

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Zentrum für nachhaltiges Bauen

Dynamische Sensitivitätsanalysemethoden energetischer  
Wohngebäudequartierssimulationen

Manuel Lindauer

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas Kolbe

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang  
3. Prof. Dr. ir. Jan L. M. Hensen,  
Technische Universität Eindhoven, Niederlande

Die Dissertation wurde am 12. Januar 2017 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 31. März  
2017 angenommen.

# Vorwort

Bei der Entstehung dieser Arbeit lag der Fokus ursprünglich auf der Modellierung von Stadtquartieren. Es hat sich im Laufe der Entwicklung des Modells EmMi-transient herausgestellt, dass die Modellierung zwar eine Herausforderung bzgl. der Programmierung ist, aber viel schwerwiegender der Mangel an verlässlichen, detaillierten Daten zur Parametrisierung von Stadtquartiersmodellen ist. Daher änderte sich der Schwerpunkt der Arbeit hin zu Sensitivitätsanalysemethoden, die eine Priorisierung der für die Parametrisierung und Validierung notwendigen Daten ermöglichen. Bei der Anpassung der Sensitivitätsanalysemethoden auf die im Kontext Energie und Stadt eingesetzten Arten von Modellen sind eine Vielzahl an Grundlagen notwendig, um die Modellierungstechnik und die darauf angewandten Sensitivitätsanalysemethoden verstehen zu können.

Dies spiegelt sich im Umfang dieser Arbeit wider. Die Grundlagen für die Erstellung von Stadtquartiersmodellen gehören in den Augen des Autors genauso dazu wie die existierenden und für die Untersuchung von Stadtquartiersmodellen eingesetzten Sensitivitätsanalysemethoden. Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Definition und Anwendung einer dynamischen Sensitivitätsanalysemethode, welche auf den Anwendungszweck Stadtquartiersmodell hin maßgeschneidert ist und hierfür teilweise Anleihen aus anderen Forschungsgebieten nimmt. Eine Kurzbeschreibung des Tools EmMi-transient, auf welches die Sensitivitätsanalysemethodik angewandt wird, ist im Hauptteil dieser Arbeit dargestellt, im Ausblick werden zukünftige Anwendungen und Erweiterungen des Modells beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung ist im Anhang zu finden, um der Öffentlichkeit die Ideen und Feinheiten des Modells zugänglich zu machen.

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Personen. Zuerst möchte ich hier Prof. Gerd Hauser erwähnen, ohne dessen Fürsprache ich vermutlich nicht am Zentrum für nachhaltiges Bauen der TU München gelandet wäre. Ohne ihn wäre dementsprechend wahrscheinlich auch diese Dissertation nicht entstanden. Prof. Hauser hat mich vor allem in der Anfangsphase meiner Promotion unterstützt und mir geholfen, die grundlegenden Ideen dieser Dissertation zu entwickeln, welche dann im weiteren Verlauf der Promotion teilweise weiterverfolgt, teilweise aber auch fallen gelassen wurden. Sein Tod im Jahr 2015 war ein tiefer Einschnitt und hat im Leben vieler Menschen eine Lücke hinterlassen.

Im Falle meines Promotionsvorhaben wurde diese Lücke von Prof. Klaus Peter Sedlbauer gefüllt, der die Rolle des Doktorvaters übernommen hat und dabei immer für inhaltliche und methodische Diskussionen zur Verfügung stand. Hierfür sowie für die Freiräume, die ich bei

## *Vorwort*

der Arbeit am Lehrstuhl für Bauphysik hatte, will ich mich herzlich bei Prof. Sedlbauer bedanken. Aber auch bei all seinen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bauphysik, insbesondere Roland Göttig und Simon Schmidt, will ich mich für die vielen Diskussionen, Ratschläge und Verbesserungsvorschläge bedanken, die sie im Laufe der Erstellung der Arbeit eingebracht haben.

Mein Dank gilt weiterhin Prof. Werner Lang, bei dem ich immer ein offenes Ohr für fachliche und sonstige Fragen gefunden habe. Prof. Lang hat mir auch bezüglich meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für nachhaltiges Bauen genug Freiräume geschaffen, so dass ich die Dissertation fertigstellen und dabei gleichzeitig die Tätigkeiten des Zentrums bewältigen sowie meiner Elternrolle gerecht werden konnte. Bezüglich der Zusammenarbeit innerhalb des Zentrums gilt mein herzlicher Dank allen dortigen Kolleginnen und Kollegen, die immer wieder Arbeiten für mich übernommen haben, um mich zu entlasten.

Besonders will ich meiner Mentorin Prof. Isabell Nemeth danken. Durch ihre Arbeiten konnten die Ideen dieser Dissertation konkrete Formen annehmen. Sie hat mich durch Diskussionen über die „Stellschrauben“ von Quartieren auf den Weg zu Sensitivitätsanalysemethoden gebracht und stand für alle fachlichen oder organisatorischen Fragen praktisch Tag und Nacht zur Verfügung. Besonders bedanken will ich mich für ihre steten Bemühungen und Ideen hinsichtlich der Weiterentwicklung des Zentrums, für das sie eine federführende Rolle innehatte.

Isabell Nemeth war durch ihre Rolle als Project Team Leader der Gruppe Energy Efficient Buildings and Communities (EEBC) gleichzeitig mein Verbindungsglied zur International Graduate School for Science and Engineering (IGSSE). Innerhalb der Gruppe EEBC waren durch die interdisziplinäre Zusammensetzung interessante Diskussionen möglich und die gemeinsamen Unternehmungen im Rahmen des Qualifizierungsprogramms der IGSSE haben viel zu meiner Persönlichkeitsbildung beigetragen. Daher auch vielen Dank an Elisabeth Endres, Mareike Ettrich, Florian Sängler und Mark Windeknecht, denen ich für die Arbeiten an ihren Dissertationen und den weiteren Werdegang viel Erfolg wünsche.

Der IGSSE und den Mitarbeitern dort will ich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung vor allem bei organisatorischen Fragen danken sowie für die Möglichkeit zur Durchführung meines Auslandsaufenthaltes an der TU Eindhoven.

An der TU Eindhoven konnte ich mich während meines Auslandsaufenthaltes am Lehrstuhl Building Performance von Prof. Jan Hensen zwei Monate lang intensiv mit meinem Dissertationsthema beschäftigen und dabei durch Gespräche mit seinen Mitarbeitern, allen voran Roel Loonen und Isabella Gaetani, austauschen und durch die Präsentation meiner Ideen wertvolles Feedback erhalten. Vielen Dank hierfür sowie für die Übernahme der Rolle des externen Gutachters meiner Dissertation.

Schlussendlich gilt mein Dank meiner Frau Anne, die mich stets bestärkt und unterstützt hat und mir zu Hause den Rücken frei gehalten hat. Zusammen mit unseren beiden tollen Kindern sorgte sie so für einen guten Ausgleich vom wissenschaftlichen Arbeiten.

# Zusammenfassung

Gebäude haben einen wesentlichen Anteil am weltweiten Energiebedarf und daher ist es für die Erreichung der beim Klimagipfel 2015 in Paris vereinbarten Klimaschutzziele notwendig, Energieeinsparungen im Gebäudesektor zu realisieren und auf erneuerbaren Energieträgern basierende Systeme einzusetzen. Dabei werden die Gebäude vermehrt nicht mehr als einzelne Objekte betrachtet, sondern werden in einen Quartierskontext eingebettet, welcher zusätzliche Energieeffizienzmaßnahmen ermöglicht.

Zur Untersuchung von Gebäudequartieren existieren vielfältige Modelle, die jedoch alle auf Daten zur Parametrisierung und Validierung angewiesen sind, welche bisher kaum vorhanden sind. Die Interpretation und die Ergebnisse hängen maßgeblich von den Eingabedaten ab. Daher müssen Methoden zur Bewertung von Quartiersmodellen entwickelt werden, die es Entwicklern ermöglichen, die Modelle besser zu verstehen und die Ergebnisse daher verlässlicher zu machen.

In dieser Arbeit werden darum vorhandene Gebäude- und Quartiersmodelle sowie Sensitivitätsanalysemethoden, die auf diese Modelle angewandt wurden, untersucht. Daraus abgeleitet wird eine Sensitivitätsanalysemethodik unter Nutzung der effizienten Elementareffekt-Methode, die an die spezifischen Eigenheiten von Quartiersmodellen angepasst ist und dabei insbesondere die Dynamik der Zielgrößen und der Parameter berücksichtigt.

Mittels dieser Methode wird eine beispielhafte Sensitivitätsanalyse an einem im Modell EmMi-transient abgebildeten Quartier durchgeführt. Dabei wurden vor allem die Parameter zum Luftwechsel und der Solltemperatur, aber auch thermische Eigenschaften der Bauteile sowie anlagentechnische Parameter als einflussreich ermittelt. Hieraus werden Empfehlungen zur Verbesserung der Modellierung und für die zukünftige Datenerfassung in dem Quartier zur Steigerung der Verlässlichkeit der Modellergebnisse abgeleitet.

Die vorgestellte Methodik wird schließlich hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Modelle und Sensitivitätsindizes bewertet und ein Ausblick auf fortführende Arbeiten gegeben.



# Abstract

Buildings have significant shares of the worldwide energy demand. In order to reach the climate protection goals defined at COP 2015, energy-saving measures and systems based on renewable energy have to be put into practice in buildings. Examining buildings in the context of districts allows for further energy efficiency improvements compared to single buildings.

Many models for enabling the analysis of districts are available. All of these models need data for parametrization and validation. The interpretation and results of such models depend highly on the input data. However, the sources for this data are rare. Therefore, methods are needed, which allow for better understanding and more reliable results of such models.

In this thesis existing building and district models as well as subsequently applied sensitivity analysis methods are examined. A use-case specific sensitivity analysis methodology using the efficient elementary effects method is derived. This method incorporates the characteristics of district models, especially the dynamics of relevant target functions and parameters.

Using this method an exemplary sensitivity analysis of a district, modeled in EmMi-transient, is conducted. Hereby, parameters describing air change rate and set point temperature as well as thermal properties of the building's construction and heating system parameters are identified as being most influential. According to these results, recommendations for model improvements and strategies to collect data on the district in order to improve reliability of the results are derived.

Finally, this sensitivity analysis method is reviewed in terms of transferability to other models as well as other sensitivity indexes and an outlook for future extensions of both the model and the sensitivity analysis method is given.



# Executive Summary

In Germany buildings have significant shares of approximately 40 % of the total final energy demand and are responsible for one third of the CO<sub>2</sub> emissions. Approximately 75 % of the energy demand is used in terms of space heating. In order to reach the goals of the climate protection policies, defined by the German government and at COP 2015 in Paris, saving energy, e.g. by increasing overall efficiency, is essential. A building's energy needs can be reduced, among other things, by refurbishing its envelope and/or heating system. While these renovation measures are undertaken on a building scale, some efficiency measures only have an impact when used in the scope of a whole district. In this context, especially systems providing decentralized electricity generation from renewable energy sources can have a high impact. If used effectively, they can reduce the amount of energy needed from other sources. However, if used inefficiently, they can also cause higher strain of the grid .

As the implementation of measures is cost intensive and time consuming the evaluation of effective measures on a district's scale requires reliable models. Particularly, for the assessment of measures using renewable energy sources, dynamic models considering annual objectives and dynamic energy flows are inevitable. For projections physical bottom-up models are suited best, as they allow for analyzing the effects of recent, not yet established technologies. For reliable models validation is necessary. However, data for validation is hardly accessible, especially whenever one is interested in larger districts and time resolved values. Therefore, sensitivity analysis and uncertainty quantification can provide insight and increased confidence in the model's behavior. In literature, most sensitivity analysis methods applied to building simulation models use scalar target functions and hence, do not respect the dynamics of the energy flows in buildings.

The purpose of this dissertation is to introduce a sensitivity analysis method for energy simulations of residential districts, which is able to assess the influence of static as well as dynamic parameters regarding time series target functions and creates a ranking of the parameter's influences using the factors prioritisation sensitivity analysis setting. This sensitivity analysis method is used to answer research questions on the change of parameter's influences due to ongoing refurbishment activities. According to these results strategies to collect data on the district for more reliable modeling are derived.

The key performance indicators used as target functions for the sensitivity analysis in this thesis are the final energy demand of the heating system, the average temperature in the thermal zones as well as the purchased and the surplus electricity. For these target functions the dynamic behavior is important regarding e.g. planning of grid infrastructure or overheating



## Executive Summary

issues. CO<sub>2</sub> emissions are not considered as target function because the time of emission is not important when looking from a global, climate change perspective.

Static parameters can be categorized into discrete, e.g. type of heating system, and continuous ones, e.g. U-value, as well as parameters used for rescaling an input time series, e.g. a scaling parameter for load profiles. In contrast, dynamic parameters are triggered by an event, which takes place at an uncertain time, lasting for uncertain duration and leads to an uncertain value of parameter change. Hence, the parameter's change in value and time of change have to be analyzed. Such dynamic parameters occur more frequently in district models whenever occupant behavior, operation of heating and electric systems or grid operation are considered. The dynamic parameters' influences have to be evaluated using sensitivity analysis methods.

The developed sensitivity analysis methodology is based on the elementary effects screening technique, which is a global qualitative sensitivity analysis method suitable for complex computational demanding models with a large number of parameters. The parameter sampling of the elementary effects methods is very efficient. Starting from a random point in the discretized parameter space, a trajectory is created by iteratively changing each parameter by a fixed step size  $\Delta$ .

The elementary effects are adapted to a sequential approach in which sensitivities are calculated for every time step of the simulation results. In addition, the method is transferred to an approach using functional transformation. This reduces the dimension of the time series by transforming the resulting data using a function basis and calculating sensitivity indexes for the coordinates with respect to this basis.

In the sequential approach for a model  $Y : I \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  defined for a discretized time interval  $I = \{t_1, \dots, t_n\}$  and parameters  $x = (x_i)_i \in \Omega$  the elementary effects  $EE_i(t)$  of the model's result  $Y(t; x)$  for parameter  $x_i$  are calculated for every time step  $t \in I$  using the formula

$$EE_i(t) = \frac{Y(t; x + e_i \Delta) - Y(t; x)}{\Delta}$$

The derived sensitivity index  $\mu_i^*(t)$  is used to rank the parameters. It is calculated as the mean of the distribution of the absolute values of the elementary effects of the  $r$  trajectories using the formula

$$\mu_i^*(t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j(t)|$$

Using a moving mean on the model's results before calculating the sensitivities can be helpful to deduce an overall parameter ranking as the sensitivities become stratified over time. The averaging interval depends on the induced error and the target function, as short-term fluctuations will be disregarded due to the smoothing. The induced error can be quantified using a mean squared error or root mean squared error calculation.

For the second approach using functional transformation, a finite functional transformation  $FT_K(f)$  of dimension  $K$  for a function  $f : t \mapsto f(t)$  is given by

$$FT_K(f)(t) = \sum_{k=1}^K c_k \Phi_k(t)$$

Here,  $\Phi_k$  are the basis functions and  $c_k$  are the coefficients of the transformed data with respect to this basis function for  $1 \leq k \leq K$ . The calculation of the coefficients is done using a least-square fit method.

Then the functional elementary effects for parameter  $x_i$  are calculated by

$$fEE_i(k) = \frac{c_k(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_n) - c_k(x_1, \dots, x_n)}{\Delta}$$

and represent the change of the coefficients of the functional transformation due to parameter changes of  $x_i$ .

The derived sensitivity index  $\mu_f^*$  for the overall influence of parameter  $x_i$  on coefficient  $c_k$  is given by the mean of the absolute values of the functional elementary effects of the  $r$  trajectories using the formula

$$\mu_f^*(i, k) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |fEE_i^j(k)|$$

Numerous function bases exist for functional transformations. In this thesis an adaptive basis calculated by principal component analysis is used for the transformation. This basis is calculated from the model results to represent the data's main effects. In order to assess the meaning of each basis function and therefore the meaning of the coefficients and the derived sensitivities, the basis has to be analyzed and interpreted. Additionally, the constant Fourier basis is considered for transformations which can be used to identify periodic patterns in the model's results. The number of evaluated basis functions can be chosen in dependence of the induced error quantified by a root mean squared error calculation.

The proposed sensitivity analysis method is exemplarily applied to the bottom-up model EmMi-transient, a self-developed model using MATLAB as framework and EnergyPlus as building energy simulation. EmMi-transient is based on geographic information system's (GIS) data as well as statistical and building typology data. The buildings in a district are modeled geometrically from the GIS data considering mutual shading. The assemblies of the building's envelope are assigned from the TABULA building typology. The number of inhabitants and the annual electricity demand for household applications are derived from statistical sources, e.g. population projections or block-wise aggregated data on buildings. The type of heating system and existence of photovoltaic (PV) or solar thermal (ST) systems are assigned by scenarios. These scenarios include the highly uncertain refurbishment status. By

## Executive Summary

using this data, EmMi-transient creates EnergyPlus simulation models from templates and simulates them in parallel. Additionally, a coupling mechanism using the Functional Mockup Interface (FMI) is implemented in order to model district measures like electric demand side management or district heating. Such measures have to change parameters during the simulation in dependence of district aggregated results using FMI. A schematic of EmMi-transient is shown in figure 0.1.

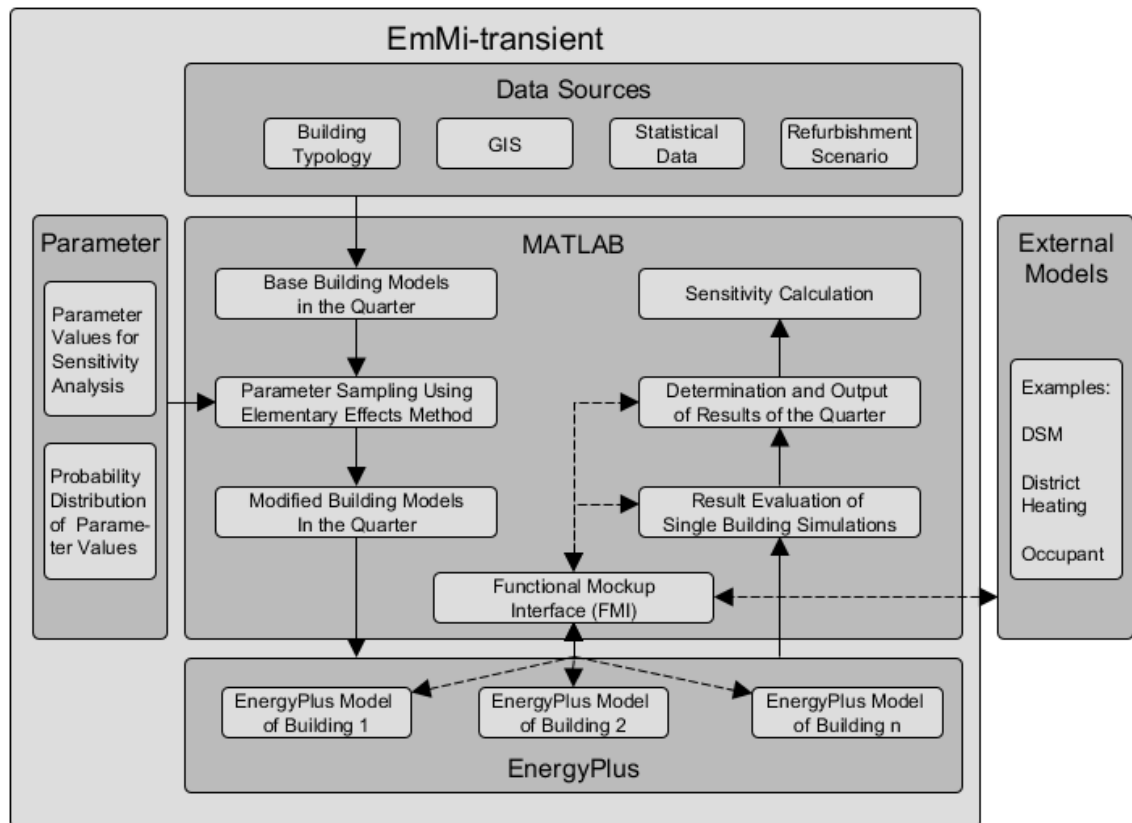


Figure 0.1.: Schematic of EmMi-transient

Compared to existing models, due to the use of EnergyPlus as a whole building energy simulation, EmMi-transient models the building's envelope, heating systems and decentralized electricity generation systems comprehensively. The model generation in EmMi-transient is documented in detail in the appendix of this thesis. Currently, due to the zoning and the usage conditions within the zones, only residential buildings can be examined. Costs for refurbishments or operations are not included and the model is not yet validated because of lack of suitable data. Using the sensitivity analysis method presented in this thesis, data acquisition requirements can be derived in such a way that model validation will be possible in the future. The implemented FMI coupling of the building models is a unique feature not yet found in other district models with this level of building detail.

The sensitivity analysis varies 21 parameters. These parameters include thermal properties of building components, parameters of the heating and electric systems as well as occupant behavior related aspects. The variation of parameters is combined for all buildings of the district to assess the parameters' influence on the target function behavior of the whole dis-

trict. For example, the U-value of the windows is taken individually for each building from the building typology data, but the standard deviation for the normal distribution representing the parameter's variation is the same for all buildings.

The district consists of 25 residential buildings constructed before 1968 with a overall heated area of 10,426 m<sup>2</sup>. The refurbishments of the buildings' envelopes and systems are defined in scenarios. In the non-refurbished scenarios the buildings' envelopes were modeled according to the building typology information for their building age. In the refurbished scenarios measures for the external walls, windows and the roof were applied. The heating system is varied between gas boilers and air to water heat pumps and can be supported by solar thermal collectors for water heating. Decentralized electricity generation can be provided by PV systems. The occupant behavior is considered in a simplified way by using schedules for the occupancy and the electric demand for household applications. Ventilation considers window opening and infiltration due to leakage.

The model's results for all simulation runs show that the final energy demand in gas boiler scenarios is 3.8 to 4.5 times higher than in heat pump scenarios due to the coefficient of performance of the heat pumps and 1.9 to 2.3 times higher in non-refurbished scenarios compared to refurbished buildings' envelopes. The purchased electricity is about 1.1 to 1.5 times higher in non-refurbished scenarios compared to refurbished scenarios. The average indoor temperature in refurbished scenarios is higher than in non-refurbished scenarios. Heat pump scenarios have a 1.5 to 2.6 times higher electricity demand than gas scenarios. PV and ST scenarios have a slightly higher annual final energy demand than scenarios without such technologies. The wide spread of the results underlines the necessity of sensitivity analysis for assessing parameter influences.

Overall, the sensitivity analysis identified the following parameters as influential when neglecting the dynamic behavior of the parameter influences:

- Infiltration rate and set point temperature in almost all scenarios and regarding all target functions
- In non-refurbished scenarios the conductivity and thickness of the structure
- In refurbished scenarios the thermal properties of the insulation
- For heat pump systems the rated power, coefficient of performance (COP), and partially the electricity demand for household applications
- For gas systems the boiler efficiency
- For both heating systems the efficiency of the pumps, especially regarding the target function of purchased electricity
- Regarding the average indoor temperature and in some scenarios the final energy demand the windows' thermal properties

From these sensitivity analyses it can be concluded that the thermal properties of the buildings' envelope are important to account for. The envelope construction, in terms of thickness and specific heat capacity of each layer, is not yet included in building typology data, although this is important for creating models of the building envelope. Likewise, the parameters for

## *Executive Summary*

heating systems should be determined in more detail in the future. The electricity demand for household applications is already measured by electric meters. In the future, smart meters can provide time resolved data which can be used for both parametrization and validation. The efficiency of pumps in the heating system should be recorded. Regarding the model within EmMi-transient, it can be concluded that modeling of the solar thermal systems, heat pumps and PV systems should be improved.

In review, the introduced sensitivity analysis method can be used to identify the parameters' influence on time series target functions using the sequential approach with moving mean and the approach using functional transformation with principal component analysis. By combining a sequential approach with moving means, the climate related fluctuations of influences can be assessed, but short-term fluctuations are neglected. For assessing the influence of parameters on short-term fluctuations, such as damping of the energy demand due to energy storage, the functional transformation approach proves beneficial. The effort to identify the effects represented by the basis functions used for the transformation should not be underrated. Both approaches can be transferred to other models, which must be able to automatically change parameter values and provide the target function values in an appropriate format. In each case the error due to smoothing or finite functional transformation has to be quantified and a limit on the error can be used to estimate an adequate averaging interval or a convenient number of basis functions. The basics for evaluating the influence of dynamic parameters changes due to events were introduced but not applied in this thesis.

The results of the sensitivity analysis method can be used to derive recommendations for future data acquisition in order to improve model validation and to create more reliable models. This methodology is mainly designed for model developers, who want to gain confidence in regard to their model's behavior, but also for model users who need to know what effort should be put into data acquisition activities. Using such improved models, strategies for holistic district renovations can be established, in which renewable energy sources can be connected to the buildings in a comprehensive sense, e.g. by using the buildings as thermal storage. For the operation of districts and the respective grids the methodology can be used to analyze and optimize control strategies. This could also result in a minimized risk of uncomfortable thermal conditions for occupants and recommendations for building operation and control.

In practical terms dynamic sensitivity analysis can be used to evaluate the integration of highly dynamic renewable energy generation. This could prove beneficial for society when renewable energy generation in connection with buildings can be used to reduce strain of the grid. This could also result in reduced financial effort for grid operators due to an optimized, more efficient usage of the existing grid. The future renovations of a quarter can be considered for that and therefore incorrect planning can be minimized. Especially for future "Smart Cities", in which comprehensive networking results in highly complex systems, an assessment method based on scientific findings for evaluating planning tools is inevitable.

One challenge for the application of the methodology is to define the distribution of the parameters based on scientific principles and reliable data sources, as these distributions have

a major impact on the results of the sensitivity analysis. Another challenge is to quantify the induced error due to smoothing and finite functional transformation. These errors have to be considered in the evaluation of the parameters' influences.

In the future, this methodology can be extended for usage with quantitative sensitivity indexes, like variance based measures. Due to the computational effort of quantitative sensitivity indexes, a reduction of parameters by the method established in this thesis, is necessary. The sampling of the parameters can be modified in such a way that parameters can be changed on different levels of the building stock. For example only for subsets of one building age class or only multi-family homes. For the sequential approach other averaging methods, e.g. a weighted moving mean, can be used to take seasonal changes into more detailed consideration. For the principal component analysis the use of weighting factors can be evaluated. In general more function bases can be analyzed regarding their application for functional transformation of model's results and the calculation of sensitivities for the coefficients of the functional transformation. The influence of additional parameters can be evaluated, especially climate related parameters as well as more detailed occupant behavior parameters.

In the future, the model within EmMi-transient can be extended to larger districts by using cloud computing services. This also implies the extension to other building types exceeding residential buildings. However, for non-residential buildings the data resources are even more scarce. Coupling EmMi-transient via FMI to energy system models or occupant models will open a wide field of additional applications. The already included district measures can be extended. To enable the use of EmMi-transient not only in an academic context, but also for projections in real projects, an inclusion of economic target functions is inevitable. The involved uncertainties due to forecasts of the economic development can then be part of the sensitivity analysis.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Executive Summary</b>	<b>vii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xxi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xxv</b>
<b>I. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1. Motivation</b>	<b>3</b>
<b>2. Methodisches Vorgehen</b>	<b>7</b>
2.1. Ziel der Arbeit . . . . .	8
2.2. Abgrenzung des Themas . . . . .	8
2.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>II. Bestehende Grundlagen</b>	<b>13</b>
<b>3. Energiebedarfsberechnungsmethoden</b>	<b>15</b>
3.1. Quasi-stationäre Methoden . . . . .	17
3.2. Dynamische vereinfachte Methoden . . . . .	20
3.3. Thermische Gebäudesimulation . . . . .	21
3.4. Validierungsmethoden für Energiebedarf . . . . .	24
<b>4. Modellierungstechniken für energetische Stadtmodelle</b>	<b>27</b>
4.1. Physikalischer bottom-up Ansatz . . . . .	28
4.2. Statistischer bottom-up Ansatz . . . . .	30
4.3. Hybrider bottom-up Ansatz . . . . .	34
4.4. Top-down Ansatz . . . . .	35



<b>5. Sensitivitätsanalysemethoden</b>	<b>37</b>
5.1. Fragestellungen für Sensitivitätsanalysen . . . . .	38
5.2. Lokale Sensitivitätsanalysemethoden . . . . .	40
5.3. Globale Sensitivitätsanalysemethoden . . . . .	42
5.4. Dynamische Sensitivitätsanalysemethoden . . . . .	51
5.5. Darstellung von Sensitivitäten . . . . .	62
<b>III. Stand des Wissens</b>	<b>69</b>
<b>6. Existierende energetische Stadtmodelle</b>	<b>73</b>
6.1. Übersicht . . . . .	73
6.2. Stationäre Modelle . . . . .	89
6.3. GIS-basierte Modelle . . . . .	92
6.4. Statistikbasierte Modelle . . . . .	93
6.5. Energiesystemmodelle . . . . .	95
6.6. Wirtschaftsmodelle . . . . .	96
6.7. Dynamische Modelle . . . . .	97
6.8. Parallelisierte Modelle . . . . .	101
6.9. Gekoppelte Modelle . . . . .	102
6.10. Sonstige Modelle . . . . .	103
6.11. Bewertung der Modelle . . . . .	104
<b>7. Sensitivitätsanalyse in Gebäudesimulationen</b>	<b>107</b>
7.1. Stadtmodelle . . . . .	109
7.2. Einzelgebäude . . . . .	113
7.3. Bewertung . . . . .	116
<b>IV. Transfer der Sensitivitätsanalysemethoden auf Stadtmodelle</b>	<b>119</b>
<b>8. Fragestellung und Auswahl der Sensitivitätsanalysemethodik</b>	<b>123</b>
<b>9. Zielfunktionen in Stadtmodellen</b>	<b>125</b>
9.1. Heizwärmebedarf . . . . .	125
9.2. Endenergiebedarf . . . . .	126
9.3. Primärenergiebedarf . . . . .	126
9.4. CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	127
9.5. Thermische Behaglichkeit . . . . .	127
9.6. Strombedarf . . . . .	128
9.7. Lokale Stromerzeugung . . . . .	128
9.8. Eigenstromnutzung . . . . .	129
<b>10. Parameterarten</b>	<b>131</b>
10.1. Diskrete konstante Parameter . . . . .	132

10.2. Kontinuierliche konstante Parameter . . . . .	133
10.3. Vordefinierte Zeitreihe als Parameter . . . . .	134
10.4. Durch Ereignisse beeinflusste Parameter . . . . .	135
<b>11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode</b>	<b>139</b>
11.1. Allgemeine Anpassungen . . . . .	139
11.2. Anpassungen für sequentielle Sensitivitätsanalyse . . . . .	142
11.3. Anpassungen der funktionalen Transformationsmethode . . . . .	146
11.4. Anpassungen für dynamische Parameter . . . . .	150
<b>V. Exemplarische Sensitivitätsanalyse</b>	<b>157</b>
<b>12. Modell EmMi-transient</b>	<b>161</b>
12.1. Beschreibung . . . . .	161
12.2. Zukünftige Validierung . . . . .	162
12.3. Einordnung hinsichtlich vorhandender Modelle . . . . .	163
12.4. Exemplarischer Block der Nürnberger Weststadt . . . . .	165
12.5. Sanierungsszenarien . . . . .	171
12.6. Parameter der Sensitivitätsanalyse . . . . .	174
<b>13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen</b>	<b>181</b>
13.1. Modellergebnisse in den Szenarien . . . . .	183
13.2. Sensitivitäten in den Szenarien . . . . .	190
13.3. Abgeleitete Empfehlungen . . . . .	213
<b>VI. Fazit und Zusammenfassung</b>	<b>215</b>
<b>14. Bewertung und Übertragbarkeit der Methodik</b>	<b>219</b>
<b>15. Ausblick</b>	<b>223</b>
15.1. Erweiterungen EmMi-transient . . . . .	223
15.2. Erweiterung der Sensitivitätsanalysemethodik . . . . .	224
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Glossar</b>	<b>255</b>
<b>VII. Appendix: Modelldokumentation EmMi-transient</b>	<b>261</b>
<b>A. Datengrundlage</b>	<b>265</b>
A.1. GIS Daten . . . . .	265
A.2. Statistische Daten . . . . .	267
A.3. Gebäudetypologiedaten . . . . .	270
A.4. Klimadaten . . . . .	272

<b>B. Modellierung der Gebäudehülle</b>	<b>273</b>
B.1. Zonierung . . . . .	273
B.2. Geometrie . . . . .	275
B.3. Konstruktionen . . . . .	286
B.4. Luftwechselrate . . . . .	291
<b>C. Modellierung des Heizungssystems</b>	<b>293</b>
C.1. Wärmeerzeuger . . . . .	298
C.2. Wärmespeicher . . . . .	304
C.3. Verteilung . . . . .	305
C.4. Übergabesysteme . . . . .	306
C.5. Hilfsenergiebedarf . . . . .	307
C.6. Lüftungssystem . . . . .	308
C.7. Auslegung der Systeme . . . . .	308
<b>D. Modellierung der Stromerzeugung und des Strombedarfs</b>	<b>311</b>
D.1. Haushaltsstrombedarf . . . . .	311
D.2. Lokale Stromerzeugung . . . . .	313
D.3. Elektrische Lastverschiebung . . . . .	315
<b>E. Modellierung des Nutzerverhaltens</b>	<b>317</b>
<b>F. Abbildung des Sanierungsverhaltens</b>	<b>321</b>
F.1. Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle . . . . .	322
F.2. Sanierungsmaßnahmen der Anlagentechnik . . . . .	323
<b>G. Kopplung von Einzelgebäudesimulationen</b>	<b>325</b>
G.1. FMI für Ereignisse . . . . .	327
G.2. Elektrische Lastverschiebung durch Wärmepumpen . . . . .	328
<b>H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung</b>	<b>329</b>
H.1. Aufbereitung der Eingabedaten . . . . .	331
H.2. Vorbereitung der Simulation . . . . .	332
H.3. Erzeugung des Gebäudebestands . . . . .	334
H.4. Erzeugung der EnergyPlus-Modelle . . . . .	334
H.5. Simulation . . . . .	335
H.6. Heizperioden- und Monatsbilanzverfahren . . . . .	336
H.7. Summierung der Ergebnisse . . . . .	337
H.8. Berechnung der Sensitivitäten . . . . .	337
H.9. Ergebnisdarstellung . . . . .	339

<b>VIII. Appendix: Vorveröffentlichungen</b>	<b>341</b>
<b>BauSIM 2014: Instationäre Energiebedarfs- und angebotssimulation eines Stadtquartiers mit Einbeziehung des Nutzerverhaltens</b>	<b>345</b>
<b>SBE 2016: Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters</b>	<b>352</b>
<b>CESB 2016: Global Impulse Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters</b>	<b>362</b>
<b>BauSIM 2016: FMI-Kopplung von EnergyPlus mit MATLAB zur Abbildung von Interaktionen im Distrikt-Modell EmMi-transient</b>	<b>370</b>
<b>CESBP 2016: Global Dynamic Sensitivity Analysis using Functional Transformation for Energy Simulation of Residential Quarters</b>	<b>377</b>



# Abbildungsverzeichnis

0.1.	Schematic of EmMi-transient . . . . .	x
4.1.	Übersicht bottom-up und top-down Ansätze . . . . .	28
5.1.	Übersicht der Samplingmethoden . . . . .	49
5.2.	Fourier-Basisfunktionen . . . . .	58
5.3.	Beispielhafte Scatterplots . . . . .	63
5.4.	Darstellungsvarianten für Sensitivitäten . . . . .	64
5.5.	Zeitreihendarstellung als Graph über die Zeit . . . . .	66
5.6.	Beispielhafte Darstellung von Rasterdiagrammen . . . . .	67
5.7.	Beispielhafte Darstellung des Effekts einer Hauptkomponente . . . . .	67
10.1.	Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameters durch ein Ereignis . . . . .	135
10.2.	Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameters durch ein periodisches Ereignis . . . . .	136
11.1.	Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisstartzeiten und sich nicht überschneidender Ereignisdauer . . . . .	151
11.2.	Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisstartzeiten und sich überschneidender Ereignisdauer . . . . .	152
11.3.	Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisdauern $\Delta t_1$ und $\Delta t_2$ . . . . .	153
11.4.	Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Parameteränderungen $\Delta P_1$ und $\Delta P_2$ . . . . .	154
12.1.	Schematische Darstellung von EmMi-transient . . . . .	161
12.2.	Darstellung des gesamten Quartiers und des untersuchten Blocks . . . . .	166

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

12.3.	LoD1 Daten des untersuchten Blocks . . . . .	167
12.4.	Dreidimensionale Darstellung der LoD1 Daten . . . . .	169
12.5.	Klimadaten für Nürnberg . . . . .	171
13.1.	Boxplotdiagramme aller Szenarien . . . . .	186
13.2.	Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung . . . . .	187
13.3.	Durchschnittliche Innenraumtemperatur . . . . .	188
13.4.	Bezogene elektrische Energie . . . . .	189
13.5.	Eingespeiste elektrische Energie . . . . .	190
13.6.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_GAS* für Endenergiebedarf . . . . .	193
13.7.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_WP* für Endenergiebedarf . . . . .	194
13.8.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_GAS* für Endenergiebedarf . . . . .	195
13.9.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_WP* für Endenergiebedarf . . . . .	196
13.10.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_GAS* für durchschnittliche Innenraumtemperatur . . . . .	197
13.11.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_WP* für durchschnittliche Innenraumtemperatur . . . . .	198
13.12.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_GAS* für durchschnittliche Innenraumtemperatur . . . . .	199
13.13.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_WP* für durchschnittliche Innenraumtemperatur . . . . .	200
13.14.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_GAS* für bezogene elektrische Energie . . . . .	201
13.15.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_WP* für bezogene elektrische Energie . . . . .	202
13.16.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_GAS* für bezogene elektrische Energie . . . . .	203
13.17.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_WP* für bezogene elektrische Energie . . . . .	204
13.18.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien U_*PV für Stromeinspeisung . . . . .	205
13.19.	$\widehat{\mu}^{*167}$ in Szenarien S_*PV für Stromeinspeisung . . . . .	206
13.20.	Hauptkomponenten PC1 und PC2 mit gleitendem Mittel über 167 Stunden für Zielgröße Endenergiebedarf im Szenario U_GAS . . . . .	207
13.21.	Hauptkomponenten PC1 und PC2 für Zielgröße Endenergiebedarf an ausgewählten Tagen im Szenario U_GAS . . . . .	208
13.22.	Sensitivitäten $\mu_f^*$ bzgl. Hauptkomponentengewichtungen der Hauptkomponentenzerlegung für die Zielgröße Endenergiebedarf im Szenario U_GAS . . . . .	209

13.23.	Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC3 mit gleitendem Mittel über 167 Stunden für Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U_GAS 210	
13.24.	Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC3 für Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur an ausgewählten Tagen im Szenario U_GAS . . . . .	211
13.25.	Sensitivitäten $\mu_f^*$ bzgl. Hauptkomponentengewichtungen der Hauptkomponentenzerlegung für die Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U_GAS . . . . .	212
A.1.	Darstellung der LoD0 bis LoD4 . . . . .	266
B.1.	Zonierung der Gebäude . . . . .	274
B.2.	Übersicht der Bauteile bei Gebäuden mit Steildach . . . . .	276
B.3.	Übersicht der Bauteile bei Gebäuden mit Flachdach . . . . .	276
B.4.	Schematische Darstellung der flächentreuen Vereinfachung der Gebäudeumrisse durch <i>SimplifyBuilding</i> . . . . .	278
B.5.	Mögliche Problemfälle bei der Erkennung angrenzender Wände . . . . .	280
B.6.	Erzeugung der Satteldachgeometrie bei rechteckigem Grundriss . . . . .	282
B.7.	Erzeugung der Satteldachgeometrie bei Gebäude mit sechs Ecken und zwei angebauten Seiten . . . . .	283
B.8.	Erzeugung der Pultdachgeometrie bei rechteckigem, an langer Seite angebautem Gebäude . . . . .	284
B.9.	Reihenendhaus mit einer angrenzenden Wand und nach außen ragendem Treppenhaus . . . . .	285
B.10.	Fensterflächen bei freistehendem Gebäude mit 20 % Fensterflächenanteil . . . . .	285
C.1.	Heizungsschema mit Heizkessel oder Fernwärmeübergabestation, ohne Solarthermieunterstützung . . . . .	294
C.2.	Heizungsschema mit Heizkessel oder Fernwärmeübergabestation, mit Solarthermieunterstützung . . . . .	295
C.3.	Heizungsschema mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, ohne Solarthermieunterstützung . . . . .	296
C.4.	Heizungsschema mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, mit Solarthermieunterstützung . . . . .	297
D.1.	Standardlastprofil H0 mit Jahresstromverbrauch von 1000 kWh . . . . .	312



*ABBILDUNGSVERZEICHNIS*

H.1. Ablaufplan von EmMi-transient . . . . . 330

# Tabellenverzeichnis

4.1.	Übersicht statistischer Verfahren für Energieverbrauchsprognosen . . . . .	32
6.1.	Übersicht stationäre Modelle 1 . . . . .	76
6.2.	Übersicht stationäre Modelle 2 . . . . .	77
6.3.	Übersicht GIS-Modelle . . . . .	78
6.4.	Übersicht Statistikmodelle . . . . .	79
6.5.	Übersicht Energiesystem-Modelle . . . . .	80
6.6.	Übersicht Wirtschaftsmodelle . . . . .	81
6.7.	Übersicht dynamische Modelle 1 . . . . .	82
6.8.	Übersicht dynamische Modelle 2 . . . . .	83
6.9.	Übersicht RC-Modelle . . . . .	84
6.10.	Übersicht sonstige Modelle . . . . .	85
6.11.	Kategorisierung der Modelle 1 . . . . .	86
6.12.	Kategorisierung der Modelle 2 . . . . .	87
6.13.	Kategorisierung der Modelle 3 . . . . .	88
12.1.	Tabelle mit manuell ergänzten Werten der Shapedatei . . . . .	168
12.2.	Zuordnung der EmMi-transient Gebäudetypen zu TABULA Gebäudetypen .	170
12.3.	U-Werte der unsanierten Bauteile . . . . .	170
12.4.	Übersicht der untersuchten Szenarien . . . . .	173
12.5.	Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle . . . . .	173
12.6.	Varierte konstante Parameter . . . . .	175
13.1.	Parameter mit Einfluss auf den Endenergiebedarf . . . . .	182
13.2.	Parameter mit Einfluss auf die durchschnittliche Innenraumtemperatur . . .	182

## TABELLENVERZEICHNIS

13.3.	Parameter mit Einfluss auf die bezogene elektrische Energie . . . . .	183
13.4.	Parameter mit Einfluss auf die eingespeiste elektrische Energie . . . . .	183
13.5.	Jährlich summierter Endenergiebedarf, bezogene und eingespeiste elektrische Energie in MWh . . . . .	185
13.6.	Prozentuale Abweichung der Zielgrößen bei sequentieller Auswertung . . .	191
13.7.	Prozentuale Abweichung der Zielgrößen bei Auswertung mit funktionaler Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung . . . . .	207
A.1.	Zusätzliche GIS-Datenfelder . . . . .	266
B.1.	Spezifische Wärmespeicherfähigkeit und Dichte diverser Materialien . . . .	287
B.2.	U- und g-Wert unterschiedlicher Fenstertypen im Bestand gemäß TABULA .	291
C.1.	Automatisch ermittelte Parameterwerte anhand der Typtage . . . . .	309
C.2.	Auslegungstemperatur der Wasserkreisläufe . . . . .	309
F.1.	U-Werte des EnEV 2014 Referenzgebäudes . . . . .	323
F.2.	U- und g-Wert unterschiedlicher Fenstertypen bei Sanierung gemäß TABULA	323
F.3.	IDs der Heizungssysteme . . . . .	324
H.1.	Beschreibung der allgemeinen Informationen in der Gebäudetypologiedatei	331
H.2.	Beschreibung der Bauteilinformationen in der Gebäudetypologiedatei . . . .	332
H.3.	Simulationseinstellungen in der MATLAB-Struktur <i>sim_parameter</i> . . . . .	333
H.4.	MATLAB-Variablendefinition für mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchende konstante Parameter . . . . .	333
H.5.	MATLAB-Variablendefinition für mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchende Ereignisse . . . . .	334
H.6.	MATLAB-Variablendefinition für per FMI auszulesende EnergyPlus-Variablen	334

**Teil I.**

**Einleitung**



# 1. Motivation

Der Gebäudebereich trägt mit Stand 2015 zu etwa 40 % des Endenergiebedarfs und zu etwa einem Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bei [35]. Etwa drei Viertel des Endenergiebedarfs werden zur Bereitstellung der Raumwärme benötigt [140]. Dabei wurden drei Viertel des Gebäudebestands vor der 1. Wärmeschutzverordnung von 1979 errichtet und sind kaum energetisch saniert [34]. Dies ist bei der langen Nutzungsdauer von Gebäuden eine Herausforderung, die nicht kurzfristig gelöst werden kann.

Gleichzeitig ist weltweit der Trend zur Urbanisierung ungebrochen, derzeit leben etwa 50 % der Weltbevölkerung in Städten, für das Jahr 2050 wird ein Anstieg auf 75 % erwartet. Dabei tragen Städte mit ihrer hohen Dichte an Treibhausgas emittierenden Sektoren wie Industrie, Verkehr, Wohnen und Abfall zu rund 70 % der Treibhausgasemissionen bei und werden maßgeblich von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein. [32]

Daher ist es für die zukünftige Entwicklung notwendig, Gebäude energieeffizienter zu betreiben, wie es im Rahmen der von der Bundesregierung 2010 beschlossenen Energiewende [34] vorgesehen ist, und zugleich mögliche Synergien in Städten zu nutzen, die die Effizienz weiter steigern und damit die Emissionen reduzieren können.

In Deutschland wurden als Ziele der Energiewende bis 2050 definiert, dass eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 1990, ein Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 60 %, ein Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von 80 %, eine Minderung des Stromverbrauchs um 25 % gegenüber 2008, eine Reduktion des Wärmebedarfs der Gebäude um 20 % gegenüber 2008 und eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50 % gegenüber 2008 erreicht werden sollen. Weiterhin soll eine stärkere bedarfsgerechte Erzeugung und Nutzung der erneuerbaren Energien realisiert werden. [34]

Zur Erreichung dieser Ziele sind bezogen auf Gebäude vielfältige Optionen möglich und notwendig. Angefangen bei der Reduktion des Heizwärmebedarfs durch Gebäudehüllensanierungen, wie verbesserte Wärmedämmung oder neue Fenster, über den Austausch der Anlagentechnik wie beim Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen und der Nutzung von Umweltenergien bis hin zu Maßnahmen wie Nahwärmenetzen, die nur im Quartierskontext umsetzbar sind.

Für die Gebäude ist dabei eine Steigerung der Sanierungsrate auf mindestens 2 % pro Jahr notwendig [34], in [140] ist sogar von 3,3 % die Rede. Allerdings ist die Datengrundlage im europäischen Wohngebäudebestand zum realen Stand der Sanierungen unbefriedigend, es

## 1. Motivation

besteht Bedarf vor allem hinsichtlich Informationen zur Dämmung der Gebäude und dem Einsatz effizienter bzw. auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Heizungssystemen [245]. Welche Daten genauer erfasst werden sollten ist eine Frage, die mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methodik beantwortet werden soll.

Es ist denkbar, dass zukünftig ein rein auf Strom basierendes Energiesystem für Gebäude Realität werden könnte. Dabei wären solarthermisch unterstützte Wärmepumpen mit Pufferspeichern als regelbare Verbraucher ausgelegt, die je nach Stromangebot unter Einhaltung der Komfortbedingungen aktiviert oder deaktiviert werden. [140]

Daneben ist auch die dezentrale Stromerzeugung, wie etwa durch PV-Anlagen oder kleine Windkraftanlagen, von Interesse. Zur Maximierung des Eigenverbrauchs bei Wärmepumpen in Verbindung mit PV-Anlagen sind dabei mittlere bis hohe Wärmespeicherfähigkeiten der Gebäude notwendig sowie Anpassungen der normativen Anforderungen an die Behaglichkeit, um die energetische Flexibilität der Gebäude ausschöpfen zu können [105]. Die Bewertung der Eigendeckung durch PV-Anlagen wird dabei im Bilanzierungsverfahren der EnEV aufgrund der monatsweisen Bilanzierung überschätzt, hier sind kleinere, an die Perspektive des jeweiligen Anwenders angepasste Zeitschritte notwendig [91]. Es ist auch aufgrund des steigenden Anteils fluktuierender Energieerzeugung sinnvoll den Zeitpunkt des Strombezugs eines Gebäudes in dessen energetische Bewertung einzubeziehen und dadurch nicht nur eine effiziente, sondern auch eine netzdienliche Betriebsweise der Gebäudeanlagen zu realisieren [142]. Aus Sicht des Autors gilt dies ebenso für andere dezentrale Stromerzeugungssysteme sowie quartiersweite Maßnahmen.

Die Bewertung all dieser Maßnahmen, die jeweils auf ein konkretes Gebäude oder ein Quartier angewandt werden können, erfordert im Vorfeld die Verwendung von Modellen, da eine Umsetzung am realen Gebäuden mit hohen Kosten und Aufwand verbunden ist und daher nicht ohne entsprechende Voruntersuchungen durchgeführt werden sollte. Dafür müssen die Modelle verlässliche Ergebnisse liefern. Um die Verlässlichkeit, vor allem in Hinblick auf den zeitlichen Verlauf der Modellergebnisse, zu ermöglichen, werden in dieser Arbeit Methoden zur Sensitivitätsanalyse vorgestellt, welche die Dynamik der hochgradig zeitlich veränderlichen Zielgrößen wie Strombezug oder Stromerzeugung am Gebäude berücksichtigen.

Solch detaillierte Modelle, insbesondere wenn sie ein Quartier oder eine Stadt abbilden, benötigen eine Vielzahl von Parametern, deren Werte für die realen Gebäude zumeist unbekannt sind und daher erst erfasst werden müssen. Die Erkenntnis, welche Parameter den größten Einfluss haben und die daher am genauesten erfasst werden sollten, sollte daher für entsprechende Modelle mittels Sensitivitätsanalysemethoden gewonnen werden. Hierbei können neben statischen Parametern, die über die Simulationszeit konstant sind, auch zeitlich variable Parameter, wie im Falle von Heizungsanlagen eine Nachtabenkungszeit und -temperatur, von Interesse sein. Zur Bewertung des Einflusses solcher veränderlichen Parameter sind kaum bestehende Grundlagen bekannt, daher werden in dieser Arbeit hierzu Überlegungen angestellt.

Auch beim Klimagipfel COP 2015 in Paris und der dort gestarteten Initiative Global Alliance on Buildings and Construction wurde hervorgehoben, dass die Entwicklung von Bewertungsmetriken, welche den Quartierskontext berücksichtigen sowie Synergien durch die Kopplung der Energiesysteme mehrere Gebäude betreffen, einen zukünftigen Schwerpunkt der Forschung darstellen soll. Die Forschungsergebnisse sollen in anwendbarer Form an die Bauindustrie weitergegeben werden [99].

Die im Rahmen der Literaturrecherche für diese Arbeit ermittelten Sensitivitätsanalysemethoden verwenden fast alle skalare Zielgrößen, wie etwa den jährlich aggregierten Endenergiebedarf oder die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Weiterhin wurden kaum Veröffentlichungen bzw. Anwendungen von Sensitivitätsanalysemethoden gefunden, die die Möglichkeit bieten, auch zeitlich veränderliche Parameter, die im Gebäudekontext vor allem hinsichtlich Nutzereinflüssen auftreten, zu untersuchen. Daher ist es das zentrale Ziel der Arbeit, die diversen vorhandenen Sensitivitätsanalysemethoden auf ihre Eignung zur Bewertung von dynamischen Gebäude- und vor allem Quartierssimulationen hin zu untersuchen und, wo nötig, entsprechend anzupassen.

Mögliche Anwendung kann die hier vorgestellte Sensitivitätsanalysemethodik bei Energieversorgern, Stadtwerken, Fernwärmenetzbetreibern, Energiedienstleistern oder Wissenschaftlern finden, die die Modelle ihrer Gebäude- oder Energiesysteme und die darin enthaltenen Mechanismen genauer verstehen wollen. Auch bei Planern, die an Umsetzungen von Sanierungsmaßnahmen arbeiten, kann die Methodik eingesetzt werden, um entsprechende Simulationsmodelle zu untersuchen und im Vorfeld der Umsetzung die richtigen Daten zu erheben. Hierbei können auch Veränderungen, die sich durch die Auswirkungen des Klimawandels für den Energiebedarf und die Energieversorgung der Gebäude ergeben, analysiert werden.

