

# **Residential buildings as a flexibility component in the district network - Development of a modelling approach**

## **Wohngebäude als Flexibilitätsbaustein im Quartiersverbund – Entwicklung eines Modellierungsansatzes**

Conference paper. German version presented at 8<sup>th</sup> Conference of IBPSA Germany and Austria (Graz, 23-25.09.2020) and published in Monsberger, M., Hopfe, C.J., Krüger, M. & Passer, A. (Eds.). *BauSIM 2020, 8<sup>th</sup> Conference of IBPSA Germany and Austria, 23-25- September 2020, Graz University of Technology, Austria, Proceedings*. Graz: Technische Universität Graz, 2020. ISBN e-book 978-3-85125-786-1, DOI 10.3217/978-3-85125-786-1 (pp. 410-416). English version added a posteriori for the present document. This document is in conformity with the approval of the responsible editor of the mentioned Proceedings.

Lea Bogischef

Manuel de-Borja-Torrejón

Claudia Hemmerle

Technical University of Munich, 2020

DOI: 10.14459/2020md1584925

CC BY 4.0

# RESIDENTIAL BUILDINGS AS A FLEXIBILITY COMPONENT IN THE DISTRICT NETWORK – DEVELOPMENT OF A MODELLING APPROACH

L. Bogischef<sup>1</sup>, M. De-Borja-Torrejon<sup>1</sup> and C. Hemmerle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technical University of Munich, Munich, Germany

## ABSTRACT

An enormous flexibility potential for future energy supply systems lies within the thermal building mass. In order to represent this potential 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 the district context is given and the resulting modelling approach is discussed.

## 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.

## INTRODUCTION

The building stock represents one of the major challenges in the decarbonisation of the heating sector. One of the approaches towards energy efficiency and a renewable supply is seen in the networking of several buildings. In this regard, the district scale offers a suitable level for the development of energy supply concepts (Zhang et al. 2018; Weißmann 2017). All multi-sectoral shifting potentials of the network must be explored not only for the optimal internal design of such a network, but also for the provision of flexibility to the superordinate energy system.

The following definition of flexibility according to Dall’Anese et al. (2017, S. 43) is suitable for this context: „[...] *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.*” This understanding of flexibility goes beyond an exclusive demand-side or production-side adaptation and defines flexibility as a system property, whereby the system within the scope of this particular case would be a district complex. Consequently, the energy flexibility at a district level should be evaluated by taking all system components into account.

This also includes the thermal loads of buildings. In addition to flattening the heat load profile, load shifting via power-to-heat technologies such as heat pumps can also offer flexibility to the electricity system. It has already been shown that the building mass, in combination with a certain temperature range setting the boundaries of thermal comfort, offers high theoretical flexibility potentials (Auer et al. 2017). The high attractiveness of using the building mass as a functional storage is due to the fact that the storage material is already available and therefore does not require additional space or economical investment nor cause negative environmental impacts due to production. In order to close the gap between the theoretical potential and actual achievable effects in the energy system, a suitable representation of the thermal performance of buildings is required.

In the modelling of thermal performance of buildings, flexibility at the district level has thus far not been a priority. The common modelling of residential buildings as a single-zone model for the purpose of determining the total thermal energy demand seems insufficient for a realistic assessment of the flexibility potential of multi-family buildings. Therefore, the development of a model and zoning approach for this purpose is presented here as

follows. First, the theoretical requirements for the model are derived from the context of the superordinate district model. This is followed by a founded choice of the model to represent the quarter in two steps: the decision on a suitable model of the thermal performance of an individual unit is described and the choice of zoning the district into such units is presented. Finally, the resulting approach is explained with a focus on residential buildings.

## MODEL DEVELOPMENT

The superordinate district model is the framework in which the model for the thermal performance of buildings is to be used. The district model is therefore also the starting point for determining the requirements of the thermal model. The further steps of the model development are based on this. Hence an overview of the base district model is needed.

### **District model**

The overall workflow of the district model has been defined as part of the *Cleanvelope* project (Bogischef et al. 2019). It can be divided into three areas: consumers, producers and optimisation (Fig.1).

The consumer level includes thermal loads but also electrical loads due to sector coupling, which consist of conventional household electrical loads and loads resulting from charging electric vehicles.

