Szenarien gebildet, die beliebig mit den Szenarien anderer Ebenen kombiniert werden können. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu Modellstrukturen, die zwar realistischere Ergebnisse liefern, aber nur auf wenige exemplarische Fälle angewendet werden sollen, weil der Modellierungs- und Simulationsaufwand sonst nicht angemessen wäre. Als Ergebnis der Simulationen werden wirtschaftliche und ökologische Kennwerte sowie Kennwerte zur Flexibilität ausgegeben.

Da die Variablen der thermischen Modellinstanzen in die quartiersweite Optimierung einbezogen werden, erhöht sich mit der Menge an Variablen auch die Rechenzeit für einen Optimierungsdurchlauf. Die Zahl an einzeln modellierten thermischen Zonen ist also möglichst gering zu halten. Um außerdem ein konsistentes Quartiersmodell zu gewährleisten, ist eine gemeinsame Datenbasis für verschiedene Modellkomponenten zu hinterlegen. Beispielsweise benötigt die Energieerzeugungskomponente für Solaranlagen gemeinsame Inputs mit den thermischen Gebäudemodellen, weil die Installationsflächen an Fassade und Dach den Flächen des thermischen Modells entsprechen. Um nun die Doppelung von Zuweisungsschritten – vor allem zur Vermeidung von Inkonsistenz – gering zu halten, sind die Instanzen von Modellkomponenten mit Inputüberschneidungen auf einem möglichst langen gemeinsamen Workflow aufzubauen. Diese Zielsetzung kann auch die Anforderung einer Anpassung der Struktur des thermischen Quartiersmodells erfordern.

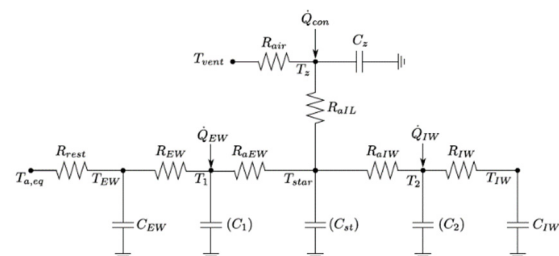
Verbrauchermodell Gebäude (Heizwärmebedarf)

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen kann nun ein Modellierungsansatz für das thermische Gebäudeverhalten entwickelt werden. Im Quartierszusammenhang sind zwei Teilfragestellungen zu berücksichtigen: zum einen wie das Quartier in einzelne Modelleinheiten zerlegt wird und wieviel Abstraktion in diesem Schritt erfolgen soll; zum anderen welches Modell für die Berechnung des thermischen Verhaltens dieser einzelnen Einheiten gewählt wird. Besonders wenn der Anwendungsfokus auf dem Verschiebepotenzial durch die thermische Gebäudemasse liegt, ist die Gratwanderung zwischen einer ausreichend detaillierten dynamischen Antwort einzelner Einheiten und der Vereinfachung für ein Abbild des gesamten Quartiers zu absolvieren.

Modellauswahl thermisches Gebäudeverhalten

Modelle für das thermische Gebäudeverhalten lassen sich in physikalische, reduzierte und datenbasierte Modelle unterteilen. Letztere weisen nach Hong et al. (2020) die Schwierigkeit auf, dass ausreichende

Trainingsdaten für die Modellerstellung zur Verfügung stehen müssen und die Modelle nur unter denselben Randbedingungen gültig sind. Physikalische Modelle bilden zwar die physikalischen Prozesse am detailliertesten nach, benötigen dafür aber auch eine entsprechende Rechenzeit und werden daher als zu aufwendig für Quartiere angesehen (Lauster 2018). Thermische-Netzwerk-Modelle, auch als Resistance-Capacitance-Modelle (RC-Modelle) bezeichnet, gehören zu den reduzierten Modellen und können je nach Modellausprägung den white- oder grey-box Modellen zugerechnet werden. Sie bilden einen geeigneten Ansatz für die Größenordnung des Quartiers, weil sie verhältnismäßig wenig Rechenaufwand mit einer physikalischen Interpretation der Parameter verbinden und sich für Optimierungsmodelle mit modellprädiktiven Ansätzen anbieten. Für eine bestmögliche Ausschöpfung von Flexibilität unter Vorhersage zukünftiger Entwicklungen werden solche Regelungsstrategien bevorzugt angewendet. RC-Modelle stellen also in diesem Zusammenhang einen geeigneten Ansatz dar, werden aber in Forschungsarbeiten in vielfältigen topologischen Modellausprägungen herangezogen. Auf der Basis einer umfangreichen Gegenüberstellung von RC-Modellen unterschiedlicher Ordnung empfiehlt Lauster (2018) Modelle 2. Ordnung. Dies entspricht auch dem Modell nach VDI 6007-1 2015.