Die Entwicklung des in dieser Arbeit exemplarisch verwendeten Modells EmMi-transient ist maßgeblich von den Vorarbeiten in den Projekten „Energetische Gebäudesanierung in Bayern“ [188] und „Stadtlabor Nürnberger Weststadt“ [191] getrieben. Vor allem hinsichtlich des Einsatzes von auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Heizungsanlagen sowie lokalen Stromerzeugungssystemen wurden die dort eingesetzten stationären Energiebedarfsberechnungsmethoden als nicht ausreichend detailliert genug identifiziert. Daher wird in EmMi-transient die diesen Systemen zugrundeliegende Dynamik durch die Verwendung von transienten Gebäudesimulationen abgebildet. Weiterhin werden Maßnahmen, die mehrere Gebäude betreffen und daher Synergien ermöglichen, erst durch die Kopplung der Einzelgebäudesimulation möglich. Dies wird in EmMi-transient ebenfalls im Rahmen dieser Dissertation umgesetzt. Bei der Recherche zu Daten, die für die Parametrisierung dieses Modells verwendet werden können, wurde dann die wie oben schon angesprochene unzureichende Datengrundlage erkannt und daraus ebenfalls die Notwendigkeit zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen abgeleitet.





## 2. Methodisches Vorgehen

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche zur Ermittlung des Standes des Wissens bezüglich vorhandener energetischer Stadtmodelle durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass für die Abbildung zukünftig durchzuführender Maßnahmen an den Gebäuden vor allem Modelle gemäß dem physikalischen bottom-up Ansatz verwendet werden sollten, um neuartige Technologien untersuchen zu können.

Weiterhin wurden Sensitivitätsanalysemethoden recherchiert, welche bisher bereits im Bereich der thermischen und energetischen Gebäudesimulation und bei Stadtmodellen zum Einsatz kommen. Es hat sich gezeigt, dass globale Sensitivitätsanalysemethoden aufgrund des fehlenden Wissens um einen Basispunkt, an dem eine lokale Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden könnte, besser zur Untersuchung von Stadtmodellen geeignet sind. Hierbei ist vor allem die Elementareffekt-Methode geeignet, da sie einen guten Kompromiss zwischen Aussagekraft und benötigter Anzahl an Rechenläufen bietet und somit auch für umfangreiche Modelle einsetzbar ist.

Die bereits eingesetzten Sensitivitätsanalysemethoden verwenden fast ausschließlich skalare Zielgrößen, so dass die Dynamik, die den Energieflüssen in Gebäuden zugrundeliegt, vernachlässigt wird. Diese Dynamik ist aber eines der entscheidenden Merkmale von Gebäuden, insbesondere für den Einsatz von auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Heizungs- und Energiesystemen. Daher wurden weitere Recherchen zu Sensitivitätsanalysemethoden, die auch die Dynamik von Zielgrößen und Parametern berücksichtigen, durchgeführt. Die gefundenen Methoden werden in dieser Arbeit für die Anwendung auf Stadtmodelle angepasst. Zudem wird das Vorgehen zur Untersuchung entsprechender Modelle demonstriert.

Das für die exemplarische Anwendung der Methodik verwendete Modell EmMi-transient ist eine MATLAB-basierte Eigenentwicklung, die aus diversen Vorarbeiten heraus entstanden ist. Es verwendet Geoinformationsdaten zusammen mit gebäudetypologischen und statistischen Daten zur Ermittlung der geometrischen, thermischen und sonstigen Eigenschaften der Gebäude. Daraus lässt sich in stündlicher Zeitauflösung der Energiebedarf und die Energieerzeugung der Gebäude mittels Simulationen im Programm EnergyPlus ermitteln. Weiterhin lassen sich auch Maßnahmen, die mehrere Gebäude betreffen, wie etwa Nahwärmenetze, damit abbilden.

In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels wird das Ziel der Arbeit sowie die Abgrenzung des Themas definiert und der Aufbau der Arbeit beschrieben.

## 2.1. Ziel der Arbeit

Die zentrale Forschungsfrage, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden soll, ist, wie sich die verschiedenen Parameter eines Modells, welches das energetische Verhalten eines Quartiers abbildet, hinsichtlich ihres Einflusses auf unterschiedliche aggregierte oder zeitlich aufgelöste Zielgrößen darstellen.

Die Antwort hierauf kann verwendet werden, um folgende untergeordnete Fragen zu beantworten:

- Wie ist prinzipiell ein Modell zur Bewertung zukünftiger Sanierungs- und Effizienzsteigerungsmaßnahmen in einem Quartier aufzubauen?
- Welche Daten sind zur Parametrisierung eines solchen Modells notwendig?
- Mit welcher Genauigkeit müssen diese Daten vorhanden sein?
- Wie ändert sich der Einfluss der Parameter bei fortschreitender Sanierung?
- Welche Daten sind zur Validierung eines Quartiersmodells notwendig?
- Wie lassen sich Quartiersmodelle mit stündlich aufgelösten Ergebnisdaten validieren?

Die Antworten hierauf können verwendet werden, um Empfehlungen für die Datenerfassung innerhalb eines Quartiers mit dem Ziel abzuleiten, möglichst gute Modelle für die energetischen Prozesse eines Quartiers zu erstellen und eine Validierung der Modelle zu ermöglichen. Es ist hervorzuheben, dass sich die Empfehlungen je nach betrachtetem Quartier unterscheiden können und daher in dieser Arbeit zwar beispielhafte Ergebnisse erstellt werden, aber im Fokus die dahinter stehende Methodik zur Gewinnung der Ergebnisse steht.

Zur Beantwortung der Fragen werden diverse existierende Sensitivitätsanalysemethoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz bei Quartiersmodellen untersucht und entsprechend den Besonderheiten dieser Art von Simulation angepasst. Dies geschieht insbesondere vor dem Hintergrund, dass eine Auswertung stündlich aufgelöster Ergebnisdaten sehr aufwändig ist und daher vereinfacht werden soll. Dabei soll die Methodik nicht nur auf einen speziellen Fall anwendbar sein, sondern übertragen werden können auf andere Modelle.

## 2.2. Abgrenzung des Themas

In dieser Arbeit werden Sensitivitätsanalysemethoden vorgestellt, die im Bereich von energetischen Gebäude- und Quartierssimulationen zum Einsatz kommen. Die im Gebäude- und Quartierskontext bisher eingesetzten Sensitivitätsanalysemethoden untersuchen fast ausschließlich aggregierte Zielgrößen wie den jährlichen Energiebedarf. Daher wird in dieser Arbeit eine Sensitivitätsanalysemethode abgeleitet, welche es ermöglicht, neben skalaren Zielgrößen auch Zeitreihen als Zielgrößen zu betrachten und damit beispielsweise die Auswirkung von Parametern auf das dynamische Lastverhalten eines Quartiers zu ermitteln. Weiterhin erlaubt es diese neue Methodik, dynamische Parameter, die sich während der jeweiligen Simulationszeit ändern, hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zielgrößen zu untersuchen. Die

Erkenntnisse aus diesen Sensitivitätsanalysen können genutzt werden, um Modellierungen zu verbessern und Empfehlungen für die Datenerfassung von Parametern für entsprechende Modelle abzuleiten.

Für diese abgeleitete Sensitivitätsanalysemethode ist die Rechenzeit des untersuchten Modells von großer Bedeutung, da im Allgemeinen für die Untersuchung von Sensitivitäten viele Modellrechenläufe notwendig sind, um den Parameterraum ausschöpfen zu können. Daher wird die Methode auf ein Modell eines Wohngebäudeblocks angewandt, für das sich die Rechenzeit mit etwa 20 Minuten pro Lauf noch in Grenzen hält. Für Modelle größerer Gebiete lässt sich die Methode ebenso verwenden; hier sind die Implementierung des Modells sowie die dafür zur Verfügung stehende Rechenleistung die hauptsächlich begrenzenden Faktoren. Es lassen sich somit die im jeweiligen Modell berechneten Ergebnisgrößen als Zielgrößen für die dynamische Sensitivitätsanalyse verwenden.

Die Eingrenzung auf einen Block bedeutet, dass nur Energieströme innerhalb des Blocks Gegenstand der Untersuchung sind und damit Zielgrößen, die etwa für Mobilitätsanforderungen innerhalb eines gesamten Stadtgebiets oder die allgemeine Infrastruktur wie Energie- oder Straßennetz von Interesse sind, außen vor bleiben. Für Untersuchungen hierzu kann auf [5] verwiesen werden. Dort werden die direkten, indirekten und wechselweisen Auswirkungen von Gebäuden, urbanem Umfeld und Verkehr auf Umweltwirkungsindikatoren analysiert.

Im exemplarisch mittels Sensitivitätsanalyse untersuchten Modell EmMi-transient werden die für den Betrieb von Heizung und Haushaltsgeräten benötigten Energieflüsse untersucht. Die bei der Gebäudeerstellung ins Gebäude eingebrachte graue Energie oder die Wiederverwertung von Materialien bei Abriss eines Gebäudes werden nicht untersucht, ebensowenig Bau- und sonstige Kosten.

Genauer werden der Endenergiebedarf für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Haushaltsstrom und Hilfsenergiebedarf der Heizung als eine Zielgröße verwendet. Es wird hierbei bewusst nicht der Primärenergiebedarf verwendet, da die Primärenergiefaktoren immer wieder Veränderungen unterworfen sind.

Die durchschnittliche Innenraumtemperatur der Vollgeschosszone der Gebäudemodelle sowie die aus dem Netz bezogene und durch lokale Stromerzeugungssysteme ins Netz eingespeiste elektrische Energie werden als weitere Zielgrößen betrachtet.

Klimadaten wie Temperatur oder Einstrahlung, welche als Parameter einer thermischen Simulation aufgefasst werden können und die das energetische Verhalten von Gebäuden maßgeblich beeinflussen, werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Dies ist zum einen der Tatsache geschuldet, dass über die konkreten, regionalen Auswirkungen des Klimawandels und damit der Veränderung der zu verwendenden Klimadaten zur Untersuchung zukünftiger Sanierungspotentiale Forschungsbedarf besteht [230], zum anderen würden hierdurch eine Vielzahl zusätzlicher Untersuchungsvarianten hinzugefügt werden, die den Rahmen der Arbeit übersteigen. In Abschnitt 15.2 werden Fragestellungen und Überlegungen zur zukünftigen Berücksichtigung der Klimadateneinflüsse aufgeführt.

## 2. Methodisches Vorgehen

Die Abgrenzung der Sensitivitätsanalyse zu einer Unsicherheitsbewertung besteht darin, dass bei der Sensitivitätsanalyse untersucht wird, welche Parameter hinsichtlich einer bestimmten Zielgröße einen Einfluss haben. Im Gegensatz dazu wird bei einer Unsicherheitsbewertung bestimmt, wie groß die Unsicherheit der Zielgröße, also deren Schwankungsbreite, ist, wenn die Parameter in einem vorgegeben Bereich variiert werden. Die Wahl dieses Bereichs und vor allem auch einer passenden Wahrscheinlichkeitsverteilung ist hierbei entscheidend, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten.

### 2.3. Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Teile. In der Einleitung in Teil I wird die Notwendigkeit von Quartiersmodellen für die Bewertung von zukünftigen Sanierungsmaßnahmen und den damit verbundenen dynamischen Sensitivitätsanalysemethoden zur Untersuchung solcher Modelle beschrieben. Weiterhin werden die Ziele der Arbeit und die Abgrenzung des Themas definiert sowie das methodischen Vorgehen der Arbeit beschrieben.

In Teil II werden die bestehenden Grundlagen zu Energiebedarfsberechnungsmethoden, Stadtmodellierungstechniken und Sensitivitätsanalysemethoden zusammengefasst.

Teil III befasst sich mit einer Übersicht vorhandener Quartiersmodelle und den damit verwandten Werkzeugen. Diese existierenden Modelle werden anschließend hinsichtlich ihrer Stärken, Schwächen und Einsatzmöglichkeiten bewertet. Weiterhin wird in diesem Teil ein Überblick über den Einsatz von Sensitivitätsanalysemethoden und Unsicherheitsbewertungen, die in Verbindung mit Quartiers- und Gebäudesimulationen bereits zum Einsatz kommen, gegeben.

In Teil IV wird beschrieben, wie die Sensitivitätsanalysemethoden zur Beantwortung von Fragestellungen, die in Gebäudesimulationen auftreten, angewandt werden können. Dies umfasst unter anderem, welche Zielfunktionen in Stadtmodellen verwendet werden, wie die Parameter von Quartiersmodellen klassifiziert werden können und schließlich wie die Elementar-effekt-Sensitivitätsanalysemethode an die Besonderheiten von Quartiersmodellen angepasst werden muss. Unter diesen letzten Punkt fallen vor allem die Anpassungen bezüglich dynamischer Zielgrößen und Parameter.

Diese Sensitivitätsmethodik wird beispielhaft in Teil V auf das Modell EmMi-transient angewandt, um die Grenzen und Möglichkeiten dieses Modells zu ermitteln und die wichtigsten zu erfassenden Informationen zu bestimmen, die eine realitätsnähere Modellierung und somit einen Schritt in Richtung Validierbarkeit des Modells ermöglichen. Zusätzlich wird eine Einordnung und Bewertung dieses Modells gegenüber den vorhandenen Modellen gegeben und damit die Notwendigkeit für diese Modellentwicklung dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Sanierungsszenarien definiert, die sowohl Modernisierungen der Gebäudehülle als auch der Anlagentechnik umfassen. Die dabei zu definierenden Parameter werden erläutert und ihre für die Sensitivitätsanalyse verwendeten Verteilungen

festgelegt. Die Sensitivitätsanalyse wird mit den Zielgrößen Endenergiebedarf, durchschnittliche Innenraumtemperatur sowie bezogene und eingespeiste elektrische Energie durchgeführt. Im Ergebnis ergibt sich hierbei, dass die Einflüsse sich je nach Sanierungsszenario und betrachteter Zielgröße unterscheiden. In den meisten Fällen sind die thermischen Eigenschaften der Außenwände, die Solltemperatur und Luftwechselrate sowie der Haushaltsstrombedarf als einflussreich eingestuft. Aus den Sensitivitätsanalyseergebnissen lassen sich Empfehlungen zur zukünftigen Datenerfassung der wichtigsten Parameter ableiten.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik wird in Teil VI zusammengefasst und einer Bewertung unterzogen. Die Ergebnisse der beispielhaften Sensitivitätsanalyse mit dieser Methodik für den Gebäudeblock, der als Fallbeispiel fungiert, werden ebenfalls zusammengefasst. Weiterhin wird in diesem Teil die Übertragbarkeit zur Untersuchung anderer Modelle beschrieben und ein Ausblick auf zukünftige Erweiterungen sowohl der Sensitivitätsanalysemethodik als auch des Modells EmMi-transient gegeben.

Im Anhangsteil VII ist das für die exemplarische Sensitivitätsanalyse verwendete Modell EmMi-transient detailliert mit der verwendeten Datengrundlage für Gebäudehülle, Anlagentechnik, Nutzerverhalten und die Abbildung von Sanierungsmaßnahmen sowie dem Programmablauf beschrieben. Auch die Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz von FMI zur Kopplung von Einzelgebäudemodellen ergeben, werden dort dargestellt.

Im Anhangsteil VIII sind die im Vorfeld veröffentlichten Arbeiten, die im Rahmen der Dissertation entstanden, aufgeführt.



**Teil II.**

## **Bestehende Grundlagen**





### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

Es gibt drei wesentlich unterschiedliche Methoden - stationär, quasi-stationär und transient - und eine Vielzahl darauf basierender Modelle zur Berechnung der Energiemenge die benötigt wird, um ein Gebäude zu betreiben. Darunter fällt das Beheizen oder Kühlen des Gebäudes, der Bereitstellung von Warmwasser sowie der Einsatz verschiedenster sonstiger Elektrogeräte im Gebäude.

Die drei wesentlichen Energiebedarfsberechnungsmethoden unterscheiden sich in der Art und Weise, wie die Wärmespeicherung im Gebäude und seinen Anlagen berücksichtigt wird.

Allen Methoden ist gemein, dass sie die Wärmeströme im Gesamtsystem Gebäude unter Einfluss vorgegebener Klimadaten erfassen und daraus den Energiebedarf des Gebäudes ableiten. Dazu wird das Gesamtsystem in Teilsysteme wie Wärmeleitung, Konvektion oder Strahlungsprozesse zerlegt, deren thermisches Verhalten sich analytisch berechnen lässt. Daher können die Teilsysteme durch analytische Modelle zum Gesamtsystem verbunden werden. Allerdings lässt sich dann dieses Gesamtsystem meistens nicht mehr analytisch, sondern nur noch numerisch lösen. Diese Lösungen sind die Energiebedarfsberechnungsmethoden und deren Modelle. [103, S. 296f]

Bei stationären Methoden wird die Wärmespeicherung nicht berücksichtigt, es wird dabei von konstanten Randbedingungen wie beispielsweise den Innenraumsolltemperaturen ausgegangen. Eine stationäre Methode wird beispielsweise in EN 12831 zur Heiz- und Kühllastberechnung vorgegeben. Dafür werden nationale Randbedingungen definiert, die in dem Verfahren verwendet werden. Da es bei Heiz- und Kühllastberechnungen, um die Ermittlung der maximal notwendigen Leistung von Heiz- oder Kühlgeräten unter Berücksichtigung von Reserven geht, ist eine Vernachlässigung der Wärmespeicherung positiv zu sehen. Allerdings führt dies regelmäßig zu einer Überdimensionierung von Heizungsanlagen und, damit verbunden, zu einer geringeren Energieeffizienz [271]. Zur Ermittlung des Energiebedarfs eines Gebäudes sind die stationären Methoden auf Grund der Vernachlässigung der Wärmespeicherung nicht geeignet. Es lässt sich zwar durch Heiz- bzw. Kühlgradtage ein Korrelationskoeffizient zur Wärmespeicherung einführen, aber damit wird das Verfahren zu einem quasi-stationären Verfahren. Daher werden die rein stationären Methoden im Folgenden nicht weiter behandelt.

Bei quasi-stationären Methoden wird die Wärmespeicherung stark vereinfacht berücksichtigt, beispielsweise durch Berechnung eines Ausnutzungsgrads in Abhängigkeit von Wärmegewinnen und -verlusten sowie des Abkühlverhaltens eines Gebäudes. Diese Verfahren werden

### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

in Deutschland zur Berechnung des Energiebedarfs für Energieausweise unter gleichen genormten Randbedingungen sowie für Energieberatungen unter Verwendung der realen Randbedingungen eingesetzt.

Unter transienten bzw. dynamischen Verfahren versteht man zum einen vereinfachte analytische Verfahren, aber auch thermische Gebäudesimulationen, die das thermische Verhalten von Gebäuden durch Differentialgleichungssysteme abbilden und diese numerisch lösen. Bei diesen dynamischen Verfahren ist es generell möglich, dass bei Wärmeüberschuss die Innentemperatur über den Sollwert hinaus ansteigt, um durch erhöhte Wärmetransportmechanismen die überschüssige Wärme nach und nach wieder abzugeben. Oder dass bei Abschaltung der Heizung kein plötzliches Abfallen der Temperatur auftritt, sondern durch die Trägheit des Gebäudes eine zeitliche Verzögerung auftritt.

Bei allen Verfahren zur Energiebedarfsberechnung müssen Randbedingungen für die klimatischen Verhältnisse vorgegeben werden. Bei stationären Verfahren sind dies entweder Gradtagszahlen oder mittlere Außenlufttemperatur sowie Einstrahlungsleistungen; bei dynamischen Verfahren zumeist stündlich aufgelöste Daten zu Außenlufttemperatur, Feuchte, Einstrahlung, Windrichtung und -geschwindigkeit und ggf. weiteren Größen. Um Vergleiche des Energiebedarfs verschiedener Gebäude zu ermöglichen, müssen die gleichen Klimadaten zugrundegelegt werden. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung [31] wurde hierfür der Standort Potsdam festgelegt. Die Klimadaten werden dabei als Datensätze für sog. Testreferenzjahre (TRY) erstellt, die mittlere typische Witterungsverläufe repräsentieren [56]. Um regionale Unterschiede abzubilden, wurden für die Testreferenzjahrsdaten von 2004 für Deutschland 15 Regionen unterschieden. Inzwischen wird eine, auf einen Quadratkilometer bezogene, hochaufgelöste räumliche Darstellung der Daten angestrebt [57].

Die hier vorgestellten quasi-stationären Methoden berechnen den Energiebedarf eines Gebäudes. Messtechnisch kann der reale Energieverbrauch eines Gebäudes erfasst werden, beispielsweise für Abrechnungszwecke. In [200] wurden die Abweichungen zwischen dem für Energieausweise berechneten Energiebedarf und dem realen Energieverbrauch systematisch untersucht. Grund für die Abweichungen sind demnach die unter standardisierten Randbedingungen zustandekommenden Energiebedarfsberechnungen. Der Energieverbrauch hingegen wird von den realen Klimaeinflüssen, dem Nutzerverhalten und weiteren Effekten beeinflusst. Der Energiebedarf liegt in den meisten Fällen über dem Verbrauch. Der Unterschied wird größer, je kleiner Gebäude sind und je schlechter die Qualität der Gebäudehülle und der Anlagentechnik ist. Durch Sanierungen können sich die Unterschiede unter anderem aufgrund von Reboundeffekten vergrößern [201]. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass die für die Energiebedarfsberechnungen verwendbaren Standardwerte immer mit einer gewissen Sicherheitsreserve gewählt werden. Zur Korrektur dieser Überschätzung kann beispielsweise ein Nutzungsfaktor wie in [20, S. 2] eingeführt werden, der durch einen empirischen Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten ermittelt wurde.

Bei thermischen Gebäudesimulationen spielen für den Vergleich von berechnetem Energiebedarf und realen Energieverbrauch eine Vielzahl von Simulationsparametern eine Rolle,

die sich je nach Gebäudemodell unterscheiden können. Daher lassen sich hier systematische Untersuchungen, wie für den Vergleich bei quasi-stationären Methoden, nur schwierig durchführen. In [216] wurde eine Methodik zur Erstellung von Simulationsmodellen, die Werte vergleichbar mit dem quasi-stationär berechneten Energiebedarf der Gebäude aus der TABULA Gebäudetypologie haben, beschrieben. Hierbei ist neben der korrekten Erstellung der Modelle vor allem die Synchronisierung der Randbedingungen eine große Herausforderung.

Prinzipielle Vorteile der stationären und quasi-stationären Verfahren sind ihre einfachen Algorithmen und entsprechend die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sowie die geringe Menge benötigter Eingabedaten. Dagegen erlauben sie keine Aussagen über den zeitlichen dynamischen Verlauf von Ergebnisgrößen, da ihr Bilanzzeitraum meistens ein Monat bis ein Jahr darstellt. Weiterhin können damit keine dynamischen Eingabegrößen wie der zeitliche Verlauf der solaren Einstrahlung, wechselnde Innenraumsolltemperaturen oder andere instationäre Nutzerverhaltensweisen berücksichtigt werden. Auch Untersuchungen zum Einsatz von dezentralen, erneuerbaren Energieversorgungskonzepten gestalten sich schwierig bis unmöglich aufgrund der fehlenden Dynamik der Modelle.

Dynamische Gebäudesimulationen erlauben zeitlich hoch aufgelöste, d.h. meistens mit Zeitschritten von einer Stunde, Untersuchungen zum thermischen Verhalten sowie der Berücksichtigung der Anlagentechnik mit all ihren Komponenten. Dies kann auch dezentrale erneuerbare Energieversorgungssysteme wie PV-Anlagen oder Solarthermie umfassen, die dann auch den korrekten zeitlichen Sonnenverlauf berücksichtigen. Dafür benötigen sie vergleichsweise viele detaillierte Daten sowie Expertenwissen zur Erstellung von Gebäudemodellen, da jedes Simulationsprogramm unterschiedlich aufgebaut ist und teilweise unterschiedliche Angaben benötigt. Die Standardeinstellungen unterscheiden sich zwischen den Programmen erheblich, je nachdem an welchen nationalen Vorgaben sie sich orientieren. Durch die Vielzahl der Parameter, für die nicht immer alle Daten gegeben sind, gewinnen also Sensitivitätsanalysen an Bedeutung, um die wichtigsten Parameter zu identifizieren.

Im Folgenden wird genauer auf die quasi-stationären Methoden und die dynamischen Methoden der thermischen Gebäudesimulation als Hauptbestandteil des in dieser Arbeit untersuchten Modells EmMi-transient eingegangen.

### **3.1. Quasi-stationäre Methoden**

Gemein ist den quasi-stationären Verfahren, dass sie wenige Eingabedaten im Vergleich zu detaillierten Gebäudesimulationen benötigen, geringe Rechenzeitanforderungen haben und leicht zu interpretieren sind. Für die Ermittlung von Jahreswerten, wie sie beispielsweise im Energieausweis verwendet werden, sind bei Verwendung dieser Verfahren große Abweichungen vom gemessenen Energieverbrauch erkennbar, die auf diverse Faktoren zurückgeführt werden können, aber nicht vollständig dadurch erklärt werden [116]. Für die Energiebedarfs-ermittlung zum Vergleich von Gebäuden bieten sie dennoch eine ausreichende Genauigkeit.

### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

Allerdings lassen sich Speichereffekte nur stark vereinfacht berücksichtigen. Im Gegensatz dazu werden bei stationären Verfahren wie einer Kühl- oder Heizlastberechnung die Speichereffekte gar nicht abgebildet. Diese stationären Verfahren werden hier jedoch nicht näher betrachtet.

Die Idee aller stationären und quasi-stationären Verfahren ist, dass in einem geschlossenen System, wie z.B. der zu bilanzierende Raum, die eingehende Energiemenge  $Q_G$  gleich der ausgehenden Energie  $Q_L$  ist. Auf Grund der Energieerhaltung muss damit  $Q_G + Q_L = 0$  gelten, um die vorgegebenen Temperaturen einzuhalten.

#### 3.1.1. Heizperiodenbilanzverfahren nach DIN V 4108-6

Das Heizperiodenbilanzverfahren wird in EN 832 bzw. DIN V 4108-6 [59] definiert und ist ein quasi-stationäres Berechnungsverfahren. Es berechnet den Heizenergiebedarf eines Gebäudes in der Heizperiode. Die zentrale Bilanzgleichung hierfür lautet

$$Q_h = Q_{l,HP} - \eta \cdot Q_{g,HP} \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $Q_{l,HP}$  der Wärmeverlust während der Heizperiode,  $Q_{g,HP}$  der Wärmegewinn während der Heizperiode und  $\eta_{HP}$  der Ausnutzungsgrad für die Wärmegewinne während der Heizperiode. Die Wärmegewinne werden als Summe der solaren und internen Gewinne ermittelt, die Wärmeverluste ergeben sich aus den spezifischen Wärmeverlusten für Transmission und Lüftung.

Die anlagentechnische Seite wird durch die Gesamtaufwandszahl  $e_P$  abgebildet.

Das Heizperiodenbilanzverfahren ist seit der EnEV 2009 nicht mehr als Nachweisverfahren für den Energiebedarf von Gebäuden zulässig. Daher wird es hier nur als Vergleichsverfahren aufgeführt.

Vorteile dieses Verfahrens sind die wenigen notwendigen Eingangsdaten und beschreibenden Gleichungen und damit die leichte Nachvollziehbarkeit. Prinzipiell lässt sich das Verfahren auch manuell berechnen. [163]

Nachteile des Verfahrens sind die nur rudimentäre Abbildung der Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes über die Zeitkonstante  $\tau$  des Ausnutzungsgrads  $\eta$ . Insbesondere lassen sich damit beispielsweise keine Bauteile mit PCM-Elementen abbilden, da bei diesen die Wärmespeicherung dynamisch erfolgt.

Das Verfahren überschätzt im Vergleich zum unten beschriebenen Monatsbilanzverfahren den Energiebedarf. Zur Vermeidung dieses Problems lässt sich die Heizgrenze in dem Verfahren anpassen. Dies muss ausreichend genau erfolgen, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. [163, S. 28]

### 3.1.2. Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6, DIN V 4701-10/12

Im Gegensatz zum Heizperiodenbilanzverfahren berechnet das gemäß DIN V 4108-6 2003-06 [59] und DIN V 4701-10 2003-08 [60] definierte Monatsbilanzverfahren den Energiebedarf auf Monatsbasis. Hierzu werden die Monatsmittelwerte der Außentemperatur und Einstrahlungen verwendet. Dies ermöglicht beispielsweise durch Verwendung von acht Orientierungsklassen eine genauere Berücksichtigung der Orientierung von Gebäuden als im Heizperiodenverfahren, bei dem nur vier Orientierungsklassen genutzt werden. Auch der Ausnutzungsgrad wird auf monatlicher Basis berechnet. Im Vergleich zum Heizperiodenbilanzverfahren ist eine größere Anzahl an Eingabeparametern notwendig. Für einen Angleich des Heizperiodenbilanzverfahren an das Monatsbilanzverfahren kann eine Anpassung des Gradtagszahlfaktors des Heizperiodenbilanzverfahrens, wie in [163] beschrieben, durchgeführt werden.

In diesem Verfahren erfolgt eine grundsätzliche Trennung zwischen der baulichen und der anlagentechnischen Seite. Die zentrale Bilanzgleichung der baulichen Seite zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs für jeden Monat lautet hier:

$$Q_{h,M} = Q_{l,M} - \eta_M \cdot Q_{g,M} \quad (3.2)$$

Hierbei sind  $Q_{l,M}$  die Wärmeverluste, die mittels  $Q_{l,M} = 0,024 \cdot H_M \cdot (\theta_i - \theta_{e,M}) \cdot t_M$  berechnet werden, wobei  $H_M$  die spezifischen Wärmeverluste sind,  $\theta_i$  die Innenlufttemperatur,  $\theta_{e,M}$  die mittlere Außenlufttemperatur und  $t_M$  die Anzahl der Tage im Monat  $M$ .  $\eta_M$  ist der Ausnutzungsgrad für die Wärmegewinne  $Q_{g,M}$  während des Monats. Die Wärmegewinne werden mittels  $Q_{g,M} = 0,024 \cdot (\Phi_{s,M} + \Phi_{i,M}) \cdot t_M$  ermittelt, wobei  $\Phi_{s,M}$  die mittleren monatlichen Strahlungswärmegewinne sind und  $\Phi_{i,M}$  die mittlere interne Wärmeleistung.

Der Jahresheizwärmebedarf wird durch Summierung der Monatsheizwärmebedarfswerte berechnet.

Die anlagentechnische Seite wird über eine separate Berechnung einer Gesamtaufwandszahl  $e_p$  berücksichtigt, welche in DIN 4701-10 für neue Anlagen bzw. DIN 4701-12 für alte Anlagen ermittelt wird. Die zentrale Gleichung zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs lautet:

$$Q_P = (Q_h + Q_{TW}) \cdot e_P \quad (3.3)$$

$Q_h$  stellt den oben ermittelten Heizwärmebedarf des Gebäudes und  $Q_{TW}$  die Energie zur Trinkwarmwassernutzung dar.  $Q_{TW}$  wird pauschal mittels des spezifischen Warmwasserbedarfs  $q_{TW} = Q_{TW}/A_N = 12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot a)$  ermittelt.

### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

Das Monatsverfahren ist als Nachweisverfahren im Rahmen der EnEV für Wohngebäude, die nicht gekühlt werden, zulässig [31, Anlage 1, Abschnitt 2]. Als Referenzklima ist das Klima der Region Potsdam zu verwenden.

#### 3.1.3. Energiebilanz nach DIN V 18599

Das in der Vornorm DIN V 18599 2011-12 [66] beschriebene Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden ist ein monatsbasiertes Verfahren, welches im Gegensatz zum vorher beschriebenen Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12 die bauliche und anlagentechnische Seite gleichzeitig mittels eines iterativen Prozesses berechnet. Dieses Verfahren ist für gekühlte Wohngebäude und alle Nichtwohngebäude zur Bestimmung des Energiebedarfs vorgeschrieben. Teile der Norm wurden 2013 berichtigt [70] [71] [72] [73], v.a. um geänderte Primärenergiefaktoren und weitere Korrekturen hinzuzufügen. Auch zukünftig werden weitere Anpassungen durch den DIN-Gemeinschaftsarbeitsausschuss „Energetische Bewertung von Gebäuden“ vorgenommen werden.

In diesem Verfahren wird dabei zum einen die benötigte Nutzenergie für Heizen, Kühlen, Lüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung berechnet. Zum anderen wird die benötigte Endenergie bei gleichzeitiger Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen der Gebäude- und Anlagenenergieströme ermittelt. Dabei orientiert sich die Definition des Verfahrens an den bestehenden Berechnungsvorschriften wie DIN V 4108-6, DIN V 4701-10, DIN V 4701-12, DIN EN 832 und DIN EN ISO 13790.

Kritikpunkte an dem Verfahren nach DIN V 18599 sind vor allem, dass die resultierenden Energiebedarfsvergleichswerte des Referenzgebäudes teils wesentlich höher als die im Monatsbilanzverfahren berechneten Werten bei gleichzeitig verschärften Anforderungen liegen. Daraus ergeben sich Konflikte zu bestehenden Stufen von Energiesparhäusern. Die Nutzungsrandbedingungen wie Raumsolltemperatur, interne Gewinne, wirksame Wärmespeicherkapazität oder Ausnutzungsgrad unterscheiden sich zwischen dem Verfahren gemäß DIN V 18599 und dem Monatsbilanzverfahren. Auch die Energiebezugsfläche wird unterschiedlich definiert. Durch die ungünstige Bewertung der anlagentechnischen Seite bei Verwendung von Standardwerten, beispielsweise für Rohrleitungslängen, wird die Diskrepanz bei den Energiebedarfsvergleichswerten noch stärker. Auch die Tatsache, dass eine manuelle Berechnung des Energiebedarfs nicht mehr praktikabel durchführbar ist und daher das Verständnis für die verwendeten Formeln und Gleichungen schwindet, wird kritisiert. [111]

## 3.2. Dynamische vereinfachte Methoden

Zu den dynamischen vereinfachten Methoden zählen stundenbasierte Berechnungsverfahren wie das in DIN EN ISO 13790 [65] definierte vereinfachte Stundenverfahren. Typisch für diese dynamischen Verfahren ist, dass bei plötzlich auftretenden Wärmeüberschüssen die Innentemperatur ansteigt und durch Transmission, Konvektion und Wärmespeicherung die

überschüssige Wärme abgeführt wird. Im Gegenzug führt die durch die Wärmespeicherfähigkeit berücksichtigte Trägheit des Gebäudes dazu bei, dass bei Heruntersetzen der Thermostate kein direktes Abfallen der Temperatur erfolgt. Das Verfahren aus DIN EN ISO 13790 hat zum Ziel, durch eine begrenzte Anzahl von Gleichungen, deren Rückverfolgbarkeit und ein Mindestmaß an Eingabedaten eine Vereinfachung einer dynamischen Simulation abzubilden, die den gleichen Grad an Transparenz, Präzision und Robustheit wie ein Monatsverfahren bietet. Es erlaubt dabei die Einbeziehung stundenbezogener Profile, beispielsweise zur Abbildung des Nutzerverhaltens. Das Verfahren beruht auf einem äquivalenten RC-Modell, welches aus fünf Widerständen und einer Kapazität aufgebaut ist. Die Hauptvariablen dieses Modells sind die Wärmetransferkoeffizienten der Bauteile, lüftungsbezogene Kenngrößen, der thermische Kopplungsleitwert und die innere Wärmespeicherfähigkeit. Heizwärme- und Kühlbedarf werden durch eine stundenweise Berechnung des Heiz- bzw. Kühlleistungsbedarf, der an den die Innenluft repräsentierenden Knoten zur Erhaltung der Solltemperatur abgegeben werden muss, ermittelt.

In [145] wurde das hier beschriebene vereinfachte Stundenverfahren mit dynamischen thermischen Simulation in ESP-r und EnergyPlus verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass es sowohl Fälle gibt, in denen es gute Übereinstimmung für die jahresweise summierten Werte gibt, als auch Fälle mit großen Abweichungen. Generell liegt das Stundenverfahren aber näher an den Werten der thermischen Simulation als das Monatsverfahren. Daher müssen Anwender je nach Fall entscheiden, welches Verfahren im konkreten Fall zum Einsatz kommen sollte.

### 3.3. Thermische Gebäudesimulation

Thermische Gebäudesimulationen werden genutzt, um das thermische Verhalten von Gebäuden detailliert und dynamisch abzubilden. Hierzu wird ein digitales Modell erstellt, welches die geometrischen und bauphysikalischen Eigenschaften der relevanten Bauteile möglichst genau beschreibt. Im Unterschied zu stationären Verfahren werden bei thermischen Gebäudesimulationen auch die Wärmespeicherfähigkeiten der verwendeten Bauteile realistisch berücksichtigt, indem die Wärme, die in der Gebäudemasse gespeichert ist und aus dieser freigesetzt wird, Berücksichtigung findet [65]. Dies spiegelt sich in einer entsprechenden Energieerhaltungsbilanzgleichung durch den Term  $\frac{dQ}{dt}$ , der die Änderung der im Bauteil gespeicherten Energie  $Q$  repräsentiert, wieder:

$$Q_G + Q_L + \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

Dies bedeutet insbesondere, dass der zeitliche Verlauf der auftretenden Wärmeströme und damit der Temperaturen variabel ist. Ergebnisse der Berechnungen sind die in den Teilsystemen erzeugten oder benötigten Energiemengen und Leistungen sowie Wärmeströme und Temperaturen der Bauteile.



### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

Es gibt zwei prinzipiell unterschiedliche Modellierungstechniken für Gebäudesimulationen: black-box und white-box Modelle.

Black-box oder statistische Modelle kommen komplett ohne physikalische Informationen aus. Sie basieren auf der Erzeugung einer (mathematischen) Funktion aus meist messtechnisch erfassten Trainingsdatensätzen, die das Verhalten eines Systems beschreiben. [90, S. 274ff] Ohne entsprechende Trainingsdatensätze, welche im Bereich der Stadtquartiersmodellierung nicht vorhanden sind, können damit also keine verlässlichen Modelle erzeugt werden. Insbesondere beim Einsatz innovativer technischer Anlagen, zu denen es keine Messdaten in größerem Umfang gibt, die aber bei der Prognose des zukünftigen energetischen Verhaltens von Gebäudequartieren angedacht werden müssen, lässt sich also mit den black-box-Modellen kein Erkenntnisgewinn erreichen. Beispiele für black-box-Modellierungstechniken sind u.a. multiple lineare Regression, genetische Algorithmen, künstliche neuronale Netze oder Support Vector Machines. Auf diese Modellierungstechniken wird im Rahmen der Untersuchung der eingesetzten Techniken für Stadtmodelle in Abschnitt 4.2 näher eingegangen.

White-box oder auch physikalische Modelle basieren auf der Lösung von Gleichungssystemen, die das physikalische Verhalten eines Systems beschreiben. Es existieren drei Ansätze für thermische white-box Gebäudesimulationen: CFD, zonal, multizonal.

Der CFD Ansatz besteht aus Unterteilung einer Gebäudezone in eine große Anzahl kleiner Kontrollvolumen in einem homo- oder heterogenen globalen Netz. Er kann daher als dreidimensionaler Ansatz aufgefasst werden, welcher zur approximativen Lösung strömungsmechanischer Probleme eingesetzt wird. Zugrunde liegen zumeist die Navier-Stokes-Gleichungen, ein nichtlineares partielles Differentialgleichungssystem 2. Ordnung, welches die meisten Fluide komplett beschreibt und auch Turbulenzen abbilden kann. Der CFD Ansatz ist der umfassendste, aber auf Grund der mikroskopischen Netzweiten und der damit verbundenen hohen Anzahl an zu lösenden Gleichungen auch derjenige mit dem höchsten Rechenaufwand. Beispiele für CFD-Programme sind Fluent, ANSYS CFD oder OpenFOAM.

Im zonalen Ansatz wird eine Gebäudezone in mehrere Zellen aufgeteilt und dann der Energie- und Materialtransport zwischen den Zellen durch physikalische Gleichungen beschrieben. Es kann also die räumliche Verteilung z.B. der Temperatur oder der Luftgeschwindigkeit ermittelt und dargestellt werden. Dieser kann beispielsweise bei Fragestellungen zum Komfort in Innenräumen genutzt werden.

Die meisten Gebäudesimulationsprogramme zur Beantwortung energetischer Fragestellungen arbeiten multizonal bzw. knotenbasiert. Das Gebäude wird also in Gebäudezonen unterteilt, wobei jede Gebäudezone ein Volumen umfasst, welches durch einheitliche Zustandsvariablen beschrieben wird. Jede Gebäudezone wird durch einen Knoten repräsentiert, der beispielsweise die Zustandsgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck besitzt. Hierbei repräsentiert ein Knoten einen Raum, ein Bauteil, die Umgebung des Gebäudes oder auch thermische Lasten wie ein Heiz- oder Kühlsystem. [90, S. 276]

Die Berechnung der thermischen Lasten wird in multizonalen thermischen Gebäudesimulationsprogrammen im Allgemeinen durch Aufstellung von Bilanzgleichungen für einzelne Knoten sowie Gleichungen für die Energietransportmechanismen und anschließender Lösung der Gleichungssysteme oder durch sog. Gewichtungsfaktormethoden durchgeführt. Dabei verwenden gleichungsbasierte Ansätze die physikalischen Gesetze der Energieerhaltung, um Energiebilanzen für die einzelne Knoten aufzustellen. Für die Energietransportmechanismen werden entsprechende Gleichungen zwischen den Knoten etabliert. Das gesamte Gleichungssystem ist im allgemeinen nicht-linear und kann nur numerisch gelöst werden. Die Gewichtungsfaktormethode [28, S. II.30] ist in gewisser Weise als hybrider Ansatz zu verstehen, da für konstante Raumlufttemperaturen eine ideale Heiz- und Kühllast berechnet wird. Diese wird dann an den Anlagensimulationsteil des Programms übergeben und daraus werden Heiz- und Kühllasten mit den Randbedingungen der Anlagentechnik erzeugt, die die variablen Temperaturverläufe im Raum erzeugen.

Beispiele für Gebäudesimulationsprogramme mit knotenbasiertem Ansatz sind u.a. TRN-SYS, EnergyPlus, IDA-ICE, ESP-r. In [54] wurde eine Übersicht über 20 gängige Gebäudesimulationsprogramme erstellt, die die jeweiligen Funktionen und Einschränkungen aufzeigt.

Als Mischform von white-box und black-box Modellen gibt es grey-box oder hybride Modelle (vgl. auch Abschnitt 4.3 für Stadtmodelle). Diese kombinieren physikalische und statistische Modellierung, indem beispielsweise maschinelle Lernmodelle zur Erzeugung eines Schätzers für physikalische Parameter genutzt wird. Oder indem Lernmodelle, die aus physikalischen Modellen zur Beschreibung des Gebäudeverhaltens abgeleitet wurden, genutzt werden. [90, S. 283]

Wenn im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Gebäudesimulation die Rede ist, so werden darunter thermische multizonale Gebäudesimulationen mit physikalischer Modellierung verstanden.

Anwendung finden thermische Gebäudesimulationen immer dann, wenn instationäre, dynamische Prozesse betrachtet werden sollen, die sich durch vereinfachte Betrachtungen, insbesondere des Wärmespeicherverhaltens, nicht abbilden lassen. Dies ist vor allem bei haustechnischen Anlagen mit regenerativer Energieerzeugung und zeitlich versetztem Energieverbrauch und der daher notwendigen Speichertechnik der Fall. Auch für Untersuchungen zum thermischen Komfort sind die zeitlichen Verläufe von Interesse. Ein Übersichtsartikel über verschiedene Programme und deren Anwendung ist in [54] zu finden.

Zur Erstellung thermischer Gebäudemodelle ist eine Vielzahl an Daten notwendig. Dies beginnt bei detaillierten Informationen über die Geometrie eines Gebäudes, über den Schichtaufbau von Bauteilen bis hin zu anlagentechnischen Details. Die korrekte Verwendung der Eingabedaten innerhalb der Modelle wird dadurch sichergestellt, dass Gebäudesimulationsprogramme eine Validierung durchlaufen sollten. Die dafür verwendeten Methoden und welche Normen für die Validierungsszenarien verwendet werden ist in Abschnitt 3.4 beschrieben.

### 3. Energiebedarfsberechnungsmethoden

In EmMi-transient wird für die thermische Gebäudesimulation das Programm EnergyPlus [55] eingesetzt. EnergyPlus ist als OpenSource Software frei erhältlich und kann dadurch bei Bedarf an die eigenen Bedürfnisse durch Änderungen am Sourcecode angepasst werden. Auch um die Funktionsweise einzelner Teilmodelle zu verstehen, ist eine Einsicht in den Quellcode hilfreich.

Die meisten in deutschen Wohngebäuden anzufindenden technischen Systeme sind in EnergyPlus als Modelle verfügbar.

Die EnergyPlus Modelle werden in Textdateien definiert, welche durch ihre Struktur leicht durch Programme zu erzeugen oder verändern sind. Der Aufruf von EnergyPlus kann automatisiert über die Kommandozeile erfolgen, es ist keine grafische Benutzeroberfläche erforderlich. Dies vereinfacht die Kopplung mit MATLAB.

Weiterhin unterstützt EnergyPlus die FMI Schnittstelle, mittels derer sich eine Kopplung von Modellen zur Abbildung eines Quartierverbunds realisieren lässt (siehe G).

EnergyPlus ist in vielen Studien validiert (vgl. [197]), v.a. hinsichtlich der amerikanischen Standards und Verfahren wie ASHREA oder BESTest (vgl. Abschnitt 3.4). Die Testreports für die meisten Validierungsstudien sind frei zugänglich.

In dieser Arbeit wird EnergyPlus in Version 8.4.0 Update 1 verwendet. Durch die stetige Weiterentwicklung des Programmes kommen immer neue Funktionalitäten hinzu. Für die Verwendung in EmMi-transient bedeutet dies, dass bei einem Update von EnergyPlus ggf. auch die Funktionen zur Erzeugung der Modelle (siehe Abschnitt H.4) angepasst werden müssen.

### 3.4. Validierungsmethoden für Energiebedarf

Dieser Abschnitt beschreibt die Verfahren, die eingesetzt werden, um den mittels der oben beschriebenen Methoden berechneten Energiebedarf von Gebäuden zu validieren. Hierfür werden zuerst die allgemeinen Validierungsmethoden beschrieben, um anschließend auf die Besonderheiten im Fall von Energiebedarfsberechnungen einzugehen.

Prinzipiell gibt es drei Arten von Validierung: analytische, logische und empirische Validierung. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Datengrundlage und ihrer Anwendungsmöglichkeit.

Bei analytischen Validierungsverfahren wird eine exakte, analytische Lösung für eine Berechnung durchgeführt und das Ergebnis davon mit dem Ergebnis des zu validierenden Modells verglichen. Dieses Validierungsverfahren ist nur anwendbar, wenn eine exakte Lösung für ein Problem angegeben werden kann. Dies ist meistens nur für einfache Testfälle möglich. Dieses analytische Validierungsverfahren wird oft bei der Modellentwicklung eingesetzt, um zu überprüfen, ob einzelne Teile eines Modells korrekt implementiert sind. Für die Validierung

### 3.4. Validierungsmethoden für Energiebedarf

der kombinierten Teile und eines Gesamtmodells ist das Verfahren aufgrund der hierfür nicht existierenden exakten Lösung nicht verwendbar. [222]

Bei empirischen Validierungsverfahren wird das Ergebnis des zu validierenden Modells mit realen, gemessenen Daten verglichen. Diese Daten müssen unter bekannten Randbedingungen, die sich auch in der zu validierenden Berechnung abbilden lassen, erfasst worden sein, was zumeist nur in teuren und aufwändigen Experimenten geschehen kann. Aufgrund des Vergleichs mit realen Daten kann dieses Validierungsverfahren als „Goldstandard“ angesehen werden, um die Realität korrekt in einem Modell abzubilden. [222]

Bei logischen Validierungsverfahren wird das Ergebnis des zu validierenden Modells mit den Ergebnissen anderer Modelle verglichen. Dies setzt die Korrektheit und Validierung der Vergleichsmodelle voraus. [222]

Die Validierung der quasi-stationären und vereinfachten dynamischen Verfahren erfolgt mittels wechselseitiger logischer Validierung sowie Vergleich der Jahreswerte aus der Validierungsnorm DIN EN 15265 [62]. Die Abweichungen von stündlichen Werten bleiben dabei unberücksichtigt. [103]

Zur Validierung von thermischen Gebäudesimulationen werden vordefinierte Testfälle berechnet und mit Ergebnissen, die entweder durch analytische Lösung, empirische Messung oder andere Modelle zustande gekommen sind, verglichen. In Deutschland sind die einschlägigen Validierungsfälle unter anderem in DIN EN 15265 und den VDI Richtlinien 6007 und 6020 definiert. International gibt es hierfür unter anderem den ASHRAE Standard 140 oder BESTEST [133]. Das prinzipielle Validierungsvorgehen wurde z.B. in der PASSYS Methodik [129] beschrieben. Dieses umfasst zum einen eine Betrachtung der einzelnen Teile einer Simulation, indem die verwendeten Algorithmen und deren Implementierung kritisch hinterfragt, analytische und empirische Vergleiche angestellt und Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Zum anderen soll eine Betrachtung der Gesamtsimulation hinsichtlich der Sensitivitäten, Vergleichen mit anderen Modellen und empirischen Vergleichen erfolgen.

Prinzipiell besteht aber das Problem, dass es unmöglich ist, alle Kombinationen von Parametern, die in einem Simulationsmodell vorhanden sind, und alle Anwendungsfälle eines Modells zu untersuchen und zu validieren. Daher erfolgen Validierungen oft unter idealisierten Randbedingungen, bei denen das Nutzerverhalten vernachlässigt wird und in denen ein imaginärer Testraum betrachtet wird. Solche Testräume können allerdings auch real existieren und durch Messtechnik versehen entsprechende Vergleichsdaten generieren. Im Gegensatz dazu spricht man von Validierung unter realistischen Randbedingungen, wenn das Nutzerverhalten Berücksichtigung findet und sich das Modell auf real existierende Gebäude bezieht. [222, S. 376f]



## 4. Modellierungstechniken für energetische Stadtmodelle

Für die Erzeugung von Stadtmodellen existieren bottom-up und top-down Ansätze. Die bottom-up Ansätze unterscheiden sich durch Verwendung physikalischer, statistischer oder hybrider Modellierungstechnik für die Abbildung der einzelnen Gebäude. Dies entspricht der Unterscheidung der Energiebedarfsberechnungsmethoden für Einzelgebäude in Abschnitt 3.3.

Im Rahmen der Literaturrecherche für diese Arbeit wurden mehr als 50 Modelle gefunden, die für Fragestellungen im Quartierskontext eingesetzt werden. In Kapitel 6 werden die Modelle hinsichtlich der hier dargestellten Modellierungstechniken unterschieden, ein schematischer Vergleich von top-down und bottom-up Ansätzen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Den bottom-up Ansätzen ist gemein, dass sie ausgehend von einzelnen Entitäten, im Fall der Stadtmodelle meistens Gebäude, für die Gesamtheit aller Entitäten, hier also Quartiere oder Städte, Ergebnisse berechnen. Für die korrekte Parametrisierung der Entitäten sind viele Daten notwendig; die Art der Daten hängt entscheidend von der Modellierungstechnik im jeweiligen bottom-up Ansatz ab. Sobald in einem Modell Daten aus einer Hierarchieebene genutzt werden, die nicht der Gesamtheit aller Entitäten entspricht, wird von einem bottom-up Ansatz gesprochen [251, S. 1822, 3.2.2]. Es lassen sich mittels bottom-up Ansätzen prinzipiell auch Einsatzmöglichkeiten neuer Technologien untersuchen, insbesondere bei den physikalischen bottom-up Ansätzen, da hierfür die physikalischen Prozesse der Technik entsprechend abgebildet werden können. Weiterhin können damit auch Änderungen im energetischen Verhalten auf Grund der Klimaerwärmung untersucht werden, da hierfür lediglich entsprechende Klimadatensätze im Modell verwendet werden müssen [109].

Top-down Ansätze dagegen verwenden aggregierte Daten, die das Verhalten der Gesamtheit aller Entitäten in der Vergangenheit widerspiegeln, um daraus Erkenntnisse zu gewinnen. Sie sind daher strukturell vergleichsweise einfach und benötigen wenige Daten, erlauben allerdings kaum die Berücksichtigung zukünftiger Trends.

Im Folgenden werden die Eigenschaften und Unterschiede der Stadtmodellierungstechniken detailliert beschrieben.