The producer level comprises models for heat- and electricity-generating components to enable the simulation of different supply concepts. Even though district energy concepts generally aim at a high supply from local renewable sources, it is not envisaged to represent a self-sufficient situation. Rather, the model is intended to encompass network-related interactions with the energy system. Thus, the connection to the superordinate energy infrastructure is also considered in this model level. Storage systems are also taken into account here, although it should be noted that elements at the consumer level can also serve as functional storage (e.g. thermal mass). A separate model component for electrical or thermal networks is not considered, as a scaled-down approach, focusing on balancing the demand in the district, is adopted.

The last level serves to optimise the overall system, whereby, for example, model-predictive control approaches are taken into account. Both central and distributed optimisation strategies are considered. Since the optimisation is aimed at enhancing operation and not at capacity planning, a time horizon of several days is implemented. The holistic consideration including producer and consumer components is important in order to explore flexibility for the overall network. The load management potentials are thereby constrained by performance limits of the producers and further operational requirements, and thus are brought closer to a realistic potential. Decentralized and centralized supply concepts at a district level can especially be compared against each other according to the resulting values of flexibility.

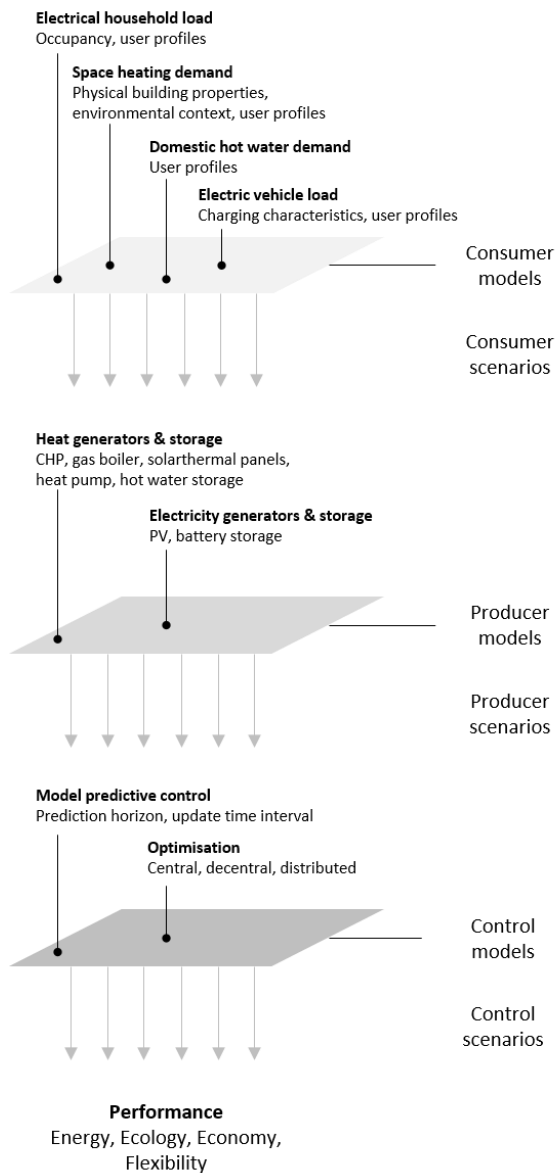


Figure 1: District model

This overall workflow aims to investigate a wide range of boundary conditions. Scenarios are defined at each model level, which can be combined with scenarios at other levels as required. This is an essential difference to model structures that provide more realistic results, but can only be applied to a few exemplary cases, due to the high modelling and simulation effort involved. Simulation results include economic and ecological characteristic values and also values related to flexibility.

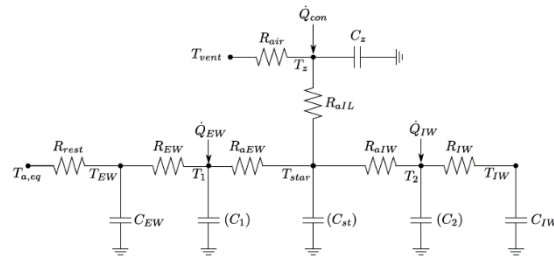
Since the variables of the thermal model instances are included in the district optimisation, the computing time of an optimisation run increases with the amount of such variables. The number of individually modelled thermal zones should therefore be kept as low as possible. In order to ensure a consistent district model, a common data base for different model components is to be defined. For example, the energy generation component for solar energy systems requires common inputs with the thermal models of buildings, because the solar panel surfaces on the façade and roof correspond to surfaces of the thermal model. Thus, in order to keep the duplication of assignment steps to a minimum – and especially to avoid inconsistencies – the instances of model components that have overlapping input are to be built based on a common workflow. This objective can also require an adaptation of the structure of the initial thermal district model.