C	Kapazität	air	Luft
\dot{Q}	Wärmestrom	a, eq	Außenluft, äquivalent
R	Wärmedurchgangswiderstand	aEW	Stern - Außenwände
T	Temperatur	aLL	Stern - Lüftung
		aIW	Stern - Innenwände
		con	konvektiv
		EW	Außenwände und nicht adiabate Innenbauteile
		IW	Innenwände
		rest	Rest
		star	Sternposition
		vent	Ventilation
		z	Zone

Abbildung 2: RC-Modell einer thermischen Zone. Kapazitäten mit einem vernachlässigbar kleinen Wert in Klammern.

Zonierung im Quartier

Für die Quartiersebene stellt sich weiterhin die Frage, wie die Zerlegung in Zonen vorzunehmen ist, die als voneinander unabhängige Modelle abgebildet werden können und welche davon vereinfachend zusammengefasst werden können. Dass die Zonierungsregeln erheblichen Einfluss auf die jährlichen Energiebedarfe haben, wird in einer Studie von Chen & Hong (2018) nachgewiesen. Unabhängig von dem gewählten RC-Ansatz, werden diese Fragen auch auf dem Forschungsfeld von *Urban Building Energy Modelling* behandelt. Hier wird unter anderem versucht, die auf das Einzelgebäude bezogenen Zonierungskriterien um den Umgebungskontext zu erweitern. Der „Shoebboxer“-Algorithmus von Dogan & Reinhart (2017) beispielsweise basiert auf der Zonierungsregel nach ASHRAE mit Kern- und Randzone pro Fassadenrichtung, führt aber weitere Schritte zur Berücksichtigung der einfallenden Solarstrahlung aus. Im Anschluss wird ein Clustering vorgenommen und eine repräsentative „Shoebbox“-Einheit pro Fassadenrichtung und Gebäude gewählt.

Unter der Flexibilitätszielsetzung kann ein analoges Vorgehen sinnvoll sein, muss aber zusätzlich die Rolle des Nutzers einbeziehen.

Im Folgenden werden die Aspekte „Umgebungskontext“ und „Nutzerverhalten“ zwar für eine Abbildung durch ein RC-Modell ähnlich dem in VDI 6007-1 2015 (siehe Abb.2) erläutert, sind aber auf andere thermische Modelle übertragbar. Die beiden Aspekte beziehen sich auf die Inputdaten im Sinne von Aktionsgrößen nach VDI 6007-1 2015. Bei stark abweichenden Inputdaten führt die Zusammenfassung zu einer Zone zu ausgleichenden Effekten und damit zu einer Verzerrung der thermischen Zustände

Berücksichtigung des Umgebungskontexts

Ein detaillierter Umgebungskontext lässt eine Differenzierung der Umwelteinflüsse zu, die über eine Unterscheidung nach der Orientierung für Solarstrahlungseinträge hinausreicht. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Verschattung, die Reflexion von kurzwelliger Strahlung, langwelliger Strahlungsaustausch und auch das Mikroklima. In das RC-Modell (Abb.2) fließen diese Faktoren über die äquivalente Außentemperatur ($T_{a,eq}$) und die Strahlungsgewinne (enthalten in den Wärmeeinträgen in die Innenbauteile Q_{IW} sowie die Außenbauteile Q_{EW}) ein. Im Quartierskontext und gerade bei größeren Gebäuden können sich die Umgebungswerte je nach Position am Gebäude stark unterscheiden. Das Erdgeschoss wird beispielsweise im Vergleich zu den oberen Geschossen deutlich häufiger von umliegender Bebauung verschattet. Eine detailliertere Berücksichtigung des Umgebungskontexts führt zu Mehraufwand in der Modellierung. Demgegenüber steht aber gerade im Rahmen eines

Quartiersgesamtmodells ein Gewinn an Genauigkeit an mehreren Stellen, wenn eine Mehrfachverwendung in unterschiedlichen Komponenten möglich ist.