#### 4. Modellierungstechniken

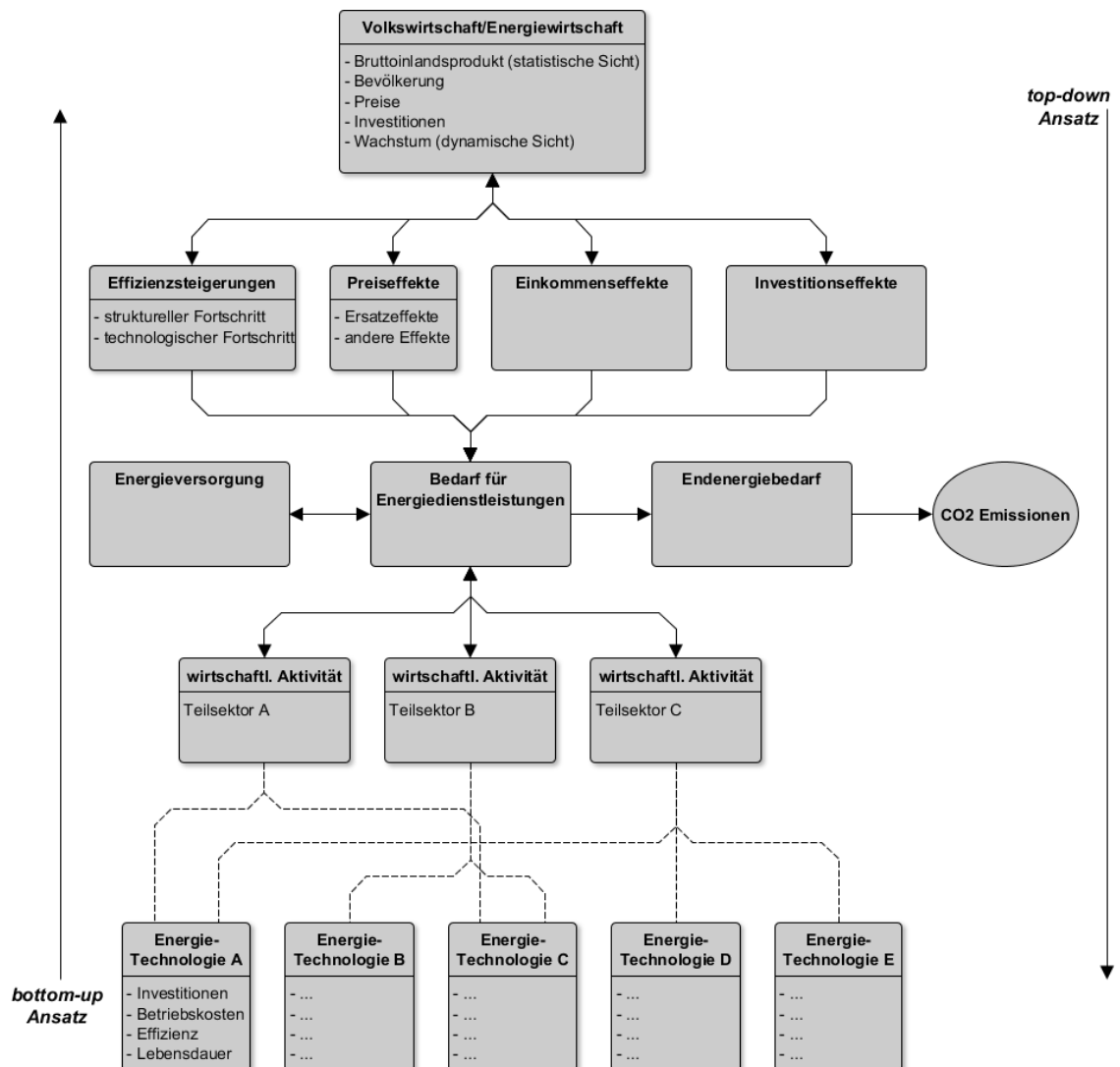


Abbildung 4.1.: Übersicht bottom-up und top-down Ansätze, angelehnt an [135, Figure 1]

#### 4.1. Physikalischer bottom-up Ansatz

Bei einem physikalischen bottom-up Ansatz werden die in den Gebäuden stattfindenden Prozesse wie Wärmeleitung, Konvektion, Wärmespeicherung, kurz- und langwellige Strahlung durch Gleichungssysteme beschrieben und damit die auftretenden Wärmeströme erfasst. Beispielsweise kann die Wärmeleitung durch die Fourier Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden. Damit kann der Nutzenergiebedarf bestimmt werden.

Die Anlagentechnik im und am Gebäude wird ggf. ebenfalls durch Gleichungen zu den physikalischen Prozessen beschrieben und erlaubt damit Aussagen zum End- und Primärenergiebedarf. Auch bisher noch nicht oder nur im kleinen Umfang eingesetzte Systeme lassen sich bei diesem Ansatz modellhaft beschreiben und somit die Potentiale solcher Systeme ermitteln.

Für die Modellierung der Gebäude ist eine räumliche und zeitliche Diskretisierung notwendig. Eine räumliche Diskretisierung wird durch eine Zonierung des Gebäudes erreicht. Dabei kann

#### 4.1. Physikalischer bottom-up Ansatz

ein Gebäude entweder als Einzonenmodell abgebildet werden, d.h. es wird von einer homogenen Temperaturverteilung und gleichen Rand- und Nutzungsbedingungen in allen Räumen des Gebäudes ausgegangen. Oder es können Mehrzonenmodelle entwickelt werden, die z.B. eine Unterteilung des Gebäudes in die unterschiedlichen Stockwerke vornehmen oder nach Rand- und Kernzonen unterscheiden. Randzonen sind dabei die Zonen mit Außenwänden, Kernzonen sind im Gebäudeinneren. Dies erlaubt eine genauere Berücksichtigung der solaren Einstrahlung. Die zeitliche Diskretisierung besteht in den meisten Fällen aus der Vorgabe von Zeitschritten, innerhalb derer das Modell simuliert wird. Dabei werden die Ergebniswerte eines Zeitschritts für die Berechnung des nächsten Zeitschritts genutzt. Typischerweise sind die Zeitschritte im Bereich von 10 bis 60 Minuten, wobei hierbei zwischen internen Zeitschritten, die für eine stabile Lösung der Gleichungssysteme genutzt werden, und den Ausgabezeitschritten unterschieden wird. Die Ausgabezeitschritte sind im Fall thermischer Simulation meistens 60 Minuten.

Bezogen auf ein Quartier werden die Energieflüsse beispielsweise in Wärme- und Stromnetzen durch Gleichungssysteme beschrieben. Hierbei ist ebenfalls eine räumliche und zeitliche Diskretisierung notwendig, beispielsweise durch Knotenpunkte in den Netzen und Betrachtung der Energieflüsse in einem zeitlichen Raster. Die Gebäude- und Quartiersdiskretisierungen müssen zueinander passend gewählt sein.

Durch die Diskretisierung werden Diskretisierungsfehler eingeführt, die Minimierung hierfür ist eine der Aufgaben von Validierungen.

Für das Lösen der Gleichungssysteme sind Anfangs- und Randbedingungen notwendig. Die vorhandenen Daten hierzu bestimmen zum großen Teil die Möglichkeit, realistische Ergebnisse durch ein Modell zu ermitteln.

Der Rechenaufwand für physikalische bottom-up Modelle ist im Vergleich zu den anderen Ansätzen hoch, da die definierenden Gleichungssysteme gelöst werden müssen. Dies ist einer der beschränkenden Faktoren für den Einsatz mit großen Gebäudebeständen. Allerdings ist durch die stetig ansteigende Rechenleistung von Computersystemen [251, S. 1832], welche bereits 1965 im Moore'schen Gesetz [185] postuliert wurde, sowie die Parallelisierung von Berechnungen auf mehreren CPU-Kernen, in Clustern oder Cloud Computing Services vorhersehbar, dass physikalische bottom-up Modelle immer größere Gebäudebestände werden abbilden können.

Da die physikalischen Prozesse modelliert werden, lassen sich insbesondere auch Aussagen über die zukünftigen Auswirkungen unterschiedlicher Einflüsse auf ein Quartier untersuchen, da hierfür nur die Randbedingungen des Modells an entsprechende, zumeist durch szenarische Betrachtungen ermittelte, für die Zukunft erwartete Entwicklungen angepasst werden müssen. Dies können beispielsweise Untersuchungen zum Einsatz von Dämmstoffen, effizienteren Anlagentechniken oder dezentralen erneuerbaren Energieversorgungssystemen sein. Zur Ermittlung valider Vorhersagen sind dabei keine Messdaten notwendig. Diese können auch im Allgemeinen nicht verfügbar sein, da es sich um zukünftig durchzuführende Maßnahmen handelt.



#### 4. Modellierungstechniken

Sofern in einem Modell wirtschaftliche Faktoren wie Kosten für die Energieversorgung oder Sanierungsmaßnahmen abgebildet sind, können auch Untersuchungen hinsichtlich kostenminimierenden Zukunftslösungen erarbeitet werden. Allerdings ist es nicht möglich, Vorhersagen zu Auswirkungen von makroökonomischen Faktoren zu ermitteln, da generell die hierfür notwendigen ökonomischen Einflüsse und Marktinteraktionen in bottom-up Modellen nicht abgebildet und Korrelationen zwischen Energieverbrauch und Wirtschaftsfaktoren zumeist vernachlässigt werden. [135, S. 1685f, 1695]

Die Abbildung des Nutzerverhaltens stellt in physikalischen bottom-up Ansätzen eine der größten Herausforderungen dar [135, S. 1686] [251]. Das Nutzerverhalten beeinflusst massiv den Energieverbrauch, muss aber im physikalischen bottom-up Ansatz durch Annahmen abgeschätzt werden, um in den Modellen abgebildet werden zu können.

In [252] werden die physikalischen bottom-up Ansätze danach unterschieden, wie die Hochrechnung des Gebäudeenergiebedarfs erfolgt. Dies kann entweder durch Verteilungen, Archetypen oder Stichproben erfolgen.

Das Verfahren mittels Verteilung meint hier die Verteilung von Geräten auf Haushalte und Nutzer. Für jeden Gerätetyp werden Informationen über Nutzungshäufigkeit, typischen Endenergieverbrauch und Wirkungsgrad benötigt. Damit kann eine Hochrechnung auf einen größeren Gebäudebestand erfolgen. Da die einzelnen Gerätetypen meistens unabhängig voneinander berechnet werden kann keine Interaktion, wie beispielsweise Wärmegewinne durch die Verlustleistung elektrischer Geräte, die die notwendige Heizenergie beeinflusst, berücksichtigt werden.

Die Berechnung mittels Archetypen bedeutet, dass für archetypische Gebäudeklassen, beispielsweise aus einer Gebäudetypologie, Energiebedarfswerte mittels eines der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren berechnet werden und anschließend auf den im Modell betrachteten Gebäudebestand hochskaliert wird. Hierfür muss eine Einteilung der Gebäude des Gebäudebestands auf die archetypischen Gebäudeklassen bekannt sein. Die Gebäudeklassen sind meistens nach Baualtersklasse, Gebäudetyp, Gebäudegröße und anderen Faktoren unterteilt.

Das Stichprobenverfahren nutzt Daten der real existierenden Gebäude, um Gebäudemodelle davon zu erzeugen. Dies erlaubt es besser als die anderen Verfahren, die Variabilität der Gebäude abzubilden. Um mit diesem Verfahren große Gebäudebestände untersuchen zu können, ist es notwendig, dass die Stichprobe repräsentativ ist, wofür eine umfassende Datengrundlage vorhanden sein muss.

#### 4.2. Statistischer bottom-up Ansatz

Beim statistischen bottom-up Ansatz werden die einzelnen Entitäten mittels mathematischer Funktionen beschrieben, die durch statistische Verfahren ermittelt wurden.

All diesen Verfahren ist gemein, dass sie auf gemessenen Daten, meistens für Stichproben des betrachteten Gebäudebestands, basieren. Dies können entweder Energieverbrauchsdaten aus Umfragen sein oder Abrechnungsdaten von Energieversorgern. Zur Modellierung ist man also auf das Vorhandensein entsprechender Daten angewiesen; Vorhersagen für Potentiale bisher noch nicht zum Einsatz kommender Technologien sind kaum möglich. Positiv an den statistischen bottom-up Verfahren ist, dass sozio- und makroökonomische Einflüsse durch die Verwendung von realen Daten auch abgebildet werden und entsprechend berücksichtigt werden können [135].

Das Nutzerverhalten ist in den zur Ermittlung der Funktionen verwendeten Daten schon mitberücksichtigt, da es sich um reale Messdaten handelt. Das bedeutet, dass eine Bereinigung um das Nutzerverhalten erfolgen muss, um Vergleichbarkeit mit Energiebedarfswerten, die unter vereinfachten Annahmen an das Nutzerverhalten erstellt wurden, zu schaffen. Dies ist jedoch praktisch kaum durchführbar, da es bisher keine sinnvolle messtechnische Erfassung des Nutzerverhaltens für Gebäudebestände gibt.

Auch die Wetterverhältnisse des betrachteten Zeitraums sind in den Messdaten berücksichtigt. Eine Bereinigung der Daten um diese Wettereinflüsse ist bereits vielfach durchgeführt worden, da die während der untersuchten Periode herrschenden Wetterverhältnisse messtechnisch einfach ermittelt werden können. Exemplarisch sei hier auf [112] verwiesen.

Die Entwicklung und technische Implementierung statistischer bottom-up Ansätze ist vergleichsweise einfach, da es sich um Anwendung bekannter statistischer Verfahren handelt, die in den gebräuchlichen Statistikprogrammen enthalten sind. Dies resultiert allerdings auch in einer eingeschränkten Flexibilität der Verfahren und Aussagekraft der Ergebnisse, v.a. in Hinblick auf die physikalische Interpretierbarkeit von Koeffizienten der erstellten Funktionen [135]. Dies bedeutet, dass ein statistisches Modell, welches auf Daten für ein Gebäude basiert, auch nur für dieses Gebäude anwendbar ist. Ein anderes Gebäude könnte zu einem komplett unterschiedlichen statistischen Modell führen [90, S. 283]. Die Koeffizienten eines statistischen Modells haben im allgemeinen keine physikalische Bedeutung, daher ist solch ein Modell nur schwer zu interpretieren. Dies lässt sich teilweise beheben, in dem physikalische Komponenten im Modell verbleiben [90, S. 283], vgl. Abschnitt 4.3.

Eine der Hauptanwendung statistischer Verfahren ist der Einsatz für Optimierungen, da hierbei die generell kurze Rechenzeit im Vergleich zu physikalischen Verfahren auf Grund der vielen zu berechnenden Varianten von größter Bedeutung ist [192, S. 1054].

Für die Ermittlung der mathematischen Funktion gibt es unterschiedliche Verfahren wie Regression, künstliche neuronale Netze, Support Vector Machine oder genetische Algorithmen. Diese Verfahren, die für die statistische bottom-up Modellierung Verwendung finden, werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben werden.

Eine Übersicht der statistischen Verfahren, die für Energieverbrauchsprognosen verwendet werden, findet sich in Tabelle 4.1.

#### 4. Modellierungstechniken

**Tabelle 4.1.: Übersicht statistischer Verfahren für Energieverbrauchsprognosen, angelehnt an [90, Tabelle 2]**

Verfahren	Besonderheiten	Vorteile	Nachteile
Regression/ Conditional Demand Analysis	Annahme: linearer Zusammenhang zwischen Variablen und Ergebnis	beschreibende Regressionsfunktion wird angegeben	großer Trainingsdatensatz notwendig; nicht-lineare Zusammenhänge können nicht abgebildet werden
Künstliches neuronales Netz	keine Annahmen an Art des Zusammenhangs; black box verhindert physikalische Interpretation des Modells	gute Lernfähigkeit	vollständige, repräsentative Trainingsdaten; keine physikalische Interpretation
Support Vector Machine	Annahme: Passende Wahl der Kernelfunktion	Überschaubare Trainingsdatenmenge; Prinzip basierend auf struktureller Risikominimierung	Bestimmung einer Kernelfunktion; Wahl der freien Parameter
Genetische Algorithmen	Annahme: Vom Benutzer vorgegebene Form der beschreibenden Gleichung; findet nicht unbedingt beste Lösung	Beschreibende Funktion wird angegeben; leistungsfähiges Optimierungsverfahren	große Trainingsdatenmenge; Anpassung der Parameter; lange Rechenzeit

##### 4.2.1. Regressionsanalyse

Bei der Regressionsanalyse wird für eine abhängige Variable  $y$  mit unabhängigen Variablen  $x_1, \dots, x_n$  eine Funktion  $f$  gesucht, so dass  $y = f(x_1, \dots, x_n) + \epsilon$  erfüllt ist.  $\epsilon$  ist das Residuum, welches den Fehler der Regression beschreibt. Meistens wird  $f$  so gewählt, dass  $\epsilon$  minimal ist.

Die Eingabedaten für die Regressionsanalyse können reale Messdaten sein wie etwa Abrechnungsdaten eines Energieversorgers. Dann werden als Eingangsvariablen  $x$  die Parameter gewählt, die einen Einfluss auf die abhängige Variable  $y$  haben und für die eine entsprechende Datengrundlage vorhanden ist. Diese Wahl muss durch analytische oder theoretische Überlegungen begründet sein [258, S. 19], da sich sonst mit entsprechenden Daten beliebige Zusammenhänge herleiten lassen. Dies stellt eine der großen Herausforderungen der sinnvollen Verwendung von Regressionsanalysen dar.

Falls die Regressionsanalyse zur Ermittlung statistischer Näherungsfunktionen für komplexe Energiemodelle verwendet wird, so werden die Eingabeparameter und Ergebnisdaten des Modells zur Regressionsanalyse verwendet. Die abhängige Variable  $y$  entspricht dann einer Modellergebnisgröße wie beispielsweise dem Energiebedarf. Der Zusammenhang zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen ist hierbei durch das zugrundeliegende Modell gegeben.

Details zu den unterschiedlichen Regressionstechniken wie linearer Regression, multivariater Regression, multivariate adaptive Regressions-Splines (MARS), Regression mittels polyno-

mialer Ansätze oder Conditional Demand Analysis (CDA) können u.a. in [86], [90], [252], [7] nachgelesen werden.

#### 4.2.2. Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen sind eine stochastische Optimierungstechnik, die sich an die Darwin'sche Evolutionstheorie anlehnt. Dabei werden ausgehend von einer Ursprungspopulation, in dem jedes Individuum eine Gensequenz bestehend aus Chromosomen besitzt, sowie einen Gütewert, der durch eine Fitnessfunktion ermittelt wird, neue Populationen erzeugt und bewertet. Dafür stehen die genetischen Operationen Selektion, Kreuzung und Mutation zur Verfügung. Die neue Population wird dann wieder mittels der Fitnessfunktion bewertet. Als Optimierungsmethode für Gebäudesimulationen werden genetische Algorithmen seit den 90er Jahren eingesetzt. Dort werden genetische Algorithmen zum Finden von einfachen, d.h. linearen, quadratischen oder exponentiellen Vorhersagemodellen für beispielsweise den Energiebedarf verwendet. Die Gewichtungsfaktoren für die Eingabeparameter werden dabei optimiert. Im Allgemeinen finden genetische Algorithmen nicht die optimale Lösung, sondern viele Lösungen, unter denen der Benutzer die aus seiner Sicht beste aussuchen muss. Ein Nachteil der Methode ist die lange Rechenzeit zum Finden von Lösungen. [90]

#### 4.2.3. Neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze sind eine nicht-lineare statistische Technik zur Erzeugung von Vorhersagemodellen, die sich am Aufbau biologischer Nervensysteme orientiert.

Solch ein neuronales Netz wird durch mehrere Schichten von Neuronen repräsentiert, wobei die erste für die Aufnahme der Eingabedaten zuständig ist, die letzte für die Ausgabe der Ergebnisdaten, die ggf. vorhandenen Zwischenschichten sind nach außen nicht sichtbar. Jedes Neuron enthält eine Transferfunktion, welche die Eingabedaten des jeweiligen Neurons in einer gewissen Weise gewichtet, summiert, und dann ein Ausgabesignal ausgibt, welches an andere Neuronen weitergeleitet wird. [84]

Vorteile des Verfahrens sind, dass es Aussagen über den Zusammenhang von Variablen ableiten kann, ohne Informationen über ein Modell enthalten zu müssen sowie dass es eine geringe Rechenzeitanforderung hat. Allerdings benötigen künstliche neuronale Netze einen sehr großen Satz an Trainingsinformationen, um zuverlässig arbeiten zu können. Hierbei ist insbesondere wichtig, dass der Parameterraum möglichst vollständig ausgeschöpft wird, damit das neuronale Netz alle Zusammenhänge richtig erlernen kann. Ein weiterer Nachteil ist die schwierige bis unmögliche Interpretierbarkeit der Koeffizienten eines neuronalen Netzes, die keine physikalische Bedeutung haben. [90, S. 280f]

Die möglichen Anwendungen für neuronale Netze sind vielfältig. Im Bereich der Gebäudesimulation sei hier auf [90] und [278] verwiesen, im Bereich Stadtmodellierung auf [252].

##### 4.2.4. Support Vector Machine

Das statistische Verfahren mittels Support Vector Machine (SVM) wurde 1995 von Cortes und Vapnik entwickelt [53]. Prinzipiell eignet es sich zur Klassifizierung von Daten und als Regressionsmethode. Bei dem Verfahren soll eine optimale Verallgemeinerung  $f(x)$  eines Modells, von dem Trainingsdatensätze  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  bekannt sind, gefunden werden. Hierfür werden nicht-lineare Zusammenhänge zwischen  $x$  und  $y$  auf eine lineare Abbildung transformiert, die auf einem hochdimensionalen Feature-Raum operiert. Die Funktion  $f$  hat die folgende Form:

$$f(x) = \langle \omega, \Phi(x) \rangle + b \quad (4.1)$$

Dabei ist  $\Phi$  eine Variable im Feature-Raum,  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ein Skalarprodukt des Feature-Raums,  $\omega$  und  $b$  sind durch Lösung eines Optimierungsproblems geschätzte Variablen. Durch die Einführung einer Kernelfunktion  $k(x, x') = \langle \Phi(x), \Phi(x') \rangle$  muss  $\Phi(x)$  nicht ausgewertet werden. Daher ist die zentrale Herausforderung bei dem Verfahren die Auswahl einer passenden Kernelfunktion. Vorteilhaft ist die geringe Anzahl freier Parameter. Maßgeblich abhängig ist die Aussagekraft des Verfahrens von dem Vorhandensein von Trainingsdaten, die aber unvollständig sein können im Vergleich zur Vollständigkeitsanforderung bei künstlichen neuronalen Netzen. Anwendung bei der Stadtmodellierung findet das Verfahren vor allem in der lokalen und regionalen Vorhersage des Energieverbrauchs. [90]

Einen Überblick über weitere Einsatzmöglichkeiten von SVM gibt [278].

##### 4.3. Hybrider bottom-up Ansatz

Hybride bottom-up Ansätze kombinieren physikalische mit statistischen Modellierungstechniken. Somit können einige der Nachteile der jeweiligen Verfahren behoben werden. Hierfür existieren diverse Strategien. So lassen sich Parameterwerte, die für den Gebäudebestand nicht vorhanden sind, durch statistische Ansätze, die Energieverbrauchsdaten nutzen, abschätzen und damit die physikalische Modellierung verbessern. Beispielsweise kann so die Luftwechselrate bei ansonsten bekannten thermischen Parametern aus einem Vergleich der Bedarfs- und Verbrauchsdaten ermittelt werden. Ebenso lassen sich physikalische Modelle als Lerndatensatz für statistische Modelle nutzen. Somit profitiert man von der hohen Rechengeschwindigkeit der statistischen Methoden, was insbesondere für Optimierungsaufgaben genutzt werden kann. Weiterhin lassen sich statistische Verfahren für Bereiche nutzen, für die physikalische Modellierungen und vor allem die Datengrundlage dafür nicht genau genug sind. Dazu gehören u.a. die Abschätzung des Endenergiebedarfs von Haushaltsgeräten oder die Abbildung des Nutzerverhaltens. Des Weiteren lassen sich für Teilbereiche, für die ausreichend Parameterdaten vorhanden sind, physikalische Modelle erstellen und für die

restlichen Bereiche werden statistische Modelle genutzt. Eine Herausforderung bei der hybriden Modellierung ist die Verbindung zweier unterschiedlicher Forschungsbereiche, einmal der Statistik und andererseits der Energiemodellierung. Hybride Verfahren werden unter anderem für das Monitoring und die Steuerung von Gebäuden eingesetzt. [90, S. 283ff]

Im Bereich der Stadtmodelle gibt es hybride Ansätze beispielsweise im Modell CHREM, welches neuronale Netze zur Abschätzung des Strombedarfs elektrischer Geräte nutzt, da dieser hauptsächlich vom nicht physikalisch abbildbaren Nutzerverhalten beeinflusst wird. [251]

#### 4.4. Top-down Ansatz

Modellierungsansätze, die auf dem top-down Prinzip basieren, nutzen Daten, welche für die gesamte untersuchte Region aggregiert vorliegen. Dies sind zumeist historische Zeitreihen zu ökonomischen oder energieorientierten Faktoren.

Prinzipiell kann zwischen ökonometrischen Modellen, welche preis- und einkommensgesteuert sind und technologischen Modellen, welche Eigenschaften der im gesamten Gebäudebestand eingesetzten Technologien abbilden, unterschieden werden. Ökonometrische Modelle basieren zumeist auf Größen wie Energieverbrauch, Einkommen, Brennstoffkosten oder Bruttoinlandsprodukt und werden genutzt, um die Zusammenhänge zwischen Energiesektor und Wirtschaftszweigen aufzuzeigen. Da sie auf Daten aus der Vergangenheit basieren, zeigen sie Schwächen bei der Abbildung aktueller und vor allem zukünftiger Trends. Insbesondere wenn es um Effekte durch den Klimawandel geht, der bisher nicht bekannte Auswirkungen auf Umwelt, soziale und wirtschaftliche Bedingungen zeigen wird, ist der top-down Ansatz also nur bedingt geeignet. Technologische Modelle berücksichtigen darüber hinaus u.a. Sättigungseffekte, technologischen Fortschritt und strukturelle Änderungen beim Einsatz von Technologien. [130, S. 15ff], [135, S. 1684]

Vorteile von top-down Ansätzen sind, dass nur wenige, aggregierte Daten zur Modellbildung vorliegen müssen. Dies erlaubt die Abbildung sehr großer Gebäudebestände, zum Beispiel ganzer Nationen, bei geringer Rechenzeit. Weiterhin werden Interaktionen zwischen ökonometrischen Größen und energieorientierten Größen sowie makroökonomische Faktoren berücksichtigt. Dies erlaubt es unter anderem, wirtschaftliche Rückkopplungseffekte durch sich verändernde Energiepreise abzubilden. Insbesondere zur Kosten-Nutzen-Berechnung von energie- und emissionspolitischen Entscheidungen lassen sich diese Ansätze sehr gut verwenden [130, S. 13f]

Nachteil des top-down Ansatzes ist, dass zukünftige Entwicklungen anhand von Daten aus der Vergangenheit vorhergesagt werden sollen. Dies ist insbesondere für neue technologische Entwicklungen nur durch Abschätzungen möglich. Dies kann auf Grund des fehlenden Detailwissens über die Technologien im Modell auch nicht anderweitig abgedeckt werden. Ökonomisch gesehen werden effiziente Kapitalmärkte als Grundvoraussetzung für die Modellbildung angenommen. [135]



## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Ein Modell ist nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn man sich der Grenzen seiner Anwendbarkeit, der Bedeutung seiner Parameter und seinen Unsicherheiten bewusst ist. Ein systematischer Ansatz, um sich mit einem Modell vertraut zu machen, sind Sensitivitätsanalysemethoden, die je nach Fragestellung der Analyse diverse Antworten geben können. Allerdings gibt es eine Vielzahl an Methoden, die hierfür in unterschiedlichen technischen Bereichen eingesetzt werden können. Darüber hinaus unterscheiden sich die Ergebnisse auch noch je nach Methode für ein Modell zum Teil erheblich. Von großer Bedeutung ist daher zuerst die Definition der Fragestellung und damit verbunden die Festlegung der Bedeutung des Begriffs „Einfluss eines Parameters“, da es hierfür keine klare mathematische Definition gibt. Dies wird in den folgenden Abschnitten für die unterschiedlichen Sensitivitätsanalysemethoden genauer behandelt.

Weiterhin muss unterschieden werden zwischen Sensitivitätsanalysen, bei denen es um Erkenntnisgewinn zum Einfluss von Parametern geht, im Vergleich zu Unsicherheitsbewertungen, bei denen es um Erkenntnisse zu den Unsicherheiten von Modellergebnissen geht. Das methodische Vorgehen ist zwar bei beiden Untersuchungen ähnlich, jedoch mit unterschiedlichem Zielfokus. Der erste Schritt bei der Untersuchung eines Modells sollte trotz des entstehenden Aufwands immer eine Sensitivitätsanalyse sein, um mit dem Modell vertraut zu werden und die einflussreichen (vgl. 5.1.1) bzw. weniger einflussreichen (vgl. 5.1.2) Parameter zu ermitteln und somit die Relevanz eines Modells bewerten zu können. Sobald der erste Schritt durchgeführt wurde und ggf. weniger einflussreiche Faktoren ausgenommen oder die Definitionsbereiche einflussreicher Faktoren genauer ermittelt werden konnten, geht es in einem zweiten Schritt mittels Unsicherheitsbewertung um die Unsicherheit der Modellergebnisse unter Berücksichtigung der Parameterunsicherheiten. Bei einer Unsicherheitsbewertung ist insbesondere die korrekte Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameter wichtig, da dies direkte Auswirkungen auf die Modellergebnisunsicherheiten hat.

Das Vorgehen einer Sensitivitätsanalyse folgt prinzipiell folgendem Schema:

- Festlegung der Fragestellung, die beantwortet werden soll
- Festlegung der Zielfunktion(en)
- Festlegung der untersuchten Parameter und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung
- Erzeugung von Stichproben der Parameterwerte
- Simulieren des Modells mit den Parameterstichproben
- Berechnung von Sensitivitätsindizes aus den Ergebnissen
- Darstellung der Sensitivitäten



## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Je nach verwendeter Methode unterscheiden sich die einzelnen Schritte bei ihrer Ausführung.

Bei lokalen Sensitivitätsanalysen wird nur das Modellverhalten um einen Basispunkt herum untersucht. Bei globalen Sensitivitätsanalysen wird das Modellverhalten an vielen unterschiedlichen Stellen des Parameterraums untersucht, dafür sind Samplingmethoden notwendig.

Eine Unterscheidung der berechneten Sensitivitätsindizes kann in qualitative und quantitative Indizes erfolgen. Qualitativ bedeutet hierbei, dass eine Rangordnung der Parameter nach Einfluss erstellt werden kann. Im Gegensatz dazu kann bei quantitativen Sensitivitätsindizes angegeben werden, um wieviel einflussreicher ein Parameter im Vergleich zu einem anderen ist. Quantitative Sensitivitätsindizes werden bei den varianzbasierten Sensitivitätsanalysemethoden definiert.

Statische Sensitivitätsanalysen haben eine skalare Zielgröße wie den jährlichen Heizwärmebedarf, dynamische Sensitivitätsanalysen haben eine vektorielle Zielgröße. Dies ist meistens eine Zeitreihe, beispielsweise des Heizwärmebedarfs während jeder Stunde eines Jahres.

Im Folgenden wird eine Übersicht der diversen Sensitivitätsmethoden gegeben, angefangen bei der Definition der Fragestellung über die eigentliche Rechenmethode bis hin zur Ergebnisdarstellung. Die Anwendung der Sensitivitätsanalysemethoden für energetische Stadtmodelle wird in Teil IV ausführlich behandelt.

### 5.1. Fragestellungen für Sensitivitätsanalysen

In [224] werden vier Szenarien als Fragestellung für Sensitivitätsanalysen vorgestellt: Faktor-Priorisierung, Faktor-Fixierung, Varianz-Verminderung („Variance Cutting“) und Faktor-Verhalten („Factor Mapping“). Diese unterscheiden sich sowohl in dem angestrebten Erkenntnisgewinn für ein Modell als auch der einsetzbaren Methode zur Berechnung der Sensitivitäten.

#### 5.1.1. Faktor-Priorisierung

Im Szenario Faktor-Priorisierung lautet die Fragestellung, welches der Faktor mit dem größten Einfluss ist. Der Einfluss eines Parameters ist dabei als die Varianz, die der Faktor für das Modellergebnis bedeutet, definiert. Daher kann die Fragestellung umformuliert werden: wenn dieser Faktor auf seinen wahren Wert fixiert würde, so würde die Varianz des Modells am meisten reduziert werden. Der wahre Wert eines Faktors ist unbekannt, daher geht es bei diesem Szenario nicht um eine Festlegung des wichtigsten Parameters, sondern um eine rationale Wahl des wichtigsten Parameters unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Analog lässt sich das für den nächsten Faktor, der die Varianz am zweitmeisten reduziert durchführen. Somit kann eine Reihenfolge der Parametereinflüsse angegeben werden. Dabei ist zu beachten, dass die fiktive Fixierung nacheinander durchgeführt wird, daher können

Interaktionseffekte zwischen den Parametern nicht erkannt werden. Dieses Szenario ist gut geeignet um eine Begründung für die weitere Erforschung bzw. experimentelle Ermittlung des genauen Wertes eines oder mehrerer wichtiger Modellparameter zu liefern. [224, S. 52]

Da der Einfluss durch die Varianz definiert ist, sind für dieses Szenario varianzbasierte oder allgemeiner quantitative Sensitivitätsanalysemethoden am besten geeignet. Aber auch qualitative Methoden können für die Identifikation des einflussreichsten Parameters verwendet werden. Hierbei kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, wieviel einflussreicher dieser Parameter gegenüber den darauf folgenden ist.

### 5.1.2. Faktor-Fixierung

Im Szenario Faktor-Fixierung geht es um die Festlegung von Faktoren, die nicht einflussreich sind, d.h. welche Faktoren auf irgendeinen Wert ihres Definitionsbereichs fixiert werden können, ohne dass das Ergebnis zu stark beeinflusst wird. Hierbei ist der Einfluss wieder durch die Varianz definiert. Daher lautet die Fragestellung umformuliert: welcher Faktor oder welche Faktoren können auf einen beliebigen Wert ihres Definitionsbereichs fixiert werden, ohne die Modellergebnisvarianz signifikant zu beeinflussen. Umgekehrt sind die übrigen Faktoren also die einflussreichen, deren Unsicherheiten genauer bekannt sein sollten. Dieses Szenario kann auch genutzt werden, um Hypothesen zum Einfluss von Parametern in einem Modell zu bestätigen oder zu widerlegen. [224, S. 54]

Diese Fragestellung kann sowohl mit varianzbasierten Sensitivitätsanalysemethoden als auch der Elementareffekt-Methode beantwortet werden. Details zu der Elementareffekt-Methode werden in Abschnitt 5.3.6 dargestellt.

Dieses Szenario wird auch oft als Faktor- oder Parameterscreening bezeichnet.

Zur Bewertung eines Modells kann die Relevanz eines Modells definiert werden. [225, S. 34]

**Definition 5.1.1.** Die **Relevanz**  $R$  eines Modells ist definiert als

$$R = \frac{\text{Anzahl an Parametern, welche die Zielgröße beeinflussen}}{\text{Gesamtzahl an Parametern des Modells}} \quad (5.1)$$

Die Relevanz eines Modells sagt aus, wie viele der im Modell vorhandenen Parameter einen echten Einfluss auf das Modellergebnis haben. Eine Festlegung, wann man sagen kann, dass ein Parameter eine Zielgröße beeinflusst, erfolgt nicht an dieser Stelle, da dies vom verwendeten Sensitivitätsindex und den dadurch berechneten Werten abhängt.

Das Ziel jeder Modellierung und insbesondere von Sensitivitätsanalysen mit dem Ziel der Faktor-Fixierung sollte es immer sein, ein Modell mit möglichst hoher Relevanz zu erstellen.

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

### 5.1.3. Varianz-Verminderung

In diesem Szenario wird die Frage behandelt, welche kleinste Anzahl an Parametern fixiert werden muss, um die Varianz des Modellergebnisses auf einen vorher festgelegten Wert zu senken. Das Ergebnis dieser Untersuchung kann durch Interaktionen zwischen Parametern beeinflusst werden, je nachdem in welcher Reihenfolge die Faktoren fixiert werden.

Diese Fragestellung kann nur mit varianzbasierten Verfahren bearbeitet werden.

### 5.1.4. Faktor-Verhalten

Bei diesem Szenario geht es nicht wie bei den vorherigen Fragestellungen um quantitative Einflüsse einzelner Parameter, sondern um die Frage, durch welche Parameter und Elemente das Modellergebnis in einem vordefinierten, erwünschten Bereich landet. Dieser Bereich kann beispielsweise akzeptable von inakzeptablen Ergebnissen unterscheiden und genutzt werden, um unterschiedliche Modellstrukturen, d.h. unterschiedliche Verfahren zur Abbildung einzelner Vorgänge, zu untersuchen. Dabei sind die Größenordnungen der durch die einzelnen Parameter ins Modell eingebrachten Einflüsse von größerem Interesse als exakte Werte der Varianzen.

Dieses Szenario wird auch unter den Begriffen Factor-Behaviour oder Factor-Mapping geführt und kann mittels Monte-Carlo-Filterung oder Bayes'scher Analyse untersucht werden [224, S. 151ff].

## 5.2. Lokale Sensitivitätsanalysemethoden

Lokale Sensitivitätsanalysemethoden berechnen die Änderung eines Modellresultats bei kleinen Änderungen der Eingangsparameter. Hierdurch wird geklärt was passiert, wenn ein Parameter in einem kleinen Bereich eines Basisfalls verändert wird.

Zur Berechnung der lokalen Änderung der Zielgröße wird die Ableitung der Zielfunktion ermittelt. In den meisten Fällen wird dabei ein Parameter nach dem anderen verändert. Daher spricht man hier auch von einem One-at-a-time (OAT) Sampling. Aufgrund des OAT Samplings lassen sich keine Interaktionen zwischen Parametern erkennen, falls z.B. bestimmte Parameter, wenn sie kombiniert werden, gegenläufige Ergebnisse ergeben.

Lokale Sensitivitätsanalysemethoden sind stark abhängig von dem Basispunkt, an dem die Ableitungen bestimmt werden. Die Parameter werden nur in einem kleinen Bereich um den Basispunkt herum variiert. Dadurch sind solche Verfahren leicht implementierbar und auch einfach interpretierbar.

### 5.2.1. Mathematische Definition

**Definition 5.2.1.** Für ein zeitabhängiges, d.h. instationäres System sei ein Differentialgleichungssystem der Form

$$\frac{dy}{dt} = f(y, k), y(0) = y^0 \quad (5.2)$$

gegeben. Dabei ist  $y \in \mathbb{R}^n$  der  $n$ -Vektor der Variablen,  $k \in \mathbb{R}^m$  der  $m$ -Vektor der Parameter und  $y^0$  der Vektor der Anfangswerte.

Weiterhin sei  $y^s$  die Lösung der Gleichung 5.2.

Der Effekt einer kleinen Parameteränderung  $\Delta k$  kann nun durch eine Taylorreihenentwicklung beschrieben werden:

$$y^s(t, k + \Delta k) = y^s(t, k) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial y}{\partial k_j} \Delta k_j + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial^2 y}{\partial k_l \partial k_j} \Delta k_l \Delta k_j + \dots \quad (5.3)$$

Dann werden die partiellen Ableitungen  $\frac{\partial y}{\partial k_j}$  die **lokalen Sensitivitäten 1. Ordnung** genannt, die partiellen Ableitungen  $\frac{\partial^2 y}{\partial k_l \partial k_j}$  die **lokalen Sensitivitäten 2. Ordnung** usw.

Darauf aufbauend sind die **normalisierten Sensitivitätsindizes 1. Ordnung** definiert als  $S_j = \frac{\frac{\partial y}{\partial k_j}}{k_j}$

Die lokalen Sensitivitäten hängen immer von dem Punkt im Parameterraum ab, an dem sie berechnet werden. Es lassen sich damit also insbesondere keine Effekte signifikanter Parameteränderungen (d.h. wenn  $|\Delta k|$  groß ist) bewerten.

Für die numerische Berechnung der partiellen Ableitungen stehen diverse Methoden wie Finite Differenzen Approximation, die sog. Direkte Methode oder andere (vgl. [226]) zur Verfügung.

### 5.2.2. Linearität und Additivität

Linearität und Additivität sind zwei wichtige Eigenschaften von Modellen, die im Folgenden definiert werden.

**Definition 5.2.2.** Ein Modell  $y$  ist **linear**, wenn  $y(\beta \cdot \Delta u) = \beta \cdot y(\Delta u)$  für alle  $\beta \in \mathbb{R}$  gilt. Dabei ist  $\Delta u$  eine gültige Parametermenge und auch deren Vielfaches  $\beta \cdot \Delta u$  ist eine gültige Parametermenge.

**Definition 5.2.3.** Ein Modell  $y$  ist **additiv**, wenn  $y(\Delta u_1 + \Delta u_2) = y(\Delta u_1) + y(\Delta u_2)$  gilt. Dabei sind  $\Delta u_1$  und  $\Delta u_2$  jeweils gültige Parametermengen, so dass auch deren Summe eine gültige Parametermenge darstellt.

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Wenn Linearität eines Modells gegeben ist, so können lokale Sensitivitätsindizes genutzt werden, um auch an anderen Stellen als dem Basispunkt, an dem sie berechnet wurden, Aussagen zu treffen. Interaktionen zwischen Parametern spielen dann keine Rolle, da die Änderungen additiv sind. Dies spielt für Modelle im Gebäudesimulationsbereich keine Rolle, da die dort eingesetzten Stadtmodelle in fast allen Parametern nicht-linear und nicht-additiv sind [49] [120].

Daher wird hier nicht weiter auf lokale Sensitivitätsanalysen eingegangen. Zur Interpretation und Anwendung lokaler Sensitivitätsanalysen finden sich in [226, S. 87ff] und [226, S. 93ff] weiterführende Informationen.

### 5.3. Globale Sensitivitätsanalysemethoden

Globale Sensitivitätsanalysemethoden untersuchen im Gegensatz zu den lokalen Methoden den gesamten möglichen Parameterbereich. Hierfür werden durch sogenannte Samplingmethoden Stichproben der Parameter aus ihrem jeweiligen Definitionsbereich erzeugt, für die die Ergebnisse des untersuchten Modells ermittelt und anschließend Sensitivitätsindizes berechnet werden. Hierdurch ist ein größerer Rechenaufwand notwendig, aber die berechneten Sensitivitätsindizes sind nicht von der Definition des Basisfalls, wie dies bei lokalen Methoden der Fall ist, abhängig. Insbesondere bei nicht-linearen Modellen erlauben also erst globale Sensitivitätsmethoden, die Einflüsse der Parameter korrekt zu ermitteln. Bei linearen Modellen lassen sich die Sensitivitäten erster Ordnung, also die Steigung der Ergebniskurve an einem Punkt, auch auf andere Stellen des Parameterraums übertragen [121, S. 4].

Zu den globalen Sensitivitätsanalysemethoden gehören unter anderem Regressionsverfahren, varianzbasierte Verfahren, Screeningverfahren wie das nach Morris und Metamodell basierte Verfahren wie MARS, ACOSSO oder SVM. Auch allgemeine Monte-Carlo-Verfahren basierend auf unterschiedlichen Samplingmethoden, wie Random Sampling, Latin Hypercube Sampling (LHS) oder Stratified Sampling [255], gehören hierzu.

Die für globale Sensitivitätsanalysen verwendbaren Sensitivitätsindizes sind bei varianzbasierten Verfahren vor allem die Haupt- und Totaleffekte. Bei regressionsbasierten Verfahren kommen die standardisierten Regressionskoeffizienten (SRC) oder standardisierten Rangregressionskoeffizienten (SRRRC) zum Einsatz. Bei dem Morris-Screening werden der Mittelwert und die Standardabweichung der Elementareffekte als Sensitivitätsindex verwendet. Bei Monte-Carlo-Verfahren werden meist die Standardabweichung und davon abgeleitete Indizes berechnet.

#### 5.3.1. Parametersampling

Da bei globalen Sensitivitätsanalysemethoden die Werte der Parameter mittels einer Verteilung aus dem gesamten Parameterraum ausgewählt werden, sind die Algorithmen für die

Auswahl der Werte entscheidend für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Eine vollständige Ausschöpfung des Parameterraums ist überhaupt nur für sehr einfache Modelle mit diskreten Parametern möglich, da sich sehr schnell eine große Anzahl von benötigten Modellberechnungen ergibt. Daher ist das Ziel von Samplingmethoden, eine Stichprobe aus dem Parameterraum zu erzeugen, so dass dieser möglichst gleichmäßig ausgeschöpft wird und alle Parameter entsprechend ihrer vorgegebenen Verteilung repräsentiert werden.

Allgemein kann der Parameterraum als  $k$ -dimensionaler Einheitswürfel wie folgt definiert werden:

**Definition 5.3.1.** Der **Parameterraum** eines Modells mit  $k$  Parametern ist definiert als

$$\Omega^k = \{(x_1, \dots, x_k) | 0 \leq x_i \leq 1, i = 1, \dots, k\} \quad (5.4)$$

Es ist zulässig, die Werte  $x_i$  im Intervall  $[0, 1]$  als gleichverteilt anzunehmen, da sich durch Transformationen sowohl andere Intervalle als auch andere Verteilungen innerhalb des Intervalls abbilden lassen [44, S. 79] [247]. Dies erfolgt, indem das Sampling im Quantilraum der Verteilung durchgeführt wird und aus dem ermittelten Quantil der Wert des Parameters gemäß der entsprechenden Verteilung ermittelt wird.

Für die Erstellung von Stichproben aus  $\Omega^k$  gibt es unter anderem Random Sampling, Stratified Sampling, Latin Hypercube Sampling, Sampling basierend auf Sobol-Sequenzen sowie das Sampling für die im weiteren Verlauf der Arbeit eingesetzte Elementareffekt-Methode, welches in Abschnitt 5.3.6 detailliert dargestellt wird.

Beim Random Sampling wird durch Pseudo-Zufallszahlen eine Stichprobe ermittelt. Hierbei kann die Dichte der Stichprobenpunkte für einen Parameter innerhalb des Intervalls  $[0, 1]$  variieren, es treten also Cluster und Lücken auf. Beim Stratified Sampling wird jedes Parameterintervall  $[0, 1]$  in Teilintervalle unterteilt, um dann bei der Stichprobenerzeugung dafür zu sorgen, dass gleich viele Werte eines Parameters in jedem der Teilintervalle liegen. Latin Hypercube Sampling ist eine spezielle Variante des Stratified Samplings. Bei Sampling basierend auf Sobol-Sequenzen werden die Zufallszahlenreihen unter Berücksichtigung der vorher bereits erzeugten Zufallszahlen generiert. [225, S. 58ff] [39]

In [39] wurde für Gebäudesimulationen festgestellt, dass Latin Hypercube Sampling und Sobol Sampling die am schnellsten konvergierenden Mittelwertschätzungen mittels Monte-Carlo-Simulation ermöglichen.

In [155] wird vorgeschlagen, für alle zu variierenden Parameter eine Gleichverteilung anzunehmen, sofern keine weiteren Informationen vorhanden sind. Dies basiert auf dem objektiven Bayesschen Wahrscheinlichkeitsbegriff und dem damit verbundenen Indifferenzprinzip der Wahrscheinlichkeitstheorie.

Es ist auch möglich, ein Sampling für korrelierte Parameter durchzuführen, so dass die Korrelation zwischen den Werten erhalten bleibt. Hierfür sind verschiedene Methoden, die u.a.

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

in [255] beschrieben werden, verfügbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird darauf nicht weiter eingegangen.

### 5.3.2. Monte-Carlo-Simulation

Der Begriff der Monte-Carlo-Simulation ist die allgemeine Bezeichnung für ein Verfahren, bei dem durch eine Samplingmethode zufällig Parameter ermittelt werden, die zur Modellberechnung genutzt werden, um anschließend die Ergebnisse zu vergleichen. Solch ein Vergleich kann beispielsweise durch die Darstellung als Scatterplot oder durch Schätzung der sich ergebenden statistischen Werte wie Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum erfolgen. Im Allgemeinen ist auf Grund der hohen Anzahl notwendiger Modellevaluierungen der Rechenaufwand groß und das Verfahren deshalb vor allem für schnell rechnende Modelle geeignet.

Wechselwirkungen zwischen Parametern werden dabei berücksichtigt, da sich alle Parameter von Stichprobe zu Stichprobe ändern. Auch nichtlineare Zusammenhänge werden berücksichtigt. Hingegen ist eine Zuordnung des Einflusses eines einzelnen Parameters auf die Schätzung statistischer Größen nicht möglich. [166, S. 25]

### 5.3.3. Regressionsbasierte Ansätze

Bei regressionsbasierten Sensitivitätsanalysemethoden wird das von  $k$  Parametern abhängige Modellergebnis  $Y = f(X_1, \dots, X_k)$  für  $N$  mittels Sampling erzeugte Parametervektoren  $X_i = (x_i^1, \dots, x_i^N)$  mit  $1 \leq i \leq k$  berechnet. Es ergeben sich somit  $N$  Ergebniswerte für die Funktion. Für den Mittelwert  $\bar{x}_j$  und die Standardabweichung  $s_j$  von  $X_j$  und den Mittelwert  $\bar{y}$  und die Standardabweichung  $s_y$  des Ergebnisses  $Y$  werden die standardisierten Variablen  $\tilde{x}_j^{(i)} = (x_j^{(i)} - \bar{x}_j)/s_j$  und  $\tilde{y}^{(k)} = (y^{(k)} - \bar{y})/s_y$  eingeführt und ein Regressionsmodell  $(\tilde{y}^{(i)} - \bar{y})/s_y = \sum_{j=1}^k \beta_j \tilde{x}_j^{(i)}$  definiert, bei dem die Koeffizienten  $\beta_j$  durch Minimierung der quadratischen Abweichung von  $\epsilon^{(i)} = \tilde{y}^{(i)} - y^{(i)}$  bestimmt werden. Die Koeffizienten  $\beta_j$  heißen standardisierte Regressionskoeffizienten (SRC). [224, S. 43f]

Neben dem Verfahren mittels SRC gibt es weitere Verfahren wie PCC (Partial Correlation Coefficient) sowie die rangtransformierten Indikatoren SRRC (Standardized Rank Regression Coefficient) und PRCC (Partial Rank Correlation Coefficient), hierfür sei auf [255] verwiesen. Die Verfahren mittels SRC und PCC sind nur für lineare Modelle geeignet. Die Verfahren, welche rangtransformierte Indikatoren nutzen, können auch für nicht-lineare monotone Modelle eingesetzt werden. PCC und PRCC können im Gegensatz zu SRC und SRRC auch korrelierte Eingabeparameter bewerten. [255, S. 414]

Die exemplarische Anwendung von regressionsbasierten Verfahren kann ebenfalls in [255] nachgelesen werden.

### 5.3.4. Varianzbasierte Ansätze

Die auf der Berechnung von Varianzen basierenden Ansätze für eine Sensitivitätsanalyse erlauben quantitative Aussagen über den Einfluss von Parametern auf die Varianz des Modellergebnisses, d.h. es kann hiermit ermittelt werden, um „wie viel“ ein Parameter einen größeren Einfluss hat als ein anderer. Diese Verfahren basieren auf einer Zerlegung der zu untersuchenden Funktion in Teilfunktionen, die jeweils nur von einem oder mehreren Parametern abhängen [237]:

**Definition 5.3.2.** Für eine integrierbare, auf  $\Omega^n$  definierte Funktion  $f$  und  $x = (x_1, \dots, x_n) \in \Omega^n$  wird die Zerlegung

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} f_{i_1 \dots i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) \quad (5.5)$$

**ANOVA-Darstellung** genannt, wenn

$$\int_0^1 f_{i_1 \dots i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_k = 0 \quad (5.6)$$

für  $k = i_1, \dots, i_s$  gilt. [237]

Die Anzahl  $s$  der eine Teilfunktion  $f_{i_1, \dots, i_s}$  beeinflussenden Parameter wird auch Ordnung der Teilfunktion genannt.