#### Building consumer-model (heating demand)

Based on these background requirements, a modelling approach for the thermal performance of buildings can be developed. For the district context, two sub-questions are considered: on the one hand, how the district (built complex) is broken down into individual thermal model units and how much abstraction should take place in this step; on the other hand, which model type is chosen for the calculation of the thermal performance of these individual units. Particularly when the focus is on the load-shifting potential associated with the thermal building mass, a balance between a sufficiently detailed dynamic response of individual units and the simplification to address the entire district needs to be achieved.

#### Model selection for building thermal performance

Models for thermal performance of buildings can be divided into physical, reduced and data-based models. According to Hong et al. (2020) the latter presents the difficulty that sufficient training data must be available for the creation of the model and that the models are only valid under the same boundary conditions. Physical models can reproduce the physical processes in detail. However, they also require a corresponding computing time and they are therefore viewed as too complex and time-consuming for a district context (Lauster 2018).



Thermal network models, also referred to as resistance capacitance models (RC models), belong to the reduced models and can be assigned to the white or gray box models, depending on the model.

$C$	capacity	$a, eq$	ambient, equivalent
$\dot{Q}$	heat flow	$aEW$	star – external walls
$R$	resistance	$aLL$	star – air volume]
$T$	temperature	$aIW$	star – internal walls
		$con$	convective
		$EW$	external walls and non-adiabatic internal walls
		$IW$	internal walls
		$rest$	rest
		$star$	star position
		$vent$	ventilation
		$z$	zone

Figure 2: RC model of a thermal zone. Capacities with a negligibly small value are in brackets.

They form a suitable approach for the district scale since they combine relatively little computing effort with a physical interpretation of the parameters, and they can be used to build optimisation models with model predictive control. Such a control approach is often preferred for the best possible exploitation of flexibility while predicting future developments. Hence, RC models represent a reasonable alternative for the case of a district context. RC models are used in research in a variety of topological forms. On the basis of an extensive comparison of RC models of different orders, Lauster (2018) recommends 2<sup>nd</sup> order models. This also corresponds to the model according to VDI 6007-1 2015.

#### District zoning

For a model addressing the district scale, the question still arises of how the division into thermal zones that can be mapped as independent models is to be carried out, and which of them can be grouped for simplification. The study by Chen & Hong (2018) shows that the zoning criteria has a significant impact on the results of annual energy demand.

Regardless of the chosen RC approach, these questions are also addressed within the research field of Urban Building Energy Modelling. Here, an attempt is made, among other things, to expand the zoning criteria relating to the individual building to include the surrounding context. The “Shoebxer”

algorithm by Dogan & Reinhart (2017), for example, is based on the zoning rule according to ASHRAE with core and edge zones per facade orientation, and carries out further steps to take into account the incident solar radiation. A clustering is then conducted and a representative “Shoebox” unit is selected for each facade orientation and building.

Aiming to address the topic of flexibility, an analogous procedure can be useful, but must also include the role of the user. In the following, the “environmental context” and “user profile” aspects are explained for a scenario using an RC model similar to the one in VDI 6007-1 2015 (see Fig. 2), although they could be transferred to other types of thermal models. These two aspects represent input data related to “active quantities” according to VDI 6007-1 2015. When this input data varies significantly, choosing too large zone dimensions will result in a balancing of effects and thus, a distortion of the thermal states.

### **Consideration of the environmental context**

A detailed environmental context allows the differentiation of environmental influences that goes beyond a distinction according to the orientation for solar radiation inputs. Essential influencing factors are shading, reflection of short-wave radiation, long-wave radiation exchange and also microclimate temperatures. These factors flow into the RC model (Fig. 2) via the equivalent outdoor temperature ( $T_{a,eq}$ ) and the radiation gains (included in the heat gains into the internal components  $Q_{IW}$  and the external components  $Q_{EW}$ ). In a district context and especially for large buildings, the ambient values can greatly differ depending on the location within the building. Compared to the upper floors, for example, the ground floor is more often shaded by surrounding buildings. A more detailed consideration of the environmental context leads to additional effort in the modelling. On the other hand, a greater level of accuracy can be achieved in the framework of an overall district model, when several components can make use of this detailed consideration of the environmental context.