Berücksichtigung des Nutzerverhaltens

Bei der Betrachtung des thermischen Nutzenergiebedarfs als flexible Last spielt das Nutzerverhalten eine tragende Rolle. Die Flexibilität kommt erst durch die Verbindung von Speicherkapazität in Form der Bauteile und einer Bandbreite an vom Nutzer akzeptierten Raumtemperaturen zustande. In dem RC-Modell wird der Einfluss der Nutzer über die gewünschte Raumtemperatur T_z abgebildet (Abb.2). Im Gegensatz zu einer einheitlichen Annahme eines festen zulässigen Schwankungsbereichs für alle Bewohner erlaubt die Möglichkeit einer differenzierten Eingabe von Nutzerwünschen weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von vielfältigen Komfortansprüchen und Beteiligungsraten. Hierfür ist auch eine Unterscheidung in Anwesenheits- und Abwesenheitszeiten sinnvoll, da die Nutzerakzeptanz für Temperaturschwankungen bei Abwesenheit wesentlich abweichen könnte. In diesem Zusammenhang muss aber zwingend auf die Verfügbarkeit entsprechender Daten und deren Auflösung eingegangen werden. Ohne die notwendige Datenbasis bleibt der Nutzen auf einem theoretischen Level.

Resultierender Modellierungsansatz

Aus den genannten Teilaspekten erschließt sich, dass die Repräsentation eines Gebäudes als eine Zone im Quartierskontext zwar den Vorteil einer Reduktion auf nur eine Modellinstanz pro Gebäude aufweist (eine einheitliche Nutzung als z.B. Wohngebäude vorausgesetzt), aber wesentliche Aspekte zur realistischen Beurteilung der Flexibilität vernachlässigt. Vor allem die Hinwendung zu einem Betrachtungsraum, der mit einer Nutzereinheit übereinstimmt, war bisher kein Zonierungsaspekt. Ein Zonierungsansatz, der allen vorgenannten Anforderungen gerecht wird, ist für Wohngebäude eine Zonierung nach Wohnungsgrundrissen. Dieser Ansatz wurde in Hausladen et al. (2014) bei der Untersuchung von Lastverhalten von Gebäudetypen unterschiedlicher Bauweisen als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Simulationsaufwand für die Übertragbarkeit der Ergebnisse angenommen. Mit diesem Ansatz wird im Quartierskontext sowohl eine vertikale Untergliederung nach Stockwerken erreicht, als auch eine weitere Zerlegung in horizontaler Richtung, sodass ein verhältnismäßig kleinteiliges Raster für die Berücksichtigung der Umwelteinflüsse entsteht. Beispielsweise gegenüber dem Verfahren im ASHRAE ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2013, wo eine rein geometrische Grundrisszerlegung in eine Kernzone und Randzonen pro Fassadenrichtung

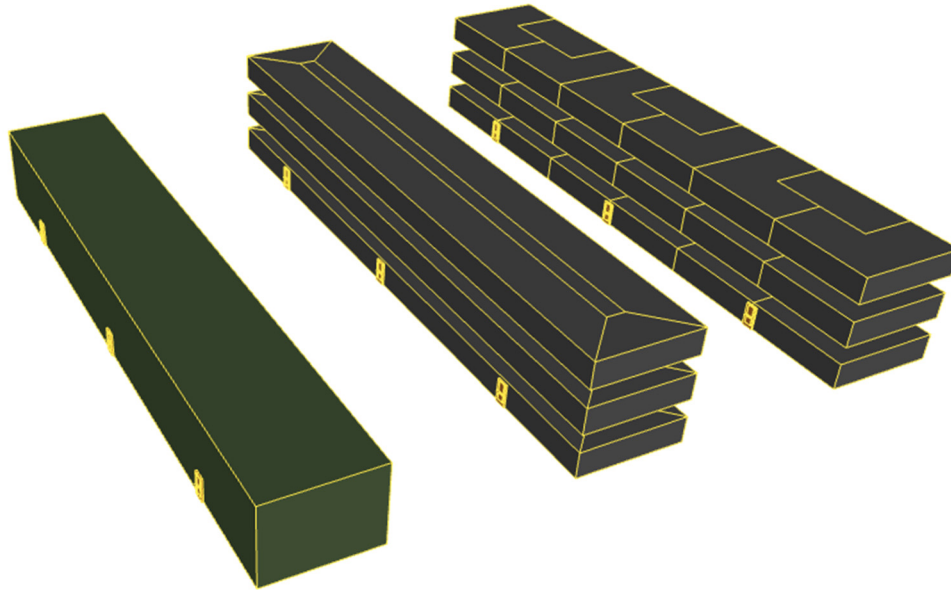


Abbildung 3: Unterschiedliche Zonierungsansätze für Mehrfamiliengebäude. Links: Einzonier. Mitte: Zonierung in Rand- und Kernbereiche. Rechts: Zonierung nach typischen Wohnungsgrundrissen.