**Definition 5.3.3.** Sei  $f$  wie oben und quadratintegrierbar. Dann werden die Konstanten

$$D = \int f^2(x) dx - f_0^2 \quad (5.7)$$

$$D_{i_1 \dots i_s} = \int f_{i_1 \dots i_s}^2 dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (5.8)$$

**Varianzen** von  $f$  bzw. der Teilfunktionen  $f_{i_1 \dots i_s}$  genannt. [237]

Es gilt:

$$D = \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} D_{i_1 \dots i_s} \quad (5.9)$$

Dies bedeutet, dass sich also auch die Varianz  $D$  von  $f$  zerlegen lässt in die Varianzen  $D_{i_1 \dots i_s}$  der Teilfunktionen  $f_{i_1 \dots i_s}$  unterschiedlicher Ordnung. Daher werden die folgenden Sensitivitätsindizes eingeführt:



## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

**Definition 5.3.4.** Die Größe

$$S_{i_1 \dots i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D} \quad (5.10)$$

wird **globaler Sensitivitätsindex** genannt. [237]

Aufbauend auf dieser Definition können die sogenannten Haupt- und Totaleffekte als Sensitivitätsindizes eingeführt werden:

**Definition 5.3.5.**  $S_i$  wird **Haupteffekt** von Parameter  $x_i$  genannt. [224]

Die Haupteffekte sind also die globalen Sensitivitätsindizes  $S_i$  erster Ordnung, die den direkten Einfluss eines Parameters auf die Funktion  $f$  beschreiben. Alle anderen Parameter außer  $x_i$  sind also variabel und daher quantifiziert  $S_i$  die Varianz, die bei Festlegung des Werts von  $x_i$  übrig bleibt. [224, S. 20f]

**Definition 5.3.6.**

$$S_{Ti} = \mathbb{E}(\mathbb{V}(f|x_{-i})) \quad (5.11)$$

wird **Totaleffekt** für Parameter  $x_i$  genannt. Dabei bedeutet  $x_{-1}$ , dass alle Parameter bis auf  $x_i$  festgelegt sind. [224]

Der Totaleffekt für einen Parameter  $x_i$  quantifiziert also die erwartete Varianz, wenn alle Parameter bis auf  $x_i$  festgelegt wären. [224, S. 21]

Eine kompakte Übersicht über die Definitionen und die Interpretationsmöglichkeiten der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse findet sich in [107]. Darin findet sich auch eine Beschreibung zur alternativen Berechnung von Haupt- und Totaleffekten mittels Fourier Analysis Sensitivity Test [107, S. 30ff].

Entsprechend der quantitativen Ergebnisse werden varianzbasierte Verfahren vor allem in den Szenarien Varianz-Verminderung, Faktor-Priorisierung und Faktor-Fixierung eingesetzt.

Bei dieser Art der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse sind für konvergente Ergebnisse mehrere hundert bis tausend Wiederholungen der Simulation mit jeweils neuen Parameterstichproben notwendig. Daher ergibt sich für eine Monte-Carlo-Berechnung der Haupt- und Totaleffekte ein Rechenaufwand in der Größenordnung  $O(N(k+2))$  [224, S. 22], wobei  $N$  die Anzahl der Wiederholungen ist und  $k$  die Parameteranzahl. Dies hängt allerdings auch von der verwendeten Samplingmethode ab. Auf Grund dieses hohen Rechenaufwands wird im weiteren Verlauf auf eine Anwendung varianzbasierter Methoden verzichtet.

### 5.3.5. Metamodell-basierte Ansätze

Metamodell-basierte Sensitivitätsanalyseansätze erstellen zuerst ein Ersatzmodell, beispielsweise mittels statistischer Verfahren, wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, oder allgemeineren Ansätzen für maschinelles Lernen. Die eigentliche Sensitivitätsanalyse ermittelt dann anhand dieses Ersatzmodells die Sensitivitätsindizes. Im Bereich der Gebäudesimulation angewandte Ersatzmodelle sind MARS, ACOSSO, SVM, GP oder TGP. [255]

Für die Erstellung von Ersatzmodellen mittels maschinellen Lernens sind im allgemeinen große Mengen an Trainingsdaten notwendig, weshalb im weiteren Verlauf der Arbeit nicht auf derartige Methoden zurückgegriffen wird.

### 5.3.6. Elementareffekt-Methode

Die Grundlagen der Elementareffekt-Methode wurden 1991 von Morris [186] entwickelt. Das Ziel dieser Art der Sensitivitätsanalyse ist es, Parameter zu ermitteln, die a) vernachlässigbar, b) linearen und additiven, oder c) nichtlinearen und durch Wechselwirkungen mit anderen Parametern entstehenden Einfluss auf das Ergebnis haben.

Die Methode ist einfach, leicht implementierbar und interpretierbar, ökonomisch durch eine lineare Abhängigkeit der Modellauswertungen von der Anzahl an Parametern. Die unten definierten Elementareffekte kommen durch Inkrementierung einzelner Parameterwerten zustande und sind daher als lokale Indizes anzusehen. Die daraus abgeleiteten Indizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  sind nicht mehr vom spezifischen Punkt, an dem die Elementareffekte berechnet wurden, abhängig, daher kann die Methode als global angesehen werden. [224, S. 93]

Die folgenden Definitionen und die Interpretation der Sensitivitätsindizes sind an [224, S. 94ff] angelehnt.

**Definition 5.3.7.** Gegeben sei ein Modell  $Y$  mit  $k$  unabhängigen Parametern  $X = (X_i)$ ,  $i = 1, \dots, k$ , welche im  $k$ -dimensionalen Einheitswürfel  $\Omega^k$  auf  $p$  Stufen variieren. Dieser Parameterraum kann auch als  $p$ -stufiges  $k$ -dimensionales Netz  $\Omega$  verstanden werden. Für dieses  $X$  ist der **Elementareffekt** des  $i$ -ten Parameters definiert als

$$EE_i = \frac{[Y(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta, X_{i+1}, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_k)]}{\Delta} \quad (5.12)$$

Dabei ist  $\Delta$  ein Wert aus  $\{1/(p-1), \dots, 1 - 1/(p-1)\}$ ,  $X$  ist so bestimmt, dass  $X + e_i \Delta$  für alle  $i = 1, \dots, k$  in  $\Omega$  liegt, wobei  $e_i$  der Einheitsvektor mit Wert 1 an Position  $i$  ist.

Es wird empfohlen,  $p$  gerade und  $\Delta = \frac{p}{2(p-1)}$  zu wählen, um die Diskretisierung der Verteilung der Parameter symmetrisch zu machen. [224, S. 97]

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Für  $r$  Trajektorien mit jeweils  $k + 1$  Werten aus  $\Omega$ , deren Konstruktion in 5.3.6.1 beschrieben wird, können  $r$  Elementareffekte berechnet werden. Hierzu seien  $x_j^{(l)}$  und  $x_j^{(l+1)}$  zwei Punkte der  $j$ -ten Trajektorie, die sich in der  $i$ -ten Komponente unterscheiden. Dann gilt:

$$EE_i^j = \frac{Y(x_j^{(l+1)}) - Y(x_j^{(l)})}{\Delta} \quad (5.13)$$

falls die  $i$ -te Komponente von  $x_j^{(l)}$  erhöht wurde, oder

$$EE_i^j = \frac{Y(x_j^{(l)}) - Y(x_j^{(l+1)})}{\Delta} \quad (5.14)$$

falls die  $i$ -te Komponente von  $x_j^{(l)}$  um  $\Delta$  reduziert wurde.

Mittels der Elementareffekte  $EE_i^j$  für  $r$  Trajektorien können Sensitivitätsindizes definiert werden. Hierfür sei mit  $F_i$  die endliche Verteilung der Elementareffekte des  $i$ -ten Parameters bezeichnet, mit  $G_i$  die endliche Verteilung der Absolutbeträge der Elementareffekte.

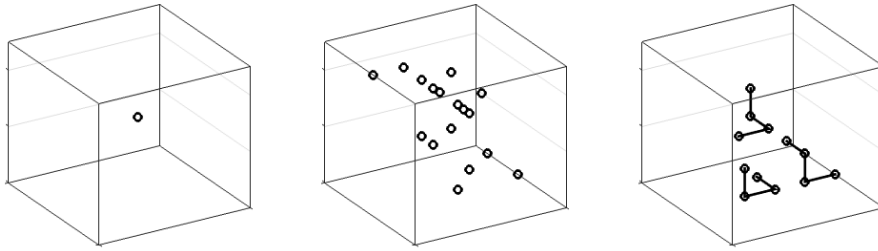
**Definition 5.3.8.** Für die Elementareffekte  $(EE_i^j)_{i,j}$ ,  $i = 1 \dots k$ ,  $j = 1 \dots r$ , wobei  $EE_i^j$  der Elementareffekt des  $i$ -ten Parameters in der  $j$ -ten Trajektorie ist, werden folgende Sensitivitätsindizes definiert:

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j \quad (5.15)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j - \mu_i)^2} \quad (5.16)$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j| \quad (5.17)$$

Also sind  $\mu_i$  bzw.  $\sigma_i$  der Mittelwert bzw. die Standardabweichung der Verteilung  $F_i$ ,  $\mu_i^*$  ist der Mittelwert der Verteilung  $G_i$ . Der Mittelwert  $\mu_i$  repräsentiert den linearen, additiven Einfluss eines Parameters und gibt an, ob ein positiver oder negativer Einfluss auf die Zielgröße vorliegt. Positive und negative Einflüsse können sich hierbei aufheben, daher ist für eine Einschätzung des Gesamteinflusses der Wert  $\mu_i$  alleine nicht verlässlich. Die Standardabweichung  $\sigma_i$  repräsentiert gesammelt die Einflüsse zweiter und höherer Ordnung, hierzu gehören nicht-lineare Einflüsse sowie Wechselwirkungen mit anderen Parametern. Wenn sich aufhebende positive und negative Elementareffekte auftreten äußert sich dies in einem niedrigen Wert für  $\mu$ , aber einem hohen  $\sigma$ . Daher wird für die Erstellung von Parameterrankings die Verwendung von  $\mu_i^*$  empfohlen, da hierdurch solche Fehler zweiter Art vermieden werden.



**Abbildung 5.1.:** links: OAT lokal um einen Punkt, mitte: zufällige über den Raum verteilte Punkte, rechts: Variationen im Raum ausgehend von unterschiedlichen Startpunkten (Elementareffekt-Trajektorien), angelehnt an [121, Figure 3]

Durch gleichzeitige Betrachtung von  $\mu_i$  und  $\mu_i^*$  kann bei großem Wert für beide Indizes darauf geschlossen werden, dass das Vorzeichen der Elementareffekte gleichbleibend ist, bei kleinem Wert für  $\mu_i$  und großem Wert für  $\mu_i^*$  darauf, dass das Vorzeichen wechselt.

### 5.3.6.1. Sampling

Das Sampling der Elementareffekt-Methode erzeugt für die Berechnung der Elementareffekte erster Ordnung ausgehend von einem zufällig gewählten Basispunkt in  $\Omega$  eine Trajektorie, bei der sich in jedem Schritt genau ein Parameter um den Wert  $\Delta$  ändert. Daher ist dies als One-at-a-time Sampling anzusehen. Dies wird  $r$  mal wiederholt. Technisch umgesetzt wird dies durch Konstruktion einer  $k \times (k + 1)$  Matrix, deren Reihen Parametervektoren entsprechen, für die mittels  $k + 1$  Modellläufen  $k$  Elementareffekte berechnet werden. Details können in den Arbeiten von Morris und Saltelli nachgelesen werden. Der Rechenaufwand ist also  $r \cdot (k + 1)$  und die Ökonomie, die als Anzahl Elementareffekte durch Anzahl notwendiger Modellläufe definiert ist, ist  $k/(k + 1)$ . Bei einem einfachen Sampling, bei dem zwei Modellläufe pro Elementareffekt notwendig wären, ist die Ökonomie mit  $rk/(2rk) = 1/2$  in jedem Fall geringer.

Bei Parametern, die nicht gleichverteilt sind, und in denen daher das Sampling erst im Quantilraum der entsprechenden Verteilung durchgeführt wird, um dann den Parameterwert gemäß dem ermittelten Quantil zu berechnen, werden dann bei den Werten 0 bzw. 1 für das Quantil auch das Minimum und Maximum der entsprechenden Verteilung angenommen. Daher müssen Minimum und Maximum realistisch gewählt werden, um eine Verzerrung der Sensitivitäten zu vermeiden.

Im Vergleich zu varianzbasierten Verfahren sind beispielsweise für ein Modell mit zwölf Parametern zur verlässlichen Varianzberechnung 14000 Rechenläufe notwendig. Für die Berechnung der Elementareffekte erster Ordnung sind bei zehn Trajektorien etwa 100 mal weniger Modellläufe notwendig. [97, S. 742]

In Abbildung 5.1 ist der Parameterraum für lokale, zufallsbasierte globale und die Elementareffekt Samplingmethode vergleichend dargestellt.

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

In [46] wird ein Verfahren zur Maximierung der Distanz zwischen den Trajektorien eingeführt, welches aus einer Anzahl von  $s$  Trajektorien die  $r$  Trajektorien ermittelt, die den größten mittels euklidischer Norm definierten Abstand voneinander haben. Hierbei ergeben sich allerdings durch Verwendung von brute-force-Methoden zur Berechnung der Distanzen große Rechenzeit- und Speicheranforderungen.

Für Elementareffekte höherer Ordnung lässt sich ein Sampling nach dem sog. „handcuffed prisoner problem“ [122] einsetzen.

### 5.3.6.2. Gruppierung von Parametern

Parameter, die zusammenhängen und daher korreliert sind, d.h. bei denen davon auszugehen ist, dass die Erhöhung eines Parameters auch zur Erhöhung des anderen führt, lassen sich in Gruppen zusammenfassen. Durch diese Gruppierung von Parametern lassen sich deren gemeinsame Elementareffekte und die darauf basierenden Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  bestimmen. Dies führt zu einer Reduzierung des Rechenaufwands und zu einer Dimensionsreduzierung der auszuwertenden Sensitivitätsergebnisse.

Mittels des in [225, S. 121f] beschriebenen Samplings bei Verwendung von Gruppen lassen sich Stichproben für positiv korrelierte Parameter ermitteln, daher bewegen sich alle Parameter einer Gruppe in einer Trajektorie in die gleiche Richtung. Für negativ korrelierte Parameter müsste dieses Gruppensampling angepasst werden.

Die Anzahl der Modellläufe für die Berechnung aller Elementareffekte der  $g$  Gruppen für  $r$  Trajektorien ist gegeben durch  $(g + 1) \cdot r$ .

### 5.3.6.3. Elementareffekte höherer Ordnung

Es können auch Elementareffekte höherer Ordnung betrachtet werden [45] [97]. Diese beschreiben den Einfluss gleichzeitiger Parameteränderungen.

**Definition 5.3.9.** Die **Elementareffekte zweiter Ordnung** sind wie folgt definiert:

$$EE_{ij} = \left| SEE_{ij} - \frac{EE_i}{\Delta_j} - \frac{EE_j}{\delta_i} \right| \quad (5.18)$$

Dabei ist  $SEE_{ij}$  der Einfluss, der durch gleichzeitige Änderung der Parameter  $X_i$  und  $X_j$  entsteht:

$$SEE_{ij} = \frac{y(x + e_i \Delta_i + e_j \Delta_j) - y(x)}{\Delta_i \Delta_j} \quad (5.19)$$

Analog können Elementareffekte dritter und höherer Ordnung definiert werden.

Der Rechenaufwand für deren Berechnung steigt exponentiell mit der Ordnung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden auf Grund des stark erhöhten Rechenaufwands die Elementareffekte höherer Ordnung nicht verwendet.

### 5.4. Dynamische Sensitivitätsanalysemethoden

Die bisher vorgestellten Sensitivitätsanalysemethoden haben als Zielgröße einen skalaren Wert. Dies kann im Rahmen von Gebäudesimulationen beispielsweise der jährliche Heizwärmebedarf sein, oder die maximal über das Jahr abgerufene Leistung des Heizungssystems. Im Fall des jährlichen Heizwärmebedarfs hätte also ein Parameter keinen durch eine Sensitivitätsanalyse festzustellenden Einfluss, wenn er tagsüber zu höherem Heizwärmebedarf führt, nachts dafür zu niedrigerem, so dass sich dies in Summe ausgleicht. Im Fall der maximalen Leistung als Zielgröße würde ein Parameter, der in Zeiten niedriger Leistung zu einer Erhöhung führt, aber das Maximum nicht überschreitet, als nicht einflussreich identifiziert werden. Eine Kombination der beiden Sensitivitätsanalysezielgrößen würde also dazu führen, dass beide Parameter bei Verwendung der jeweils anderen Zielgröße durchaus einen Einfluss haben.

Die zugrundeliegende Problematik ist der zeitliche Verlauf der aus der Gebäudesimulation gewonnenen Ergebnisse, der bei skalaren Zielgrößen nicht berücksichtigt werden kann. Die Simulationsergebnisse sind meistens Zeitreihen über die 8760 Stunden eines Jahres. Diese Zeitreihe kann für Sensitivitätsanalysen daher als vektorielle Zielgröße oder auch als Funktion der Zeit interpretiert werden. Im folgenden Abschnitt werden daher die Möglichkeiten zur Berechnung von Sensitivitäten bei Zeitreihen als Zielgrößen vorgestellt.

Die erste Methode in Abschnitt 5.4.1 ist die sequentielle Sensitivitätsanalyse, bei der die Sensitivitätsindizes für jeden Zeitpunkt berechnet werden und entsprechend auch als Zeitreihen dargestellt werden. Als zweite Methode wird in Abschnitt 5.4.2 ein Verfahren mittels funktionaler Transformation vorgestellt, welches die Simulationsergebnisse durch Linearkombination fest vorgegebener oder an die Daten angepasster Funktionen ausdrückt und die Sensitivitätsindizes für die zu diesen Funktionen gehörenden Koeffizienten der Linearkombination berechnet.

Neben der Zielgröße können aber auch die zu untersuchenden Parameter zeitlich veränderlich sein. Bei den bisher vorgestellten Verfahren wird angenommen, dass ein Parameter sich nicht während der Simulationszeit verändert. Aber eine Vielzahl von Gebäudesimulationsparametern sind über Zeitpläne abgebildet, d.h. der Parameter nimmt je nach Zeitpunkt in der Simulation unterschiedliche Werte an. Dies kann etwa die sich ändernde Luftwechselrate bei einer durch den Nutzer initiierten Fensterlüftung sein.

Daher wird in Abschnitt 5.4.3 das ursprünglich aus der Biologie stammendes impulsparametrische Sensitivitätsanalyseverfahren [206] vorgestellt und auf den Anwendungsfall von

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Quartiersenergiesimulationen übertragen. Dies ermöglicht, die Auswirkung der Zeitpunkte von Parameteränderungen zu berechnen.

### 5.4.1. Sequentielle Sensitivitätsanalysemethoden

Bei der sequentiellen Sensitivitätsanalyse ist die Zielfunktion der Untersuchung eine Zeitreihe. Die Sensitivitätsindizes werden für jeden Zeitpunkt der Zeitreihe einzeln berechnet. Bei der Auswertung der Sensitivitäten müssen entsprechend alle Zeitpunkte nacheinander betrachtet werden, um den Einfluss eines Parameters zu den verschiedenen Zeitpunkten ermitteln zu können. Dieses Verfahren ist in der Auswertung dementsprechend aufwändig, eine grafische Darstellung der Sensitivitäten als Kurven erleichtert die Auswertung erheblich. So können saisonale Schwankungen der Parametereinflüsse grafisch leicht erkannt werden. Bei kurzen, d.h. tages- oder stundenweisen Schwankungen der Ergebniszeitreihe, muss die grafische Auswertung sehr sorgfältig und für kurze Darstellungsintervalle erfolgen, damit keine Ausschläge übersehen werden.

Die folgende Definition für den Ablauf einer sequentiellen Sensitivitätsanalyse orientiert sich an der Beschreibung in [167, S. 300].

**Definition 5.4.1.** Eine **sequentielle Sensitivitätsanalyse** besteht aus den folgenden Schritten:

1. Festlegung der Zielfunktion
2. Festlegung der  $p$  zu untersuchenden Parametern und deren Verteilung
3. Erzeugung von  $N$  Eingabedatenmengen für die  $p$  Parameter mittels einer geeigneten Samplingstrategie
4.  $N$  Simulationen mit den  $p$  variierten Parametern laufen lassen, Ergebnisse als Zeitreihe  $y_i(t), 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T$  speichern
5. Alle Ergebnisse in Ergebnismatrix  $Y$  zusammenfassen, so dass

$$Y = \begin{pmatrix} y_1(1) & \dots & y_1(t) & \dots & y_1(T) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_i(1) & \dots & y_i(t) & \dots & y_i(T) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_N(1) & \dots & y_N(t) & \dots & y_N(T) \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Jede Zeile von  $Y$  entspricht der Ergebniszeitreihe einer Simulation. Jede Spalte enthält den Zielgrößenwert für eine Zeit zu allen  $N$  unterschiedlichen Eingabedaten.

6. Durchführung der Sensitivitätsanalyse für jede Spalte von  $Y$ . Das Ergebnis ist ein Sensitivitätsvektor

$$S = \begin{pmatrix} s(1) & \dots & s(t) & \dots & s(T) \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

7. Ergebnisdarstellung der Sensitivitäten über die Zeit

Bei mehreren Zielfunktionen erfolgt die Berechnung separat für jede Zielgröße. Das Vorgehen kann mit beliebigen globalen Sensitivitätsmethoden verwendet werden. Lokale Sensitivitätsanalysemethoden, die nur das Verhalten an einem Punkt des Parameterraums ermitteln, sind außen vor. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die sequentielle Sensitivitätsanalyse mithilfe der Elementareffekt-Methode verwendet. Dabei entsprechen die Einträge des Sensitivitätsvektors  $S$  dem Wert der Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  zum jeweiligen Zeitpunkt.

Ein Vorteil bei der Auswertung der Sensitivitätsindizes als Zeitreihe ist, dass ein Vergleich beispielsweise mit den der Simulation zugrundeliegenden Klimadaten erfolgen kann und somit auf grafische Art und Weise oder mittels der Berechnung von Korrelationskoeffizienten zwischen den Sensitivitätsindizes und den Klimadaten zum gleichen Zeitpunkt Zusammenhänge ermittelt werden können.

Wegen der sich zum Teil sehr stark und abrupt verändernden Ergebnisdaten in Gebäudesimulationen, wie etwa ein plötzlich auf Null sinkender Heizenergiebedarf bei einer Heizungsabschaltung, kann die Verwendung von Glättungsmethoden sinnvoll sein. Diese können entweder genutzt werden, um die Ergebnisse bzw. Zielgrößen zu glätten und dann für die geglättete Zielgröße die Sensitivitäten zu berechnen. Alternativ werden die stark schwankenden Sensitivitätsindizes, die von den Originaldaten ausgehend berechnet wurden, geglättet. Die Verwendung von Glättungsmethoden ist immer auch abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung. Wenn die täglichen Schwankungen im Fokus der Untersuchung liegen, so sind entsprechende Lastspitzen und -einbrüche von größerem Interesse als wenn saisonale Auswirkungen der Änderung von Parametern untersucht werden sollen.

Es hat sich gezeigt, dass vor allem gleitende Mittelwerte gut zur Glättung geeignet sind, da hier die dynamischen Effekte der Gebäudesimulation besser erhalten bleiben als bei diskreter, also z.B. tages- oder monatsweiser Mittelwertbildung. [260] [167]

**Definition 5.4.2.** Sei  $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ . Für  $m \in \mathbb{N}$  mit  $k = 2m + 1 < n$  und  $i \in \mathbb{N}$  so, dass  $m < i \leq n - m$ , ist das **zentrierte gleitende Mittel**  $\hat{x}_i^k$  über  $k$  Werte von  $x_i$  gegeben durch:

$$\hat{x}_i^k = \frac{1}{k} \sum_{j=i-m}^{i+m} x_j \quad (5.22)$$

Für  $i \leq m$  und  $i > n - m$ , also für den Anfang und das Ende der Datenreihe, wird der Mittelwert nur über die Werte  $x_1, \dots, x_{i+m}$  bzw.  $x_{i-m}, \dots, x_n$  ermittelt.

Das gleitende Mittel heißt zentriert, da symmetrisch  $m$  Werte vor und nach  $x_i$  sowie  $x_i$  selbst zur Mittelwertbildung herangezogen werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird unter gleitenden Mittelwerten immer ein zentriertes gleitendes Mittel verstanden.

Die Länge  $k$  des Mittelungsintervalls muss hierbei an die Fragestellung angepasst werden, dies wird in Abschnitt 11.2.1 genauer dargelegt. Hierbei spielen sowohl die verwendeten Klimadaten als auch die Regelungen im Gebäudemodell eine Rolle. Auch berücksichtigt werden müssen die durch die Glättung auftretenden Fehler. Zur Berechnung des Fehlers sind im Folgenden die Definitionen für MSE und RMSE angegeben.



## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

**Definition 5.4.3.** Seien  $r$  und  $s$  Zeitreihen über  $\{1, \dots, T\}$ . Dann ist der **mittlere quadratische Fehler MSE** definiert als

$$MSE(r, s) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (r(t) - s(t))^2 \quad (5.23)$$

**Definition 5.4.4.** Seien  $r$  und  $s$  Zeitreihen über  $\{1, \dots, T\}$ . Dann ist die **Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers RMSE** definiert als

$$RMSE(r, s) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (r(t) - s(t))^2} \quad (5.24)$$

Für die Untersuchung des Fehlers bei der gleitenden Mittelwertbildung kann dann  $MSE(x, \hat{x}^k)$  bzw.  $RMSE(x, \hat{x}^k)$  dienen.

Gegebenenfalls ist auch ein gewichteter gleitender Mittelwert, bei dem bei Nutzung zeitlich konstanter Gewichte die unterschiedlichen Zeiten der Ergebnisse gewichtet werden können, von Interesse. Damit können z.B. Fragen, bei denen der Fokus auf dem Verhalten an Wochenenden oder während der Hauptnutzungszeit der Gebäude liegt oder mit besonderem Fokus auf sommerlichen Betrachtungen, untersucht werden. Dieser wird wie folgt definiert:

**Definition 5.4.5.** Sei  $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ . Für  $m \in \mathbb{N}$ ,  $k = 2m + 1 < n$ ,  $i \in \mathbb{N}$  so, dass  $m < i \leq n - m$ , und  $\beta \in \mathbb{R}^n$  ist das mit  $\beta$  **gewichtete zentrierte gleitende Mittel mit konstanten Gewichten**  $\hat{x}_i^{k,\beta}$  über  $k$  Werte von  $x_i$  gegeben durch:

$$\hat{x}_i^{k,\beta} = \frac{1}{k \sum_{j=i-m}^{i+m} \beta_j} \sum_{j=i-m}^{i+m} \beta_j x_j \quad (5.25)$$

Für  $i \leq m$  und  $i > n - m$ , also für den Anfang und das Ende der Datenreihe, wird der Mittelwert nur über die Werte  $x_1, \dots, x_{i+m}$  bzw.  $x_{i-m}, \dots, x_n$  ermittelt.

Hierbei sind die Gewichte also im Vorhinein konstant für alle Zeitschritte gewählt. Wenn bei der gleitenden Mittelwertbildung jedoch die für das jeweilige Mittel verwendeten Ergebnisdaten zum relativen Zeitpunkt gewichtet werden sollen, so kann das folgende gleitende Mittel mit sich bewegenden Gewichten definiert werden.

**Definition 5.4.6.** Sei  $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ . Für  $m \in \mathbb{N}$ ,  $k = 2m + 1 < n$ ,  $i \in \mathbb{N}$  so, dass  $m < i \leq n - m$ , und  $\beta \in \mathbb{R}^k$  mit  $\sum_{j=0}^k \beta_j = 1$ . Dann ist das mit  $\beta$  **gewichtete zentrierte gleitende Mittel mit bewegenden Gewichten**  $\bar{x}_i^{k,\beta}$  über  $k$  Werte von  $x_i$  gegeben durch:

$$\bar{x}_i^{k,\beta} = \frac{1}{k} \sum_{j=0}^{k-1} \beta_j x_{j+i-m} \quad (5.26)$$

Mittels der bewegenden Gewichte können also die weiter zurück oder in der Zukunft liegenden Werte stärker oder schwächer berücksichtigt werden als Werte, die nahe am zentralen Element  $x_i$  liegen.

### 5.4.2. Funktionale Transformation

Wenn Simulationsergebnisse über die Stunden eines Jahres als Zeitreihe oder Funktion der Zeit aufgefasst werden, so ist man meistens nicht an dem Einfluss eines Parameters zur einer bestimmten Zeit interessiert. Vielmehr soll der Einfluss eines Parameters auf den gesamten Verlauf der Zeitreihe untersucht werden [43, S. 1468f]. Darunter fällt z.B., welcher Parameter für eine generelle Senkung des Heizenergiebedarfs verantwortlich ist oder welcher Parameter die Leistungsspitzen abmildert. Dies kann mittels sequentieller Sensitivitätsanalyse untersucht werden, ist jedoch relativ aufwändig, da jeder Zeitpunkt betrachtet werden muss.

Um dies zu vereinfachen, kann die Zielfunktion vom zeitbasierten Koordinatensystem mittels einer sogenannten Funktionsbasis auf ein anderes Koordinatensystem transformiert werden, welches die durch die Parameteränderungen ausgelösten Variationen besser beschreibt. Die Sensitivitätsindizes können dann in diesen Koordinaten untersucht werden [43, S. 1470f]. Die auf Quartierssimulationen angewandte Methodik hierzu wurde in Verbindung mit einer beispielhaften Sensitivitätsanalyse bereits in [158] dargestellt und vorveröffentlicht.

Für die funktionale Transformation kann die Zeitreihe zuerst normiert werden, d.h. für jede Zeitreihe wird der Mittelwert über alle Zeitreihen subtrahiert. Die Funktionsbasis mit ihren Koeffizienten beschreibt dann die Abweichungen der jeweiligen Zeitreihe von der gemittelten Zeitreihe.

Für eine funktionale Transformation ist die Wahl einer geeigneten Funktionsbasis an die zu untersuchende Zielgröße von wesentlicher Bedeutung, da hiervon die Interpretierbarkeit der Sensitivitäten abhängt. Prinzipiell muss zwischen fest vorgegebenen Funktionsbasen und an die Daten angepassten Funktionsbasen unterschieden werden. Zu den festen Funktionsbasen gehört beispielsweise die Fourier-Basis, welche eine Kombination aus Sinus- und Cosinus-Kurven darstellt und mittels derer die in der Zielfunktion auftretenden Frequenzen untersucht werden können. Ebenfalls zählen Funktionsbasen, welche Wavelets oder Legendre-Polynomen verwenden, dazu.

Vorteile fester Funktionsbasen sind, dass hierzu vielfach Untersuchungen zu ihren Eigenschaften durchgeführt wurden und Unterschiede in den Daten, die transformiert werden, sich nur in den Koeffizienten der Transformation widerspiegeln. Nachteile sind, dass die feste Basis für das zu untersuchende Problem geeignet sein muss und das bestimmte, in den Daten auftretende Effekte, ggf. über mehrere Basisfunktionen verteilt repräsentiert werden. [43, S. 1470]

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Bei den an die Daten angepassten Basen wird mittels bestimmter Algorithmen wie Hauptkomponentenzerlegung oder „partial least squares“ (PLS) eine Funktionsbasis erzeugt, die die Eigenschaften der zu untersuchenden Zielgröße möglichst gut abbildet.

Der Vorteil hierbei ist, dass die in den Daten auftretenden Effekte meist durch sehr wenige Basisfunktionen beschrieben werden und auch physikalisch interpretierbar sind. Nachteilig ist, dass bei jedem neu zu untersuchenden Datensatz andere Basisfunktionen ermittelt werden können, die zuerst analysiert werden müssen, bevor der konkrete Effekt beschrieben werden kann. [43, S. 1472]

Im Folgenden sind der Vollständigkeit halber die im weiteren Verlauf verwendeten mathematische Definition und Begriffe aufgeführt, die auch in jedem grundlegenden Buch über lineare Algebra zu finden sind.

**Definition 5.4.7.** Sei  $V$  eine Menge,  $K$  ein Körper,  $\oplus : V \times V \rightarrow V$  eine Verknüpfung zur Vektoraddition und  $\otimes : K \times V \rightarrow V$  eine Verknüpfung zur Skalarmultiplikation. Dann heißt  $(V, \oplus, \otimes)$  **Vektorraum** über dem Körper  $K$  (oder  $K$ -Vektorraum), wenn  $\oplus$  assoziativ und kommutativ ist und ein neutrales und inverses Element besitzt und  $\otimes$  assoziativ und distributiv ist und das neutrale Element  $1 \in K$  besitzt.

**Definition 5.4.8.** Für eine nichtleere Menge  $M$ , einen Vektorraum  $V$  über einem Körper  $K$  sei  $V^M = \{f : M \rightarrow V \mid f \text{ Funktion}\}$  die Menge aller Funktionen von  $M$  nach  $V$ . Dann wird die Menge  $V^M$  mittels der Addition  $(f + g) : M \rightarrow V, x \mapsto f(x) + g(x)$  und der Skalarmultiplikation  $\lambda f : M \rightarrow V, x \mapsto \lambda f(x)$  zu einem Vektorraum. Dieser wird auch als **linearer Funktionsraum** bezeichnet.

**Definition 5.4.9.** Eine **Basis** eines  $K$ -Vektorraums  $V$  ist eine Teilmenge  $B \subseteq V$ , so dass sich jedes Element  $x \in V$  als Linearkombination von Elementen aus  $B$  eindeutig darstellen lässt:

$$\forall x \in V \exists (b_i)_i \in B, (k_i)_i \in K : x = \sum_{b_i \in B} k_i b_i \quad (5.27)$$

Aufbauend auf diesen Definitionen kann nun der Begriff der funktionalen Transformation eingeführt werden.

**Definition 5.4.10.** Sei  $(\Phi_k)_k, k \in \mathbb{N}$  eine Basis des Vektorraums  $L^1(I, \mathcal{B}(I), \lambda)$  der integrierbaren Funktionen von  $I$  nach  $\mathbb{R}$ . Weiter sei  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  eine integrierbare Funktion vom Intervall  $I = [0, T]$  mit Werten in den reellen Zahlen, d.h.  $f \in L^1(I, \mathcal{B}(I), \lambda)$ . Dann ist eine **funktionale Transformation**  $FT$  von  $f$  gegeben durch eine unendliche Linearkombination der Basisfunktionen, so das gilt:

$$f(t) = FT_\infty(f)(t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \Phi_k(t) \quad (5.28)$$

Für  $K \in \mathbb{N}$  ist die **endliche funktionale Transformation**  $FT_K$  von  $f$  gegeben durch eine endliche Linearkombination der Basisfunktionen wie folgt:

$$FT_K(f)(t) = \sum_{k=1}^K c_k \Phi_k(t) \quad (5.29)$$

$K$  wird **Dimension** der funktionalen Transformation genannt.

Die Auswahl der Basis  $(\Phi_k)_k$  beeinflusst maßgeblich die für die geforderte Genauigkeit notwendige Dimension  $K$  der funktionalen Transformation. Je kleiner  $K$  ist und je besser die Basis die Eigenschaften der zu approximierenden Funktion abbildet, desto weniger Rechenaufwand ist für die funktionale Transformation nötig und desto eher können die Koeffizienten der funktionalen Transformation als Kennwerte zur Beschreibung der Daten und damit auch zur Ermittlung von Sensitivitäten verwendet werden. [213, S. 44]

Prinzipiell sind endliche funktionale Transformationen immer mit einem Informationsverlust verbunden. Dieser muss bei der Untersuchung mit berücksichtigt werden, um wichtige Einflüsse nicht zu übersehen. Dies kann beispielsweise durch Auswertung von  $MSE(f, FT(f))$  bzw.  $RMSE(f, FT(f))$  erfolgen.

Da die Ergebnisdaten aus Simulationen immer für diskrete Zeitpunkte ausgegeben werden, muss für die Umwandlung dieser diskreten Daten in eine Funktion ein passender Ansatz verwendet werden. Das Standardmodell hierfür ist, dass zu den diskreten Daten  $y = (y_1, \dots, y_n)$  eine Funktion  $x : [t_1, t_n] \rightarrow \mathbb{R}$  gesucht wird, so dass  $y_j = x(t_j) + \epsilon_j$ . In dem Standardmodell werden die Fehlerterme  $\epsilon_j$ , auch Residuen genannt, als normalverteilt mit Mittelwert 0 und konstanter Varianz  $\sigma^2$  angenommen. Die Varianz  $\sigma^2$  ergibt sich dabei aus den gemessenen Daten  $y$ . Dieses Standardmodell wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Umformung diskreter Daten in Funktionen verwendet.

Zur Bestimmung der Koeffizienten einer funktionalen Transformation lässt sich im einfachsten Fall ein Verfahren, welches die quadratische Abweichung minimiert, verwenden. Dies ist zulässig, wenn die Residuen der funktionalen Transformation unabhängig und identisch verteilt mit Mittelwert 0 und konstanter Varianz  $\sigma^2$  sind, wie im Standardmodell angenommen. Der Vektor  $c = (c_k)$  bestimmt sich dann mittels

$$c = (\Phi' \Phi)^{-1} \Phi' x \quad (5.30)$$

wobei  $\Phi$  die Matrix bestehend aus den Werten  $\phi_k(t)$  ist. [213, S. 59ff]

In den folgenden Abschnitten werden die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Basen für funktionale Transformationen eingeführt.

In Verbindung mit Sensitivitätsanalysen wird funktionale Transformation wie folgt verwendet: die Sensitivitätsindizes werden für die Koeffizienten  $c_k$  der funktionalen Transformation berechnet. Somit wird durch den Sensitivitätsindex der Einfluss eines Parameters auf den An-

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

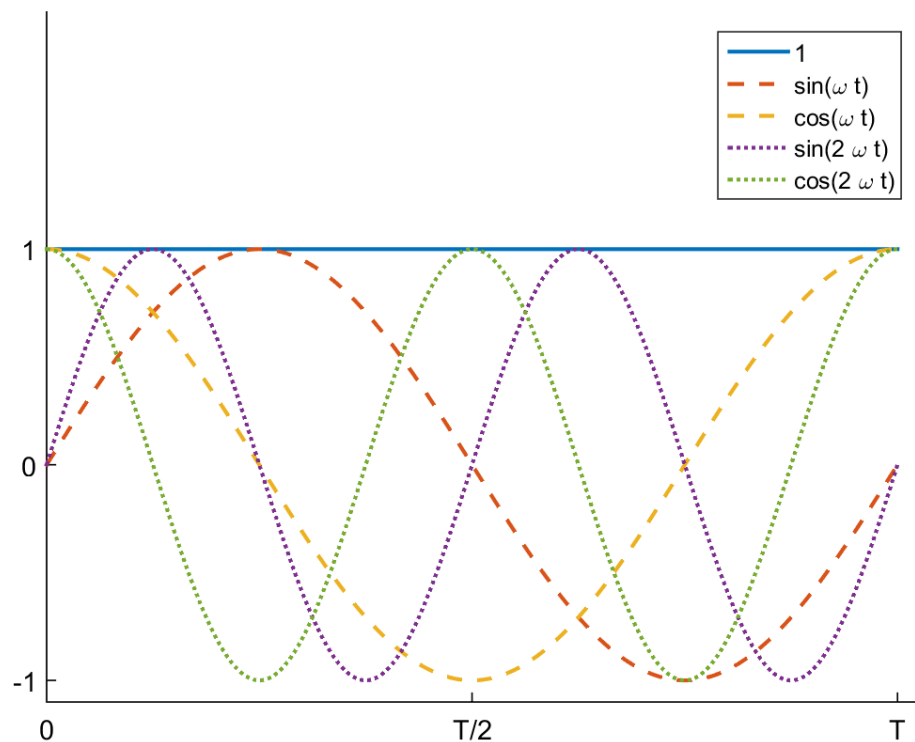


Abbildung 5.2.: Fourier-Basisfunktionen

teil der jeweiligen Basisfunktion widergespiegelt. Der durch die Basisfunktion repräsentierte Effekt muss also bekannt sein, um die Sensitivität analysieren zu können und damit eine Interpretation zu ermöglichen. Das Ziel dieses Vorgehens ist es, die Sensitivitäten nicht wie bei der sequentiellen Analyse für jeden Zeitschritt auszuwerten, sondern für die Basisfunktionen und somit eine Dimensionsreduzierung des Sensitivitätsindex zu erreichen.

### 5.4.2.1. Fourier-Basis

**Definition 5.4.11.** Für  $t \in I, \omega = \frac{2\pi}{T}$  wird die durch

$$\Phi_k(t) = \begin{cases} 1 & k = 1 \\ \sin(\frac{k}{2}\omega t) & \text{falls } k \text{ gerade} \\ \cos(\frac{k-1}{2}\omega t) & k > 3, k \text{ ungerade} \end{cases} \quad (5.31)$$

beschriebene Funktionenfolge **Fourier-Basis** genannt.

**Definition 5.4.12.** Eine funktionale Transformation, in der  $(\Phi_k)_k$  die Fourier-Basis ist, wird **Fourier-Transformation** genannt.

Eine Fourier-Transformation ergibt also eine Kombination aus Sinus- und Cosinus-Funktionen mit abnehmender Periodenlänge der Schwingungen. Sie ist daher insbesondere für die Ermittlung der Frequenzen und den jeweils auftretenden Amplituden in den zugrundeliegenden Daten geeignet.

FFT ist eine sehr effiziente Methode zur Bestimmung der Koeffizienten einer Fourier-Transformation. Fourier-Transformationen sind insbesondere nützlich, wenn Daten ohne starke lokale Schwankungen auftreten und die Krümmung von  $x$  überall die gleiche Größenordnung besitzt. Die der Fourier-Basis zugrundeliegende Periodizität sollte sich in den Daten widerspiegeln. [213, S. 45f]

### 5.4.2.2. Hauptkomponentenzerlegung

Die Idee bei der Hauptkomponentenzerlegung, auf Englisch Principal Component Analysis (PCA) genannt, ist die zu transformierende Funktion durch Basisfunktionen, welche aus den vorhandenen Daten ermittelt wurden, zu approximieren. Die Ermittlung der Basisfunktionen erfolgt derart, dass sie orthogonal zueinander sind, d.h.  $\int \Phi_k \Phi_l = 0$  für  $k \neq l$ , und dass die erste Funktion  $\Phi_1$  den größten Anteil an der Varianz der Daten hat, die darauf folgenden Basisfunktionen abnehmende Anteile.

Zur Bestimmung solch einer Basis können diverse Algorithmen verwendet werden. Hier wird der in [213, S. 148] beschriebene Algorithmus für multivariate Daten verwendet.

Der Algorithmus erzeugt eine lineare Kombination

$$f_i = \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij}, i = 1, \dots, N \quad (5.32)$$

der Variablenwerte. Dabei ist  $\beta_j$  ein Gewichtungskoeffizient,  $x_{ij}$  der Variablenwert zur Zeit  $j$  für die Ergebniszeitreihe  $i$ . Die Gewichte werden so gewählt, dass bestimmte Variationen der Daten hervorgehoben werden. Hierfür wird ein iteratives Vorgehen gewählt:

**Definition 5.4.13.** Bestimmung der Hauptkomponenten einer  $N \times p$ -Matrix  $x = (x_{ij})$ :

1. Suche den Gewichtungsvektor  $\xi_1 = (\xi_{11}, \dots, \xi_{p1})'$ , für den die Werte der linearen Kombination  $f_{i1} = \sum_j \xi_{j1} x_{ij}$  das mittlere Quadrat  $N^{-1} \sum_i f_{i1}^2$  unter der Bedingung  $\sum_j \xi_{j1}^2 = \|\xi_1\|^2 = 1$  maximieren.
2. Im  $m$ -ten Schritt ( $m \leq p$ ) wird ein neuer Gewichtungsvektor  $\xi_m$  mit Komponenten  $\xi_{jm}$  und neue Werte  $f_{im} = \xi_m' x_i$  bestimmt, so dass die Werte  $f_{im}$  maximale mittlere Quadrate unter den Bedingungen  $\|\xi_m\|^2 = 1$  und  $\sum_j \xi_{jk} \xi_{jm} = 0, k < m$  haben.

Dann werden die Werte  $f_{im}, i = 1, \dots, N, m = 1, \dots, p$  die **Hauptkomponentengewichtungen** oder **Principal Component Scores** genannt,  $\xi_m, m = 1, \dots, p$  werden **Hauptkomponente** oder **Principal Component** genannt.

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

In [131] wird dies so beschrieben, dass  $p$  gemessene Größen  $x_1, \dots, x_p$  durch  $m$  abgeleitete Größen ersetzt werden, wobei  $m$  wesentlich kleiner als  $p$  ist und der Informationsverlust minimiert wird. Das bedeutet, dass jede Hauptkomponente  $z_k$  die größtmögliche Varianz unter allen linearen Kombinationen von  $x_1, \dots, x_p$  hat unter der Bedingung, dass  $z_k$  unkorreliert zu  $z_1, \dots, z_{k-1}$  ist für  $2 \leq k \leq p$ .

Die Methode der Hauptkomponentenzerlegung wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts durch Karl Pearson entwickelt [205] und in einer Vielzahl von Untersuchungen, anfangs vor allem mit biologischem und medizinischem Fokus, eingesetzt. Aber sie findet auch Anwendung für die Analyse von Pflanzenwachstumsmodellen ([147], [148]) und in vielen anderen Gebieten.

In [172] wird über das hier beschriebene Vorgehen hinaus eine Methodik vorgestellt, die mittels Kovarianzgewichtung für eine erhöhte Robustheit der Hauptkomponentenzerlegung gegenüber Ausreißern sorgt. Die Notwendigkeit der Anwendung dieser Methodik für die Untersuchung von Quartierssimulationsergebnissen wäre zukünftig zu untersuchen.

Zur Verbindung der funktionalen Transformation durch Hauptkomponentenanalyse mit Sensitivitätsanalysemethoden werden, wie oben beschrieben, die Sensitivitäten für die Principal Component Scores berechnet. Zur möglichen Interpretation und Ergebnisdarstellung siehe Abschnitt 5.5.

### 5.4.2.3. Weitere Basen

Es gibt eine Vielzahl weiterer Basisfunktionen, die für funktionale Transformationen eingesetzt werden können. So könnte zukünftig die Eignung von Legendre Polynome [43, S. 1469f], Wavelets ([213, S. 53f]) oder B-splines ([213, S. 49ff]) als feste Funktionsbasen für die Ergebnisdaten von Quartierssimulationen untersucht werden. Für adaptive Funktionsbasen gibt es neben der Hauptkomponentenzerlegung beispielsweise auch Verfahren, die Funktionsbasen mittels Partial Least-Square Methoden ermitteln [43, S. 1471f].

### 5.4.3. Sensitivitätsanalyse bei dynamischen Parametern

Die bisher behandelten Sensitivitätsanalysemethoden sind in der Lage, den Einfluss von Parametern sowohl auf skalare als auch vektorielle Zielgrößen zu untersuchen. Allerdings ist bei diesen Methoden der Änderungszeitpunkt für einen Parameter immer gleich dem Simulationsstartzeitpunkt. D.h., wenn die Simulation einmal läuft ändert sich ein mittels Sensitivitätsanalyse untersuchter Parameter nicht mehr. Nun gibt es im Gebäudesimulationsbereich aber viele zeitabhängige, d.h. dynamische Parameter, die zu unterschiedlichen Simulationszeiten unterschiedliche Werte annehmen (vgl. Abschnitt 10.4), und daher auch als eine Art Ereignis oder Impuls mit einer Startzeit, Dauer, Wert der Parameteränderung und ggf. Wiederholungsrate aufgefasst werden können. Klassischerweise wird dies über vorgegebene

Zeitreihen, auch Schedules genannt, erreicht, in denen festgelegt ist, zu welcher Simulationszeit ein Parameter welchen Wert annehmen soll. Die Zeitpunkte für Parameteränderungen sind dabei fix und werden meist aus Erfahrungswerten der Modellersteller festgelegt.

**Beispiel 5.4.14.** *Folgende Einflussgrößen werden beispielsweise über Schedules in Gebäudemodellen abgebildet:*

- *Änderung der Luftwechselrate durch manuelle Fensterlüftung zu bestimmten Zeiten*
- *Nachtabenkung der Raumsolltemperatur in den Nachtstunden*
- *Zapfmenge und -temperatur für Trinkwarmwasser*
- *Heizungsabschaltung im Sommer*

Aufgrund der fixen Zeitpunkte der Parameteränderung stellt sich die Frage, inwiefern diese Zeitpunkte einen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation haben, und wie sich solch ein Einfluss gegebenenfalls qualitativ oder quantitativ bewerten lässt.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wird auf die Idee der für die Anwendung in der Biologie und Chemie entwickelten Methode der sogenannten impulsparametrischen Sensitivitätsanalyse, kurz iPSA, welche in [208], [207] und [206] detailliert vorgestellt wird, zurückgegriffen. Diese Methode ist für durch gewöhnliche Differentialgleichungssysteme gegebene dynamische Systeme definiert. Solche dynamischen Systeme können beispielsweise biologisch motivierte Modelle zur Signalübertragung im Nervensystem oder für genetische Veränderungen sein, oder Modelle aus der Chemie zur Abbildung von Verbrennungsprozessen oder allgemeiner chemischen Reaktionen. Bei solchen Systemen spielt der Zeitpunkt, wann beispielsweise die Konzentration eines Enzyms ansteigt oder eine chemische Substanz hinzugefügt wird, eine wesentliche Rolle. Daher wird ein Sensitivitätsindex definiert, der nicht nur vom Zeitpunkt der Betrachtung, wie bei der sequentiellen Auswertung in Abschnitt 5.4.1 dargestellt, abhängt, sondern auch vom Zeitpunkt der Änderung eines Parameters.

In den folgenden Abschnitten wird die iPSA-Methode für explizit gegebene Probleme in Form gewöhnlicher Differentialgleichungen beschrieben; Details sind in den oben genannten Veröffentlichungen nachzulesen. In Kapitel 11.4 werden die für die Untersuchung von Quartiersimulationen notwendigen Anpassungen der iPSA-Methode beschrieben. Diese sind notwendig, da zum einen thermische Gebäudemodelle im Allgemeinen nicht durch ein analytisch lösbares System gewöhnlicher Differentialgleichungen beschrieben werden können (vgl. Kapitel 3). Daher muss die Definition des iPSA-Sensitivitätsindex auf modellbasierte Probleme übertragen werden. Zum anderen wird die iPSA-Methode in Verbindung mit der Elementareffekt-Methode eingesetzt. Die für Quartiersimulationen mittels der angepassten iPSA-Methode zu untersuchenden Ereignisparameter werden in Kapitel 10 beschrieben.

Die Idee hinter iPSA ist, dass für ein gewöhnliche Differentialgleichung der Form  $\frac{d}{dt}x(t, p) = f(x, p)$ ,  $x(t_0, p) = x_0$  Parameteränderungen  $\delta p$  zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Auswirkungen auf die Zustandsvariablen  $x$  haben, d.h. dass die Sensitivität eines Parameters vom Zeitpunkt der Änderung des Parameters und vom Zeitpunkt der Betrachtung abhängt. Dabei kann eine Änderung eines Parameters auch nur ein infinitesimaler Impuls sein.



## 5. Sensitivitätsanalysemethoden

Daher wird in [206] ein Verfahren zur Ermittlung von Kenngrößen  $iS_{i,j}(t, \tau)$  beschrieben, welche den Einfluss eines Impulses in Parameter  $p_j$  zum Zeitpunkt  $\tau$  auf die Ergebnisgröße  $x_i$  zum Beobachtungszeitpunkt  $t \geq \tau$  beschreiben. Die Herleitung der Definition für  $iS$  kann dort nachgelesen werden.