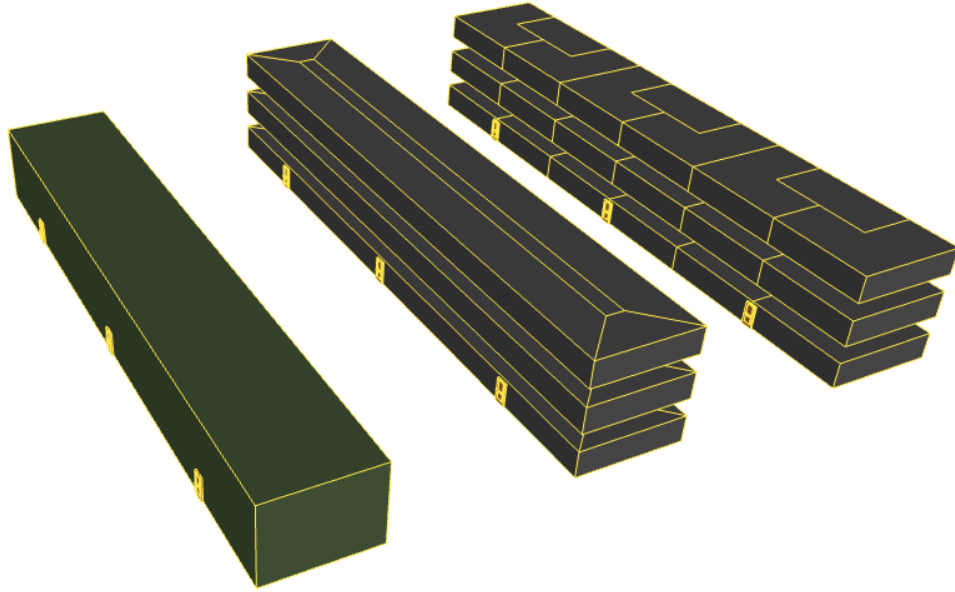
### **Consideration of the user profile**

When taking into account the thermal energy demand as a flexible load, the user profile can play an important role. The flexibility results from the combination of the use of the building components’ storage capacity and a room temperature range accepted by the user. In the RC model, the influence of the user is considered via the set room temperature  $T_z$  (Fig. 2). In contrast to a uniform assumption of a fixed range for temperature fluctuation for all residents, separate model instances enable the input of different user preferences to analyse the influence

of various comfort requirements and response rate. To this end, a distinction between presence and absence times is also useful, as the user acceptance for temperature fluctuations in absence time could differ significantly. In this sense, however, the availability of the required data and their resolution needs to be addressed. Without the necessary database, the possible benefit remains on a theoretical level.

### **Resulting model**

From the partial aspects described above it can be derived that the modelling of a building as a single zone in the context of a district has the advantage of allowing the reduction of the district model to just one model instance per building (assuming a uniform use as a residential building, for example); but it neglects essential features to assess flexibility. In particular, it does not consider a spatial distribution corresponding to a user unit as a district zoning attribute. An approach that meets all the requirements discussed earlier consists of an apartment-based zoning in the case of residential buildings. This approach was assumed by Hausladen et al (2014) in the study of load profiles of buildings of different constructive characteristics, as a balance between accuracy and simulation effort aiming to facilitate the transferability of the results. Through this method, it is possible to vertically and horizontally break down buildings within a district, creating a proportionate small sub-divided grid for the analysis of environmental factors. Compared to the procedure in ASHRAE ANSI / ASHRAE Standard 90.1-2013, where a building floor plan is geometrically broken down into a core zone and edge zones per facade orientation, this approach has the advantage that the change of environmental factors can be taken into account along the length of the building, while the assignment of users and their preferences correspond to their radius of action. Also in this case, the availability of data is a requirement. The floor plan distributions of buildings are commonly not public, but as floor plan subdivisions are subject to certain patterns, information on standard apartment floor plans can be found in the literature according to the building type and age class. Since an apartment can also be divided into individual thermal zones according to rooms, assuming closed doors, the question is whether the use of such a zoning approach is appropriate due to the higher level of detail. A disadvantage is however the much less precise knowledge about the room division and the occupation by the users as well as the air exchange between the zones when the doors are open. This would also require a much greater modelling effort due to the more complex representation. Addressing the zoning, the apartment-based assumption represents a balance between the accuracy of the



*Figure 3: Different zoning approaches for multi-family buildings. Left: single-zone. Centre: Zoning in peripheral and core areas. Right: Zoning according to typical apartment floor plans.*

thermal performance and the availability of information as well as modelling effort. The zoning approaches mentioned are illustrated in Figure 3.