erfolgt, hat dies den Vorteil, dass die Änderung von Umwelteinflüssen entlang der Gebäudelänge wiedergegeben werden kann und die Zuordnung von Nutzern und deren Präferenzen ihrem Wirkungsbereich entspricht. Voraussetzung hierbei ist wieder die Datenlage. Zwar sind die Wohnungsgrundrisse nicht flächendeckend öffentlich verfügbar, aber da die Einteilungen gewissen Regelmäßigkeiten unterworfen sind, finden sich bei Kenntnis des Gebäudetyps und der Baualtersklasse Informationen zu häufigen Wohnungsgrundrissen in der Literatur. Da sich bei der Annahme von geschlossenen Türen auch eine Wohnung in einzelne thermische Zonen nach Räumen gliedern lässt, ist die Frage nach einer solchen Zonierung wegen des höheren Detaillierungsgrads gerechtfertigt. Dagegen spricht die wesentlich ungenauere Kenntnis über die Raumeinteilung sowie die Anwesenheit der Nutzer innerhalb welchen Raums und den Luftwechsel zwischen den Zonen bei geöffneten Türen. Dazu wäre außerdem ein wesentlich größerer Modellierungsaufwand aufgrund einer komplexeren Darstellung zu betreiben. Die Orientierung an Wohnungsgrößen stellt bei der Zonierung also einen Kompromiss dar zwischen Exaktheit des thermischen Verhaltens und Informationsverfügbarkeit sowie Modellierungsaufwand. Die angesprochenen Zonierungsansätze werden in Abbildung 3 veranschaulicht.

Die aus einem solchen Vorgehen resultierenden Zonen werden dann als voneinander unabhängige RC-Modellinstanzen in das Quartiersmodell eingebunden, was auf der Grundannahme basiert, dass keine Wärme Flüsse zwischen den Zonen auftreten. Da die Ausnutzung von Temperaturkomfortbändern eine

Zielsetzung darstellt und die Möglichkeit von unterschiedlichen Innenraumtemperaturen einzelner Nutzereinheiten explizit eingeräumt wird, sollte eine Plausibilisierung dieser Annahme erfolgen. Da allerdings von einer Toleranzspanne von nur wenigen Kelvin und kurzen Verschiebedauern auszugehen ist, ist ein geringer Einfluss dieser Vereinfachung auf das Ergebnis zu erwarten. Diese These gilt es, mit gesicherten Erkenntnissen zu hinterlegen.

Im Ergebnis werden somit größere Wohngebäude über eine Anzahl an RC-Modellen repräsentiert, die der Anzahl an Wohnungen entspricht. Im Vergleich zu der Ein-Zonen-Betrachtung eines Gebäudes wird die Anzahl an Variablen für die Optimierung damit deutlich erhöht. Um dem entgegenzuwirken bieten sich Clustermethoden an. Statt eine Vereinheitlichung der Zonen an der Lage innerhalb desselben Gebäudes festzumachen können unterschiedliche Kriterien wie z.B. die jährliche Einstrahlung und Anwesenheitsprofile herangezogen werden. Neben den Kriterien für die Clusterbildung muss auch die Clustergröße festgelegt werden. Durch diese Faktoren besteht bei der Clusterbildung eine große Bandbreite an Detaillierungstiefe. Hier sind die Abweichungen in Hinblick auf die Genauigkeit gegenüber der Erhöhung der Rechengeschwindigkeit abzuwägen.

DISKUSSION

Das vorgestellte Modell erweitert bisherige Ansätze zur Modellierung des thermischen Gebäudeverhaltens im Forschungsfeld von *Urban Building Energy Modelling* um eine differenzierte Zonierung insbesondere von Wohngebäuden. Diese wird als notwendig erachtet, um die Nutzungspotenziale der thermischen Gebäudemasse als Flexibilitätsbaustein in Quartiersenergieverbänden aufzuzeigen.

Der Modellansatz basiert auf einer argumentativen Herleitung und daher sind im nächsten Schritt simulationsbasierte Nachweise zu führen. Als Kriterien für eine Eignung für den vorliegenden Einsatzzweck sind vor allem die Unterschiede in der Simulationszeit und der Ergebnisqualität der Flexibilitätskennwerte gegenüber anderen Modellansätzen heranzuziehen.