**Definition 5.4.15.** Der **Impuls-Sensitivitäts-Koeffizient**  $iS_{i,j}(t, \tau)$ , der die durch einen Parameterimpuls für Parameter  $j$  zur Zeit  $\tau$  ausgelöste Änderung der  $i$ -ten Zustandsgröße zur Zeit  $t > \tau$  beschreibt, ist durch

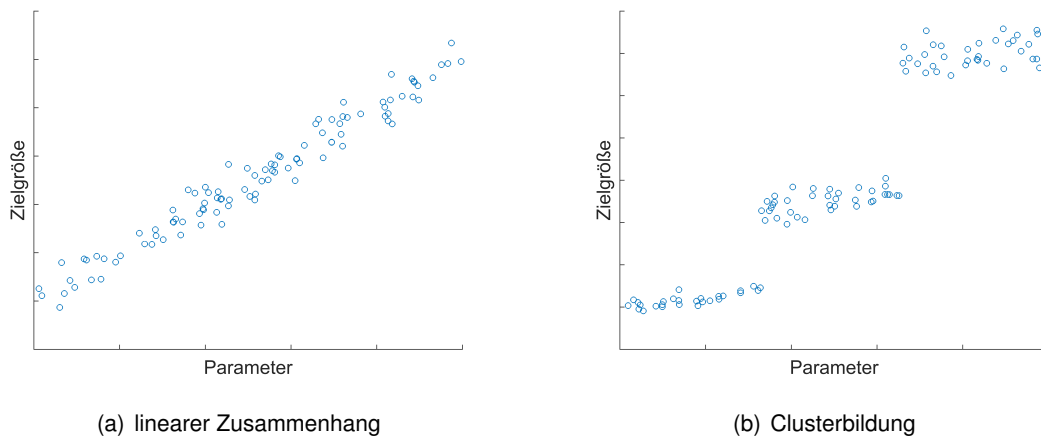
$$iS_{i,j}(t, \tau) = S_{i,[1...n]}^x(t, \tau) \frac{\partial f}{\partial p_j}(\tau) \quad (5.33)$$

gegeben. Dabei ist  $S^x$  die Greensche Funktionsmatrix, welche durch  $S_{i,j}^x(t, \tau) = \frac{\partial x_i(t)}{\partial x_j(\tau)}$  definiert ist und die Sensitivität der Zustandsgröße  $x_i$  zur Zeit  $t$  gegenüber einer Änderung der Zustandsgröße  $x_j$  zur Zeit  $\tau < t$  darstellt. [206]

Es existieren auch andere Ansätze zur Untersuchung dynamischer Parameter. So wird in [226, S. 83, Gleichung 5.5] eine Möglichkeit zur Berechnung lokaler Sensitivitäten zeitabhängiger Systeme erwähnt. Hierbei werden Parameteränderungen zu einem Zeitpunkt  $t_1 > 0$  durchgeführt und deren Auswirkungen auf die lokalen Sensitivitäten zu einem Zeitpunkt  $t_2 > t_1$  bestimmt. In [6] werden dynamische Parameter als stochastische Prozesse aufgefasst und hierfür eine Methode zur Berechnung von varianzbasierten Sensitivitätsindizes vorgestellt. Diese Verfahren werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht verwendet, da die lokalen Sensitivitäten nicht ausreichend für eine allgemeine Einflussbewertung sind und die varianzbasierten Verfahren zu rechenaufwändig sind.

### 5.5. Darstellung von Sensitivitäten

Zur Erkennung von Zusammenhängen zwischen den Werten eines Parameters und den zugehörigen Modellergebnissen, also insbesondere den Ergebnissen von Monte-Carlo-Simulationen, kann auf grafische Verfahren wie Scatterplots zurückgegriffen werden. Dabei werden die Parameterwerte auf der  $x$ -Achse, die Ergebniswerte auf der  $y$ -Achse aufgetragen. Die sich hier ergebenden Punktwolken geben durch ihre Form Aufschluss auf die Art des Zusammenhangs. Grafisch lassen sich so vor allem lineare Zusammenhänge (Abbildung 5.3(a)) oder die Bildung von Clustern (Abbildung 5.3(b)), also unterschiedlichen Parameterwerten, die zu ähnlichen Ergebnissen führen, erkennen. Die Formalisierung dieses Verfahrens ist die Berechnung von Korrelationskoeffizienten. Nicht-lineare Zusammenhänge und auch Effekte, die auf der Interaktion mehrerer Parameter basieren, lassen sich mittels Scatterplots nicht erkennen. Dieses Verfahren lässt sich praktikabel nur für aggregierte Zielgrößen verwenden, für Zeitreihen müsste zu jedem Zeitpunkt der Untersuchung ein entsprechendes Scatterplotdiagramm erzeugt und ausgewertet werden.



**Abbildung 5.3.: Beispielhafte Scatterplots, die den Zusammenhang zwischen Parameter und Ergebnis darstellen**

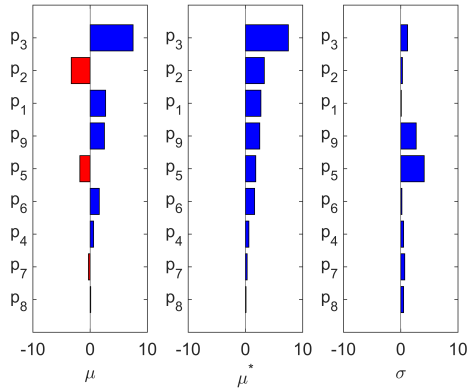
Für mit den diversen Sensitivitätsanalysemethoden berechnete Sensitivitätsindizes können unterschiedliche Darstellungsformen gewählt werden. Eine häufig gewählte Darstellungsform bei aggregierten Zielgrößen sind sogenannte Tornadoplots. Diese verwenden Balken für die Repräsentation des Sensitivitätsindex und ordnen die untersuchten Parameter vom einflussreichsten oben zum am wenigsten einflussreichen Parameter unten an. Dies ist für Zeitreihenzielgrößen aus dem gleichen Grund wie für Scatterplots nicht praktikabel. Grafisch ist hiermit sehr einfach ein Vergleich des relativen Einflusses unterschiedlicher Parameter erkennbar. Bei Sensitivitätsindizes, die das Vorzeichen des Einflusses mitführen sind positive und negative Einflüsse gut erkennbar. Bei der Verwendung der Elementareffekt-Methode ist es sinnvoll, alle drei berechneten Größen  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  als jeweils eigenen Tornadoplots darzustellen [121, S. 8, Figure 4] (Abbildung 5.4(a)), alternativ kombiniert in einem Tornadoplots mit Balken in unterschiedlichen Farben für die drei Indizes.

Ein Spiderplot stellt einen Sensitivitätsindex für jeden Parameter durch den radialen Abstand vom Nullpunkt aus dar (Abbildung 5.4(b)). Diese Darstellung wird bei vielen Parametern unübersichtlich, bei wenigen Parametern ist sie aber sehr hilfreich, vor allem bei varianzbasierten Sensitivitätsindizes [255, S. 414]. Eine Sortierung nach dem Sensitivitätsindexwert hilft bei der grafischen Interpretation. Mit Spiderplots sind die Vorzeichen eines Einflusses nicht darstellbar.

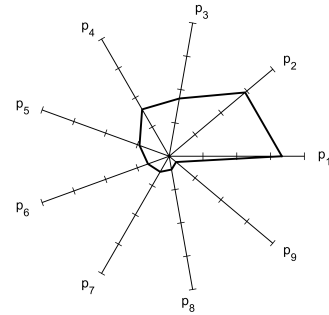
Bei sogenannten Parallel Coordinate Plots (PCP) werden die Achsen der Dimensionen eines Datenpunktes parallel zueinander angeordnet (Abbildung 5.4(c)). Ein Datenpunkt entspricht dann also einer Linie, die über die gesamte Breite des PCP verläuft. Dies kann beispielsweise bei Monte-Carlo-Berechnungen zur Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit von den Parameterwerten genutzt werden [175]. Dabei heben sich dann besonders bei vielen Parametervariationen häufig auftretende Ergebnisse grafisch hervor. Auch kann ein PCP genutzt werden, um die Sensitivitätsindizes von Parametern bzgl. unterschiedlicher aggregierter Zielgrößen darzustellen.

Für die Darstellung der mittels der Elementareffekt Methode berechneten Sensitivitätsindizes

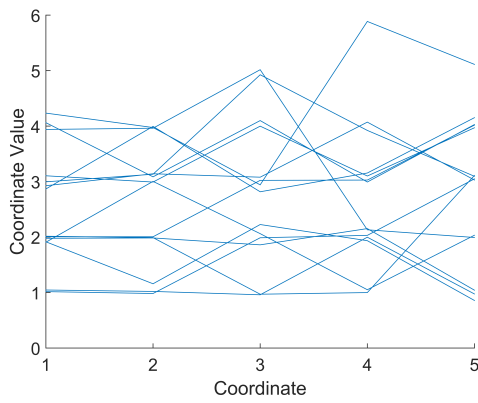
## 5. Sensitivitätsanalysemethoden



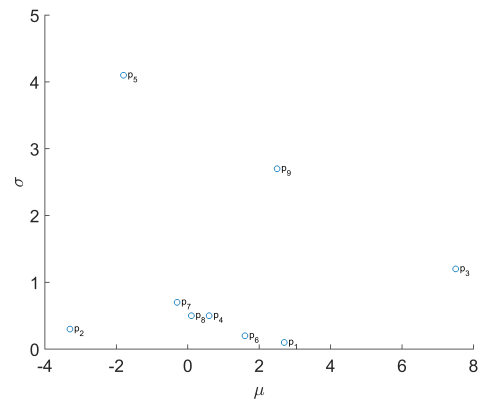
(a) Tornado plot für Elementareffekt-Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$



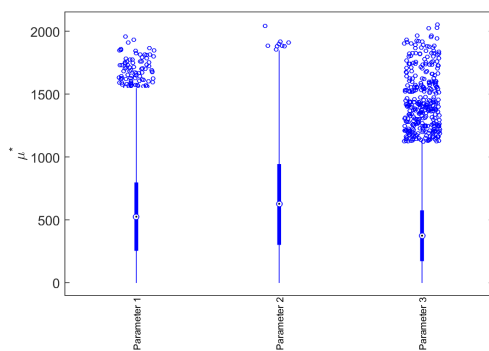
(b) Spiderplot



(c) Parallel Coordinate Plot



(d) Morris-Plot



(e) Boxplot

Abbildung 5.4.: Darstellungsvarianten für Sensitivitäten

## 5.5. Darstellung von Sensitivitäten

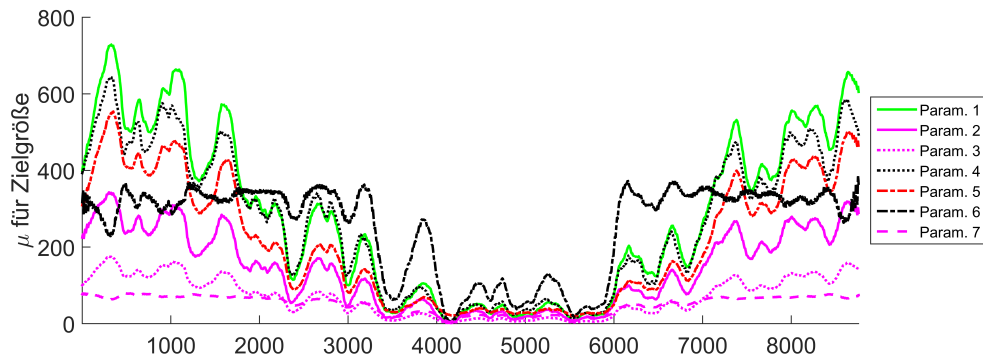
$\mu$  bzw.  $\mu^*$  und  $\sigma$  für aggregierte Zielgrößen wird klassischerweise ([46], [97, S. 746]) auf eine Darstellung zurückgegriffen, bei der die Werte von  $\mu$  oder  $\mu^*$  und die Werte von  $\sigma$  mittels eines Scatterplots aufgetragen werden (Abbildung 5.4(d)). Diese Darstellung wird auch als Morris-Plot bezeichnet. Dann sind also nahe des Nullpunkts die Parameter, die geringen Gesamteinfluss haben und geringe Interaktionen mit anderen Parametern bzw. nicht-linearen Einfluss aufweisen. Parameter, die einen hohen Wert für  $\mu$  bzw.  $\mu^*$  haben, aber niedrigen Wert für  $\sigma$ , können als die Zielgröße linear beeinflussend und additiv interpretiert werden. Parameter mit hohen Werten für  $\sigma$  haben, unabhängig von ihrem Wert für  $\mu$  bzw.  $\mu^*$ , einen nicht-linearen Einfluss oder Einfluss auf Grund von Wechselwirkung mit anderen Parametern. [255, S. 414]

Boxplots (Abbildung 5.4(e)) können unter anderem zur Darstellung von Zeitreihen genutzt werden, wenn der zeitliche Verlauf nicht von Interesse ist. In einem Boxplot werden der Medianwert, das 25 %-Quantil und das 75 %-Quantil, wobei letzere auch unteres und oberes Quartil genannt werden, in einer Box bzw. als fatter Streifen dargestellt, der Bereich der Werte unter- und oberhalb der Quartile werden als Antennen (oder Whisker) dargestellt. Die Whisker haben eine maximale Länge von 1,5 mal der Boxlänge, Werte unter- und oberhalb davon werden als Ausreißer bzw. Extremwerte dargestellt. Somit kann der Bereich, in dem sich die Zeitreihendaten bewegen, schnell erfasst werden. Dies kann bei der sequentiellen Sensitivitätsanalyse genutzt werden, um die Sensitivitäten der einzelnen Parameter über den gesamten Simulationsverlauf darzustellen oder auch, um die durch Mittelwertbildung oder funktionale Transformation auftretenden Fehler MSE und RMSE darzustellen.

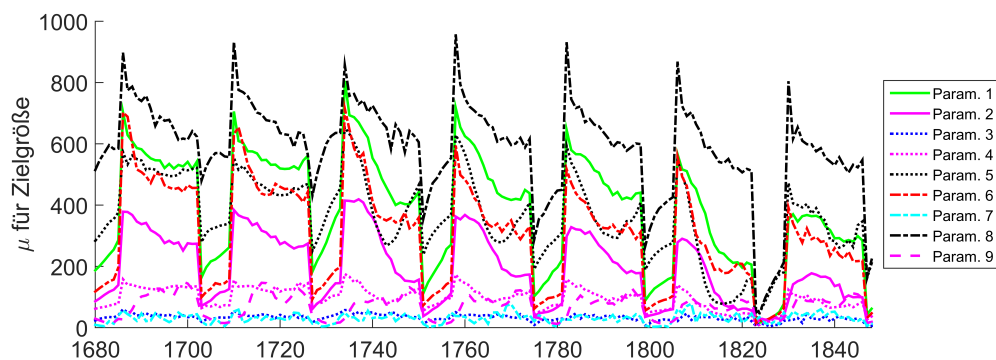
Zeitreihen können auch als Graphen über die Zeit dargestellt werden. Für die sequentielle Auswertung von Sensitivitäten ist dies die bevorzugte Variante, da hierbei im Vergleich zu Boxplots v.a. auch saisonale Schwankungen erkennbar sind. Dies ist in Abbildung 5.5(a) beispielhaft für den Sensitivitätsindex  $\mu^*$  dargestellt, der aus dem gleitenden Mittelwert von Ergebnisdaten über 167 Stunden berechnet wurde. Kurzfristige Schwankungen, also beispielsweise ein Tagesverlauf innerhalb einer Jahresauswertung, lassen sich hier nicht erkennen, da die Auflösung zu gering ist bzw. diese Effekte durch die Glättung verschwinden. Daher müssen hierfür kürzere Zeitintervalle betrachtet werden, wie es beispielhaft in 5.5(b) mit den ungeglätteten Sensitivitäten  $\mu^*$  für eine Woche dargestellt ist. Für die Darstellung der Elementareffekt-Sensitivitätsindizes ist es sinnvoll, mehrere Diagramme dieser Art zu erzeugen, in denen der betrachtete Sensitivitätsindex für alle Parameter dargestellt ist. Somit können die Gesamt- und Wechselwirkungseinflüsse der unterschiedlichen Parameter zu den verschiedenen Zeitpunkten verglichen werden. Insbesondere bei Verwendung von gleitenden Mittelwerten lassen sich so Einflussrangfolgen der unterschiedlichen Parameter ableiten, welche ggf. saisonal unterschiedlich sein können.

Ebenfalls gut zur Darstellung von Zeitreihendaten können Rasterdiagramme genutzt werden. Dabei wird für eine Jahresdarstellung ein Raster von 365 Spalten, entsprechend den Tagen, mit je 24 Zeilen, entsprechend den Stunden des Tages, erstellt, in dem mittels Einfärbung der Rasterzellen Daten visualisiert werden. Hierdurch können insbesondere wiederkehrende Muster leicht erkannt werden, wie beispielsweise in Abbildung 5.6(a) in der Darstellung des

## 5. Sensitivitätsanalysemethoden



(a) Beispielhafte sequentielle Darstellung des Elementareffekt Sensitivitätsindex  $\mu^*$  über ein Jahr bei Verwendung eines gleitenden Mittelwerts über 167 Stunden



(b) Beispielhafte sequentielle Darstellung des Elementareffekt Sensitivitätsindex  $\mu^*$  über eine Woche

**Abbildung 5.5: Zeitreihendarstellung als Graph über die Zeit**

Standardlastprofils H0 für den Strombedarf in Haushalten. In 5.6(b) ist der Sensitivitätsindex  $\mu^*$  dargestellt, hierbei lässt sich grafisch die Nachtabsenkungszeit erkennen. Generell sind Rasterdiagramme also gut geeignet, um Sensitivitäten bzgl. Zeitreihenzielgrößen darzustellen, da hierbei leicht erkennbar ist, zu welchen Tageszeiten der Einfluss eines Parameters variiert. Allerdings muss dabei für jeden Parameter ein eigenes Rasterdiagramm erzeugt werden.

Zur Auswertung von Sensitivitätsanalysen, die mittels funktionaler Transformation erstellt werden, ist eine Darstellung der jeweils gewählten Basisfunktionen als Graph über die Zeit geeignet. Mittels dieser Darstellung kann die Bedeutung der Basisfunktionen analysiert werden. Im Falle einer auf gemittelten Werten erzeugten funktionalen Transformation ist es sinnvoll, die gemittelten Werte plus bzw. minus einem Vielfachen  $C$  der Basisfunktion darzustellen. Im Falle der Erzeugung der Basisfunktionen durch Hauptkomponentenzerlegung wird das Vielfache  $C$  gemäß [213, S. 154] mittels folgender Formel berechnet:

$$C^2 = T^{-1} \|\hat{\mu} - \bar{\mu}\|^2, \bar{\mu} = T^{-1} \int \hat{\mu}(t) dt \quad (5.34)$$

wobei  $T$  die Anzahl der Zeitschritte ist und  $\bar{\mu}(t)$  der Mittelwert aller Ergebnisse zur Zeit  $t$ . In Abbildung 5.7 ist dann die Mittelwertzeitreihe plus und minus dem durch die Hauptkom-

## 5.5. Darstellung von Sensitivitäten

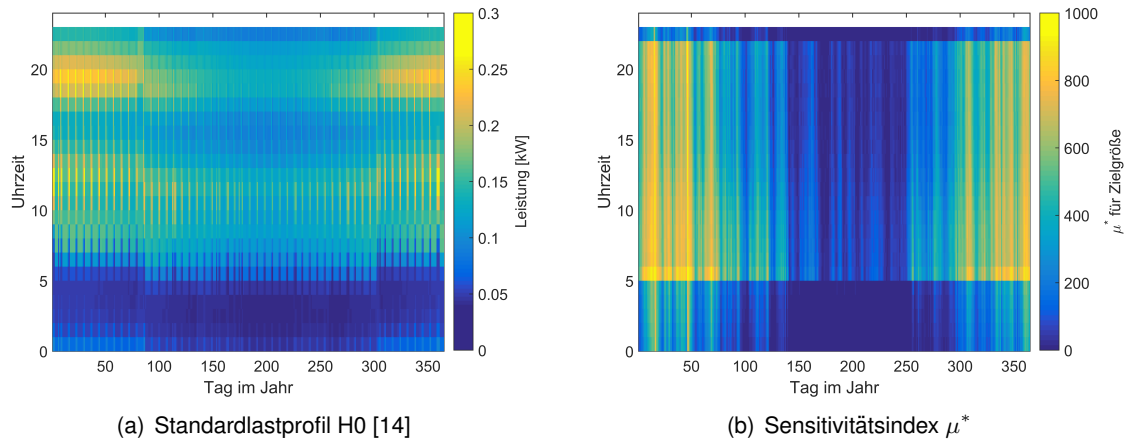


Abbildung 5.6.: Beispielhafte Darstellung von Rasterdiagrammen

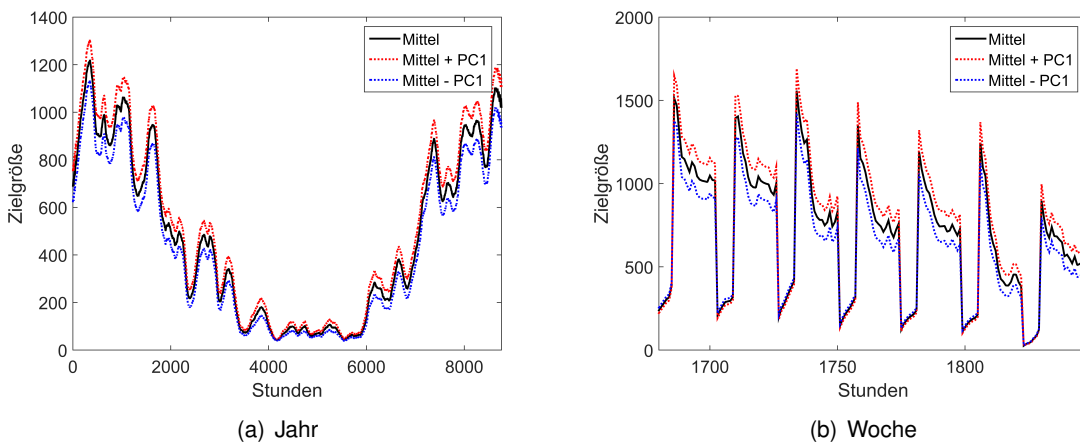


Abbildung 5.7.: Beispielhafte Darstellung des Effekts einer Hauptkomponente für ein Jahr und eine Woche

ponente PC1 repräsentierten Effekt für gesamtes Jahr mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden bzw. für eine Woche mit ungeglätteten Werten dargestellt.

Die für die Hauptkomponenten berechneten Elementareffekt-Sensitivitätsindizes können dann wieder als üblicher Morris-Plot dargestellt werden, da die Indizes  $\mu_f$  bzw.  $\mu_f^*$  und  $\sigma_f$  skalare Werte annehmen (vgl. Abschnitt 11.3) und den Einfluss auf den durch die jeweilige Hauptkomponente beschriebenen Effekt darstellen. Der Gesamteinfluss eines Parameters für ein Parameterranking lässt sich mittels Balken- oder Säulendiagramm für die Werte von  $\mu_f^*$  darstellen.



**Teil III.**

## **Stand des Wissens**





In diesem Teil der Arbeit wird auf den aktuellen Stand des Wissens im Bereich der energetischen Stadtmodellierung, speziell auf die entwickelten Modelle sowie der im Gebäudesimulationsbereich eingesetzten Sensitivitätsanalysemethoden eingegangen. Hierfür werden die im Rahmen der Literaturrecherche gefundenen Modelle mit ihren unterschiedlichen Modellierungsansätzen, verwendeten Daten und erzielbaren Ergebnissen vorgestellt. Zusammengefasst werden die Modelle in einer tabellarischen Übersicht sowie im diesen Teil abschließenden Bewertungskapitel kritisch in Hinblick auf die Verwendung als Planungsinstrumente hinterfragt.

Im Bereich der für Gebäudesimulationen eingesetzten Sensitivitätsanalysen wird auf die verwendeten Methoden und die damit erzielten Ergebnisse eingegangen. Insbesondere wird dabei auf die von anderen erfolgte Übertragung von Sensitivitätsanalysemethoden auf Stadtmodelle eingegangen, die jedoch bisher in diesem Bereich sehr spärlich eingesetzt wurden.



## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Im Rahmen der Literaturrecherche für diese Arbeit wurden 58 Modelle gefunden, die sich mit der energetischen Bewertung von Quartieren befassen bzw. einzelne Aspekte berücksichtigen, die auch in EmMi-transient (vgl. Teil VII) abgebildet werden. Die Recherche stützt sich dabei auf die Reviewartikel [137], [135], [252], [214], die Suche mittels entsprechender Stichwörter bei den einschlägigen Web-Suchdiensten, hauptsächlich Web of Science und Google Scholar, sowie auf Veröffentlichungen aus Konferenzbänden, hier insbesondere der BauSIM- und BuildingSimulation-Konferenzreihen.

Eine detaillierte Beschreibung, wie die Modellierung durchgeführt wurde, war über die aufgeführten Veröffentlichungen hinaus zumeist nicht verfügbar und auch die Modelle selbst sind größtenteils nicht öffentlich einsehbar. Daher ist die folgende Übersicht dazu gedacht, einen Einblick in die diversen Aspekte, die durch die Modelle abgedeckt werden, zu geben. Daraus wird zum einen die in dieser Arbeit erstellte Sensitivitätsanalysemethodik in Teil IV abgeleitet, so dass sie auf entsprechende Quartiersmodelle anwendbar ist. Zum anderen orientiert sich aber auch die Modellierung von EmMi-transient an den vorhandenen Modellen.

In Abschnitt 6.1 wird eine Übersicht der Modelle und eine Beschreibung der Kategorien gegeben, in den darauf folgenden Abschnitten werden die den einzelnen Kategorien zugeordneten Modelle beschrieben.

### 6.1. Übersicht

Durch die große Anzahl relevanter vorhandener Modelle ist es notwendig, diese zuerst übersichtsweise darzustellen und einer Kategorisierung zu unterziehen, bevor die einzelnen Modelle mit ihren jeweiligen Besonderheiten in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben werden.

Aus der Literaturrecherche abgeleitet wurde eine Kategorisierung der energetischen Stadtmodelle. Dabei werden die Modelle jeweils in der Kategorie genannt, in die sie nach Ansicht des Autors am besten einzuordnen sind. Bei vielen Modellen sind jedoch auch Aspekte anderer Kategorien enthalten. Dies wird entweder im Text erwähnt oder diese Aspekte eines Modells werden in der jeweiligen Kategorie aufgeführt.

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Die *stationären Modelle* nutzen stationäre Energiebedarfsberechnungsmethoden, die die physikalischen Prozesse des Wärmetransports vereinfacht abbilden und erlauben damit eine eingeschränkte Abbildung von Energiespeicherung. Insbesondere lassen sich hiermit die dynamischen Prozesse bei der erneuerbaren Energieerzeugung nur unzureichend untersuchen.

Die *GIS-basierten Modelle* nutzen GIS-Daten und teilweise auch die GIS-Programme selbst, um Energiebedarfsabschätzungen zu erstellen. Vor allem werden auch die Ergebnisse der Modelle in GIS angezeigt, weswegen diese Modelle gute Visualisierungsmöglichkeiten besitzen.

Die *statistikbasierten Modelle* nutzen statistische Daten und entsprechende statistische Modellierungstechniken, um den Energiebedarf abzuschätzen oder zu prognostizieren. Hierbei werden also nicht die physikalischen Prozesse abgebildet, sondern zumeist aufbauend auf Messdaten neue Ergebnisse erarbeitet.

*Energiesystemmodelle* behandeln nicht nur die Energienachfrageseite, sondern vor allem auch die Energieerzeugung und den -transport. Deshalb sind sie meist für größere Regionen ausgelegt und untersuchen dort optimale Lösungen für Strom- und Wärmenetze.

*Wirtschaftsmodelle* verfolgen in der Regel entweder einen Ansatz nach Input-Output-Rechnung oder nach Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnung und erlauben damit die Verknüpfung zwischen wirtschaftlichen Faktoren und der Entwicklung im Energiesektor abzubilden.

Die *dynamischen Modelle* nutzen thermische Simulationsprogramme, um das Verhalten der Gebäude nachzubilden. Daher lassen sich hier auch Energiespeicherungsvorgänge detailliert abbilden. Eine Sonderform der dynamischen Modelle sind die *Widerstand-Kapazitäts-Modelle* (RC-Modell), die die Wärmeströme im Gebäude mittels einer Analogie zu elektrischen Schaltkreisen abbilden. Hiermit lassen sich kurze Rechenzeiten realisieren; anlagentechnische Details sind mit dieser Methode jedoch nicht abbildbar.

*Parallelisierte Modelle* laufen ohne Informationsaustausch auf einem oder mehreren Computersystemen parallel und reduzieren die notwendige Rechenzeit. Da die gefundenen Modelle dynamisch rechnen sind sie in der Übersichtstabelle der dynamischen Modelle aufgeführt.

*Gekoppelte Modelle* laufen auch parallel, tauschen jedoch Informationen zu bestimmten Zeitpunkten aus und erlauben daher den Aufbau sehr komplexer Modelle. Diese sind jedoch im Allgemeinen auch sehr rechenaufwändig. Eine spezielle Form davon sind Modelle, die über den FMI Standard kommunizieren. Auch diese Modelle sind in der tabellarischen Übersicht bei den dynamischen Modellen eingeordnet.

Die *sonstigen Modelle* lassen sich keiner der vorherigen Kategorien zuordnen.

In den Tabellen 6.1 bis 6.10 sind die Modelle mit ihren wichtigsten Informationen aufgeführt. Die Spalte *räumliche Auflösung* beschreibt dabei die Größe des zu untersuchenden Gebiets, die Spalte *zeitliche Auflösung* beschreibt, bis zu welcher Zeiteinheit hinunter Ergebnisdaten aufgelöst werden können. Die Spalte *Ergebnisdaten* gibt an, welche Ergebnisgrößen mit dem Modell berechnet werden. Die Spalte *zeitliche Dimension* gibt an, inwiefern nicht nur

Untersuchungen zu einem bestimmten Zeitpunkt und damit Sanierungsstand des Quartiers, sondern auch eine zeitliche Entwicklung der Sanierungen berücksichtigt werden kann. Die Spalte *Validierung* gibt an, mit welchen Daten bzw. anderen Modellen eine Modellvalidierung durchgeführt wurde. Die Spalte *Anwendung* gibt das hauptsächliche Anwendungsgebiet für ein Modell an. In Spalte *Verfügbarkeit* ist angegeben, inwiefern Modelle nicht nur von den Entwicklern eingesetzt werden, sondern auch für außenstehende Personen zugänglich sind.

In den Tabellen 6.11 und 6.12 ist die Einordnung der Modelle in Kategorien dargestellt. Dabei wird in den Spalten *Energiebedarf Berechnungsmethode* zwischen stationären Methoden und dynamischer Berechnung mittels Gebäudesimulation bzw. RC-Modellen sowie Berechnung basierend auf statistischen Methoden unterschieden. In der Spalte *Eingangsdaten* wird aufgeführt, welche Art von Daten für die Parametrisierung des Modells verwendet wird. Dabei wird zwischen GIS- und BIM-Daten unterschieden, sowie angegeben, ob Typgebäudedaten wie etwa aus Gebäudetypologien sowie weitere statistische Daten verwendet werden. In der Spalte *Gebäudearten* wird unterschieden, ob Wohn- und/oder Nichtwohngebäude modelliert werden. Die Spalte *Ökonomie* gibt an, ob wirtschaftliche Untersuchungen mit dem Modell durchgeführt werden, die Spalte *FMI*, ob eine Kopplung mittels FMI verwendet wird und die Spalte *Parall.*, ob die Einzelberechnungen parallelisiert laufen können. In der Spalte *Modellierungstechnik* ist angegeben, ob ein Modell mittels bottom-up oder top-down Ansatz arbeitet. In der Spalte *SA* ist angegeben, ob Sensitivitätsanalyse oder Unsicherheitsbetrachtungen an dem jeweiligen Modell durchgeführt wurden.

6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.1.: Übersicht stationäre Modelle 1

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
BRE-HOMES	Shorrock, Henderson et al	[235] [234]	1997	Gebäudetypen - Nation	Jahr	Energiebedarf	-	Statistikdaten	Bewertung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen	k.A.
-	Kohler et al	[144]	1997	Referenzgebäude	Jahr	Energiebedarf	bis 2020	Vergleich top-down mit bottom-up Ergebnissen	Forschung	k.A.
EEP	Jones, Lan-non et al	[132]	2001	Gebäudecluster	Jahr	Energiebedarf, CO <sub>2</sub> -Emissionen, Kosten	Gebäudehüllensanierung, Anlagentausch	nur Sub-Modelle	Planungsinstrument	k.A.
-	Johnston	[130]	2003	Gebäudetypen	Jahr	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Energiebedarf	Szenarische Betrachtungen	Vergleich mit Verbrauchsdaten und BREHOMES-Ergebnissen	Forschung	k.A.
-	Mavrogianni, Davies et al	[179]	2009	MLSOA je ca. 3000 Gebäude	Jahr	Wärmebedarf, Brennstoffbedarf	geplant	Vergleich mit MLSOA top-down Daten	Forschung	k.A.
CDEM	Firth, Lomas et al	[87] [88]	2009	Gebäudetypen	Jahr	CO <sub>2</sub> -Emissionen	Szenarische Betrachtungen	-	Forschung, Sensitivitätsanalysen	k.A.
DECM	Cheng, Steemers	[49]	2011	Kommune - Nation	Monat	Energiebedarf elektrisch, thermisch, CO <sub>2</sub> -Emissionen	Szenarische Betrachtungen: Wanddämmung, Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses	Vergleich mit Verbrauchsdaten auf Local Authority Ebene	Planungsinstrument für Sanierungen; Forschung	k.A.

Tabelle 6.2.: Übersicht stationäre Modelle 2

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
-	Eicker, Nouvel	[82]	2012	Gebäude - Stadtteil	Monat	Wärmebedarf	Szenarische Betrachtungen	Quartiersverbrauchsdaten	Planungsinstrument für Sanierungen und Energieversorgung	k.A.
GOSOL	Gorezki	[101]	2013	Gebäude	Monat	Heizwärmebedarf, Primärenergiebedarf, Solarerträge	-	-	solare & energetische Bewertung und Optimierung städtebaulicher Planung	kommerziell
CHM	Hughes, Palmer et al	[120] [121]	2013	Nation	Monat	Energiebedarf, CO <sub>2</sub> -Emissionen	k.A.	k.A.	Forschung	frei verfügbar unter gov.uk/government/publications/cambridge-housing-model-and-user-guide
SimStadt	Nouvel, Schulte et al	[195] [196]	2014	Gebäude - Stadtteil	Monat	Heizwärmebedarf	Gebäudehüllensanierung auf Effizienzhaus 85, 2 % Sanierungsrate pro Jahr, Projektion bis 2050	Vergleich des realen und simulierten Wärmebedarfs	Ermittlung von Energieeinsparpotential und Sanierungsprioritäten	k.A.
EmMi	Nemeth et al	[187] [191] [188] [189]	2014	Gebäude	Monat - Jahr	Heizwärmebedarf, Strombedarf	Zufallsbasiertes Sanierungsmodell	Vergleich mit top-down-Daten	Forschung	von Entwicklern eingesetzt
District ECA	Fraunhofer IBP	[92] [264]	2015	Gebäude, Quartier	Monat	Energiebedarf, CO <sub>2</sub> -Bilanz	Variantenvergleich	k.A.	Bewertung der Energieeffizienz von Stadtquartieren	frei verfügbar unter district-ecca.de
-	Horn	[115]	2016	Gebäude	Monat	Ökologische und ökonomische Auswirkung	Szenarische Sanierungen	Daten des Fallbeispiels Karlsruhe Rintheim	Planungsinstrument	k.A.



## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.3.: Übersicht GIS-Modelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
GIS-CAR	Ramos, Siret et al	[212]	2004	Gebäude	Stunde	Energiebedarf, solare Einstrahlung, Schall	k.A.	Vergleich mit durch Architekten erfassten Energieeffizienzwerten geplant	Planungsinstrument für Sanierungen	k.A.
Dorfner	Dorfner	[76]	2011	Kacheln $200 \cdot 200m^2$	Jahr	Wärmebedarfskarte	-	-	Planungsinstrument für Fernwärme und Sanierungen	k.A.
ISIS	Brüggemann, v. Both	[25]	2012	Gebäude	k.A.	-	Betrachtung von Planungsprozessen	-	Integriertes Stadtmodell, Management-Plattform	k.A.
GEKIS	Isele, Höfker et al	[124]	2008	Region, Nation	Jahr	Energiebedarf	Gebäudehüllensanierung	Vergleich mit Verbrauchsdaten für Gebäudetypen	Planungsinstrument für Sanierungen	k.A.

Tabelle 6.4.: Übersicht Statistikmodelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
-	Sailor, Lu	[223]	2004	Block	Stunde	spezifische anthropogene Abwärmeprofile	k.A.	k.A.	Erzeugung von Abwärmeprofilen für Mikroklimateursuchungen	k.A.
-	Brownsword, Fleming et al	[24]	2005	Stadt	Stunde	Lastprofile, Kosten	Veränderung der Wirkungsgrad-Faktoren	nicht möglich auf Grund von Datenmangel	Optimierung	k.A.
-	Sartori, Wachenfeldt et al	[227]	2009	pro m <sup>2</sup> , Nation	Jahr	Heizwärmebedarf, elektrischer Energiebedarf	Szenarische Betrachtungen: Fernwärmenutzung, Wärmepumpen, Gebäudehüllensanierung	Vergleich mit Verbrauchsdaten	Planungsinstrument	k.A.
CARB	Bruhns	[26]	2010	Gebäude	Jahr	Schätzung des Gas- und Stromverbrauch	über Energieintensitätsfaktoren	Vergleich mit Digest of UK Energy Statistics	Forschung	k.A.
-	Howard, Parshall et al	[117]	2012	PLZ Bereiche	Jahr	Schätzung Energieverbrauch	-	Vergleich mit Verbrauchsdaten	Planungsinstrument für verteilte Energieerzeugung und Sanierungsmaßnahmen	k.A.
-	Mastrucchi, Baume et al	[177]	2014	Gebäude	Jahr	geschätzter Gas- und Elektrizitätsverbrauch	über Energieeinsparungsfaktoren für die Gebäudetypen	Vergleich mit Durchschnittsenergieverbrauchswerten, Bootstrapping	Planungsinstrument für Sanierungen und Energieversorgung	geplante Integration in Web-Plattform iGUESS
-	Farzana, Liu et al	[86]	2014	Region	Jahr	Elektrizitätsbedarf, Gesamtenergiebedarf	Vorhersage mittels statistischer Modelle bis 2025	gegen andere statistische Modelle	Vorhersage des Energiebedarfs	k.A.
-	Mikkola, Lund	[181]	2014	Parzellen mit Seitenlänge 100 m bis 1 km	Stunde	örtlich und zeitlich aufgelöstes elektrisches Lastprofil	-	Vergleich mit jährlichen Stromverbrauchsdaten	Smart Grids, DSM, erneuerbare Energieversorgung	k.A.

6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.5.: Übersicht Energiesystem-Modelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
-	Blesl	[17]	2002	Siedlungstypen	Stunde - Jahr	Wärmebedarf, Kosten, Wirtschaftlichkeit	Szenarische Betrachtung und Optimierung bis 2025 unter Berücksichtigung von Sanierungen und Wirtschaftlichkeit	k.A.	Planungsinstrument für Nah- und Fernwärme	k.A.
ETSAP-TIAM	Loulou	[168]	2008	Nation - Global	Jahr	Kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen, Energiesystem-Konfigurationen	Szenarische Betrachtungen bis 2100	-	Forschung	Evaluationsversionen frei verfügbar
DIP-CEM	Lin, Huang	[156]	2009	Quartier	Jahr	geschätzter Brennstoffverbrauch, CO <sub>2</sub> -Emissionen	szenarische Betrachtungen bis 2022	-	Planungsinstrument	k.A.
SEDSO	Li	[155]	2013	Regionen, Siedlungen (medium super output areas)	Jahr	Kosten	Jahr 2050	-	Forschung	k.A.
REMod	Paizer, Henning	[110] [202] [203]	2014	Nation	Stunde	jährliche Gesamtkosten, benötigte Kapazitäten für Strom- und Wärmeerzeugung, Lastprofile	Kostenkurve für Sanierungsmaßnahmen	k.A.	Optimierung des Energiesystems, Planungsinstrument	k.A.
URBS	Hamacher, Dorfner	[106]	2016	Energienetz	Stunde	Kosten	Szenarische Betrachtungen	-	Energiesystem-Optimierung	frei verfügbar unter <a href="http://urbs.readthedocs.io">urbs.readthedocs.io</a>

Tabelle 6.6.: Übersicht Wirtschaftsmodelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
Invert	Kranzl, Stadler et al	[146] [239]	2006	lokal - multinational	Jahr	Kosten, CO <sub>2</sub> -Emissionen, Förderprogramm-effizienz	Szenarische Betrachtungen bis 2020	Kalibrierung mit historischen Daten	Bewertung von Förderprogrammen für erneuerbare Energien	k.A.
e3.at	gws	[248] [249]	2011	Nation	Jahr	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Energieverbrauch, Kosten, ökonomische Zusammenhänge der Sektoren	Szenarische Betrachtungen	k.A.	Abbildung wahrscheinlicher Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen auf nationaler Ebene	von Entwicklern eingesetzt
PANTA RHEI	gws	[154]	2011	Nation	Jahr	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Energieverbrauch, Kosten, ökonomische Zusammenhänge der Sektoren	Szenarische Betrachtungen	k.A.	Abbildung wahrscheinlicher Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen auf nationaler Ebene	von Entwicklern eingesetzt
ASTRA	Fraunhofer ISI	[154]	2011	EU, Nation	Jahr	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Energieverbrauch, Kosten, ökonomische Zusammenhänge der Sektoren	Szenarische Betrachtungen mit Zeithorizont 30-50 Jahre	k.A.	Strategische Bewertung von Politikprogrammen (insb. Klima-, Energiepolitik) auf europäischer Ebene	k.A.

6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.7.: Übersicht dynamische Modelle 1

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
-	Huang, Brodriick	[118]	2000	Gebäudetypen	Stunde	Heiz-, Kühl-, Endenergiebedarf	-	Vergleich mit Jahresverbrauchswerten, anderen Studien, top-down-Daten	Forschung	k.A.
-	Shimoda, Fujii et al	[232] [233]	2003	Quartier	Stunde	Elektrizitätsbedarf, Heiz-, Kühlbedarf	Szenarische Betrachtungen: Änderungen Gebäudebestand, elektr. Anwendungen, Bevölkerung, Haushaltstruktur, Gebäudehülle	k.A.	Planungsinstrument	k.A.
SUNTool	Robinson et al	[220] [219]	2007	Gebäude	Stunde	Energiebedarf, Wasser, Abfall, Tageslicht	Szenarische Betrachtungen	Vergleich mit anderen Tools/Studien	Lehre; Forschung; Planungsinstrument	frei verfügbar
-	Heiple, Sailor et al	[109]	2007	Parzellen kleiner 100 m	Stunde	Lastprofile, Energienutzungsichte	nein	Vergleich mit realen Gebäudedaten	Einfluss Abwärme auf Mikroklima	k.A.
-	Yamaguchi, Shimoda et al	[274] [272] [273]	2007	Gebäude, 500 · 500m <sup>2</sup> Kacheln	Stunde	Energiebedarf	szenarische Betrachtungen: CHP, Wast Heat Network, Energieeinsparmaßnahmen	k.A.	Planungsinstrument	k.A.
CHREM	Swan, Ugursal et al	[251]	2009	Gebäude	Stunde	Energiebedarf	k.A.	k.A.	Planungsinstrument für neue Technologien	k.A.
-	Huber, Nytsch-Geusen	[119]	2011	Gebäude	Stunde	Energiebedarf	Verschiedene Versorgungssysteme	k.A.	Planungsinstrument für neue Stadtquartiere	k.A.

Tabelle 6.8.: Übersicht dynamische Modelle 2

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
-	Yang, Shao et al	[275]	2012	Einzelgebäude	Stunde	Mikroklima, Energiebedarf	-	-	Forschung	einzelne Tools frei verfügbar
BEDEM	Kavgic, Muzovic et al	[136]	2013	Stadt	Jahr	Energiebedarf, CO <sub>2</sub> -Emissionen	Szenarische Betrachtungen	Vergleich mit Verbrauchsdaten, top-down-Daten	Forschung	k.A.
umi	Reinhart, Dogan et al	[215]	2013	Quartier	Stunde	Heizwärmebedarf, Strombedarf, Tageslichtnutzung	k.A.	k.A.	Planungsinstrument für neue und bestehende Stadtquartiere; Lehre	frei verfügbar unter urbanmodelling.net
-	Kim, Plessis et al	[138]	2014	Gebäude	Stunde	Temperaturen, Lastprofil	-	Vergleich der vereinfachten, reduzierten Modelle mit detailliertem Modell	Forschung	k.A.
UMEM	Thomas, Miller et al	[254]	2014	Gebäude	Stunde	Heiz-, Kühlenergiebedarf	-	-	Proof of concept	k.A.
-	Macumber, Ball et al	[175]	2014	Gebäude	Stunde	Energiebedarf	-	-	Parametrische Studien	frei verfügbar
-	Mastrucchi, Baume et al	[178]	2014	Gebäude	Stunde	Energiebedarf, CO <sub>2</sub> -Emissionen, thermischer Komfort	Sanierung von Gebäudetypen	Vergleich mit jährlichen Energieverbrauchsdaten	Planungsinstrument für Sanierungen unter Berücksichtigung des thermischen Komforts	k.A.
-	Fonseca, Schlueter,	[89]	2015	Gebäude, Block, Distrikt	Stunde	Energiebedarf	Sanierungen an Gebäudehülle, Kühlsystem, elektr. Geräte mittels Energiebedarfs-Abminderungsfaktoren	empirische Daten, Vergleichsmodell CLM	Abwärmepotential, Planungsinstrument für Fernwärme und Sanierungsmaßnahmen	k.A.

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.9.: Übersicht RC-Modelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
CitySim	Robinson, Haldi et al	[221] [263]	2009	Gebäude	Stunde	Energiebedarf, Energieströme	-	BESTEST, gemessene Verbrauchswerte	Forschung; Planungsinstrument	frei verfügbar unter citysim.epfl.ch
MEU	Rager, Rebeix et al	[211]	2013	Gebäude	Jahr	End- und Primärenergiebedarf, CO <sub>2</sub> -Emissionen	Szenarische Betrachtungen	Vergleich der Einzelgebäudedaten mit Messwerten	Monitoringtool, Planungsinstrument	k.A.
-	Fuchs, Dixius et al	[95] [94]	2013	Gebäude	Stunde	Massenstrom und Vor-, Rücklauftemperaturen im Fernwärmenetz	Gebäudehüllensanierung	Fernwärmeübergabestationsmodell mit Messdaten validiert	Auswirkung von Sanierungsmaßnahmen auf Fernwärmenetz	k.A.
-	Stinner, Streblow et al	[247]	2014	Gebäude	Stunde	Heizwärmebedarf	-	Test hinsichtlich Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	Forschung	k.A.

Tabelle 6.10.: Übersicht sonstige Modelle

Name	Entwickler	Quelle	Jahr	räumliche Auflösung	zeitliche Auflösung	Ergebnisdaten	zeitliche Dimension	Validierung	Anwendung	Verfügbarkeit
City Life Management	Siemens	[236] [23]	2012	Gebäude	?	Energieverbrauch, CO <sub>2</sub> -Emissionen	Szenarische Betrachtungen	-	Planungsinstrument	k.A.
-	Bouyer, Inard	[22]	2011	CFD-Grid bzw. Gebäude	Stunde	Temperaturen, Heiz-, Kühlbedarf für 2 Referenzwochen	-	-	Mikroklima-Auswirkungen auf eine Gebäudesimulation	k.A.
ENVImet	Bruse	[27]	2015	Kacheln mit Kantenlänge 1 m	Stunde	Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen	-	Für diverse Regionen validiert	Mikroklimasimulation	frei verfügbar unter envi-met.com



6. Existierende energetische Stadtmodelle

Tabelle 6.1.1.: Kategorisierung der Modelle 1

Name	Ersteller	Quelle	Kategorisierung	Kategorien														
				Berechnungsmethode des Energiebedarfs			Eingangsdaten				Gebäudearten			Modell-Technik				
				Stat. ionär	Dyn. Stat.	RC	GIS	BIM	Typgeb. daten	Stat. daten	Wohn. Nichtwoh.	Ökon. FMI	Para.	bott. up	top down	SA		
-	Huang, Brodrick	[118]	Dynamisches Modell	x						x	x						x	
-	Shimoda, Fujii et al	[232] [233]	Dynamisches Modell	x						x	x							x
SUNTool	Robinson et al	[220] [219]	Dynamisches Modell		x					x								x
-	Heiple, Sailor et al	[109]	Dynamisches Modell	x					x									x
-	Yamaguchi, Shimoda et al	[274] [272] [273]	Dynamisches Modell	x						x								x
CHREM	Swan, Ugursal et al	[251]	Dynamisches Modell	x	x					x	x							x
-	Huber, Nytsch-Geusen	[119]	Dynamisches Modell	x					x									x
-	Yang, Shao et al	[275]	Dynamisches Modell	x														
BEDEM	Kavgic, Mumovic et al	[136]	Dynamisches Modell	x						x	x							x
umi	Reinhardt, Dogan et al	[215]	Dynamisches Modell	x						x								x
-	Kim, Plessis et al	[138]	Dynamisches Modell	x														
UMEM	Thomas, Miller et al	[254]	Dynamisches Modell	x						x								x
-	Macumber, Ball et al	[175]	Dynamisches Modell	x														
-	Mastrucchi, Baume et al	[178]	Dynamisches Modell	x						x								x
-	Fonseca, Schlueter,	[89]	Dynamisches Modell	x	x					x	x							x
-	Blesl	[17]	Energiesystem-Modell	x						x	x							x
ETSAP-TIAM	Loulou	[168]	Energiesystem-Modell							x	x							x
DIP-CEM	Lin, Huang	[156]	Energiesystem-Modell	x														x
SEDSD	Li	[155]	Energiesystem-Modell	x														x
REMOD	Paizer, Henning	[110] [202] [203]	Energiesystem-Modell		x						x							x
URBS	Hamacher, Dorfner	[106]	Energiesystem-Modell		x													x





## 6.2. Stationäre Modelle

Die Gemeinsamkeit der folgenden Modelle ist, dass sie (quasi-)stationäre Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden nutzen, welche meistens monatliche und jährliche Zeiträume betrachten. Daher lassen sich keine Aussagen zum Lastverlauf ableiten. Diese Modelle haben im allgemeinen einen sehr geringen Rechenaufwand und ermöglichen somit, eine große Anzahl an Gebäuden zu betrachten.

In [3] und [4] werden die Jahres- bzw. Monatsvariante des englischen BREDEM Verfahrens zur Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden erläutert. Darauf basieren viele in Großbritannien verwendete Modelle wie u.a. BREHOMES [235], [234], das Modell von Johnston [130] oder das Community Domestic Energy Model [87], [88]. Reviews dieser Modelle und der zugrundeliegenden Modellierungsansätze sind in [135] und [198] verfügbar. Das in den weiter unten aufgeführten Modellen verwendete Energiebedarfsberechnungsverfahren SAP basiert ebenfalls auf dem BREDEM Rechenalgorithmus, allerdings sind bei SAP die Randbedingungen, die bei BREDEM angepasst werden können, fixiert, um eine Vergleichbarkeit der damit berechneten Gebäudeenergiebedarfe zu erreichen.

Das Energy and Environmental Prediction (EEP) Modell [132] ist ein GIS-basiertes System mit verschiedenen Teilmodellen zur Ermittlung des aktuellen Energiebedarfs von Gebäuden (Wohn- und Nichtwohngebäude), Transportsystemen und Industrie und der dadurch erzeugten Emissionen. Zur Energiebedarfsberechnung wird SAP eingesetzt. Es wird eine statistische Clusteringtechnik zur Zuordnung von Gebäuden zu Gebäudetypen verwendet. Die Effekte unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen wie zusätzlicher Dämmung oder Installation eines Brennwertkessels können untersucht werden.

In [179] wird ein Modell basierend auf GIS-Daten und SAP beschrieben, welches die räumliche Verteilung des Heizwärmebedarfs in London für 95 sog. Middle Layer Super Output Areas (MLSOA) abschätzt. Daten des 2005 durchgeführten English House Condition Survey bilden die Grundlage für die Gebäudedaten. Temperaturdaten von London wurden zur Ermittlung der Heizgradtage verwendet. Validiert wurden die Modellergebnisse mit top-down-Daten, die auf MLSOA-Ebene verfügbar waren.

Das in [49] beschriebene Domestic Energy and Carbon Model (DECM) nutzt ebenfalls das SAP-2005 Verfahren, allerdings mit einigen Modifikationen in den Bereichen Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und sonstige elektrische Geräte. Weiterhin wird das Nutzerverhalten anders als bei SAP durch angepasste Heizzeiten abgebildet. Dies hat den Vorteil, dass der berechnete Energiebedarf geringere Abweichungen zum realen Energieverbrauch aufweist.

Das Cambridge Housing Model (CHM) [120] nutzt den SAP-2009 Algorithmus zur Abschätzung des Energiebedarfs in England und UK. Es basiert auf den English Housing Survey Daten bestehend aus 16150 Gebäudedatensätzen. In der Veröffentlichung werden vor allem Untersuchungen zu den Sensitivitäten des Modells vorgenommen.