The zones resulting from such a procedure are then integrated into the district model as independent RC model instances under the assumption that no heat transfer occur between zones. As the use of temperature comfort bands is aimed at, and it is possible to consider different indoor temperatures in each single user units, this assumption should be checked for plausibility. Nonetheless, since a tolerance range of only a few Kelvin and short shifting periods are presumed, this simplification is expected to have a minor influence on the result. This hypothesis however needs to be backed up with further evidence.

As a result, large residential buildings are represented by a number of RC models that correspond to the number of apartments. Compared to the single-zone approach, the number of variables for optimisation is significantly increased. Cluster methods represent an alternative to counteract this. Instead of classifying the zones based on their location within the same building, different criteria such as the receiving annual solar radiation and the occupation profile can be used. In addition to the criteria for clustering, the cluster size must also be specified. As a result of these factors, there is a wide range of depth of detail when forming a cluster. Here the deviations in terms of accuracy must be weighed against the increase in computing time.

## DISCUSSION

The presented model expands previous approaches to modelling the thermal building performance in the research field of Urban Building Energy Modelling by a differentiated zoning method, especially for residential buildings. This is considered necessary in order to show the potential for using the thermal building mass as a flexibility component in district energy networks.

The model approach has a theoretical base and therefore simulation-based evidence must be provided as a next step. The main arguments supporting its suitability for the mentioned scope are the differences in the simulation time and the quality of the results of the flexibility parameters compared to other model approaches.

For the implementation of the approach, a more detailed procedure of breakdown into residential units is required. If typological values are used for the breakdown, but a large number of real floor plans are to be covered through them, the difficulty arises, of how to adapt the breakdown for each case. An algorithm that covers all use cases can prevent arbitrariness and at the same time it can serve as a means of showing the sensitivity of the results to a change in the process. In addition, a typological approach is also dependent on the availability of representative data.

Finally, these challenges should be compared to the application potential. The main purpose of investigating flexibility at a district level can be

supplemented with other purposes. The influence of individual model parameters can be analysed in the context of the district in different scenarios and, thus, their relevance can be categorised. The environmental factors and user profiles are only mentioned here as examples.

## CONCLUSION

Considering flexibility at a district level sets new requirements for the thermal modelling of buildings, when the ability for shifting loads through the use of the building mass is also to be taken into account. The requirements result on the one hand from the overall district model into which these components are to be integrated, and on the other hand from a more differentiated zoning aiming to determine the shifting potential. RC models are identified as a suitable representation. With regard to the method for breaking down the district into such individual model instances, to contemplate the surrounding context and the role of the user is considered necessary and promising. For residential buildings, a breakdown according to typical apartment floor plans in combination with a subsequent clustering is suggested. Since this approach is based on theoretical considerations, quantitative evidence must be provided as a next step.

## AKNOWLEDGMENT

The authors thank the Bavarian State Ministry for Science and Art for funding the Cleanvelope project as part of the Bavarian Climate Research Network.

## LITERATURE

- 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.
- 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., Quian, 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.

# WOHNGEBÄUDE ALS FLEXIBILITÄTSBAUSTEIN IM QUARTIERSVERBUND - ENTWICKLUNG EINES MODELLIERUNGSANSATZES

L. Bogischef<sup>1</sup>, M. De-Borja-Torrejon<sup>1</sup> und C. Hemmerle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU München, München, Deutschland

## KURZFASSUNG

Die thermische Gebäudemasse stellt ein großes Flexibilitätpotenzial 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 Flexibilitätpotenziale 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 Flexibilitätpotenzials von Mehrfamilienhäusern