Für die Umsetzung des Ansatzes ist außerdem eine detailliertere Vorgehensweise auszuarbeiten, wie die Zerlegung in Wohnungseinheiten erfolgt. Wenn typologische Werte für die Grundrisszerlegung herangezogen werden, aber eine Vielzahl an realen Grundrissausprägungen damit belegt werden soll, entsteht die Schwierigkeit, wie die Zerlegung jeweils angepasst wird. Ein Algorithmus, der alle Anwendungsfälle abdeckt, kann hier dem Vorwurf einer Willkürlichkeit vorbeugen und gleichzeitig ein Mittel sein, um die Sensibilität der Ergebnisse auf eine Änderung des Verfahrens aufzuzeigen. Daneben ist eine typologische Herangehensweise auch von der Verfügbarkeit repräsentativer Datengrundlagen abhängig.

Zuletzt sind diese Herausforderungen aber den Anwendungspotenzialen gegenüberzustellen. Der Hauptanwendungszweck, eine Untersuchung von Flexibilität auf Quartierebene, lässt sich um weitere Anwendungszwecke ergänzen. Der Einfluss einzelner Modellparameter kann im Quartierszusammenhang in unterschiedlichen Szenarien analysiert werden und somit deren Relevanz eingeordnet werden. Die Umgebungseinflüsse und das Nutzerverhalten seien hier nur beispielhaft genannt.

ZUSAMMENFASSUNG

Flexibilitätsbetrachtungen auf Quartiersverbundebene stellen neue Anforderungen an die thermische Modellierung von Gebäuden, wenn auch die Lastverschiebemöglichkeit durch die Gebäudemasse berücksichtigt werden soll. Die Anforderungen ergeben sich einerseits aus dem übergeordneten Quartiersmodellkontext, in den diese Komponente integriert werden soll, und andererseits aus einer differenzierteren Zonierung zur Ermittlung der Verschiebepotenziale. RC-Modelle werden als geeignete Abbildung identifiziert. Bei der Frage nach dem Zerlegungsverfahren des Quartiers in einzelne solcher Modellinstanzen wird eine Berücksichtigung des Umgebungskontexts und der Nutzerrolle als notwendig und vielversprechend erachtet. Für Wohngebäude wird eine Zerlegung nach typischen Wohnungsgrundrissen in Kombination mit einem anschließenden Clustering vorgeschlagen. Da dieser Ansatz auf theoretischen Überlegungen basiert, sind im nächsten Schritt quantitative Nachweise zu führen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst für die Förderung des Projekts Cleanvelope im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks.

LITERATUR

- ASHRAE ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2013: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA.
- Auer, T., Hamacher, T., Wagner, U., Atabay, D., De-Borja-Torrejón, M., Dornmair, R. et al. 2017: Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland: Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bogischef, L., De-Borja-Torrejón, M., Fassbender, E., Jambagi, A., Hemmerle, C. 2019: Solar activated envelopes in district context – energy modelling tasks. In: Thomas Hamacher (Hg.): Shaping a Sustainable Energy Future. 9th Colloquium of the Munich School of Engineering. Garching, 01.08.2019, S. 16.
- Chen, Y., Hong, T. 2018: Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. In: Applied Energy 215, S. 717–735.
- Dall'Anese, E., Mancarella, P., Monti, A. 2017: Unlocking Flexibility: Integrated Optimization and Control of Multienergy Systems. In: IEEE Power and Energy Mag. 15 (1), S. 43–52.
- Dogan, T., Reinhart, C. 2017: Shoeboxer: An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. In: Energy and Buildings 140, S. 140–153.
- Hausladen, G., Auer, T., Schneegans, J., Klimke, K., Riemer, H., Trojer, B., Qian, L., de-Borja-Torrejón, M. 2014: Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden (Technische Universität München Ed.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., Lee, S.H. 2020: Ten questions on urban building energy modeling. In: Building and Environment 168, S. 106508.

- Lauster, M. 2018: Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren. Dissertation. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, Aachen.
- VDI 6007-1 2015: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell.
- Weißmann, C. 2017: Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren. Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung. Dissertation. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Heft 37.
- Zhang, X., Lovati, M., Vigna, I., Widén, J., Han, M., Gal, C., Feng, T. 2018: A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions. In: Applied Energy 230, S. 1034–1056.