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

In [144] wird das in EN 832 (Stand 1992) definierte Verfahren zur Berechnung des jährlichen Energiebedarfs verwendet, um ein bottom-up-Modell für den Gebäudebestand zu erstellen. Hierbei wurde bereits rudimentär der Sanierungsstand der Gebäude berücksichtigt. In diesem Modell wurden das erste Mal 160 Referenzgebäude verwendet, die aus Baualterklassen und Nutzungskategorien entstanden, im Gegensatz zu den Typgebäuden, die im IKARUS Teilprojekt 5 entwickelt wurden. Zugleich wurde hier ein top-down-Modell erstellt, welches Massen-, Energie- und Geldströme durch Produktionsstatistiken und input-output-Matrizen berechnet. Der Vergleich der beiden Modellergebnisse zeigt relativ große Abweichungen. Es wurden auch szenarische Untersuchungen zum langfristigen Verhalten des Gebäudebestands bis 2020 unter Berücksichtigung von Neubau, Ersatzneubau und Abriss erstellt.

Ein GIS-basiertes Modell, mit welchem der Heizwärmebedarf von Gebäuden mittels DIN 18599 voll automatisiert berechnet wird, wird in [82] vorgestellt. Grundlagen dieses Modells sind neben den GIS-Geometriedaten das Baualter, die Gebäudenutzung, der Gebäudetyp und weitere Informationen wie Geschosshöhe oder Sanierungsjahr, die zur Verfeinerung genutzt werden können. Es können Daten aus der Deutschen Gebäudetypologie des IWU für die Bauteilaufbauten genutzt werden. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt in der Simulationssoftware INSEL nach dem Monatsbilanzverfahren DIN V 18599-2 für jedes Gebäude. Der errechnete Wert wird mit einem empirischen Nutzungsfaktor [20] korrigiert. Es wurden auch Vergleiche mit Verbrauchsdaten angestellt, hierbei lag die durchschnittliche Abweichung bei unter 20 %. Generell lag der Bedarf oberhalb des Verbrauchs, nur bei sehr effizienten Gebäuden war dies umgekehrt. Gründe hierfür sind u.a. größer angenommene beheizte Volumen und Nutzflächen, keine Berücksichtigung der Nutzungsarten einzelner Räume, pauschal festgesetzte Heizbetriebstemperatur und -dauer sowie die Abschätzung des Luftwechsels durch Infiltration und natürliche oder mechanische Lüftung.

Das Modell der HFT Stuttgart wurde weiterentwickelt im Projekt SimStadt [195]. Hier kommt zur Berechnung des Heizwärmebedarfs das europäische Rechenverfahren ISO 13790, das dem Verfahren aus DIN V 18599 entspricht, mit einigen Vereinfachungen zum Einsatz, welches in der Simulationssoftware INSEL implementiert wurde. Im Rahmen dieser Fortführung wurden auch Unsicherheitsbetrachtungen durchgeführt, mehr dazu in Kapitel 7. Zusätzlich wurden die Kosten für Sanierungsmaßnahmen berechnet und mittels der GIS-Software für jedes Gebäude dargestellt. Weiterhin wurde dieses Modell auch im größeren Maßstab in einem Stadtteil von Ludwigsburg mit mehr als 14000 Gebäuden eingesetzt und hierfür Auswirkungen der Datenverfügbarkeit und daraus resultierenden Modellergebnisgenauigkeiten diskutiert [196].

Das unter den GIS-basierten Modellen genauer beschriebene GEKIS [124] nutzt das stationäre Heizperiodenbilanzverfahren aus DIN 4701.

Das Programm GOSOL [101] nutzt stationäre Energiebedarfsberechnungsmethoden gemäß DIN 18599, DIN 4108 und DIN 4701, um den Energiebedarf eines Gebiets zu ermitteln. Hierfür wird ein Modell genutzt, welches die Topographie eines Gebiets, die vorhandenen Gebäude zur Verschattung, Neubauten mit solaren und energetischen Eigenschaften sowie

Vegetation mit unterschiedlicher Belaubung berücksichtigt. Dieses nutzt Baukörperstypen, um schnell große Gebiete untersuchen zu können. Insbesondere werden durch GOSOL die thermischen und photovoltaischen Solargewinne bilanziert, wodurch eine Gesamtenergiebilanz mit Heizen, Brauchwasser und Strom für ein Gebiet erstellt werden kann.

In [92], [264] wird das frei verfügbare Tool District ECA vorgestellt. Dieses umfasst u.a. ein DIN 18599 basiertes Distriktsmodell, mit dem Abschätzungen zum Energiebedarf des Distrikts erstellt werden können. Es können auch Untersuchungen hinsichtlich lokaler Stromerzeugung durch PV oder Wind durchgeführt werden.

Ein auf der in ISO 13790 beschriebenen Energiebedarfsberechnung basierendes Quartiersmodell wird in [115] vorgestellt. Dieses beinhaltet neben energetischen Betrachtungen auch ein Lebenszyklusanalysemodul sowie ein Lebenszykluskostenmodul. Das Modell untersucht Wohngebäudequartiere und basiert auf TABULA Gebäudetypologiedaten und den TABULA-Sanierungsvarianten. In einer Fallstudie wurde es auf einen Distrikt in Karlsruhe Rintheim angewandt, um Untersuchungen zu unterschiedlichen Wärmeerzeugern für Nahwärme durchzuführen. Da das Modell für sehr frühe Planungsphasen gedacht ist, werden nur wenige Daten für die Modellierung benötigt. Es wird argumentiert, dass einfache Berechnungsverfahren für die Planung ausreichend sind, da es darum gehe, generelle Trends zu erkennen und durch das unsichere Nutzerverhalten genaue Aussagen unmöglich seien, sondern nur Abschätzungen ermittelt werden können.

Zuletzt wird das am Zentrum für nachhaltiges Bauen (ZNB) der Technischen Universität München (TUM) entwickelte und in dieser Dissertation fortgeführte Modell Energiemodellierung Multiskalar (EmMi) vorgestellt. Dieses basiert in seiner stationären Version auf der Methodenentwicklung zur Abbildung von Sanierungen aus [187], in welcher Lebensdauern von Bauteilen durch Normalverteilungen angenommen werden und daraus Sanierungszeitpunkte ermittelt werden, welche mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten zur energetischen Verbesserung eines Bauteils genutzt werden können. Dies wurde zuerst für die Gebäude einzelner Landkreise des Freistaats Bayern umgesetzt. Für das Projekt „Energetische Gebäudesanierung in Bayern“ [188] wurde das Verfahren dann auf alle Landkreise Bayerns erweitert [189] und es wurden Untersuchungen zur Auswirkung des Einsatzes unterschiedlicher Anlagentechniken und derer Energieträger integriert. Die Energiebedarfsberechnungen erfolgten hierbei mit dem Heizperiodenbilanzverfahren und entsprechenden Anlagenaufwandszahlen. Zusätzlich wurden Kosten für die Sanierungsmaßnahmen errechnet. Für das Projekt „Stadtlabor Nürnberger Weststadt“ [191] wurde das Verfahren mit detaillierteren Daten der Stadt Nürnberg auf das Monatsbilanzverfahren umgestellt, hierdurch konnten die zur Verfügung gestellten GIS-Informationen wie Anbausituation und Orientierung der Gebäude berücksichtigt werden. Außerdem wurde eine vereinfachte Berechnung des Energiebedarfs der Nichtwohngebäude hinzugefügt. Mittels vorgegeben Fernwärmenutzungszeitreihen wurden die monatlichen Ergebnisse auf stündliche Resultate skaliert, um damit die Kopplung mit dem Modell URBS [106], welches die Energieangebotsseite modelliert, zu ermöglichen. [190]

### **6.3. GIS-basierte Modelle**

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Modelle nutzen Daten mit Ortsbezug wie z.B. Katasterdaten (ALKIS-Datenbank), Gebäudeumrisse (LoD1) oder dreidimensionale Gebäudemodelle (LoD2 und höher), zumeist angereichert um semantische Daten wie Baualtersklassen, Gebäudenutzung oder beheizte Fläche. Eine Erörterung der in Deutschland verfügbaren GIS-Daten wird in A.1 gegeben. Die meisten Modelle verwenden Daten in einem gängigen GIS-Format und eine entsprechende Softwareplattform wie beispielsweise ArcGIS, qGIS oder webbasierte Lösungen. Einige der beschriebenen Modelle sind hauptsächlich als Datenaustauschplattform ohne eigene Berechnungsmodule gedacht, hier erfolgt die Berechnung beispielsweise des Energiebedarfs in anderen Programmen. Streng genommen könnten auch die GIS-Datenformate wie Shape oder CityGML hier aufgeführt werden, da sie schon den Austausch von unterschiedlichsten Daten ermöglichen, ohne eigene Berechnungen durchzuführen. Die GIS-Daten werden im Allgemeinen neben der Nutzung als Gebäudegeometriedatenquelle auch zur Visualisierung der Ergebnisse genutzt, um den räumlichen Bezug der Ergebnisse abzubilden und hiermit beispielsweise die Planung von Sanierungen nach räumlichen Prioritäten zu ermöglichen.

In [212] wird ein GIS-basiertes Tool zur Parametrisierung von EnergyPlus-Gebäudemodellen zur Ermittlung des Energiebedarfs der Gebäude vorgestellt. Zusätzlich werden darin auch Daten zu Solarstrahlungsverteilung auf die Gebäude sowie Untersuchungen zu Schallausbreitung berücksichtigt. Als Besonderheit kann dieses Modell die Gebäude sowohl als Einzonenmodell erstellen, als auch Mehrzonenmodelle erstellen, in denen die Stockwerke den Zonen entsprechen. Daher lässt sich damit eine genauere Verteilung der Heiz- und Kühllasten auf die Stockwerke ermitteln.

Ein GIS-basiertes Tool, welches ausgehend von Gebäudeumrissen und Gebäudetypeigenschaften (Baujahr, Anzahl Geschosse, spezifischer Wärmebedarf) eine Wärmebedarfskarte in einem Raster mit Kantenlänge 200 m erzeugt, wird in [76] vorgestellt. Dieses Modell dient der Erkennung von Flächen mit hohem Wärmebedarf, um dort beispielsweise Sanierungsmaßnahmen durchzuführen oder Nah- bzw. Fernwärmenetze dafür zu planen.

Im Forschungsvorhaben ISIS (Integriertes Semantisches Informationsmodell für den Kontext Energieeffiziente Stadt) wurde ein „explizites Objektmodell als informationstechnologische Basis zur nachhaltigen Verbesserung kommunaler Entscheidungs- und Realisierungsprozesse“ [25, S. 86] entwickelt. Dieses soll in erster Linie dazu dienen, eine ganzheitliche Informationsgrundlage für die verschiedenen an der Stadtplanung beteiligten Prozesse bereitzustellen. Hierzu sollen neben den von GIS-Systemen verwalteten räumlichen und geometrischen Informationen auch semantische Daten in einem Modell verwaltet werden.

Das Projekt GEKIS hat die „Entwicklung eines Gebäudeinformationssystems zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung von bauphysikalischen Gebäudedaten“ [124, S. 316] mit Hilfe von Google Earth zum Ziel. Dieses System wird genutzt, um eine Abschätzung des Energiebedarfs mittels des Heizperiodenbilanzverfahrens gemäß DIN V 4108-6: 2003 zu

erstellen. Die Ergebnisse des Modells werden für unterschiedliche Gebäudetypen mit Verbrauchsdaten validiert.

### 6.4. Statistikbasierte Modelle

Die Gemeinsamkeit der in diesem Abschnitt beschriebenen Modelle ist, dass sie statistische Daten der Verwaltung oder Umfrageergebnisse zur Modellierung nutzen. Die Modellierung ist dementsprechend auch statistischer Natur, d.h. es werden nicht wie bei stationären oder dynamischen Modellen die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse abgebildet, sondern mittels statistischer Verfahren Ergebnisse erarbeitet. Teilweise werden diese Statistikansätze mit analytischen oder physikalischen Modellierungen kombiniert, daher werden einige in anderen Kategorien bereits genannte Modelle hier nochmals aufgeführt und dann auf die jeweils verwendeten statistischen Verfahren eingegangen.

Ein Ansatz zur Ermittlung saisonalspezifischer Tagesprofile zur vom Menschen verursachten Erwärmung durch Gebäude, Transport und Stoffwechsel wird in [223] vorgestellt. Dies ist ein top-down Modell, welches verfügbare Daten zur stündlichen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte, zur Wärmeentwicklung elektrischer Verbraucher und Menschen sowie dem Gasverbrauch als Repräsentant aller Heizungsarten nutzt und die räumlich durchschnittliche Wärmeentwicklung einer Stadt stundengenau aufgelöst ermittelt. Der Ansatz kann auch feinere räumliche Auflösung nutzen und Anwendung beispielsweise in Mikroklimasimulationen finden.

In [24] wird ein GIS-basiertes bottom-up-Modell vorgestellt, welches Lastprofile erzeugt und dabei Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt. Die Lastprofile werden mittels der GIS-Daten räumlich verteilt. Dabei werden vor allem Elektrizitäts- und Gasnetze untersucht. Zusätzlich wird eine über GAMS programmierte Optimierung angekoppelt, mittels der unterschiedliche Szenarien untersucht werden können.

Ein statistikbasiertes Modell zur Berechnung der Auswirkungen dreier unterschiedlicher Szenarien auf den Energiebedarf des norwegischen Gebäudebestands wird in [227] vorgestellt. Dieses Modell nutzt Daten zur Geschossfläche in Verbindung mit Energieintensitäten und variiert diese Zahlen je nach Szenario. Die Szenarien sind: erhöhte Fernwärmenutzung, erhöhte Wärmepumpennutzung und erhöhte Energieeinsparungsmaßnahmen sowie die Kombinationen dieser Szenarien. Das Ergebnis der Berechnungen ist, dass Energieeinsparungsmaßnahmen in jedem Fall sinnvoll sind.

In [26] wird ein im Rahmen des Projekts Carbon Reduction in Buildings (CaRB) entwickeltes bottom-up Nichtwohngebäudemodell für Großbritannien vorgestellt, welches auf Energieverbrauchsdatenerhebungen basiert. Aufgrund der Komplexität der Nichtwohngebäudestruktur wird argumentiert, dass dessen Charakterisierung auf administrativen statistischen Daten sowie auf Umfragen basieren müsse und daher keine physikalische Modellierung eingesetzt werden könne. Das vorgestellte Modell setzt sich aus einem Submodell zur Berechnung der



## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Geschossfläche in den Nichtwohngebäuden und Energieintensitätskoeffizienten zusammen. Die Validierung erfolgt mittels Daten der Studie Digest of UK Energy Statistics von 2004. Es wird festgestellt, dass der Nichtwohngebäudebestand selbst Objekt der wissenschaftlichen Untersuchungen bleiben muss, da hier noch viele Fakten unbekannt sind und daher eine Klassifizierung, wie sie im Wohngebäudebereich vorhanden ist, bisher nicht erstellt werden kann.

Ein statistisches bottom-up-Modell, welches multiple lineare Regression nutzt, um den Gas- und Stromverbrauch der einzelnen Wohngebäude in Rotterdam abzuschätzen, wird in [177] beschrieben. Grundlage hierfür sind Messdaten für Gas- und Stromverbrauch aus Postleitzahlregionen, die mittels Regression auf Gebäudeebene herunterskaliert und unterschiedlichen Endanwendungsarten zugeordnet werden. Die räumliche Verteilung der Gebäude wird über GIS-Daten berücksichtigt.

In [86] werden verschiedene Vorhersagemetamodelle für den Energiebedarf der Wohngebäude einer chinesischen Stadt hinsichtlich ihrer Aussagekraft verglichen. Dabei wurde ein künstliches neuronales Netz als akzeptabelstes Modell mit den kleinen Fehlerraten identifiziert. Die Vorhersagemodelle wurden mit Daten verschiedener Statistiken erstellt. Das Referenzmodell arbeitet mit durch Fragebögen erhobenen Daten, wobei der Umfang der Umfrage unklar ist.

Ein Modell zur Bestimmung der Endenergieverbrauchsintensitäten für Raumheizung, Trinkwarmwasser und elektrischen Energieverbrauch für Raumkühlung und andere Anwendungsarten wird in [117] beschrieben. Die Hauptannahme dieser Modellierung ist, dass die Endenergieverbrauchsarten primär von der Gebädefunktion und nicht von Konstruktionsart oder Alter der Gebäude abhängen. Die Modellierung basiert auf Statistikdaten zum Elektrizitäts- und Gasverbrauch sowie geschätzten Daten zum Ölverbrauch. Die Endenergieverbrauchsintensitäten wurden mittels multipler linearer Regression, angewandt auf Endenergieverbrauchsdaten der Postleitzahlbereiche, ermittelt. Die Ergebnisse für die Stadt New York zeigten Abweichungen von 20%, die für die elektrischen Anwendungen geringer als für brennstoffbasierte Anwendungen war. Dies wurde auf ungenauere Erfassung des Brennstoffverbrauchs und zeitlicher Differenz zwischen Brennstoffbeschaffung und -verbrauch zurückgeführt.

In [181] wird ein raumzeitliches Energiebedarfs-Modell, welches für unterschiedliche räumliche und zeitliche Skalen geeignet ist, vorgestellt und für die Städte Helsinki und Shanghai mit unterschiedlich detaillierten Eingabedaten angewandt. Üblicherweise wird es mit stündlicher Simulation über ein Jahr und räumlicher Auflösung einiger hundert Meter bis zu einigen Kilometern genutzt. Das Modell nutzt drei Verbraucherklassen (Haushalte, Dienstleistung, Industrie) und entsprechende Verbrauchsdaten zur Erzeugung eines Lastprofils der Form  $P(x, y, t)$ . Es fand eine logische Validierung der Lastprofilerggebnisse statt, eine physikalische Validierung mit Smart-Meter-Daten ist geplant. Solange konnten nur die jährlichen Verbrauchszahlen als Vergleich dienen, wobei Abweichungen kleiner 15 % ermittelt wurden.

## 6.5. Energiesystemmodelle

Die folgenden Modelle bilden das gesamte Energiesystem einer untersuchten Region und umfassen immer den Elektrizitäts- und Wärmesektor. Hierbei wird meistens weniger auf eine detaillierte Simulation der Nachfrageseite Wert gelegt, vielmehr werden die notwendigen Aus- und Umbauten am Energiesystem auf Erzeuger- und Verteilerseite untersucht. Die Nachfrage wird zumeist über vorgegebene Zeitreihen abgebildet. Grundlage der Energiesystemmodelle sind Energiebilanzen, die für jeden Zeitschritt erfüllt sein müssen, d.h. die Energieerzeugung muss gleich dem Energiebedarf sein. Speichersysteme können hier also beim Beladen als Verbraucher, beim Entladen als Erzeuger angesehen werden.

Die hier vorgestellten Energiesystemmodelle lassen sich insbesondere zur Optimierung des zukünftigen Energiesystems einsetzen. Optimierungsziel sind hierbei meist die Gesamtkosten des Energiesystems. Für die Modellierung werden in der Regel mathematische Optimierungsprogramme wie GAMS genutzt.

In [17] wird eine räumlich hochaufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme für die Deckung des Niedertemperaturbedarfs vorgestellt. Diese basiert zum einen auf stationärer Energiebedarfsberechnung nach DIN 4701 und andererseits auf einem Flächenmodell zur Abbildung der räumlichen Dimension. Es werden die wirtschaftlichen Potentiale für Nah- und Fernwärmenetzversorgung dargestellt. Dies erfolgt mittels einer Optimierung der Gesamtkosten des Systems.

Das Energiesystemmodell DIP-CEM wird in [156] vorgestellt. Dieses Modell hat die Optimierung der Kosten für das Energiesystem von Gemeinden oder Stadtteilen unter Berücksichtigung von vorgegebenen Restriktionen als Ziel. Dieses Modell wird zur Untersuchung von drei Szenarien in einer Fallstudie der Stadt Waterloo, Kanada eingesetzt.

In [168] und [169] wird der Modellgenerator TIMES vorgestellt. Mit diesem kann man Energiesysteme als ein Netzwerk von Prozessen (Kraftwerksarten u.a.) und Gütern (Energieträger, Ressourcen) abbilden und hinsichtlich einer Zielfunktion wie den Gesamtkosten optimieren. TIMES wird an einer Vielzahl von Forschungseinrichtungen verwendet, um Empfehlungen zur weiteren Entwicklung des Energiesystems zu entwickeln. Die Bedarfsseite ist allerdings generell durch vorgegebene Zeitreihen abgebildet, es lassen sich daher Auswirkungen von beispielsweise Sanierungen der Gebäudehülle nur extern abbilden und dann in das TIMES Modell integrieren.

Das bottom-up Energiesystemmodell Settlement Energy Demand System Optimiser (SEDSO) wird in [155] vorgestellt. Dieses unterscheidet sich von anderen Energiesystemmodellen durch die hohe räumliche Auflösung, für die die Ergebnisse berechnet werden. Diese ist, wie auch schon das Modell in [179], durch die sog. Medium Super Output Area (MSOA) Levels gegeben, damit ergeben sich mehr als 8000 individuelle Gebiete, in die das Vereinigte Königreich aufgeteilt ist. Das Modell kann auch zur Optimierung eingesetzt werden, es verlässt sich auf offizielle Statistikdaten der britischen Regierung zur Ermittlung der Energiebedarfe der unterschiedlichen Sektoren.

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

In [110] wird das Modell Renewable Energy Model-Deutschland (REMod-D) vorgestellt. Dieses Modell bildet den gesamten Elektrizitäts- und Wärmemarkt in Deutschland nach und wird verwendet, um eine Optimierung des Energiesystems hinsichtlich der Kosten zu erreichen. In [202] und [203] wird mit Hilfe dieses Modells ermittelt, dass es technisch möglich wäre, das deutsche Energiesystem auf 100 % erneuerbare Energieerzeugung umzustellen und dadurch die Kosten nach erfolgter Umstellung vergleichbar mit den heutigen Energieerzeugungskosten wären. Allerdings müssen hierfür hohe Energieeffizienzstandards im Gebäudebestand erfüllt sein, um den Wärmebedarf massiv zu senken.

Das Energiesystemmodell URBS [106] nutzt lineare Programmierung, um optimale Speichergrößen und deren Nutzung im Energiesystem unter minimalen Kosten zu ermitteln. Das Modell ist in der Lage, elektrische Netze und Wärmeversorgung inkl. Umwandlungsprozesse abzubilden. Der Energiebedarf wird durch vorgegebene Zeitreihen abgebildet, die zeitliche Auflösung ist normalerweise eine Stunde.

### 6.6. Wirtschaftsmodelle

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Modelle verfolgen einen wirtschaftsorientierten Modellansatz, d.h. es werden Ressourcen- und Geldströme bilanziell abgebildet. Dies erfolgt beispielsweise mittels Input-Output-Rechnung oder den Methoden der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Modelle nach diesem Ansatz untersuchen im allgemeinen diverse Wirtschaftszweige und ermitteln die Wechselwirkungen zwischen diesen. Die hier ausgewählten Modelle haben ihren Fokus auf der Untersuchung von energiepolitischen Entscheidungen und bilden daher den Strom- und Wärmemarkt vergleichsweise detailliert ab.

In [154] wird ein Vergleich der beiden Modelle PANTA RHEI und ASTRA angestellt. Das Modell PANTA RHEI ist ein makroökonomisches Modell und beruht auf den Input-Output-Rechnungen und den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes. Parameter werden durch Zeitreihenschätzung bestimmt. Dagegen basiert ASTRA auf dem Modellansatz System Dynamics, welches ökonometrische Ansätze, aber auch Heuristiken zur Parameterbestimmung nutzt. Beide Modelle ermöglichen die Abschätzung der ökonomischen Wirkungen, die sich durch Einsatz umweltpolitischer Instrumente ergeben.

Das Modell e3.at, ein integriertes Umwelt-Energie-Wirtschafts-Modell, welches an das deutsche Modell PANTA RHEI angelehnt ist, wird in [248] und [249] vorgestellt. Dieses besteht im Kern aus einem Wirtschaftsmodell, welches 57 Wirtschaftszweige durch Input-Output-Rechnung abbildet, und einem Energiemodell, welches den Zusammenhang zwischen ökonomischer Entwicklung, notwendigem Energieeinsatz und den resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen abbildet. Zusätzlich gibt es noch Submodelle für Außenhandel, Materialien, Wohnungsbestand, Verkehr und Außenhandel. Das Wohnungsbestandsmodell hat zum Ziel, den Energieverbrauch zur Wärmeerzeugung unter Berücksichtigung der demographischen Entwicklung, des Sanierungsverhaltens und anderer Faktoren abzubilden. Alle Modelle basieren auf

Bilanzgleichungen. Ergebnisgrößen sind beispielsweise das Bruttoinlandsprodukt, Energiepreise oder CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das Modell ermöglicht Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung dieser Größen.

In [146] und [239] wird die Anwendung des Modells Invert zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Förderpläne für erneuerbare Energieerzeugung demonstriert. Es basiert im Allgemeinen auf Kosten-Ressourcen-Kurven, im gebäuderelevanten Teil auf der Abbildung der Entscheidungsprozesse der beteiligten Akteure und deren Investitionen sowie diverser Restriktionen. Die Ergebnisse sind u.a. öffentliche Ausgaben sowie CO<sub>2</sub> Emissionen und deren Reduktion auf jährlicher Basis.

## 6.7. Dynamische Modelle

Die folgenden Modelle haben als Gemeinsamkeiten, dass sie Gebäudesimulationsprogramme wie TRNSYS oder EnergyPlus mit zeitlicher Auflösung von zumeist einer Stunde nutzen. Daher lassen sich insbesondere auch Fragestellungen hinsichtlich der Anlagentechnik und dem damit verbundenen Lastverlauf hiermit beantworten. Diese Modelle haben im Vergleich zu stationären Berechnungen einen wesentlich höheren Rechenaufwand, können dafür aber Energiespeichervorgänge, welche in stationären Berechnungen nur rudimentär berücksichtigt werden, exakt abbilden. Eine spezielle Variante, die in Abschnitt 6.7.1 genauer erläutert wird, sind RC-Modelle, die auch zu den dynamischen Modellen gezählt werden könnten, aber auf Grund ihrer Modelleigenschaften einen eigenen Abschnitt gewidmet bekommen.

Das bottom-up Modell in [118] basiert auf prototypischen Gebäuden, für welche stündliche Energiebedarfswerte mittels DOE-2 Gebäudesimulationsmodellen ermittelt wurden. Dies wird genutzt, um den Energiebedarf für den gesamten US-Gebäudebestand hochzurechnen und Analysen hinsichtlich Effizienzmaßnahmen in unterschiedlichen Regionen, Baualtersklassen und Gebäudetypen zu erstellen.

In [274] wird ein bottom-up Stadt-Energiesystem-Modell vorgestellt, welches zur Berechnung des thermischen Verhaltens der Gebäude die Weighting-factor-Methode zur Berechnung der Heizlasten nutzt. In diesem Modell wird das Nutzerverhalten über stochastische Prozesse berücksichtigt. Die sich ergebenden Energiebedarfe werden genutzt, um ein Wärmenetzmodell für den Distrikt zu erstellen. Das Modell beschränkt sich dabei auf Geschäftsdistrikte. Dieses Berechnungsmodell wurde in [272] verwendet, um die Distrikte einer Stadt energetisch einzuschätzen und Auswirkungen von unterschiedlichen Sanierungsszenarien zu ermitteln. Dies wird mittels eines Clusterings durchgeführt, welches Distrikte auf Grund ihrer bebauten Struktur in Kategorien einteilt und anschließend für einen repräsentativen Distrikt den Energiebedarf mittels des oben vorgestellten bottom-up Modells für diese Distriktkategorie ermittelt. Daraus wird auf einem Netz aus Kacheln mit einer Seitenlänge von 500 m dann der Energiebedarf der Stadt hochgerechnet. Dies wird genutzt, um in dem Energiesystemmodell

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

die Randbedingungen für ein Wärmenetz zur Verfügung zu haben. In [273] wird dieser Ansatz zur Ermittlung der Auswirkungen von fünf Szenarien auf den zukünftigen Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Geschäftsdistrikts verwendet.

In [232] und [233] wird ein Modell für den Einsatz in Japan vorgestellt, welches für 23 Haushaltstypen kombiniert mit 20 Gebäudetypen stündliche Energiebedarfswerte für Heizung, Kühlung, elektrische Anwendungen und Trinkwarmwasser mittels eines HASP/ACLD Programms berechnet. Hierbei wird insbesondere die unterschiedliche Nutzung der Gebäude auf Grund unterschiedlicher Haushaltstypen und deren Aktivitäten berücksichtigt. Auch Effizienzsteigerungsmaßnahmen der elektrischen Geräte und Dämmmaßnahmen können berücksichtigt werden. Es kann also für Prognoseberechnungen verwendet werden.

Das Programm SUNTool wird in [220] und [219] vorgestellt. Dieses Modell wurde zur Planung nachhaltiger Quartierskonzepte entwickelt. Es nutzt ein eigens entwickeltes Java-Interface zur Erstellung der 3D-Gebäude-Modelle, denen Anlagentechniken und Systeme zur lokalen Energieerzeugung zugeordnet werden können. Standardwerte hierfür basieren auf Gebäudealter und Art der Gebäudenutzung und können für jedes Gebäude angepasst werden. Für das Quartiersmodell wird eine Mikroklima- und Strahlungssimulation durchgeführt, deren Ergebnisse als Randbedingungen für die thermische Simulation der Gebäude, welches einen grey-box-Ansatz nutzt, verwendet werden. Physikalisch werden die Wärmeströme abgebildet, welche anschließend mittels Modellreduktion zu einem black-box Modell mit schneller Ausführungszeit zu Transferfunktionen konvertiert werden. Alle vom Nutzerverhalten beeinflussten Vorgänge werden stochastisch modelliert. Nachfolger von SUNTool ist das unten vorgestellte Programm CitySim.

Das in [109] vorgestellte bottom-up-Modell basiert auf prototypischen Gebäuden, die als Simulationsmodelle in der Software DOE-2 in Verbindung mit eQuest erstellt wurden. Die vorhandenen Gebäude wurden mittels GIS diesen Gebäudetypen zugeordnet. Die Simulationsmodelle erzeugen stündlich aufgelöste Lastprofile, welche für das untersuchte Gebiet aggregiert werden. Diese aggregierten Daten wurden mit top-down-Daten des Gebiets verglichen. Die Abweichungen der monatlichen summierten Werte bewegen sich dabei im einstelligen Prozentbereich. Bei den über alle August- bzw. Januartage gemittelten stündlichen Werten ergaben sich hingegen relative große zeitliche Abweichungen der Lasten. Eine in der Studie erwähnte Hausforderung war die Erstellung realistischer Betriebsschemata für die Gebäudetechnik, welche auf Basis der Gebäudetypen zu Ungenauigkeiten führt, da Gebäude des gleichen Typs teilweise unterschiedlich genutzt werden können.

In [251] wird das Modell Canadian Hybrid Residential End-use Energy and Emissions Model (CHREM) zur Abschätzung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des kanadischen Wohngebäudebestands unter Berücksichtigung von Modernisierungsmaßnahmen vorgestellt. Dieses nutzt 17.000 Typgebäude, die den kanadischen Gebäudebestand statistisch repräsentieren. Der jährliche Energiebedarf für Haushaltsgeräte und Beleuchtung sowie für Trinkwarmwasser werden durch ein neuronales Netzwerk, d.h. eine statistische

Modellierung, abgebildet. Der Heizwärmebedarf wird durch eine physikalische Modellierung mittels des Simulationsprogramms ESP-r ermittelt.

Das Belgrade Domestic Energy Model (BEDEM) wird in [136] vorgestellt. Es ist angelehnt an das BRE Domestic Energy Model [4], nutzt aber TRNSYS statt stationärer Wärmebilanzgleichungen zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs für die Gebäudetypen. Daher lassen sich auch Nutzerprofile hiermit detaillierter abbilden. Das Modell wird genutzt, um Vorhersagen zum Energiebedarf des Wohngebäudebestandes in Abhängigkeit von Sanierungsmaßnahmen in unterschiedlichen Szenarien zu berechnen. Weiterhin wurden Sensitivitätsanalysen an dem Modell durchgeführt, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird.

Das Modell UMI [215] basiert auf einer Kombination der Programme Rhinoceros, EnergyPlus und Radiance. Es nutzt die CAD-Software Rhinoceros zur Erzeugung von Gebäudegeometrien. Daraus werden die EnergyPlus Dateien erzeugt und damit der Energiebedarf in EnergyPlus simuliert. Radiance wird für Tageslichtuntersuchungen genutzt. Darüber hinaus können Personenmobilitätsanalysen damit durchgeführt werden. Das Programm ermöglicht somit die Beantwortung energetischer, tageslichtbezogener, außenkomfortbezogener und fußgängerbezogener Fragestellungen. Die Anlagentechnik wird aber derzeit nur durch ideale Heizer und Kühler abgebildet, daher lassen sich keine Aussagen zum Einsatz unterschiedlicher Anlagen damit erarbeiten.

In [138] wird ein Modelica-basiertes Modell zur Energiebedarfsberechnungen von Gebäuden vorgestellt, welches die physikalischen Prozesse wie Wärmeleitung, Wärmespeicherung, lang- und kurzwellige Strahlungsprozesse und Konvektion sehr detailliert abbildet. Um dieses für ein Stadtmodell einsetzbar zu machen, werden Vereinfachungen wie Linearisierung des langwelligigen Strahlungsaustausches, äquivalente Gebäudehüllen (d.h. Wände und Decken werden zu einem Bauteil zusammengefasst, die enthaltenen Fenster werden zusammengefasst) und vorberechnete Transmissionsgrade für die Fenster verwendet. Weiterhin wird eine Möglichkeit zur Reduktion der Modellordnung vorgestellt, welche die Rechenzeit über die oben genannten Vereinfachungen hinaus weiter reduziert. Die Auswirkungen der Vereinfachungen und Modellordnungsreduktion werden anhand zweier Fallbeispiele erläutert, so ergeben sich bzgl. des jährlichen Energiebedarfs Abweichungen von 1 % und maximale Abweichungen von weniger als 7 % bzgl. der stündlichen Werte. Dafür reduziert sich die Rechenzeit vom detaillierten auf das reduzierte Modell um den Faktor 700 auf ca. eine Sekunde. Dadurch ergeben sich Einsatzmöglichkeiten dieses Modells für Stadtmodelle.

Ein Modell zur Abschätzung der Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen auf Energiebedarf und thermischen Innenraumkomfort mittels dynamischer Gebäudesimulation wird in [178] beschrieben. Grundlage hierfür sind GIS-Daten der Stadt Rotterdam, mittels derer 16 Prototypgebäude identifiziert wurden, die mit EnergyPlus-Gebäudemodellen instationär simuliert werden. Validiert werden die Gebäudemodelle mithilfe von Vergleichen zu Werten aus vorherigen Studien. Die unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen werden für die Prototypen implementiert und dann für die gesamte Stadt hochgerechnet. Insbesondere kann mit diesem Ansatz das Risiko für Überhitzung durch Sanierungsmaßnahmen ermittelt werden.

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Das in [89] vorgestellte Modell koppelt zwei bottom-up Ansätze. Einen statistischen Ansatz zur Approximierung jährlicher Energiebedarfswerte und einen physikalischen Ansatz, welcher die „simple hourly dynamic method“ aus ISO 13790 zur Abbildung der dynamischen stündlichen Heiz- und Kühllasten umsetzt. Zielsetzungen des Vorhabens sind u.a. die Ermittlung des Abwärmepotentials sowie die Identifikation sinnvoller Sanierungsmaßnahmen und Nah- bzw. Fernwärmenetzeinrichtungen. Die Kopplung funktioniert über eine Mittelwertbildung der Resultate der beiden Ansätze in den einzelnen Nutzungsarten und anschließender Reskalierung der dynamischen Lasten. Ein 4D-Interface ermöglicht die grafische Darstellung der Ergebnisse und leichte Interpretation. Eine Validierung des Ansatzes erfolgte über empirische Daten und mittels Vergleichsmodellen. Hierbei wurden auf Gebäudeebene Abweichungen zwischen 4 % und 66 % ermittelt, für aggregierte Ergebnisse Abweichungen zwischen 8 % bis zu 99 %.

In [119] wird ein Modell vorgestellt, welches instationäre Einzelgebäudesimulation in EnergyPlus zur Energiebedarfssimulation mit einer Anlagen- und Verteilnetzsimulation für die Abbildung der Energieversorgung eines Distrikts über die Plattform BCVTB koppelt. Diese Kopplung ermöglicht es, die Simulationsrechnungen auf einzelne CPU-Kerne zu verteilen. GIS wird zur Datenverwaltung genutzt. Angewandt wird das Modell als Fallbeispiel auf einen 2000 Gebäude umfassenden Distrikt.

### 6.7.1. Widerstand-Kapazitäts-Modelle

In diesem Abschnitt werden Modelle, die für die Berechnung des thermischen Verhaltens sog. Widerstands-Kapazitäts-Modelle (RC-Modell) einsetzen, vorgestellt. Die Idee dieser Modelle ist, dass die Wärmetransportmechanismen analog zu Widerständen in elektrischen Schaltkreisen und Wärmespeicherfähigkeit analog zu Kondensatoren betrachtet werden können. Diesen Modellen ist gemein, dass sie auf Grund ihrer einfachen Struktur sehr schnelle Rechenzeiten ermöglichen. Dabei wird aber zumeist nur der Wärmebedarf eines Gebäudes abgebildet, anlagentechnische Details sind in den reinen RC-Modellen nicht vorgesehen. Eine beispielhafte Definition solch eines RC-Modells ist in VDI Richtlinie 6007 zu finden.

In [247] wird ein Modell vorgestellt, welches die Gebäude eines Stadtteils jeweils durch drei Widerstände und zwei Kapazitäten abbildet, die Anlagentechnik wird nicht berücksichtigt. Dies ermöglicht sehr schnelle Simulationszeiten. Der Sanierungszustand der Gebäude wird durch statistische Verfahren ermittelt. Das Modell wird in einer Fallstudie auf einen Distrikt bestehend aus 200 Gebäuden angewandt, in dem die Baualtersklassen und Gebäudetypen bekannt sind. Auch der Sanierungsstand der Gebäude ist bekannt. Dieses Modell wird für Sensitivitätsanalysen verwendet, Details hierzu siehe Kapitel 7.

Ein Stadtquartiersmodell auf Basis des thermischen RC-Modells aus VDI 6007 wird in [95] beschrieben. Die einzelnen Gebäudemodelle werden hierbei durch ein Netzmodell gekoppelt

und ermöglichen somit Aussagen zum dynamischen elektrischen und thermischen Lastverhalten aller Gebäude im Stadtquartier. Das Nutzerverhalten wird vereinfacht über Tagesprofile für Werkzeuge und Wochenendtage definiert. In [94] werden die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen, welche den Wärmebedarf reduzieren, auf den Volumenstrom innerhalb eines Fernwärmenetz dargestellt.

Das in [221] vorgestellte Modell CitySim nutzt ein RC-Modell, um das thermische Verhalten der Gebäude in einem Block bestehend aus wenigen Gebäuden bis hin zu einer ganzen Stadt mit mehreren zehntausend Gebäuden abzubilden. Dieses RC-Modell wurde mit Simulationen aus ESP-r verglichen. Für die Berechnung der solaren Einstrahlung auf die Gebäudeoberflächen wird der Simplified Radiosity Algorithm eingesetzt, wobei besonderes Augenmerk auf die notwendige Sichtfaktorberechnung gelegt wurde. Diese werden auch für die langwelligen Strahlungsprozesse genutzt. Zur Abbildung des Nutzerverhaltens sind verschiedene deterministische und stochastische Modelle vorgesehen. Die Heizungs-, Lüftungs- und Speichertechnik wird vereinfacht abgebildet. Zum Import der Gebäudegeometrie können 3D-Daten genutzt werden, der Sanierungszustand der Gebäude wird manuell festgelegt. Das Modell wurde mittels BESTEST sowie mittels gemessener Verbrauchsdaten des EPFL Campus Geländes validiert [263].

In [211] wird die Plattform MEU beschrieben, ein webbasiertes Tool zur Entscheidungsfindung bei Energiemanagement- und Energieplanungsfragen in Städten. Diese Plattform sammelt die relevanten Daten in verschiedenen Detailstufen und erlaubt eine georeferenzierte Darstellung der Daten. Jährliche Verbrauchswerte werden zur Performancebewertung eingesetzt. CitySim wird zur Berechnung des Energiebedarfs der Gebäude eingesetzt.

## 6.8. Parallelisierte Modelle

Die folgenden Modelle haben gemeinsam, dass sie Gebäudesimulationen parallel laufen lassen. D.h. es werden einzelne Gebäudesimulationsmodelle aufgesetzt und diese laufen auf einem oder mehreren Computern gleichzeitig. Dabei gibt es keinen Informationsaustausch zwischen den Modellen. Modelle mit Informationsaustausch werden im folgenden Abschnitt 6.9 behandelt.

In [175] wird ein Verfahren zur Nutzung von OpenStudio in Verbindung mit EnergyPlus auf einem Amazon Elastic Compute Cloud Service vorgestellt. In dieser Veröffentlichung wird das Verfahren zur Kalibrierung des Simulationsmodells eines einzelnen Gebäudes durchgeführt, insbesondere wird hier also kein Stadtmodell eingeführt. Aber dies zeigt die Möglichkeiten, die sich durch kommerzielles Cloud Computing ergeben.

Das Modell CHREM [251] nutzt eine selbst erstellte Perl-Skriptsammlung, um die ESP-r Modelle auf zwei Computersysteme mit jeweils 8 CPU Kernen zu verteilen und dadurch die Simulationszeit zu reduzieren.



## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

Das in [42] vorgestellte Modell nutzt die Plattform jEPlus zum parallelisierten Simulieren von EnergyPlus-Modellen zur Ermittlung von Sensitivitäten. Diese ist Java-basiert und ermöglicht es, ein Parametersampling vornehmen zu lassen. Da dieses Modell nur für Einzelgebäude verwendet wird, ist es nicht in den Übersichtstabellen aufgeführt.

### 6.9. Gekoppelte Modelle

Gekoppelte Modelle sind dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Simulationstools miteinander verknüpft genutzt werden, um eine Simulation durchzuführen. Hierdurch können die Programme in ihrem Bereich ihre Stärken ausspielen und werden durch die Möglichkeiten anderer Programme ergänzt. Die Einzelmodelle laufen dabei parallel und kommunizieren zu bestimmten Zeitpunkten miteinander.

Das Modell in [119], welches bereits bei den dynamischen Modellen beschrieben wurde, nutzt die Plattform BCVTB [266], welche zur Kopplung der Programme EnergyPlus, Dymola, MATLAB/Simulink, Radiance, ESP-r, TRNSYS u.a. eingesetzt werden kann. Mit BCVTB lassen sich vielfältige Kombinationen verschiedener Simulationsprogramme realisieren. Eine Kopplung zwischen EnergyPlus und MATLAB wäre damit möglich. Weitere Informationen hierzu sind in Anhang G angegeben.

In [275] wird ein in EnergyPlus erstelltes Gebäudemodell mit dem in Abschnitt 6.10 beschriebenen Programm ENVI-met per BCVTB gekoppelt, um mikroklimatische Veränderungen im Gebäudemodell berücksichtigen zu können. Hierfür werden die Ergebnisse der Mikroklimasimulation den Außenseiten der Gebäudehülle aufgeprägt. Das größte Problem hierbei ist die lange Rechenzeit für das Mikroklimamodell, welches die Einsatzfähigkeit der gekoppelten Simulation einschränkt.

Die Kopplung des Programms Fluent CFD mit einem RC-Modell in dem Programm Solene wird in [22] beschrieben. Hierbei werden die Wärmeübergangskoeffizienten der Außenwände, die Außenlufttemperatur und der Feuchtemassenstrom aus Fluent an Solene übertragen. Die Oberflächentemperaturen, die absorbierte Strahlung und die Feuchteabgabe werden von Solene an Fluent übertragen. Es wird eine Fallstudie mit einem untersuchten Gebäude in einer Umgebung für einen Simulationszeitraum von einer Woche untersucht.

#### 6.9.1. FMI Modelle

Das Functional Mockup Interface (FMI) ist eine Kommunikationsschnittstelle, mittels derer Simulationsmodelle oder verschiedene Simulationstools gekoppelt werden können. In diesem Abschnitt wird auf die Möglichkeiten für Stadtmodelle, die durch FMI entstehen, sowie für ein Modell, welches FMI nutzt, eingegangen. Genauere technische Informationen zu FMI finden sich in Anhang G im Rahmen der Implementierung von FMI in das Tool EmMi-transient.

FMI wird bisher vor allem von Modelica-basierten Simulationsprogrammen unterstützt, somit lassen sich die auf Modelica basierenden Gebäudebibliotheken wie die auf dem Annex 60 Projekt [267] basierende Buildings Bibliothek [265] für die Erstellung von Gebäudemodellen nutzen. EnergyPlus ist das einzige ganzheitliche thermische Gebäudesimulationsprogramm, das aktuell FMI unterstützt [182] [193].

In [254] werden drei Ansätze zur Simulation eines Gebäudes inklusive seiner Umgebung vorgestellt. Als erstes wird eine Simulation nur in EnergyPlus mit Abbildung der umgebenden Gebäude als Verschattungsobjekte durchgeführt. Als zweites wird das thermische Modell in CitySim [221] zur Simulation des Gebäudes genutzt. Und schließlich wird ein mittels FMI gekoppeltes EnergyPlus/CitySim-Modell beschrieben. Dies ist als Proof of Concept zur Umsetzung der verwendeten Toolchain zu verstehen. Datengrundlage für die Modelle in beiden Programmen ist jeweils ein BIM-Modell sowie gleiche Wetterdaten. Die FMI-Kopplung erfolgt mittels Export des EnergyPlus Modells als FMU unter Benutzung des EMS von EnergyPlus zur Definition der auszutauschenden Variablen. EMS wird auch zur Aggregation von Werten genutzt, da das EnergyPlus Modell mehr Details als das CitySim Modell beinhaltet.

Prinzipiell ist mittels FMI auch eine Verteilung von Einzelmodellen auf mehrere Computersysteme möglich und ermöglicht somit die Nutzung von Computer Clustern bzw. Cloud Computing Diensten, allerdings wurden hierzu im Rahmen der Recherche keine Modelle gefunden, die dies umsetzen.

## 6.10. Sonstige Modelle

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modelle lassen sich keiner der vorherigen Kategorien zuordnen.

In [236] und [23] wird die Softwareplattform „City Life Cycle Management“ (CLM) vorgestellt, welche eine ganzheitliche Betrachtung einer Stadt ermöglichen soll und damit langfristige Auswirkungen von Eingriffen in dieses hochkomplexe System bewerten soll. Dies basiert auf szenarischen Betrachtungen, in denen verschiedene mögliche Entwicklungen dargestellt werden können. Die Wechselwirkungen unterschiedlicher Entscheidungen werden dargestellt und liefern somit eine Entscheidungsgrundlage für alle am Stadtplanungsprozess Beteiligten. Zukünftig sollen neben den bereits abgebildeten ökologischen Indikatoren auch sozioökonomische Indikatoren abgeleitet werden, so dass eine nachhaltige Entwicklung ermöglicht wird. Aus den verfügbaren Veröffentlichungen zu CLM ist nicht ersichtlich, welche Verfahren im Einzelnen für die Simulation eingesetzt werden, daher wird dieses Modell keine Kategorie zugeordnet.

Das Programm ENVI-met [27] wurde ursprünglich für Mikroklimasimulationen im Außenraum entwickelt. Daher können hiermit Untersuchungen beispielsweise zum Wärmeinseleffekt angestellt werden, deren Ergebnisse anschließend als Randbedingung für thermische Gebäudesimulationen genutzt werden können, indem Klimadatensätze entsprechend angepasst wer-

## 6. Existierende energetische Stadtmodelle

den. Aufgrund des großen Rechenaufwands für Mikroklimasimulationen wird meistens nur ein Zeitraum von einem oder wenigen Tagen simuliert und nicht wie bei thermischen Gebäudesimulationen ein ganzes Jahr. In neueren Versionen bietet das Programm auch die Möglichkeit, beispielsweise Auswirkungen von Vegetation und Schadstoffausbreitung zu untersuchen, sowie auch die thermische Hülle von Gebäuden und deren Wärmeströme mit in die Untersuchung aufzunehmen. Es wurden vielfältige Validierungen des Modells durchgeführt [83] [253] [104].

### 6.11. Bewertung der Modelle

Die in der Literatur gefundenen Modelle wurden jeweils für die Untersuchung spezifischer Zielgrößen für ein Quartier wie Energiebedarf für Beheizung oder dem thermischen Komfort, oder für unterschiedliche Aufgaben wie die Prognose zukünftigen Primärenergiebedarfs, CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Optimierungsaufgaben des Energiesystems entwickelt. Bei den meisten Programmen steht auch eine schnelle Rechenzeit im Vordergrund, daher sind vor allem einfache Rechenverfahren zur Bestimmung des energetischen Verfahrens, wie die stationären Verfahren oder RC-Modelle, im Einsatz. Die Vereinfachungen, die durch diese Verfahren vorgenommen werden, sind bei einer umfassenden Sensitivitätsanalyse hinderlich, da somit vereinfachte Parameter nicht mehr hinsichtlich ihres Einflusses analysiert werden können. Bei den stationären Verfahren kommt noch hinzu, dass hiermit keine Aussagen zum dynamischen Lastverlauf und damit den Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energieerzeugungssysteme, die stark schwankende Erzeugungsprofile haben, möglich sind.

In praktisch allen Modellen kommen Gebäudetypen zum Einsatz, die zumeist aus Gebäudetypologiedaten oder mittels Statistiken erzeugt werden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass in der Realität jedes Gebäude eine Einzelanfertigung ist und es keine Datenquellen gibt, die Informationen über jedes einzelne Gebäude enthalten. Die Sanierung von Gebäuden wird in den meisten Modellen durch Faktoren, die die Energieeffizienzsteigerung quantifizieren, oder durch relative Häufigkeit von Sanierungen bei den Gebäudetypen vorgenommen. Dies ist ebenfalls der mangelnden Datenverfügbarkeit zu Sanierungen auf Einzelgebäudeebene geschuldet.

Eine Validierung der Modelle als Gesamtes ist kaum vorhanden, zumeist wird die Validität der eingesetzten Energiebedarfsberechnungsmethode als Annahme vorausgesetzt. Einige wenige Modelle wurden mit Verbrauchsdaten verglichen. Hierbei besteht grundsätzlich das Problem der realistischen Randbedingungen, die erfasst werden müssten, um die Modelle entsprechend der Realität zu validieren. Die für einige Modelle vorgenommene logische Validierung mit den Ergebnissen anderer Modelle ist fragwürdig, da die Validierung der Vergleichsmodelle nicht unbedingt gegeben ist.

Als Datengrundlage werden in vielen Modellen GIS-Daten eingesetzt, dies ist aufgrund der flächendeckenden Verfügbarkeit dieser Daten auch angebracht. Allerdings besteht hier das

Problem, dass über die geometrischen Daten hinaus kaum semantische Daten in GIS vorliegen. Auch statistische Daten werden vielfach ergänzend eingesetzt, hierbei besteht das später noch ausführlichere beschriebene Problem, dass die Region, in der die Daten ermittelt wurden, meist nicht mit dem untersuchten Gebiet übereinstimmt und daher Unsicherheiten bei der Zuordnung der statistischen Verteilung entstehen.

Die meisten Modelle verfolgen den bottom-up Ansatz und sind damit prinzipiell in der Lage, technologische Neuerungen zu untersuchen. Reine top-down-Modelle werden kaum verwendet und falls doch, dann findet eine Verbindung von top-down Ansätzen mit bottom-up Modellierung statt.

In 11 der 58 Modelle werden neben energetischen Zielgrößen auch ökonomische Betrachtungen angestellt. Insbesondere für Modelle, die als Planungsinstrumente eingesetzt werden, ist aus Sicht des Autors eine Berücksichtigung der Ökonomie unerlässlich, um den an ggf. anstehenden Sanierungen beteiligten Akteuren Investitionsanreize aufzeigen zu können.

Es wurden kaum Modelle gefunden, die eine Kopplung, beispielsweise mittels FMI, von Einzelmodellen verwenden. Dies ist vermutlich den Herausforderungen bei der technischen Umsetzung, der hohen Rechenzeitanforderung sowie dem Mangel an thermischen Gebäudesimulationsprogrammen, die solch eine Kopplung unterstützen, geschuldet.