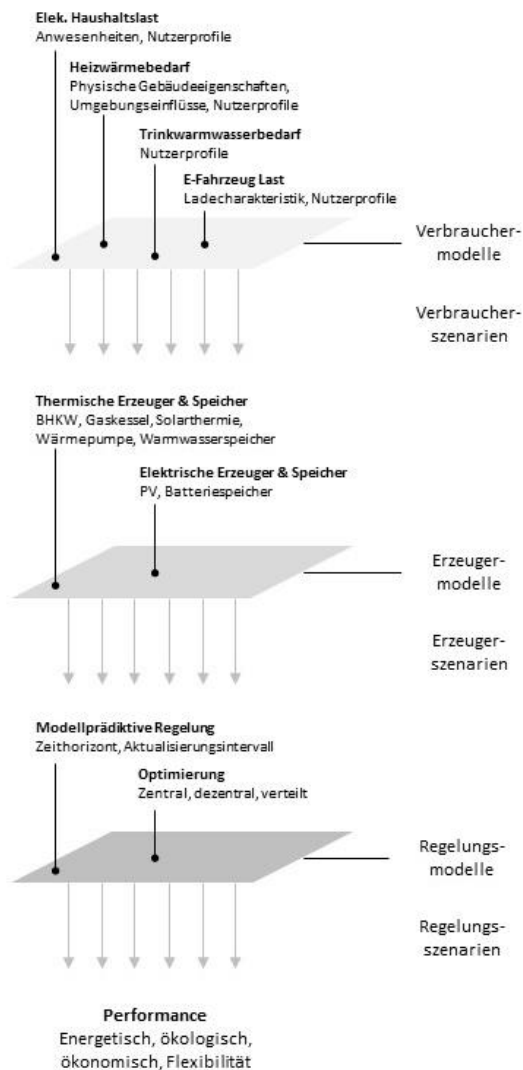


Abbildung 1: Quartiersmodell

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.

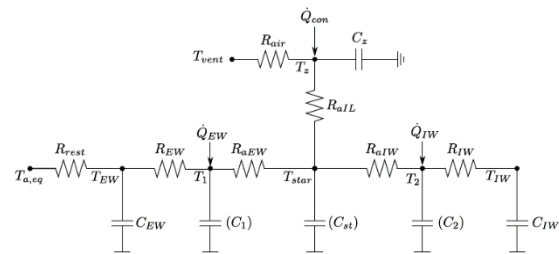
### Verbrauchermodell Gebäude (Heizwärmebedarf)

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	aIL	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 „Shoebox“-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 „Shoebox“-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 kurzweiliger Strahlung, langweiliger 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  $Q_{TW}$  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

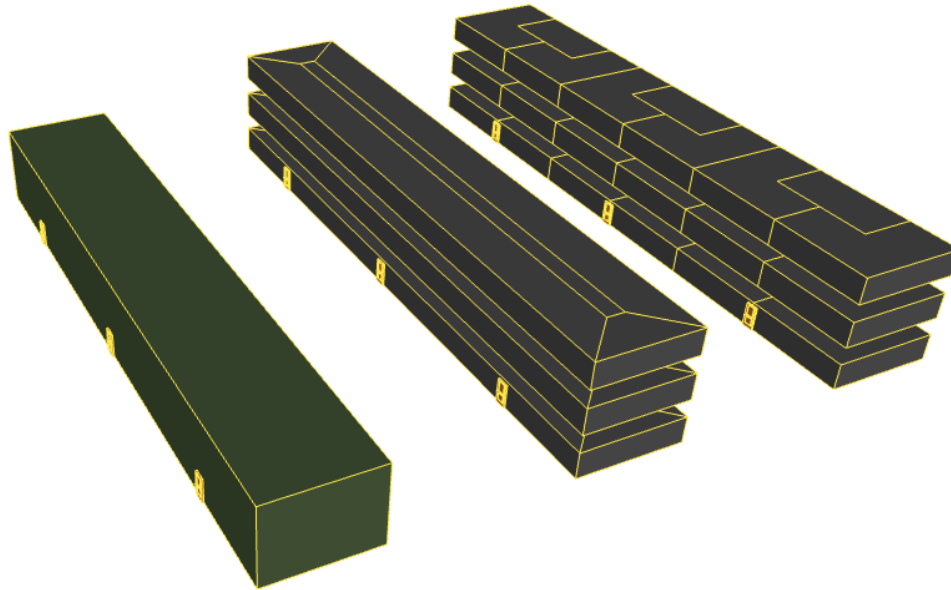


Abbildung 3: Unterschiedliche Zonierungsansätze für Mehrfamiliengebäude. Links: Einzoner. Mitte: Zonierung in Rand- und Kernbereiche. Rechts: Zonierung nach typischen Wohnungsgrundrissen.

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 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 Quartiersebene, 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., Quian, 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.