Aus diesen Feststellungen wurden, neben den der Entwicklung zugrundeliegenden Projekten und den daraus entstehenden Anforderungen, die Ideen für die Entwicklung des Modells EmMi-transient abgeleitet. Dieses wird im Anhang VII ausführlich beschrieben. So wurde als einzig sinnvolle Modellierungstechnik, um technologische Neuerungen untersuchen zu können, der physikalische bottom-up Ansatz identifiziert. Als Datengrundlage stehen flächendeckende GIS-Daten in Verbindung mit Gebäudetypologiedaten zur Verfügung. Für die Untersuchung der Möglichkeiten von erneuerbaren Energieversorgungssystemen ist der Einsatz von dynamischen Gebäudesimulationen notwendig. Aus der daraus resultierenden langen Rechenzeit wird die Notwendigkeit für parallele Berechnung auf mehreren Prozessorkernen bzw. mehreren Computersystemen abgeleitet. Für die Energieversorgungssysteme sind auch Maßnahmen zu untersuchen, die sich nicht auf einzelne Gebäude beschränken, sondern die Gebäude im Quartier als Verbund betrachten. Dadurch wird es notwendig, die Gebäudesimulationen nicht nur parallelisiert, sondern auch miteinander gekoppelt laufen zu lassen. Hierfür ist FMI die geeignetste Schnittstelle, die sich als Standard v.a. im Bereich von Modelica-basierten Simulationsprogrammen etabliert. Ökonomische Betrachtungen wurden bereits in den Vorgängerversionen von EmMi-transient, beispielsweise in [188], angestellt, wurden jedoch in dieser Arbeit auf Grund der Komplexität ausgeklammert. Nichtsdestotrotz ist eine erneute Implementierung der Ökonomie in EmMi-transient für die Zukunft angedacht.



## 7. Sensitivitätsanalyse in Gebäudesimulationen

Für die Übersicht der im Gebäude- und insbesondere Quartierssimulationsbereich bereits verwendeten Sensitivitätsanalysemethoden wurde wie für die Modelle selbst eine Literaturrecherche mittels Web of Science und Google Scholar sowie den diversen Konferenzbänden durchgeführt.

Im Bereich der energetischen Gebäudesimulation wurden vielfältige Untersuchungen zu Parametersensitivitäten angestellt, unter anderem in Reviewartikeln wie [255], der im Folgenden zusammengefasst für das Vorgehen zur Ermittlung von Sensitivitäten wiedergegeben wird.

Das Vorgehen für Sensitivitätsanalysen für energetische Gebäudesimulation folgt üblicherweise folgendem Schema:

- Variation der Eingabeparameter durch eine Samplingmethode
- Erstellung eines Gebäudeenergiemodells mit den entsprechenden Parametern
- Durchführung der Simulation
- Simulationsergebnisse auslesen
- Berechnung der Sensitivitäten
- Darstellung der Sensitivitäten

Die Durchführung dieser Schritte unterscheidet sich je nach Anwendungsfall und Ziel der Untersuchung.

Die Bereiche, in denen die Eingabeparameter liegen, und die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen festzulegen ist ein wesentlicher Schritt, der vor allem vom Anwendungsfall abhängt. Wenn unterschiedliche Varianten eines neu zu errichtenden Gebäudes untersucht werden, so können Gleichverteilungen für die Parameter angenommen werden, da beispielsweise für die U-Werte der Dämmung alle Varianten, die sich aus unterschiedlichen Konstruktionsarten ergeben, gleich wahrscheinlich sind. Wenn dagegen ein vorhandenes Gebäude untersucht werden soll, so ist eine Normalverteilung für die meisten Parameter die richtige Wahl. Hier ist zumeist bekannt, was für einen Wert der Parameter haben sollte. Es kann allerdings durch Verschleiß, ungenaue Faktenlage oder aus andere Gründen zu Abweichungen hiervon kommen.

Die Erstellung des Gebäudeenergiemodells hängt vor allem vom verwendeten Simulationsprogramm ab. Prinzipbedingt sind Programme mit einer reinen grafischen Benutzeroberfläche nur schwer automatisiert anzusprechen, daher werden für Sensitivitätsanalysen zu-

## 7. SA in Gebäudesimulationen

meist Simulationsprogramme mit text- oder konsolenbasierten Eingabemöglichkeiten, wie z.B. EnergyPlus, TRNSYS oder ESP-r verwendet. Alternativ werden vereinfachte Algorithmen, die beispielsweise auf der ISO 13790 [65] basieren, verwendet.

Die Durchführung der Simulation ist meistens der rechen- und zeitintensivste Schritt, hier sind parallelisierte Verfahren, die die Simulation auf mehreren Prozessorkernen oder verschiedenen Computersystemen parallel ausführen können, gefragt.

Das Auslesen der Ergebnisse hängt wieder vom jeweiligen Simulationsprogramm und dessen Ausgabeformat ab, ist aber zumeist unkompliziert, da die Ergebnisdaten in Text- oder Tabellenformaten vorliegen.

Die Berechnung der Sensitivitäten ist im Vergleich zur Simulationsdauer wenig aufwändig, nur bei metamodellbasierten Verfahren kann die Erstellung der Metamodelle mehr Zeit benötigen.

Auf die Ergebnisdarstellung der Sensitivitäten wurde bereits in Abschnitt 5.5 eingegangen.

Auf Grund ihrer einfachen Struktur, Berechenbarkeit und Interpretierbarkeit werden lokale Sensitivitätsanalysen sehr häufig verwendet. Globale Sensitivitätsanalysen werden ebenfalls eingesetzt, hier vor allem Regressionsmethoden, aber auch varianz- und metamodellbasierte Methoden wurden bereits vielfach eingesetzt. Zum Parameterscreening für rechenintensive Einzelgebäudemodelle mit vielen Parametern kommt die Elementareffekt-Methode [186] häufig zum Einsatz, allerdings nach Wissen des Autors bisher immer mit Einzelwerten wie summiertem Heizwärmebedarf als Zielgröße und nicht mit Zeitreihen, wie es in Teil IV eingeführt wird.

Im folgenden Abschnitt 7.1 werden die Untersuchungen zu Sensitivitäten und Unsicherheiten im Bereich von Stadt- und Quartiersmodellen genauer dargestellt. Methodisch relevante Veröffentlichungen zu Untersuchungen an einzelnen Gebäuden werden in Abschnitt 7.2 aufgeführt.

Dabei sind bereits vielfältige Untersuchungen zu Unsicherheiten gemacht worden. Hauptsächlich sind dabei skalare Zielgrößen mittels lokaler oder globaler Methoden untersucht worden, dynamische Zielgrößen wurden nur in zwei Untersuchungen betrachtet.

Für die Berücksichtigung dynamischer Parameter, also Parametern, deren Wert sich während der Simulationszeit verändert, wurden im Bereich der Gebäudesimulation nur wenige Veröffentlichungen gefunden, die sich zum einen mit der Dynamik der klimatischen Randbedingungen befassen und andererseits Parameter als stochastische Prozesse modellieren. Aber Methoden für die Untersuchung des Einflusses von Zeitpunkten, zu denen Ereignisse im Gebäude oder der zugehörigen Anlagentechnik beginnen oder enden, wurden nicht gefunden.

## 7.1. Stadtmodelle

Für das Modell SimStadt wurden in [195] Vergleiche zwischen dem simulierten Energiebedarf und dem realen Energieverbrauch angestellt. Diese ergaben, dass der Energieverbrauch durch die Simulation um 21 % bzw. 7 % überschätzt wurde, je nachdem, ob die Geometriedaten der Gebäude als LoD1 oder LoD2 vorlagen. Diese Abweichungen sind vor dem Hintergrund einer durchschnittlich um 20 % überdimensionierten Anlagentechnik akzeptabel. Die geometrischen Unsicherheiten sind v.a. bzgl. des beheizten Volumens eines Gebäudes groß, da oft die Kellerhöhe, die Geometrie von Treppenhäusern und das Volumen anderer unbeheizter Zonen eines Gebäudes nicht bekannt sind. Aber auch der Fensterflächenanteil kann in vorhandenen GIS-Daten meist nur abgeschätzt werden, daher ergeben sich auch Unsicherheiten bei den solaren Gewinnen. Um diese zu minimieren, wird empfohlen, gebäudetypabhängige Faktoren für den Fensterflächenanteil zu verwenden. Generell konnte eine Korrelation zwischen geometrischen Unsicherheiten und Abweichungen zwischen Energiebedarf und -verbrauch festgestellt werden. Auch thermische Unsicherheiten wurden in den beiden Fallstudien analysiert. So wurde festgestellt, dass die Abweichung bei Verwendung von U-Werten der Gebäudetypologie ca. 20 % beträgt im Vergleich zu weniger als 10 % bei Verwendung detaillierter Daten zu den U-Werten für ein Quartier. Auch die Luftwechselrate wurde als großer Unsicherheitsfaktor ermittelt. Als weitere Unsicherheitsquelle stellte sich das Nutzerverhalten, welches Einfluss auf Heizbetriebszeiten, Raumsolltemperaturen oder andere Parameter hat, heraus. Allerdings wurde auch festgestellt, dass das Nutzerverhalten zwar für den Vergleich von Energiebedarf und -verbrauch einen gewissen Einfluss hat, für strategische langfristige Untersuchungen zum Energiebedarf eines Quartiers aber nur eine untergeordnete Rolle spielt, da hier davon auszugehen ist, dass in jedem Fall Änderungen am Nutzerverhalten auftreten.

In [196] wurden weitere Untersuchungen am SimStadt-Modell durchgeführt. Für den untersuchten Ludwigsburger Stadtteil Grünbühl waren Gasverbrauchsdaten verfügbar, daher erfolgte ein Vergleich zwischen diesen Verbrauchsdaten, simulierten Energiebedarfswerten mit genauen Gebäudeinformationen und simulierten Energiebedarfswerten mit Gebäudeinformationen aus der Gebäudetypologie. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die simulierten Werte basierend auf Gebäudetypologiedaten den Energiebedarf um 31 % überschätzen, mit genauen Daten hingegen nur um 2 %. Die geometrischen Unsicherheiten zu beheizter Fläche, Abweichungen zwischen LoD1 und LoD2 Daten sowie Abhängigkeit von der Geschosshöhe wurden genauer untersucht. Weiterhin wurden Sensitivitätsanalysen zu den Parametern Sanierungsstand und Fensterflächenanteil durchgeführt. Diese ergaben, dass ungenaue Informationen zum Sanierungsstand zu Energiebedarfsüberschätzungen von mehreren hundert Prozent führen können und daher zumindest das Jahr der Gebäudesanierungen bekannt sein sollte.

Für das in [49] vorgestellte Modell wurden lokale Sensitivitätsanalysen für die Zielfunktion CO<sub>2</sub>-Emission durchgeführt. Untersuchte Parameter waren dabei Außenlufttemperatur, Nutzfläche der Gebäude, U-Wert der Wand, U-Wert der Fenster, Wirkungsgrad des Gaskessels



## 7. SA in Gebäudesimulationen

und mittlere Innenraumtemperatur. Es ergab sich folgendes Ranking: Innenraumtemperatur ( $\sigma_{i,j} = 1,55$ ), gesamte Nutzfläche ( $\sigma_{i,j} = 0,77$ ), Außenlufttemperatur ( $\sigma_{i,j} = -0,61$ ), Gaskesselwirkungsgrad ( $\sigma_{i,j} = -0,48$ ). Der große Einfluss der Innenraumtemperatur wird mit dem Reboundeffekt in Verbindung gebracht. Es wurden auch Untersuchungen zur Linearität des Einflusses der Parameter auf das Modellergebnis angestellt. Diese ergaben, dass in einem Bereich von  $\pm 10\%$  Linearität des Modells für die Parameter Innenraumtemperatur, Außenlufttemperatur und Gaskesselwirkungsgrad gegeben ist aber nicht darüber hinaus. Also können Auswirkungen dieser Parameter nicht durch die normalisierten Sensitivitätskoeffizienten dargestellt werden. Für die Parameter U-Wert der Wand, U-Wert der Fenster und Nutzfläche gilt Linearität im gesamten relevanten Definitionsbereich dieser Parameter. Effekte davon können also durch die normalisierten Sensitivitätskoeffizienten abgeschätzt werden. Das Modell wurde auch auf Additivität hin untersucht. Diese ist für Änderungen der Parameter um maximal  $1\%$  gegeben, darüber hinaus ist Additivität nicht gegeben. Daher kann kein einfaches Modell angegeben werden, dass die kumulierten Effekte richtig abschätzt. Weiterhin wurden Unsicherheitsabschätzungen für diese Parameter durchgeführt. Diese ergaben für die CO<sub>2</sub>-Emissionsunsicherheit von  $-4\%$  bis  $15\%$ , für den Gasbedarf Unsicherheiten von  $-7\%$  bis  $23\%$  und für den Strombedarf Unsicherheiten von  $-1\%$  bis  $3\%$ .

In [120] wurde eine lokale One-at-a-time Sensitivitätsanalyse auf das CHM Modell angewandt. Dabei wurde das folgende Parameterranking ermittelt: Innenraumtemperatur, Heizsystemwirkungsgrad, Außenlufttemperatur, Nutzfläche, Geschosshöhe, Heizbetriebszeiten. Der Einfluss der 31 wichtigsten Parameter ist hier meistens nicht linear und für alle Parameter nicht additiv. Zur qualitativen Unsicherheitsbewertung wurde eine Übersicht erarbeitet, die die verschiedenen Unsicherheitsquellen für das Modell aufzeigt. Quantitativ wurden für die Unsicherheitsbewertung den meisten Parametern Gleichverteilungen mit  $\pm 50\%$ ,  $\pm 30\%$ ,  $\pm 10\%$  zugewiesen, je nachdem ob die Unsicherheit des Parameters als hoch, mittel oder niedrig eingestuft wurde. Die Verteilungen wurden als symmetrisch angenommen, da keine Informationen über Asymmetrien bekannt waren. Nur wenn, wie beispielsweise bei Wirkungsgraden, ein Maximum von  $100\%$  dem entgegensteht, wurden die Verteilungen abgeschnitten. Für jedes Gebäude und jeden Simulationslauf wurden dabei die meisten Parameter unabhängig voneinander ermittelt, d.h. die Parametersamples dafür sind unkorreliert. Nur bei einigen Parametern wie U-Wert der Wände oder Fenster, deren Daten aus einer Datenquelle mit geringem Stichprobenumfang kommen, wurde der Parameterwert für alle Gebäude auf einmal verwendet.

In [121] wurde darüber hinaus das CHM Modell mittels globaler Sensitivitätsanalysemethoden untersucht. Hierbei kamen zum Parameterscreening die Elementareffekt-Methode zum Einsatz, um anschließend mittels einer varianzbasierten Methode quantitative Aussagen über die Varianzen zu ermöglichen. Die Parameterunsicherheiten wurden dabei auf verschiedenen Ebenen des Gebäudebestands angewandt: die unterste Ebene ist das Einzelgebäude, gefolgt von der regionalen Ebene, dann die Ebene der unterschiedlichen Gebäudetypen und -bauklassen und die oberste Ebene ist der gesamte Gebäudebestand. Es wird festge-

stellt, dass sich Unsicherheiten auf niedriger Ebene gegenseitig aufheben, wenn eine ausreichend große Zahl von Gebäuden betrachtet wird. Modellunsicherheiten, also insbesondere Unsicherheiten der verwendeten Algorithmen für die Berechnung, werden von der Untersuchung ausgenommen. Die folgenden Parameterarten werden auf den verschiedenen Ebenen betrachtet: Gebäudedatenunsicherheiten werden auf Grund der Annahme, dass diese nicht systematisch sind, auf Einzelgebäudeebene betrachtet. Die Unsicherheiten der Werte für das SAP Verfahren werden durch je eine Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet und könnten systematisch sein, daher werden sie auf Ebene des Gesamtgebäudebestands angewandt. Ebenso werden die Parameter, die das Nutzerverhalten betreffen, auf Ebene des Gesamtgebäudebestands betrachtet, da hier nur unzureichende Daten vorhanden sind. Klimadatenunsicherheiten werden auf Regionalebene betrachtet, da angenommen wird, dass die Klimadaten für die jeweilige Region repräsentativ sind. Zusätzlich werden auf Gesamtgebäudebestandsebene systematische Konvertierungsunsicherheiten angewandt. Unsicherheiten auf Grund des Samplingverfahrens in der EHS Umfrage, die als Hauptdatenquelle genutzt wird, werden auf der Ebene der Gebäudetypen und Gebäudebaualterklassen angewandt. Diese Parameterunsicherheiten wurden genutzt, um die Unsicherheiten des Gesamtenergiebedarfs der Gebäude im CHM Modell zu mittels einer Monte-Carlo Simulation mit 2000 Simulationsläufen zu bestimmen. Dabei wird ein Mittelwert von 542 TWh mit einem 95 % Konfidenzintervall von 215 TWh ermittelt.

Zur Identifikation der einflussreichsten Parameter wird in dieser Untersuchung eine Elementareffekt-Analyse durchgeführt, welche folgendes Ranking ergibt: U-Wert Wand, Innenraumsolltemperatur, Dach U-Wert, Fenster U-Wert, Außenlufttemperatur, Boden U-Wert, Heizsystemwirkungsgrad, Fensterorientierung, Heizbetriebszeiten, Speicherfähigkeit der Innenwände. Nur die drei Parameter Außenlufttemperatur, Heizsystemwirkungsgrad und Fensterorientierung haben dabei hohe  $\sigma$ -Werte und könnten daher nicht-lineare Effekte oder Interaktionen mit anderen Parametern aufweisen. Allerdings wird festgestellt, dass diese hohen  $\sigma$ -Werte teilweise auch durch Gruppensamplingeffekte zustande kommen können. Die Elementareffektergebnisse wurden genutzt, um ein vereinfachtes Modell, in dem nur noch die neun einflussreichsten Parameter Unsicherheiten aufweisen, zu erstellen. Die Unsicherheitsanalyse wurde für dieses vereinfachte Modell mit den Unsicherheiten des detaillierten Modells verglichen und hatte sehr gute Übereinstimmungen, daher konnte für die weiteren varianzbasierten Betrachtungen das vereinfachte Modell verwendet werden. Für die varianzbasierte Sensitivitätsanalyse wurde LHS verwendet, insgesamt waren 45000 Modellläufe notwendig. Das sich ergebende Parameterranking ist ähnlich dem Parameterranking der Elementareffekt-Methode. Quantitativ ergibt sich, dass Wand U-Werte und Innenraumsolltemperatur für 84 % der Modellvariation verantwortlich sind, wenn noch die U-Werte für Dach, Fenster und Boden hinzugenommen werden sogar 96 %. Als Empfehlung aus der globalen Sensitivitätsanalyse wird für die Zukunft die genauere Ermittlung von typischen U-Werten und Solltemperaturen abgeleitet. In der Diskussion wird festgestellt, dass die globale Sensitivitätsanalyse andere Parameter als am einflussreichsten ermittelt als die lokalen Sensitivitätsanalysemethoden. Es werden vor allem weniger Parameter als sehr einflussreich ermittelt. Auf Seiten der lokalen Sensitivitätsanalysemethoden liegt dies vor allem daran, dass die Unsicherheitsbereiche der

## 7. SA in Gebäudesimulationen

Parameter nicht berücksichtigt werden können, sondern nur der Einfluss um den Basispunkt herum betrachtet wird. Daher sind lokale Sensitivitätsanalysemethoden nicht sinnvoll für die Ermittlung der Einflüsse von Parametern in Stadtmodellen einsetzbar.

Das in [156] vorgestellte Energiesystemmodell unterstützt Intervallparameter, d.h. es können für alle Parameter Intervalle angegeben werden, in denen sie sich bewegen und es wird automatisch ermittelt, welche Ergebnisintervalle sich daraus ergeben. Daher ist hier eine interne Unsicherheitsbetrachtung direkt im Modell integriert.

Das BEDEM Modell wrd in [136] einer lokalen Sensitivitätsanalyse sowie Tests auf Linearität und Additivität unterzogen. Die wichtigsten Parameter hinsichtlich Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission sind mittlere Innenraumtemperatur, Heizsystemwirkungsgrad, Außenlufttemperatur und U-Wert der Fenster. Dabei hängen die Sensitivitäten stark vom jeweiligen Gebäudetyp ab, daher sollten den Autoren zufolge insbesondere für Einfamilienhäuser, bei denen die Variation besonders stark ist, zusätzliche Gebäudetypen definiert und verwendet werden. Der Test auf Additivität zeigt, dass die Parameter in einem 10 %-Bereich als linear beeinflussend angenommen werden können, aber nicht darüber hinaus. Additivität ist im allgemeinen ebenfalls nicht gegeben, es wird allerdings argumentiert, dass wenn Parametereinflüsse linear sind diese ebenfalls als additiv betrachtet werden können, um schnelle Abschätzungen von Effekten wie Senkung der Innenraumtemperatur in Verbindung mit verbesserten U-Werten der Fenster erstellen zu können.

In [273] wird die CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von Kraftwerken in drei Stufen variiert und der Einfluss auf das Modellergebnis untersucht. Weiterhin werden unterschiedliche Technologieszenarien untersucht. Dies kann im weitesten Sinne auch als Sensitivitätsanalyse verstanden werden, allerdings ist diese Methode stark szenariogetrieben und folgt nicht dem üblichen Schema einer Sensitivitätsanalyse.

Zur Beantwortung der Frage nach den zukünftigen Einsatzmöglichkeiten von leitungsgebundenen Wärmenetzen wird in [155] eine globale Monte-Carlo-Sensitivitätsanalyse eingesetzt. Diese erlaubt ein Ranking der Parameter bzgl. ihres SRCC bzw. ihres Einflusses auf das Modellergebnis Gesamtsystemkosten. Das Ranking wurde für eine anschließende Unsicherheitsbewertung des Modells verwendet. Die Parameter wurden dabei alle als unkorreliert und gleichverteilt innerhalb ihrer jeweiligen Intervallgrenzen angenommen. Sofern keine Intervallgrenzen, sondern nur ein Punktwert angegeben werden konnte, so wurde dieser um  $\pm 10\%$  variiert. Die Begründung für den Bereich von  $\pm 10\%$  ist, dass bei größeren Unsicherheiten für solche Punktwerte ernsthafte Zweifel an ihrer Korrektheit angenommen werden müssten.

In [256] wird ein physikalisches bottom-up Modell für Nichtwohngebäude vorgestellt. Das Modell basiert auf EnergyPlus Modellen für unterschiedliche Typgebäude, die jeweils einer globalen Sensitivitätsanalyse mittels SRC und MARS unterzogen werden, um die für das jeweilige Gebäudemodell wichtigsten Parameter zu ermitteln. Das jeweilige Gebäudemodell wird für jedes Gebäude des Gebäudebestands mit unterschiedlichen Werten parametrisiert. Es ergibt sich also eine Verteilung der Parameter für jedes Gebäudemodell. Daher wird hier auch von einem probabilistischen Gebäudemodell gesprochen. Da nicht für alle Gebäude

die Daten vorhanden sind wird mittels linearer Regression ein vereinfachtes Modell erstellt, welches für eine inverse Analyse mittels vorhandener Energieverbrauchsdaten genutzt wird, um die Verteilungen der Parameter zu ermitteln. Vorteile dieses probabilistischen Ansatzes sind, dass die Variabilität der Parameter in einer Gebäudeart abgebildet werden kann und die Ergebnisse, Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Energiebedarfs, daher repräsentativ für den gesamten Bestand dieses Gebäudetyps sind. Der Ansatz erlaubt auch eine flexible Anpassung der Gebäudemodelle an neue Gebäudetypinformationen. Allerdings benötigt das Modell mehr Rechenläufe als ein deterministisches Modell und verlässt sich für die inverse Analyse auf Energieverbrauchswerte, die für jeden Gebäudetyp vorhanden sein müssen. Auch die Korrelation von Parametern muss beim Sampling berücksichtigt werden.

Das in der Veröffentlichung [247] vorgestellte und in der Modellübersicht genauer beschriebene RC-Stadtmodell wird dort auch einer Unsicherheitsbewertung mittels Quasi-Monte-Carlo Ansatzes und Sobol Sequenzen als Sampling Methode unterzogen. Dabei wird die für Konvergenz notwendige Anzahl von Samples untersucht und mittels eines statistischen Kolmogorov-Smirnov Tests eine Mindestzahl von 64 ermittelt. Zielgröße ist der jährliche Heizwärmebedarf. Da keine realen Daten verfügbar sind wird damit überprüft, ob die Ergebnisse des Modells reproduzierbar sind. Weiterhin wird der stündliche Heizwärmebedarf untersucht. Für beide Zielgrößen wird der relative Interquartilsabstand RIQR verwendet. Dieser ist wie folgt definiert:

$$RIQR = \frac{p_{75} - p_{25}}{p_{50}} = \frac{IQR}{Median} \quad (7.1)$$

Hierbei sind  $p_{25}$  und  $p_{75}$  die 25 % bzw. 75 % Quantile und  $IQR = p_{75} - p_{25}$  der Interquartilsabstand sowie  $p_{50}$  das 50 % Quantil, welches auch als Median bezeichnet wird.

Für den jährlichen Heizwärmebedarf ergibt sich ein Wert für RIQR von 0.04. Beim stündlichen Heizwärmebedarf lässt sich feststellen, dass im Sommer, wenn der Heizwärmebedarf gering ist, RIQR ansteigt und generell der dynamische Heizwärmebedarf größere Unsicherheiten aufweist. Daher müssen hier weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Diese sollen auch in Hinblick auf zeitlich veränderliche Parameter wie das Nutzerverhalten erfolgen.

## 7.2. Einzelgebäude

Hopfe beschreibt in [114] die Einsatzmöglichkeiten von Gebäudesimulation in frühen und späten Planungsphasen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und zur Ermittlung von Sensitivitäten. Auch die Optimierung von Gebäuden mit mehreren Zielgrößen und der Berücksichtigung von Unsicherheiten wird behandelt, jedoch nur für Einzelgebäude. Zielgröße der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse sind jährlicher Energiebedarf für Heizen und Kühlen sowie der thermische Komfort repräsentiert durch Über- und Untertemperaturstunden. Als Sensitivitätsindex wird SRRC in Verbindung mit einem Regressionsmodell verwendet. Die Parameter für die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse werden in physikalische, szenarische

## 7. SA in Gebäudesimulationen

und aus dem Design resultierende Parameter unterteilt. Die Sensitivitätsanalyseergebnisse zeigen, dass in den behandelten Fallstudien die Infiltrationsrate der einflussreichste Parameter ist.

In [95] wird eine Sensitivitätsanalyse für ein RC-Modell durchgeführt, dabei erweisen sich die Soll- und Außentemperatur, Infiltration und Luftwechsel als einflussreichste Parameter. Allerdings bleibt dabei unklar, welche Methode für die Berechnung der Sensitivitäten verwendet wurde.

Zwei Unsicherheitsanalysemethoden für ein RC-Modell werden in [127] gegenübergestellt: zum einen eine Monte-Carlo-Simulation, die ein Parametersampling nutzt und damit beliebige Gebäudesimulationsprogramme zur Berechnung verwenden kann. Und zum anderen eine interne Methode, bei der die Unsicherheiten direkt im Modell durch abbilden der Parameter als Zufallsvariablen berechnet werden können. Dieser zweite Ansatz ist allerdings für Gebäudesimulationen nicht relevant, da es keine passenden bzw. nur sehr spezialisierte Programme dafür gibt. Durch eine Betrachtung der notwendigen Rechenoperationen und -zeiten wird festgestellt, dass die interne Methode bei hochpräzisen Anwendungen Potential hat die externe Monte-Carlo-Methode zu übertreffen. Allerdings haben Monte-Carlo und andere externe Methoden den Vorteil, dass sie sich leicht parallelisieren lassen und damit bei gleicher Rechenzeit eine wesentlich größere Sampleanzahl abarbeiten können.

In [39] wird die Eignung von Sobol Sequenzen als Samplingmethode für Monte-Carlo-Berechnungen von Gebäudesimulation mit anderen Samplingmethoden hinsichtlich ihrer Konvergenz untersucht. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass Sobol Sequenzen und auch LHS sehr schnell, d.h. bereits bei einem Stichprobenumfang von 16, konvergieren, andere Verfahren teilweise erst bei einem Stichprobenumfang von 256. In [38] wird darauf aufbauend eine globale Sensitivitätsanalyse mit Zielgröße solarer Deckungsgrad für ein einfaches Gebäudemodell erstellt, die in diesem Fall folgendes Parameterranking ergibt: Luftwechselrate, Innenraumsolltemperatur, Belegungsrate und Massenstrom des Solarkollektors.

Eine Unsicherheitsbewertungsmethode, welche sowohl eine Gebäudesimulation als auch eine Kosten-Nutzen-Rechnung beinhaltet, wird in [40] vorgestellt. Dies wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, welche zur Analyse der Unsicherheiten und für eine Parameterfilterung genutzt wird (vgl. Abschnitt 5.1.4). Zielgröße für die Filterung ist der Kapitalwert. Für die Kosten-Nutzen-Rechnung werden ARIMA Modelle zur Vorhersage der zukünftigen Inflationsraten und Gaspreise verwendet und die Unsicherheiten der das Modell beschreibenden Parameter untersucht. Die Gebäudesimulation wird mit dem gleichen Modell wie in [39] durchgeführt. Es werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet: Betrieb des Gebäudes nur mit einem Gaskessel sowie Betrieb mittels eines Solarthermiesystems zusätzlich zu einem Gaskessel. Es wurde untersucht, ob die Investitionen in das Solarthermiesystem (Kollektor, Speicher, sonstige zusätzliche Aufwendungen) wirtschaftlich sind. Die Haupteinflussfaktoren hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sind auf Seiten der Gebäudesimulation die Luftwechselrate, der Warmwasserbedarf sowie die Anwesenheit von Personen. Allerdings ist der

Einfluss dieser technischen Faktoren auf den Kapitalwert im Vergleich zu den wirtschaftlichen Faktoren Zinssatz, Gaspreis, Investitionskosten und Inflationsrate sehr gering.

In [167] wurde nach Wissen der Autoren das erste Mal eine dynamische Sensitivitätsanalyse-methode, welche die Sensitivitäten als Zeitreihen ermittelt, an einem detaillierte Gebäudesimulationsmodell durchgeführt. Hier wurde auch die Verwendung von gleitenden Mittelwerten zur Glättung der Ergebnisse vorgeschlagen. Dies wurde an dem einfachen Beispiel von feststehenden Verschattungselementen vor einem Fenster demonstriert. Als Sensitivitätsindex wird der SRC verwendet. Eine konventionelle Sensitivitätsanalyse ergibt, dass der Parameter, welcher das horizontale Verschattungselement über dem Fenster beschreibt, den größten Einfluss hat. Ein Plot der stündlichen Sensitivitätsindizes zeigt saisonale Schwankungen sowie viele kurzzeitigen Schwankungen. Durch die Verwendung eines gleitenden Mittelwerts über 24 Stunden werden die stündlichen Schwankungen ignoriert und tageweise Betrachtungen rücken in den Fokus. Daraus ergibt sich, dass im vorliegenden Beispiel ein beweglicher Sonnenschutz sinnvoll wäre. Durch die Verwendung eines gleitenden Mittelwerts über 10 Tage resultiert, dass im Sommer das horizontale Verschattungselement über dem Fenster den größten Einfluss hat. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Ergebnis der konventionellen Sensitivitätsanalyse. Im Winter und insbesondere der Übergangszeit zeigt sich jedoch, dass eine adaptive Sonnenschutzeinrichtung sinnvoll sein könnte, um in Abhängigkeit vom Außenklima die solaren Gewinne maximieren zu können. Problematisch für den dynamischen Sensitivitätsansatz könnten Gebäude mit thermisch aktivierten Bauteilen sein, da die Trägheit des Systems ggf. die Ergebnisse der dynamischen Sensitivitätsanalyse verzerrt.

Ein Konzept zur Zusammenfassung von detaillierten Parametern, sog. Mikroparametern, zu Makroparametern wird in [42] vorgestellt. Ein Beispiel ist der U-Wert als Makroparameter, der sich aus den Mikroparametern Dicke, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübergangskoeffizienten für eine Konstruktion zusammensetzt. Dies resultiert in einer Reduktion der Parameteranzahl für die Sensitivitätsanalyse sowie in einer besseren Vergleichbarkeit des Einflusses der Parameter in der Sensitivitätsanalyse, da die Größenordnungen der Sensitivitäten besser zusammen passen. Diese Methodik wird anhand eines detaillierten EnergyPlus Gebäudemodells für eine Wohnung in Malaga mit 155 m<sup>2</sup> Grundfläche demonstriert. Dabei werden die Parameter aus ihren Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels LHS ermittelt. Die Simulation läuft mittels der Software jEplus [277]. Im Anschluss an die Simulation werden die Werte der Makroparameter ermittelt und dann die Sensitivitätsindizes SRC einmal für alle Parameter und einmal nur für Makroparameter berechnet. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit allen 130 Mikroparametern ergibt, dass Belegung und Wetter die Haupteinflussparameter sind, aber sehr starke Unterschiede in der Größenordnung der SRC-Werte auftreten. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit Makroparametern ergibt ebenso, dass Belegung und Wetter den größten Einfluss haben. Zur Bewertung des Ergebnisses werden diese beiden Parameter daher jeweils fixiert. Im Anschluss erfolgt eine Untersuchung der Einflüsse der weiteren Makroparameter und ein entsprechendes Ranking.

Eine varianzbasierte Sensitivitätsanalysemethodik für Einzelgebäude wird in [6] vorgestellt,

## 7. SA in Gebäudesimulationen

welche sowohl statische als auch dynamische Parameter berücksichtigt. Diese Methodik nutzt Gauß'sche Prozesse, um stochastische Prozesse zu modellieren, die die dynamischen Parameter repräsentieren. Durch ein Sampling, welches ähnlich wie Latin Hypercube Sampling arbeitet, kann die Anzahl der notwendigen Stichproben auf  $2N$  begrenzt werden. Diese Methodik wird auf ein Einzelgebäudemodell angewandt, in dem die statischen Parameter die physikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle darstellen, die dynamischen Parameter zur Untersuchung des Einflusses der Klimadaten Außenlufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit, Direkt- und Diffusstrahlung und Feuchte genutzt werden. Dabei wird eine Stichprobengröße von  $N=1000$  genutzt. Als Zielgröße wird der aggregierte Wärmebedarf verwendet. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass mit Direktstrahlung und Außenlufttemperatur zwei dynamische Parameter sehr einflussreich sind neben dem statischen Parameter Luftdichtheit.

In [204] wird eine Sensitivitätsanalyse mittels Elementareffekt-Methode für das LCA Tool *no-vaEQUER* gekoppelt mit der Gebäudesimulation *COMFIE* vorgestellt, um Umweltauswirkungen und Energiebedarf von Gebäuden gleichzeitig betrachten zu können. Diese Methode wurde auch auf Distrikte skaliert. Die Elementareffekt-Methode wird zum Parameterscreening eingesetzt. Als Unsicherheitsquellen wurden die Annahmen zu den Gebäuden identifiziert, die dann um Referenzwerte herum variiert werden. Weiterhin wurden die langfristigen Entwicklungen wie Stromerzeugungsmix oder zukünftige neue Recyclingmöglichkeiten für Materialien, die für LCA eine wichtige Rolle spielen, untersucht. Auch die Modellierungsmethoden für LCA sowie die Inventarisierung und Umweltauswirkungen der verwendeten Materialien sind Gegenstand der Sensitivitätsanalyse. Die Methode wird anhand eines Einfamilienhauses nach Passivhausstandard mit  $90 \text{ m}^2$  Wohnfläche demonstriert. Die Zielgrößen der Sensitivitätsanalyse sind u.a. kumulierter Energiebedarf und Treibhauspotential. Im Ergebnis ist festzustellen, dass vor allem der Stromerzeugungsmix sowie andere, für das energetische Verhalten des Gebäudes relevante Parameter den größten Einfluss auf die Zielgrößen haben. In dieser Veröffentlichung wird für die Bewertung mittels relativen Einflusses die euklidische Distanz im Morris-Graphen (vgl. Abbildung 5.4(d)), der  $\mu^*$  und  $\sigma$  beinhaltet, eingeführt. Dies erlaubt es den gesamten Einfluss eines Parameters, also lineare und nicht-lineare bzw. Wechselwirkungseinflüsse, anhand eines einzelnen Wertes zu bewerten.

### 7.3. Bewertung

Das Problem unsicherer Parameter und den damit verbundenen Bandbreiten von Ergebnissen wurde sowohl für Einzelgebäudemodelle ([114], [39], [38]) als auch Stadtmodelle ([195], [196], [49], [120], [121]) erkannt und wird mittels entsprechender Unsicherheitsbewertungs- und Sensitivitätsanalyseverfahren behandelt. Dabei werden fast ausschließlich skalare Zielgrößen wie der jährliche Energiebedarf oder  $\text{CO}_2$ -Emissionen behandelt. Auch Lebenszykluskosten [204] oder allgemeinere ökonomische Größen [40] werden als Zielgrößen verwendet.

Lokale Sensitivitätsanalysemethoden haben ihre Berechtigung, wenn ein Basisfall für die Parameter eines Modells bekannt ist und die Auswirkung kleiner Änderungen untersucht werden soll. Bei Stadtmodellen hat sich herausgestellt, dass die Bereiche, in denen durch lokale Methoden Aussagen erarbeitet werden können, sehr klein sind, da die Modelle nur in sehr kleinen Parameterbereichen linear bzw. additiv sind [49] [120] [136]. Als globale Sensitivitätsanalysemethoden kommen sowohl Elementareffekte zum Parameterscreening als auch varianzbasierte Verfahren zur Quantifizierung der Einflüsse zum Einsatz [121]. Dabei ist vor allem die Anzahl notwendiger Simulationsläufe der begrenzende Faktor, für Monte-Carlo-Verfahren sind bei einer skalaren Zielgröße mindestens 64 Läufe notwendig, um konvergente Ergebnisse zu erhalten [247]. Globale Sensitivitätsanalysemethoden liefern zum Teil deutlich andere Ergebnisse als lokale Methoden [121], daher ist für Stadtmodelle der Einsatz lokaler Methoden nicht ausreichend.

Die interne Behandlung von Unsicherheiten direkt in Simulationsprogrammen erfordert einen hohen Implementationsaufwand [156] [127], der bisher in keinem Stadtmodell betrieben wurde. Der Ansatz probabilistischer Gebäudemodelle, der Modellergebnisse mit unterschiedlichen Parameterwerten berechnet und die sich ergebende Verteilung dem Gebäudetyp zuweist [256], kann als interne Betrachtung von Unsicherheiten interpretiert werden.

Das in [42] beschriebene Verfahren zur Erzeugung von Makroparametern und der Berechnung von Unsicherheiten bzw. Sensitivitäten für diese könnte sich für die Parameterreduktion und die Angleichung der Größenordnungen der Sensitivitäten auch in Stadtmodellen als sinnvoll erweisen.

Sensitivitätsanalyse mit dynamischen Zielgrößen wird im Gebäudebereich bisher nur einzeln angewandt. Für die Untersuchung von Zeitreihen als Zielgrößen wird in [247] eine Bewertung mittels des Medians und des relativen Interquartilsabstands vorgenommen. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Unsicherheit des stündlichen Heizwärmebedarfs. In [167] wird die Methodik zur Sensitivitätsanalyse von Zeitreihen eingeführt, welche gleitende Mittelwerte nutzt und dadurch teilweise stark von einer konventionellen Sensitivitätsanalyse abweichende Ergebnisse für unterschiedliche Jahreszeiten erzielt. Diese Methodik wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit aufgenommen und für die Anwendung in Verbindung mit Quartiersmodellen angepasst.

Bei den vorhandenen Sensitivitätsanalysen der unterschiedlichsten Quartiersmodelle haben sich neben den geometrischen Eigenschaften, d.h. unter anderem dem Detaillierungsgrad der vorhandenen GIS-Daten, Fensterflächenanteil und Angaben zum Keller, die Parameter zur Luftwechselrate, der Innenraumsolltemperatur, dem Wirkungsgrad des Heizungssystems, den U-Werten und der Speicherefähigkeit der Bauteile sowie zum Nutzerverhalten als einflussreich herausgestellt. Diese Parameter sind daher bei der Untersuchung der Sensitivitäten am Fallbeispiel in Teil V besonders im Fokus.

Zur Untersuchung von dynamischen Parametern, d.h. Parameter deren Wert sich während der Simulationszeit zu bestimmten Zeitpunkten ändert, wurden nur wenige Veröffentlichungen im Bereich der Gebäudesimulation gefunden. Für die Berücksichtigung von vorgegebenen



## 7. SA in Gebäudesimulationen

Zeitreihen wie den Klimadaten können unterschiedliche Extremfälle wie extrem heiße oder kalte Jahresklimadaten unter Berücksichtigung des wahrscheinlichsten Falls verwendet werden [247]. Die Auswahl eines Klimadatensatzes erfolgt dann durch einen diskreten Parameter mit entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilung. In keiner Veröffentlichung wurden Untersuchungen gefunden, die sich mit den Zeitpunkten, wann Ereignisse wie eine Nachtabsenkung der Heizung beginnen und enden, beschäftigen und den Einfluss der Zeiten bewerten. Das Vorgehen in [6], dynamische Parameter als Zufallsvariablen abzubilden, ist aufgrund der Notwendigkeit vieler Simulationsläufe, im Beispiel 2000, nicht für detaillierte Quartiersmodelle mit ihrer langen Rechenzeit einsetzbar.

Nach Meinung des Autors wird das dynamische Verhalten, welches den Prozessen in Gebäuden zueigen ist, bisher nicht ausreichend für die Bewertung des energetischen Verhaltens berücksichtigt. Bei der Verwendung von Zeitreihenzielgrößen besteht das Problem, dass ein hoher Auswertungsaufwand entsteht, wenn konventionell Stunde für Stunde der Simulationsergebnisse ausgewertet wird. Dieser Aufwand steigert sich weiter, wenn dynamische Parameter berücksichtigt werden, die noch mehr Variabilität in die Ergebnisse einbringen.

**Teil IV.**

**Transfer der  
Sensitivitätsanalysemethoden auf  
Stadtmodelle**



In diesem Teil der Dissertation wird die Anwendung der vorgestellten Sensitivitätsanalysemethoden auf Stadtmodelle beschrieben. Hierbei wird in Kapitel 8 zuerst die Fragestellung, die mittels Sensitivitätsanalyse beantwortet werden soll, festgelegt. Die Auswahl der Zielgröße und deren unterschiedliche Bedeutung werden in Kapitel 9 beschrieben. In Kapitel 10 wird auf die ein Stadtmodell beeinflussenden Parameter eingegangen und eine Systematik der unterschiedlichen Parameterarten, insbesondere solcher Parameter die nicht über den gesamten Simulationsverlauf konstant sind, erstellt. Im anschließenden Kapitel 11 werden die strukturellen und technischen Anpassungen der Sensitivitätsanalysemethoden beschrieben. Hierunter fallen die Kombination der Elementareffekt-Methode mit sequentieller Auswertung und funktionaler Transformation, die Auswahl sinnvoller Mittelungsintervalle für die Evaluierung der Sensitivitäten sowie die Modifikationen zur Verwendung dynamischer Parameter. Dies geschieht mit dem Ziel, die dynamischen Zielgrößen in der Bewertung eines Stadtquartiers berücksichtigen und die hierfür einflussreichsten Parameter mit geringem Auswertungsaufwand ermitteln zu können.



## 8. Fragestellung und Auswahl der Sensitivitätsanalysemethodik

Die zentrale Frage, die in dieser Arbeit mittels Sensitivitätsanalyse beantwortet werden soll, ist, welche Parameter der Gebäude und ggf. der Energienetze für das Modell eines Quartiers genauer zu bestimmen sind, um Prognosen zu den Auswirkungen zukünftiger Sanierungsmaßnahmen erstellen zu können. Die Herausforderungen bei dieser Fragestellung sind vielfältig.

So ist zumeist bereits der aktuelle Sanierungsstand der Gebäude bzgl. ihrer Hülle und Anlagentechnik unklar, da für diese Information keine zentrale Registrierungsstelle besteht. Alle hierzu im jeweiligen Quartier erfassten Informationen sind hilfreich.

Noch unklarer ist, wie die Sanierungsmaßnahmen in der Zukunft fortgesetzt werden können. Dies kann im Modell durch Definition von Szenarien untersucht werden, mittels derer potentielle Maßnahmen definiert und hinsichtlich der sich ändernden Parametersensitivitäten untersucht werden.

Die Modellparameterwerte unterscheiden sich in der Realität von Gebäude zu Gebäude. Für eine konkrete Sanierungsplanung eines Gebäudes wären also nur dessen Parameter einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen. In dieser Arbeit soll aber die Frage nach dem Einfluss der Parameter auf das energetische Verhalten des gesamten Quartiers untersucht werden. Hierfür ist eine Evaluation der Parameter einzelner Gebäude nicht zielführend, da zu aufwändig und da der Einfluss dieser einzelnen Parameter auf die quartiersweiten Zielgrößen zumeist relativ gering ist. Stattdessen werden die Parameter aller Gebäude parallel verändert, um die Frage nach den Haupteinflussfaktoren für das Quartier insgesamt beantworten zu können. Somit kann anschließend ermittelt werden, für welche Parameter der meiste Aufwand in die Datenerfassung investiert werden sollte.

Eine weitere Frage ist die Übertragbarkeit der Untersuchungen an einem Modell auf die realen Gebäude eines Quartiers, d.h. inwiefern das jeweilige Modell validiert ist. Wie in 12.2 beschrieben, ist das Modell EmMi-transient derzeit nicht validiert und die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen am Modell können als erster Schritt hin zu einer Validierung gesehen werden. Ein Problem hierbei ist, dass die Umsetzung szenarischer Untersuchungen für reale Gebäude mit erheblichen Kosten verbunden sind. Daher ist eine Validierung nur für den aktuellen Stand der Gebäude bzw. einzelne Maßnahmen daran möglich.

## *8. Fragestellung und Auswahl der Sensitivitätsanalysemethodik*

Ausgehend von der Formulierung der zu untersuchenden Fragestellungen kann nun die Übertragung in die Sprache der Sensitivitätsanalyse erfolgen. Vornehmlich ist die Frage zu untersuchen, zu welchen Parametern erhöhter Aufwand in die Erfassung genauerer Daten zu stecken ist. Hierfür ist eine Einflussrangliste hilfreich. Diese sollte im besten Fall mittels quantitativer Methoden erstellt werden, um die Kosten der Erfassung dem möglichen Gewinn an Genauigkeit des Modells gegenüber zu stellen. Gleichzeitig ist aber auch eine Erhöhung der Relevanz des Modells, d.h. das Verhältnis der Anzahl der das Ergebnis beeinflussenden Parameter zu der Anzahl aller Parameter, wünschenswert. Dies kann durch Festlegung von Parametern, die kaum Einfluss haben, auf einen fixen Wert ihres Definitionsbereichs erfolgen. Bezug nehmend auf Abschnitt 5.1 entspricht dies also einer Kombination des Faktor-Priorisierungs- und des Faktor-Fixierungs-Szenarios. Für die Priorisierung wäre eine varianzbasierte Untersuchung optimal, die allerdings mit hohem Rechenaufwand verbunden ist. Die Elementareffekt-Methode kann hier auch gute Dienste leisten, allerdings ist eine Bewertung der Kosten im Vergleich zum zusätzlichen Nutzen für das Modell hiermit nicht möglich ist, da die Methode qualitative Sensitivitäten berechnet. Für die Faktor-Fixierung ist die Elementareffekt-Methode uneingeschränkt empfehlenswert, da hiermit ermittelt werden kann, welche Parameter weder additive und lineare Einflüsse noch nicht-lineare Einflüsse und Wechselwirkungseffekte haben.

Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Elementareffekt-Methode genutzt und diese an die Besonderheiten der energetischen Quartiersbetrachtung angepasst. Vor allem erfolgt eine Anpassung an Zeitreihen als Ergebnisdaten, d.h. vektorielle Zielgrößen.

## 9. Zielfunktionen in Stadtmodellen

Zu Beginn jeder Sensitivitätsanalyse steht nach der Festlegung der zu beantwortenden Fragestellung die Definition der zu betrachtenden Zielfunktion, anhand derer Sensitivitäten für Parameter ermittelt werden. In diesem Kapitel werden mögliche aggregierte und vektorielle Zielgrößen beschrieben sowie Interpretationsmöglichkeiten und Fragestellungen, für die diese interessant sind, angegeben.

Häufig sind für die Auswertung von Energiebedarfsmodellen nur aggregierte, z.B. jährliche summierte oder gemittelte Werte von Interesse. So werden bei der Erstellung von Energieausweisen nur Jahreswerte, wie der summierte End- und Primärenergiebedarf bzw. -verbrauch, betrachtet. Zur Ermittlung des Energieeinsparpotentials von Sanierungsmaßnahmen ist dies meistens ausreichend, da es hierbei nicht auf den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs ankommt. Auch sind die politisch vorgegebenen Ziele, die im Rahmen der Energiewende erreicht werden sollen, auf Jahreswerte bezogen und nicht etwa auf die maximal benötigte Heizleistung eines Gebäudes. Die unten beschriebenen Zielgrößen lassen sich alle als jährliche Werte verwenden.

Zur Bewertung der Möglichkeiten, die beispielsweise durch den Einsatz regenerativer Energieerzeugung via PV oder Solarthermie entstehen, sowie den Auswirkungen auf Wärme- und Stromnetze sind jährlich aggregierte Zielgrößen weniger interessant. Hier sind die dynamischen Auswirkungen der Maßnahmen zu betrachten, ob also beispielsweise mit einer erhöhten Stromnetzbelastung bei bestimmten Maßnahmen zu rechnen ist, oder wie sich Demand Side Management (DSM) auf die Reduzierung von Lastspitzen auswirkt. Daher werden im Folgenden auch die Möglichkeiten zur Verwendung zeitlich hoch aufgelöster Zielgrößen im Rahmen der dynamischen Sensitivitätsanalyse genannt.

### 9.1. Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  entspricht gemäß [59] dem rechnerisch ermittelten Wärmeeintrag, den das Heizsystem zur Aufrechterhaltung einer bestimmten mittleren Raumtemperatur an das Gebäude oder eine Zone während eines Bilanzzeitraums abgeben muss. Hierbei finden also weder die Wärme, die für die Bereitung von Warmwasser notwendig ist, noch die Verluste durch die Anlagentechnik noch die elektrischen Verbraucher in einem Gebäude Berücksichtigung. Daher ist diese Zielgröße für Parameter der Anlagentechnik meistens uninteressant. Ausnahmen entstehen, wenn sich durch solch einen Parameter die Verluste der



## 9. Zielfunktionen in Stadtmodellen

Anlage ändern und sich daher auch die internen Gewinne, die den Heizwärmebedarf beeinflussen, ändern. Zu unterscheiden ist der Heizwärmebedarf vom Heizenergiebedarf  $Q_H$ , der die dem Heizungssystem zuzuführende Energie zur Deckung des Heizwärmebedarfs beschreibt.

Die Berechnung des jährlichen Heizwärmebedarfs erfolgt durch Summation über die Heizwärmebedarfe der Bilanzzeitschritte. Für ein Quartier kann der Heizwärmebedarf aller Einzelgebäude summiert werden.

### 9.2. Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf  $Q_E$  beschreibt gemäß [60] die Energiemenge, die zur Deckung der Summe aus Heizwärmebedarf  $Q_h$  und Trinkwasserwärmebedarf  $Q_W$  an der Systemgrenze des betrachteten Gebäudes benötigt wird. Vorgelagerte Prozesse für die Erzeugung oder Transport des Brennstoffs werden nicht berücksichtigt.

Beim Endenergiebedarf werden also im Vergleich zum Heizwärmebedarf auch die Anlagentechnik für Heizung und Warmwasserbereitung und deren Hilfsenergiebedarf berücksichtigt. Es wird jedoch nicht der Haushaltsstrombedarf berücksichtigt.

Die Berechnung des jährlichen Endenergiebedarfs erfolgt durch Summation über die Endenergiebedarfe der Bilanzzeitschritte. Für ein Quartier kann der Endenergiebedarf aller Einzelgebäude summiert werden.

### 9.3. Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf  $Q_P$  berücksichtigt im Vergleich zum Endenergiebedarf auch die zusätzliche Energiemenge, die durch vorgelagerte Prozesse außerhalb des Gebäudes für Gewinnung, Umwandlung und Verteilung des Brennstoffs benötigt wird.

Hierbei spielt auf Grund der Primärenergiefaktoren für die Brennstoffe also auch der Energieträger eine Rolle. Die Primärenergiefaktoren sind jedoch Werte, die sich im Laufe der Zeit verändern, beispielsweise weil Strom vermehrt durch Umwandlung erneuerbarer Energieträger erzeugt wird.

Die Berechnung des jährlichen Primärenergiebedarfs erfolgt durch Summation über die Primärenergiebedarfe der Bilanzzeitschritte bzw. die Multiplikation des jährlichen Endenergiebedarfs mit dem Primärenergiefaktor. Eine höhere zeitliche Auflösung ist nur bedingt sinnvoll, da die vorgelagerten Prozesse zeitlich entkoppelt sind von der Verwendung im Gebäude. Der Primärenergiebedarf der Einzelgebäude kann für alle Gebäude eines Quartiers summiert werden.

## 9.4. CO<sub>2</sub>-Emissionen

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche häufig für politische Vorgaben an Einsparziele oder Effizienzsteigerungsmaßnahmen verwendet werden, sind die Emissionsfaktoren der GEMIS-Datenbank [123] geeignet. Diese geben das CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro kWh Endenergie an, wobei hier auch die vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden wie beim Primärenergiebedarf.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden meist nur jährlich summiert berechnet, da eine zeitlich höhere Auflösung hier keinen Mehrwert liefert und da durch Berücksichtigung der Vorkette auch zeitlich entkoppelte Prozesse für die Emission berücksichtigt werden. Für die Gebäude eines Quartiers können die errechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen summiert werden.

## 9.5. Thermische Behaglichkeit

### 9.5.1. Jährlich aggregierte Werte

Für die Langzeitbewertung der Behaglichkeitsbedingungen eines Gebäudes mittels Ergebnissen einer dynamischen Simulation sind in Anhang F der DIN EN 15251:2012-12 [67, Anhang F] drei Verfahren definiert. Diese Verfahren summieren nach unterschiedlichen Kriterien die Abweichungen von den gewünschten Behaglichkeitsbedingungen. Beim ersten Verfahren wird der Prozentsatz der Stunden, in denen die Temperatur außerhalb des gewünschten Bereichs liegt, ermittelt. Im zweiten Verfahren, den Gradstunden, werden die Anzahl der Stunden gewichtet mit der Höhe der Temperaturdifferenz aus Ist- und Sollwert ermittelt. Im dritten Verfahren erfolgt eine Gewichtung mittels der Größe PPD.

Zur Aggregation des thermischen Komforts aller Gebäude eines Quartiers können Summenwerte, Extremwerte, d.h. Minimum und Maximum der in den Verfahren definierten Indizes, oder Mittelwerte bzw. Mediane verwendet werden. Für eine Auswahl ist die zu untersuchende Fragestellung entscheidend. Soll beispielsweise ein vorgegebenes Komfortkriterium wie die Gradstunden für alle Gebäude unterhalb eines Grenzwerts liegen, so wäre das Maximum über alle Gradstunden der Gebäude zu wählen. Mittels der Extremwerte lassen sich auch Best- und Worst-Case-Gebäude unterscheiden. Wenn dagegen eine Bewertung des gemittelten Komforts erfolgen soll bietet sich die Mittelwert- bzw. Medianbildung an.

Wenn eine Verteilung der Behaglichkeitsindizes über die Gebäude eines Quartiers von Interesse ist, kann auch eine vektorielle Zielgröße mit einem Eintrag für jedes Gebäude definiert werden.

### 9.5.2. Stündlich aufgelöste Werte

Für eine zeitlich aufgelöste Bewertung können die stündlichen Werte der Innenraumluft- oder Operativtemperaturen verwendet werden. Hierbei ist jedoch der starke Einfluss der Zonierung der Gebäude zu beachten. Für die Bewertung von Maßnahmen, die die Solltemperatur der Gebäude verändern können Mittelwerte der Innenraumtemperaturen verwendet werden. Hierdurch kann auch eine Kontrolle erfolgen, ob in den Simulationsmodellen ggf. eine Unterdimensionierung der Heizung vorhanden ist. Für Untersuchungen zum Überhitzungsverhalten kann das Maximum der Temperaturen aller Gebäude von Interesse sein.

## 9.6. Strombedarf

Beim Strombedarf, also der elektrischen Energie, die für den Betrieb von Geräten benötigt wird, muss zwischen dem Bedarf für Haushaltsgeräte und dem Strombedarf für die Systeme der Anlagentechnik unterschieden werden. Der Haushaltsstrombedarf ist maßgeblich von den Nutzern, deren Anwesenheit und Gewohnheiten sowie den vorhandenen Geräten abhängig. Da der Haushaltsstrombedarf in EmMi-transient als externer Wert vorgegeben wird (vgl. Kapitel D), wird er nicht von den Parametern der Gebäudemodelle beeinflusst und ist daher auch nicht sinnvoll als Zielgröße für die Sensitivitätsanalyse verwendbar.

Der Strombedarf der Anlagentechnik dagegen wird in Abhängigkeit von der Auslastung und dem Betriebszustand der Heizung im thermischen Gebäudemodell ermittelt und kann daher auch mit den Parametern der Anlagentechnik variieren. Er setzt sich aus dem Hilfsenergiebedarf für Pumpen und Steuergeräte sowie ggf. den Energiebedarf für elektrisch betriebene Heizsysteme zusammen.

Der Gesamtstrombedarf eines Gebäudes ist die Summe aus Haushaltsstrombedarf und Strombedarf der Anlagentechnik. Der jährliche Strombedarf wird durch Summation der Strombedarfswerte der Zeitschritte ermittelt, für ein Quartier kann der Strombedarf aller Einzelgebäude summiert werden.

## 9.7. Lokale Stromerzeugung

Hierunter fällt die elektrische Energie, die durch Systeme wie eine PV-Anlage oder ein BHKW in den Gebäuden des Quartiers erzeugt wird. Die Zielgröße der lokalen Stromerzeugung ist unabhängig von dem Anteil des direkt im Gebäude wieder verbrauchten Stroms. Diese Zielgröße kann also vor allem zur Einschätzung der Parameter der stromerzeugenden Systeme verwendet werden.

Für die jährliche Stromerzeugungsmenge werden die Energiemengen der einzelnen Zeitschritte summiert. Für ein Quartier können die Stromerzeugungsmengen aller Gebäude addiert werden. Falls zutreffen können auch die erzeugten Energiemengen von Systemen im Quartier, die unabhängig von den Gebäuden sind, mit summiert werden. Hierunter könnten beispielsweise Freiflächen-PV-Anlagen fallen.

## 9.8. Eigenstromnutzung

Der Eigenstromnutzungsanteil  $ENA$  eines Gebäudes ist gemäß [143] für einen bestimmten Betrachtungszeitraum definiert als das Verhältnis des lokal im Gebäude erzeugten und lokal genutzten Stroms zu dem gesamten lokal erzeugten Strom. Oder anders ausgedrückt das Verhältnis der Differenz des lokal erzeugten Stroms und des eingespeisten Stroms zu dem lokal erzeugten Strom. In Formeln:

$$ENA = \frac{Q_{selbstgenutzt}}{Q_{produziert}} = \frac{Q_{produziert} - Q_{eingespeist}}{Q_{produziert}} = 1 - \frac{Q_{eingespeist}}{Q_{produziert}} \quad (9.1)$$

Hierbei ist  $Q_{selbstgenutzt}$  der im Gebäude selbst genutzte, lokal produzierte Strom,  $Q_{produziert}$  der lokal produzierte Strom und  $Q_{eingespeist}$  der ins allgemeine Stromnetz eingespeiste Strom. Die Berechnung von  $ENA$  für ein Quartier kann auf die gleiche Art und Weise erfolgen. Hierbei ist auch eine Berücksichtigung von Stromerzeugungssystemen, die nicht direkt einem Gebäude zugeordnet werden können, möglich.

$ENA$  als Zielgröße ist hinsichtlich lokaler Energieerzeugung von großem Interesse, da sich durch eine hohe Eigenstromnutzung die Netzbelastung prinzipiell reduzieren lässt. Der jährliche Wert des  $ENA$  liefert aber keine Aussage darüber, wie stark das Netz punktuell durch lokale Stromerzeugung belastet wird, d.h. was für Einspeisespitzen auftreten.

Aussagen hierüber sind nur bei zeitlich höher aufgelösten Daten möglich, da erst damit die Netzbelastung durch Stromeinspeisung je Zeitschritt untersucht werden kann. Zur Berechnung der aktuellen Eigenstromnutzung kann die Differenz aus produziertem Strom und eingespeistem Strom verwendet werden, der Eigennutzungsanteil je Zeitschritt lässt sich wie in Gleichung 9.1 bestimmen.

Für die Betrachtung der Eigenstromnutzung in einem Quartier, d.h. wenn Strom in einem Gebäude produziert und in einem anderen verbraucht wird, so ist eine Bilanzierung der Stromnutzung nur aus den Daten der einzelnen Gebäude nicht exakt möglich, da die Gebäudemodelle keine Information darüber haben, ob die elektrische Energie aus dem allgemeinen Stromnetz oder dem Quartiersnetz bezogen wird. Eine mögliche Lösung ist die Bilanzierung über ein per FMI mit den Gebäuden kommunizierendes Quartiersnetzmodell, wie in Kapitel 15.1 als zukünftige Erweiterung beschrieben. In diesem Falle müsste die Bilanzierung an der Schnittstelle zwischen Quartiersnetz und allgemeinem Stromnetz erfolgen.



## 10. Parameterarten

Die Parameter eines Stadtmodells, welche für die Berechnung bestimmt werden müssen, sind vielfältig und hängen maßgeblich vom untersuchten Modell ab. In Hinblick auf Sensitivitätsanalysen und insbesondere die Elementareffekt-Methode mit Zeitreihen als Zielgröße können vier Parameterarten unterschieden werden, welche für die Sensitivitätsanalyse unterschiedlich behandelt werden müssen:

- Diskrete konstante Parameter, welche einen Wert aus einer endlichen Menge annehmen können und diesen während der Simulation konstant beibehalten
- Kontinuierliche konstante Parameter, die einen beliebigen Wert innerhalb eines Intervalls annehmen können und ebenfalls konstant sind.
- Vordefinierte Zeitreihen, die für jeden Simulationszeitschritt einen Wert vorgeben und die skaliert bzw. im Ganzen in ihrer Höhe verschoben werden können
- Ereignisse, die zu einem variablen Zeitpunkt auftreten, eine variable Länge haben und in dieser Zeit einen Parameter verändern

Für die beiden konstanten Parameterarten müssen zusätzlich zu dem Wertebereich diskrete bzw. kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden, um mittels einer Samplingmethode eine Stichprobe dafür ziehen zu können. Zeitreihen und Ereignisse werden dagegen nicht durch einen einzelnen Wert beschrieben, daher müssen hier für die Sensitivitätsanalyse mehrere Größen mittels Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgewählt, verändert und kombiniert ausgewertet werden.

Eine Herausforderung stellt die Frage dar, ob für alle Parameter jedes Gebäudes einzeln Stichproben erzeugt werden, oder ob für das gesamte Quartier eine Stichprobe der Parameter erzeugt wird.

Im Falle der Stichprobe für jedes einzelne Gebäude muss für jedes Gebäude eine Verteilung des Parameters angegeben werden und somit multipliziert sich die Anzahl der zu untersuchenden Parameter mit der Anzahl der Gebäude. Der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf eine Zielgröße, die für das gesamte Quartier berechnet wird, ist eher gering. Daher müssten Parameter kombiniert werden, um relevante Einflüsse zu ermitteln. Allerdings kann es dann auf Grund der unabhängigen Stichproben zu Aufhebungseffekten kommen, wenn beispielsweise für ein Gebäude ein hoher U-Wert der Außenwände angenommen wird und für ein anderes Gebäude ein niedriger U-Wert. Eine Möglichkeit zur Umgehung dieser kleinteiligen Parametrisierung wäre die Nutzung von Parametergruppen wie in Abschnitt 5.3.6.2, bei denen die gruppierten Parameter immer gemeinsam erhöht oder herabgesetzt werden.

## 10. Parameterarten

Im zweiten Fall wird für alle zu untersuchenden Parameter eine Stichprobe mittels einer individuell festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilung erzeugt und die Parameter werden jeweils den einzelnen Gebäudemodellen zugewiesen. Dabei muss beachtet werden, dass für unterschiedliche Gebäude der Basiswert, auf den der durch die Stichprobe ermittelte Wert addiert oder subtrahiert wird, abweichend sein kann. Beispielsweise wenn der Einfluss der Variation der Außenwand-U-Werte untersucht werden soll und Gebäudemodelle unterschiedlicher Baualtersklasse mit aus der Gebäudetypologie vorgegebenen, sich unterscheidenden U-Werten  $U_{AW,1}$  und  $U_{AW,2}$  der Außenwände erstellt wurden. Hierfür könnte die U-Wert-Variation mittels einer Normalverteilung mit Mittelwert 0 und fixer Standardabweichung  $\sigma$  auf den Basis-U-Wert der beiden Gebäude addiert bzw. subtrahiert werden, es ergibt sich somit für das erste Gebäude eine Normalverteilung mit Mittelwert  $U_{AW,1}$ , für das zweite Gebäude eine Normalverteilung mit Mittelwert  $U_{AW,2}$ , beide haben Standardabweichung  $\sigma$ . Daher sind folgende Definitionen für absolut und relativ variierte Parameter sinnvoll:

**Definition 10.0.1.** *Ein Parameter wird **absolut variiert** genannt, wenn seine Verteilung für alle Gebäude des Quartiers gleich ist.*

**Definition 10.0.2.** *Ein Parameter wird **relativ variiert** genannt, wenn jedes Gebäude einen Basiswert für den Parameter hat und die Variation des Parameters zu diesem Basiswert addiert wird.*

Die Parametervariation für das gesamte Quartier hat den Vorteil, dass die Parameteranzahl überschaubar bleibt und direkt der Einfluss des Parameters auf die quartiersweite Zielgröße ermittelt wird. Somit können Aussagen über die Wichtigkeit eines Parameters für ein gesamtes Quartier erarbeitet und daraus Empfehlungen für die weitere Datenerfassung abgeleitet werden. Durch dieses Vorgehen werden allerdings Abweichungen, die für einzelne Gebäude positiv oder negativ sein können und sich in Summe dadurch aufheben, ignoriert.

Das in [121] verwendete kombinierte Verfahren, bei dem Parameter auf unterschiedlichen Ebenen variiert werden, wäre ein nächster Schritt für die Sensitivitätsuntersuchungen.

Im Folgenden finden sich Details zu den Parameterarten und Beispiele für Werte, die sich mittels der Parameterarten abbilden lassen.

### 10.1. Diskrete konstante Parameter

Ein diskreter konstanter Parameter  $p$  bleibt konstant während der gesamten Simulationszeit auf einem seiner  $n$  möglichen Werte aus dem diskreten Definitionsbereich  $D_p = \{p_1, \dots, p_n\}$ , einer endlichen Menge. Die Verteilung, die die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Werte definiert, ist endlich. Im einfachsten Fall ist eine Gleichverteilung mit Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{n}$  für jeden der Werte gegeben.

Auch Parameter, die vorgeben, ob ein bestimmtes System wie eine PV-Anlage vorhanden ist oder nicht, sind als diskrete Parameter mit zwei möglichen Werten durch diese Parameterart abgebildet.

**Beispiel 10.1.1.** *Folgende Größen können als diskrete konstante Parameter definiert werden:*

- *Art der Beheizung (Öl, Gas, Fernwärme, Wärmepumpe)*
- *Existenz einer PV-Anlage*
- *Existenz einer Solarthermieanlage*
- *Anzahl der Bewohner im Quartier*

In Verbindung mit der Elementareffekt-Methode tritt das Problem auf, dass die Anzahl der möglichen Parameterwerte und die Diskretisierung des Parameterraums  $\Omega^k$  zusammenpassen muss, weitere Erläuterungen hierzu finden sich in Abschnitt 11.1.1.

## 10.2. Kontinuierliche konstante Parameter

Unter diese Parameterart fallen Parameter  $p$ , die während der gesamten Simulationszeit konstant sind und beliebige Werte aus ihrem kontinuierlichen Definitionsbereich  $D_p = [p_{min}, p_{max}]$ , einem Intervall, annehmen können. Als Wahrscheinlichkeitsverteilung kommt hier jede Verteilung über  $D_p$  in Frage. Bei den meisten Parametern sind Gleich- oder Normalverteilung die richtige Wahl. Eine Normalverteilung sollte verwendet werden, wenn wie beispielsweise beim U-Wert aus der Gebäudetypologie ein Mittelwert vorgegeben ist und die Auswirkung von Abweichungen von diesem Wert untersucht werden sollen. Diese Abweichungen können z.B. durch Alterungsprozesse oder andersartige Konstruktionsausführungen gegeben sein. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass der Parameterwert in dem Bereich um den vorgegeben Wert liegt und genau dies wird durch eine Normalverteilung beschrieben.

Wenn hingegen kein Mittelwert vorgegeben ist, sondern ein ganzer Bereich, in dem sich ein Parameter bewegen kann, wie dies z.B. beim Design eines neuen Gebäudes der Fall ist, so sollte eine Gleichverteilung mit den Bereichsgrenzen als unterer und oberer Wert der Gleichverteilung verwendet werden.

Einige Parameter können fixe Grenzwerte haben, die nicht über- oder unterschritten werden dürfen. Beispielsweise muss der g-Wert einer Verglasung zwischen 0 und 1 liegen. Um dies zu berücksichtigen, muss eine Verteilung an den Grenzwerten abgeschnitten werden. Dies bedeutet, dass die Verteilung keine Werte außerhalb der Grenzwerte annehmen kann und daher die Wahrscheinlichkeiten von denen einer nicht-abgeschnittenen Verteilung abweichen. Insbesondere bei Normalverteilungen ist solch eine Begrenzung notwendig, da diese mit kleiner Wahrscheinlichkeit Werte weit entfernt vom vorgegebenen Mittelwert annehmen können. Diese Grenzwerte werden im Folgenden als absolutes Minimum bzw. Maximum bezeichnet.



## 10. Parameterarten

**Beispiel 10.2.1.** *Relativ variierte stetige konstante Parameter sind beispielsweise:*

- *U-Wert-Variation mittels Normalverteilung um einen aus der Gebäudetypologie vorgegebenen U-Wert als Mittelwert und Standardabweichung von  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  mit Begrenzung der Verteilung auf das Intervall  $[0,001, 7]$*
- *g-Wert-Variation mittels Normalverteilung um einen aus der Gebäudetypologie vorgegebenen g-Wert  $g \in [0; 1]$  als Mittelwert und Standardabweichung von  $0,1$ . Hierbei muss eine Begrenzung der Verteilung auf das Intervall  $[0, 1]$  erfolgen.*
- *Variation der Dicke eines Bauteils um einen Standardwert mit unterem Grenzwert  $0,115 \text{ m}$ , der nicht unterschritten werden kann*

**Beispiel 10.2.2.** *Absolut variierte stetige konstante Parameter sind beispielsweise:*

- *Variation des  $\lambda$ -Werts für die Wärmeleitfähigkeit einer durch Sanierung aufgebrauchten Dämmschicht mittels Normalverteilung um Mittelwert  $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$  mit Standardabweichung  $0,0035 \text{ W}/(\text{mK})$*
- *Jahresstrombedarf für Haushaltsgeräte für einen Drei-Personen-Haushalt als Normalverteilung um Mittelwert  $2000 \text{ kWh}$  mit Standardabweichung  $200 \text{ kWh}$*
- *Variation der Infiltrationsrate der Gebäude mittels einer Gleichverteilung im Intervall  $[0,2, 2]$*

## 10.3. Vordefinierte Zeitreihe als Parameter

Vordefinierte Zeitreihen geben für jeden Simulationszeitpunkt einen Wert an, den der durch die Zeitreihe beeinflusste Parameter zum jeweiligen Zeitpunkt annimmt. Bei dieser Parameterart wird an den Zeitpunkten der Zeitreihe nichts verändert, allerdings kann eine Skalierung des Parameterwerts durch einen Faktor oder eine Verschiebung um einen Offset erfolgen. Der Einfluss dieser beiden Variationswerte für die Zeitreihe können mittels Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

Eine besondere Form dieser Parameterart sind periodische Zeitreihen, die für einen bestimmten Zeitraum Werte vorgegeben und nach Ende des Zeitraums die Zeitreihe wiederholen. Bei periodischen Zeitreihen kann die Periodenlänge als weiterer Variationswert untersucht werden.

**Beispiel 10.3.1.** *Vordefinierte Zeitreihen sind beispielsweise:*

- *Stromlastprofil H0 des VBEW, skaliert mit Jahresstrombedarf eines Haushalts*
- *Personenanwesenheitsprofil für Werktage, Samstage und Sonntage*

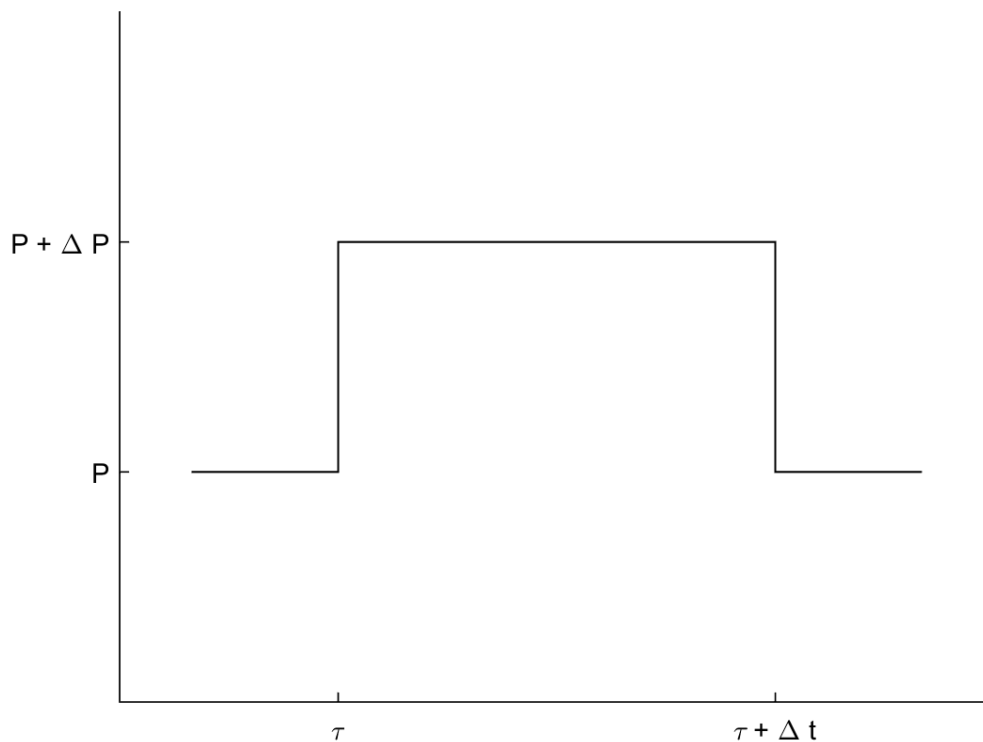


Abbildung 10.1.: Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameters durch ein Ereignis

## 10.4. Durch Ereignisse beeinflusste Parameter

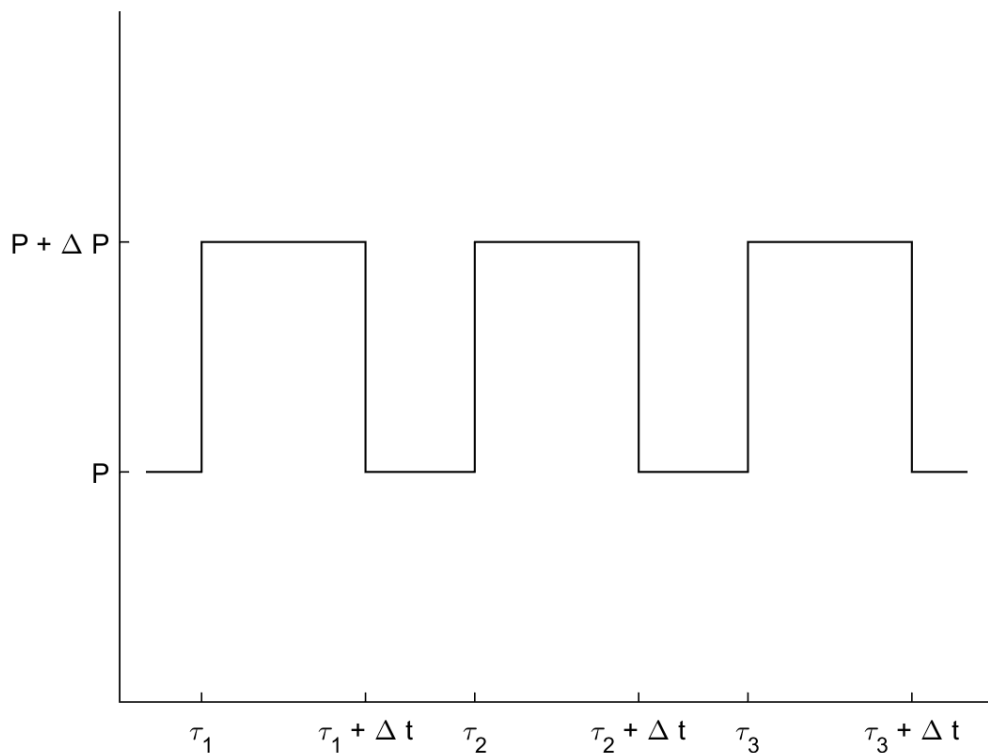
Durch Ereignisse beeinflusste Parameter als mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchende Größen sind im Vergleich zu den bisher beschriebenen Parameterarten dadurch gekennzeichnet, dass sie zu einer variablen Zeit für eine variable Dauer einen Parameter auf einen bestimmten Wert ändern und nach Ende des Ereignisses der Parameter wieder auf seinen Ursprungswert zurückgesetzt wird, siehe Abbildung 10.1. Der Unterschied zu vorgegebenen Zeitreihen ist also, dass neben dem Wert der Parameteränderung auch die Zeitpunkte der Parameteränderung Gegenstand der Sensitivitätsanalyse sind. Daher wird folgende Definition festgelegt:

**Definition 10.4.1.** Ein **Ereignis**, welches den Parameter  $P$  beeinflusst, ist definiert durch den Startzeitpunkt  $\tau$  des Ereignisses, die Zeitspanne  $\Delta t$ , in der das Ereignis andauert und den Wert  $\Delta P$ , um den der Parameter  $P$  in der Zeit des Ereignisses variiert wird.

Ein Ereignis kann wie in Definition 10.4.1 einmalig auftreten, oder es kann periodisch auftreten, siehe Abbildung 10.2. Dies ist insbesondere bei Jahressimulationen von Gebäuden der Fall, wenn beispielsweise Nachtabsenkung untersucht wird. Daher wird folgende Definition für periodische Ereignisparameter festgelegt:

**Definition 10.4.2.** Ein **periodisches Ereignis**, welches den Parameter  $P$  beeinflusst, ist eine Folge von Ereignissen mit Startzeitpunkten  $\{\tau_1, \dots, \tau_n\}$ , wobei gilt  $\tau_{i+1} - \tau_i = c$  für alle

## 10. Parameterarten



**Abbildung 10.2.: Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameters durch ein periodisches Ereignis**

$1 \leq i < n$  und ein konstantes  $c$ .  $c$  ist dann die Periodenlänge des Ereignisses. Die Dauer  $\Delta t$  und der Wert der Parametervariation  $\Delta P$  ist für all diese Ereignisse gleich.

Der Startzeitpunkt, die Dauer sowie die Periodizität eines Ereignisses können als stetige Werte innerhalb eines Intervalls mittels Normal- oder Gleichverteilung gewählt werden. Der Wert der Parameteränderung kann wie bei diskreten oder kontinuierlichen konstanten Parametern ermittelt werden und der Ereignisparameter kann relativ oder absolut variiert werden.

Die Beeinflussung des entsprechenden Parameters  $P$  durch das Ereignis kann dann beschrieben werden indem man den Parameterwert als Zeitreihe auffasst. Sei der unbeeinflusste Parameterwert durch  $P_0$  gegeben, d.h. für die 8760 Stunden eines Jahres wird der Parameter als Zeitreihe  $(P_1, \dots, P_{8760})$  mit Länge 8760 aufgefasst, wobei  $P_i = P_0$  für alle  $1 \leq i \leq 8760$ . Wenn nun zu einem Zeitpunkt  $\tau$  ein Ereignis eintritt und für  $\Delta t$  andauert, so wird der durch das Ereignis beeinflusste Parameter durch die Zeitreihe  $(P_1, \dots, P_{i-1}, P_i + \Delta P, P_{i+1} + \Delta P, \dots, P_{i+\Delta t} + \Delta P, P_{i+\Delta t+1}, \dots, P_{8760})$  dargestellt.

Da solche Arten von Parametern in den klassischen Sensitivitätsanalysemethoden und insbesondere in der Elementareffekt-Methode nicht vorgesehen sind, werden in Abschnitt 11.4 die notwendigen Anpassungen der Elementareffekt-Methode beschrieben, mit denen die Startzeitpunkte und die Dauer des Ereignisses hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zielgröße untersucht werden können.

**Beispiel 10.4.3.** *Einen Parameter beeinflussende Ereignisse sind beispielsweise:*

- *Erhöhte Luftwechselrate aufgrund von Fensteröffnung: hierbei wird eine durch manuelle Fensteröffnung erhöhte Luftwechselrate abgebildet. Dies wird durch Start- und Endzeit, ggf. eine Periodizität und die Luftwechselrate mit und ohne Fensteröffnung definiert. Beispielsweise wird ein einmaliges Fensteröffnungsereignis in Stunde 80 mit einer Dauer von zwei Stunden und einer Erhöhung der Luftwechselrate um  $1,5 \text{ h}^{-1}$  gemäß Definition 10.4.2 durch folgende Werte beschrieben:*

$$\tau = 80$$

$$\Delta t = 2$$

$$\Delta p = 1,5$$

- *Nachtabstaltung der Heizung: hierbei wird jeden Tag zu einer bestimmten Zeit die Heizung deaktiviert und zu einer anderen Zeit wieder aktiviert. Dieses Ereignis ist also durch die Startzeit, die Dauer, der Periodizität von einem Tag sowie dem zu ändernden diskreten Parameter, der die Verfügbarkeit der Heizung durch die Zustände „ein“ und „aus“ repräsentiert, beschrieben. Wenn beispielsweise die Nachtabstaltung ab 22 Uhr jeden Tag für eine Dauer von 7 Stunden aktiv ist, so könnte dies gemäß Definition 10.4.2 wie folgt ausgedrückt werden*

$$\text{Startzeitpunkte sind } \{\tau_1, \dots, \tau_{365}\} = \{22, 46, 70, \dots, 8758\}$$

$$\Delta t = 7$$

$\Delta p = -1$ , wenn der die Heizungsaktivierung repräsentierende Parameter die diskreten Werte 0 für „aus“ und 1 für „ein“ annimmt

- *Nachtabenkung der Heizung: dieses sich täglich wiederholende Ereignis sorgt für eine Absenkung der Solltemperatur der Räume außerhalb der Nutzungsphase eines Gebäudes. Es wird also durch Start- und Endzeit, Periodizität ein Tag und die Solltemperatur während der Nachtabenkungsphase und außerhalb dieser Phase beschrieben. Wenn die Nachtabenkung immer zwischen 23 und 5 Uhr aktiv ist und die Solltemperatur um  $3^\circ \text{C}$  abgesenkt wird, so gilt gemäß Definition 10.4.2:*

$$\{\tau_1, \dots, \tau_{365}\} = \{23, 47, 71, \dots, 8759\}$$

$$\Delta t = 6$$

$$\Delta p = -3$$



# 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

Die Elementareffekt-Methode benötigt Anpassungen, um für die Untersuchung von Stadtmodellen eingesetzt werden zu können. Die Diskretisierung des Parameterraums muss an die zu untersuchenden Parameter angepasst werden, dies wird in Abschnitt 11.1.1 dargestellt. Die Möglichkeit zur Gruppierung von Parametern wird in Abschnitt 11.1.2 beschrieben. Für die sequentielle Auswertung der Elementareffekt-Sensitivitätsindizes werden in Abschnitt 11.2 die notwendigen Definitionen für  $EE(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $\sigma(t)$  und  $\mu^*(t)$  sowie die entsprechenden Definition unter Verwendung gleitender Mittelwerte gegeben. Für die Auswertung mittels funktionaler Transformation werden in Abschnitt 11.3 die Definitionen für  $fEE$ ,  $\mu_f$ ,  $\sigma_f$  und  $\mu_f^*$  gegeben. Die Anpassungen zur Untersuchung dynamischer Parameter, die Ereignisse beschreiben, werden in Abschnitt 11.4 dargestellt. Diese umfassen Hinweise zum Umgang mit verschiedenen Startzeiten, Dauern und Parameterwerten für von Ereignissen beeinflusste Parameter sowie Möglichkeiten zur sequentiellen Auswertung der Elementareffekte und der resultierenden Sensitivitäten.

## 11.1. Allgemeine Anpassungen

Die Elementareffekt-Methode wurde zur globalen Sensitivitätsanalyse, insbesondere dem Parameterscreening, von Modellen mit einer skalaren Zielgröße entwickelt. Für die Verwendung der Methode im Rahmen dieser Arbeit sind also einige Anpassungen vorzunehmen, die die Diskretisierung des Parameterraums für diskrete Parameter und Ereignisparameter sowie die Gruppierung von Parametern betreffen.

### 11.1.1. Diskretisierung des Parameterraums

Wie in Abschnitt 5.3.6 beschrieben, wird der Parameterraum für die Elementareffekt-Methode als  $p$ -stufiges  $k$ -dimensionales Netz definiert. D.h. jeder Parameter  $X_i$  kann einen der  $p$  Werte in der Menge  $\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, \frac{p-2}{p-1}, 1\}$  annehmen. Die Wahl von  $p$  ist direkt verbunden mit der Anzahl  $r$  an Wiederholungen bzw. zu erzeugenden Trajektorien, denn je mehr Werte ein Parameter annehmen kann, desto mehr Wiederholungen sind notwendig damit der Parameterraum ausgeschöpft wird [224, S. 101f].

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

Wenn ein diskreter Parameter mit einer Anzahl von  $q$  möglichen Werten untersucht werden soll, muss also  $p \geq q$  gelten, damit beim Sampling überhaupt jeder Wert für den Parameter angenommen werden kann. Wenn  $p = q$  gilt, so kann eine direkte Zuordnung der Stufen des diskretisierten Parameterraums zu den möglichen Werten des diskreten Parameters erfolgen, hierbei wird dann eine Gleichverteilung der Wahrscheinlichkeit für jeden Wert angenommen. Sollen die möglichen Werte des diskreten Parameters entsprechend einer anderen Verteilung als einer Gleichverteilung ermittelt werden, so kann dies nur dadurch erfolgen, dass  $p$  wesentlich größer als  $q$  gewählt wird und dann mehrere Stufen des Parameterraums jeweils zum gleichen Wert des Parameters zusammengefasst werden. Aufgrund der Diskretisierung wird sich aber auch dann eine gewisse Veränderung der Verteilung der diskreten Parameterwerte einstellen. Und da  $p$  für alle Parameter gleich festgelegt wird führt dies zu einer Erhöhung der notwendigen Anzahl an Wiederholungen  $r$ , um den Parameterraum auszuschöpfen.

**Beispiel 11.1.1.** *Für die Untersuchung der Auswirkung der durch anwesende Personen verursachten internen Lasten wird ein diskreter Parameter definiert, der die Anzahl der Personen beschreibt. Es ist bekannt, dass zwischen 0 und 15 Personen in einem Gebäude mit gleichverteilter Wahrscheinlichkeit anwesend sein können. Im Fall von  $p = 4$  Stufen kann der Parameter dann also die Werte 0, 5, 10 und 15 annehmen.*

Ein ähnliches Problem tritt auf wenn zufällig verteilte Zeitpunkte für durch Ereignisse beeinflusste Parameter ermittelt werden sollen.

**Beispiel 11.1.2.** *Bei der Wahl von  $p = 4$  Stufen zur Ermittlung des Werts für den Startzeitpunkt eines Ereignisses zwischen 4 und 10 Uhr eines Tages lassen sich nur die Zeitpunkte 4 Uhr, 6 Uhr, 8 Uhr, 10 Uhr ermitteln.*

Für die Untersuchung des Einflusses eines täglich wiederkehrenden Ereignisses, welches zufällig über den ganzen Tag auftreten kann, kann  $p = 24$  gewählt werden, damit jede Stunde des Tages als Startzeitpunkt untersucht werden kann.

Die Auswahl der Anzahl von Diskretisierungsstufen  $p$  sollte im Falle mehrere diskreter oder Zeitpunkte beschreibender Parameter also an den Parameter angepasst werden, der die meisten Stufen fordert bzw. wenn es keine Limitierung der Anzahl an Wiederholungen durch zu hohe Rechenzeit gibt kann auch das kleinste gemeinsame Vielfache aller diskreten Parameter gewählt werden.

Ein Ansatz, der bisher noch nicht weiter verfolgt wird, ist, für jeden diskreten Parameter  $X_i$  eine eigene Wahl der Anzahl an Stufen  $p_i$  zu treffen. Da jedoch  $\Delta$  direkt von  $p$  abhängt und  $\Delta$  zur Berechnung der Elementareffekte verwendet wird, kann dies zu einer falschen Einordnung der Parametereinflüsse führen. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

### 11.1.2. Gruppierung von Parametern

Mittels der Gruppierung von Parametern kann die Anzahl der notwendigen Modellevaluationen reduziert werden, da die Parameter innerhalb einer Gruppe sich simultan in eine Rich-

tung bewegen. Die sich ergebenden Sensitivitätsindizes erlauben dann eine Bewertung des Einflusses der Parametergruppe, die Einzelparametereinflüsse lassen sich nicht berechnen. Daher ist eine Gruppierung von Parametern nur sinnvoll, wenn es dafür eine physikalische bzw. logische Begründung gibt.

So können Parameter, die zu unterschiedlichen Zeiten für ein Modell relevant sind sich aber generell jeweils simultan erhöhen oder reduzieren, zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Dies ist etwa für Parameter, die während und außerhalb der Nutzungszeit unterschiedliche Werte annehmen, verwendbar.

**Beispiel 11.1.3.** *Die Raumsolltemperatur während des Tages und der Nacht kann gruppiert werden, wenn angenommen wird, dass niedrigere Raumsolltemperaturen tagsüber auch niedrigere Raumsolltemperaturen nachts bedingen und umgekehrt.*

Auch wenn die gemeinsamen Einflüsse mehrerer Parameter, die beispielsweise durch ein Sanierungsszenario zu einer Erhöhung der Energieeffizienz verändert werden, untersucht werden sollen ist die Gruppierung einsetzbar. In diesem Fall werden dann die in einer Gruppe zusammengefassten Parameter auf ihren Einfluss hin analysiert.

**Beispiel 11.1.4.** *Im Rahmen eines Sanierungsszenarios wird auf alle Außenwände, Dächer und unteren Gebäudeabschlüsse Dämmung aufgebracht. Die Dicke der Dämmung kann für alle Bauteile simultan durch Gruppierung variiert werden. Es lässt sich dann nicht mehr quantifizieren, ob beispielsweise der Einfluss der Außenwanddämmungsdicke größer ist als die Dicke der Dachdämmung.*

Eine weitere Verwendung der Gruppierung ist für Start- und Endzeitpunkte von Ereignissen, die eine feste Dauer haben. In diesem Fall bewegen sich diese beiden Zeitpunkte simultan und die Einflüsse der einzelnen Zeitpunkte sind nicht von Interesse. Einfacher ist hier jedoch die Dauer des Ereignisses fest vorzugeben und nur den Startzeitpunkt zu variieren.

**Beispiel 11.1.5.** *Für eine Untersuchung des Einflusses einer zweistündigen manuellen Fensteröffnung kann der Startzeitpunkt für dieses Ereignis, welches zu einer Erhöhung der Luftwechselrate führt, beispielsweise zwischen 6 und 20 Uhr variiert werde und simultan hierzu der Endzeitpunkt zwischen 8 und 22 Uhr.*

Eine weitere Anwendung der Gruppierung ist für miteinander in Verbindung stehende Ereignisse, bei denen nur der gemeinsame Einfluss ermittelt werden soll.

**Beispiel 11.1.6.** *Die Anwesenheit von Personen wird als Ereignis mit variablem Start- und Endzeitpunkt abgebildet. Während der Anwesenheit werden zusätzlich elektrische Verbraucher aktiviert. Eine Gruppierung der Startzeitpunkte kann genutzt werden, damit elektrische Verbraucher immer erst bei Anwesenheit aktiviert werden. Es lässt sich dann jedoch beispielsweise nicht der Einfluss nur der Anwesenheit auf den Heizwärmebedarf ermitteln.*



## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

In Kapitel 10 wurde bereits auf die Erstellung der Stichproben für jedes Gebäude einzeln oder für das Quartier im Ganzen eingegangen. Falls die Parameter einzeln für die Gebäude definiert werden, so können alle gleichartigen Parameter der Gebäude als Gruppe untersucht werden, somit wird ein vergleichbarer Effekt wie bei der in dieser Arbeit verwendeten gemeinsamen Stichprobe der Parameter für alle Gebäude erreicht.

### 11.2. Anpassungen für sequentielle Sensitivitätsanalyse

Die sequentielle Sensitivitätsanalyse, bei der die Sensitivitätsindizes für jeden Zeitschritt berechnet werden, ist prinzipiell mit jedem Sensitivitätsindex durchführbar. In diesem Abschnitt wird auf die Besonderheiten bei Verwendung der Elementareffekt-Methode in Verbindung mit sequentieller Auswertung eingegangen. Teile dieses Abschnitts wurden bereits in [160] veröffentlicht.

Zur Glättung der Daten, für die die Sensitivitäten berechnet werden, können gleitende Mittel für festgelegte Intervalllängen der Zielgröße berechnet und anschließend daraus Elementareffekte ermittelt werden. Die prinzipiellen Auswirkungen unterschiedlicher Intervalllängen für die gleitenden Mittelwerte werden in Abschnitt 11.2.1 beschrieben. Für die Verwendung von gewichteten gleitenden Mittelwerten gilt das gleiche, hier kommt aber noch die Auswahl passender Gewichte hinzu. Hierauf wird in Abschnitt 11.2.2 eingegangen.

Die in 5.1.1 definierte Relevanz eines Modells lässt sich für sequentielle Auswertung nicht direkt verwenden, da sich die Einflüsse über die Simulationszeit verändern. Daher wird hier eine angepasste Definition der Relevanz vorgeschlagen, bei der ein Parameter dann zu den relevanten Parametern gezählt wird, wenn er zu irgendeinem Zeitpunkt des Modelllaufs einen Einfluss hat:

**Definition 11.2.1.** Die **Relevanz**  $R_S$  eines Modells bei sequentieller Auswertung ist definiert als

$$R_S = \frac{\text{Parameteranzahl, die Zielgröße zu einem beliebigen Zeitpunkt beeinflussen}}{\text{Gesamtzahl an Parametern des Modells}} \quad (11.1)$$

Ergänzend kann für die Relevanz der Parameter für sequentielle Auswertung auch berücksichtigt werden, wie groß der Anteil der Zeit sein muss, in der ein Parameter Einfluss hat:

**Definition 11.2.2.** Die **Relevanz**  $R_{S,p}$  eines Modells bei sequentieller Auswertung für einen zeitlichen Anteil  $p \in [0, 1]$  ist definiert als

$$R_{S,p} = \frac{\text{Parameteranzahl, die Zielgröße in } p \cdot 100\% \text{ der Zeit beeinflussen}}{\text{Gesamtzahl an Parametern des Modells}} \quad (11.2)$$

## 11.2. Anpassungen für sequentielle Sensitivitätsanalyse

Die Festlegung eines Sensitivitätsindexwerts, so dass der Parameter als beeinflussend gezählt wird, erfolgt bei der Berechnung von Sensitivitäten am Fallbeispiel in Teil V.

Bei der Definition der Elementareffekte in 5.3.7 ist das Ergebnis des Modells  $Y$  ein Skalar. Daher muss die Definition der Elementareffekte an Modelle mit vektoriellen Zielgrößen, in diesem Fall Zeitreihenzielgrößen, angepasst werden.

**Definition 11.2.3.** Für  $t \in \{t_1, \dots, t_n\}$  sei  $Y(t; x)$  das Ergebnis des Modells  $Y : \{t_1, \dots, t_n\} \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  zur Zeit  $t$  mit Parametern  $x \in \Omega$ . Dann ist der **sequentielle Elementareffekte**  $EE_i(t)$  für den Parameter  $x_i$  definiert als:

$$EE_i(t) = \frac{Y(t; x + e_i \Delta) - Y(t; x)}{\Delta} \quad (11.3)$$

$x$  ist dabei so bestimmt, dass  $x + e_i \Delta$  in  $\Omega$  liegt für alle  $i = 1, \dots, k$ , wobei  $e_i$  der Einheitsvektor mit Wert 1 an Position  $i$  ist.

$Y$  kann auch wie in Gleichung 5.20 als Matrix aufgefasst werden, in deren Zeilen die Ergebniszeitreihe der entsprechenden Parametervariation steht. Die Zeit  $\{t_1, \dots, t_n\}$  entspricht im Falle einer Stadtquartierssimulation meistens den 8760 Stunden des Jahres. Für die Berechnung der Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  muss Definition 5.3.8 um die Zeitabhängigkeit ergänzt werden. Dabei ist die Erstellung der  $r$  Trajektorien und deren Verwendung für die Berechnung der Elementareffekte analog.

**Definition 11.2.4.** Für die Elementareffekte  $(EE_i^j(t))_{i,j,t}$ ,  $i = 1 \dots k$ ,  $j = 1 \dots r$ ,  $t \in \{t_1, \dots, t_n\}$ , wobei  $EE_i^j(t)$  der Elementareffekt des  $i$ -ten Parameters in der  $j$ -ten Trajektorie zur Zeit  $t$  ist, werden folgende zeitabhängige Sensitivitätsindizes definiert:

$$\mu_i(t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j(t) \quad (11.4)$$

$$\sigma_i(t) = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j(t) - \mu_i(t))^2} \quad (11.5)$$

$$\mu_i^*(t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j(t)| \quad (11.6)$$

Vorteile der sequentiellen Sensitivitätsanalyse in Verbindung mit der Elementareffekt-Methode sind ihre einfache Implementierbarkeit und die stets gegebene Nachvollziehbarkeit der Berechnungen. Für jeden Zeitschritt ist direkt der Einfluss eines Parameters ablesbar und daher sind auch saisonale Unterschiede der Einflüsse von Parametern leicht erkennbar. Daher ist dieses Verfahren bestens geeignet, wenn beispielhafte, kurze Zeitabschnitte zur Auswertung der Sensitivitäten verwendet werden, wie es beispielsweise bei auf Typtagen basierenden Verfahren der Fall ist. Wenn hingegen lange Zeiträume wie ein Jahr in stündlicher Auflösung

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

untersucht werden, so können die Einflüsse der Parameter stark variieren. Hierbei ist dann ggf. eine abschnittsweise Auswertung vorzunehmen, d.h. dass die Sensitivitäten beispielsweise wochen- oder monatsweise dargestellt werden und daraus Parameterrankings abgeleitet werden.

### 11.2.1. Nutzung gleitender Mittelwerte

In [167] wurde die sequentielle Auswertung des SRC Sensitivitätsindex unter Verwendung gleitender Mittelwerte für eine Gebäudesimulation vorgestellt. Hierbei wurden Mittelungsintervalle von 24 Stunden und 240 Stunden verwendet. Diese Idee wird hier fortgeführt und die Anwendung in Verbindung mit der Elementareffekt-Methode dargestellt.

**Definition 11.2.5.** Für  $t_j \in \{t_1, \dots, t_n\}$  sei  $Y(t_j; x) =: Y_j$  das Ergebnis des Modells  $Y : \{t_1, \dots, t_n\} \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  zur Zeit  $t$  mit Parametern  $x \in \Omega$ , sowie  $Y(t_j; x + e_i \Delta) =: \tilde{Y}_j$  das Ergebnis des Modells  $Y$ , wenn der Parameter  $x_i$  um  $\Delta$  verändert wurde so dass  $X + e_i \Delta$  in  $\Omega$  liegt für alle  $i = 1, \dots, k$ . Dann ist der **sequentielle Elementareffekte des gleitenden Mittelwerts**  $\widehat{EE}_i^k(t_j)$  von  $Y$  für den Parameter  $x_i$  zur Zeit  $t_j$  unter Verwendung des gleitenden Mittelwerts über  $k$  Werte definiert als:

$$\widehat{EE}_i^k(t_j) = \frac{\widehat{Y}_j^k - \widehat{Y}_j}{\Delta} \quad (11.7)$$

$x$  ist dabei so bestimmt, dass  $x + e_i \Delta$  in  $\Omega$  liegt für alle  $i = 1, \dots, k$ , wobei  $e_i$  der Einheitsvektor mit Wert 1 an Position  $i$  ist.

Die Definition der zeitabhängigen, von den sequentiellen Elementareffekten abgeleiteten Sensitivitätsindizes unter Benutzung des gleitenden Mittelwerts für die Modellresultate ist wie folgt:

**Definition 11.2.6.** Für die Elementareffekte  $\widehat{EE}_i^{j,k}(t)$  des  $i$ -ten Parameters in der  $j$ -ten Trajektorie zur Zeit  $t$  mit gleitendem Mittelwert des Modells  $Y$  mit  $k$  Werten werden folgende zeitabhängige Sensitivitätsindizes definiert:

$$\widehat{\mu}_i^k(t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \widehat{EE}_i^{j,k}(t) \quad (11.8)$$

$$\widehat{\sigma}_i^k(t) = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (\widehat{EE}_i^{j,k}(t) - \widehat{\mu}_i^k(t))^2} \quad (11.9)$$

$$\widehat{\mu}_i^{*k}(t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |\widehat{EE}_i^{j,k}(t)| \quad (11.10)$$

Die Elementareffekt-Methode lässt sich also auch in Verbindung mit gleitenden Mittelwerten anwenden. Für die Ermittlung der Länge  $k$  des Mittelungsintervalls sind diverse Faktoren zu berücksichtigen. Zuerst ist die Fragestellung, zu deren Beantwortung die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, zu betrachten. Liegt der Fokus auf kurzzeitigen Schwankungen wie etwa der Erkennung von Lastspitzen bei der Stromeinspeisung so wird eine Mittelwertbildung über lange Zeiträume wenig hilfreich sein, um einflussreiche Faktoren zu ermitteln. Ist hingegen der Fokus auf saisonale Betrachtung gelegt so können Intervalle über mehrere Tage verwendet werden, da hierdurch die kurzzeitigen Schwankungen ignoriert werden und der generelle Einfluss hervorgehoben wird. Als weiterer Faktor ist die Art der Parameter, deren Einfluss untersucht werden soll, zu berücksichtigen. Sind dies konstante Parameter, so ist eine Mittelwertbildung zumeist unproblematisch. Allerdings kann es hier beispielsweise durch Wärmespeicherung zu Effekten kommen, die sich auf viele Zeitschritte im Simulationsergebnis verteilen und dadurch Störungen bei der Analyse der Energieflüsse auftreten [167, S. 304]. Sind dagegen Parameter, die ein Ereignis definieren, also insbesondere die das Ereignis definierenden Zeitpunkte zu untersuchen, so sollte die Mittelungsintervalllänge generell kürzer als das jeweilige Ereignis bzw. der Abstand zwischen den Zeitpunkten sein, da sonst Ergebnisdaten mit aktivem und nicht aktivem Ereignisparameter gemischt zur Mittelwertbildung verwendet werden. Die Besonderheiten zu Ereignisparametern werden in Abschnitt 11.4 nochmal aufgegriffen.

Zur Bewertung der Länge des Mittelungsintervalls lassen sich MSE bzw. RMSE verwenden, um die mittleren Abweichungen über die gesamte Simulationszeit zu quantifizieren. Hierzu werden  $MSE(Y, \hat{Y}^k)$  bzw.  $RMSE(Y, \hat{Y}^k)$  für die möglichen Mittelungsintervalllängen  $k$  berechnet, um die Abweichung der gemittelten Ergebnisdaten von den exakten Ergebnissen zu ermitteln. Um die Auswirkung der Mittelung auf die Sensitivitäten zu bestimmen, lassen sich die Fehlerwerte  $MSE(\hat{\mu}_i^k, \mu_i)$ ,  $MSE(\hat{\sigma}_i^k, \sigma_i)$  und  $MSE(\hat{\mu}_i^{*k}, \mu_i^*)$  bzw. deren Wurzeln  $RMSE$  verwenden. Die Grenzwerte, anhand derer eine Entscheidung für eine Mittelungsintervalllänge getroffen werden kann, sind von Fall zu Fall unterschiedlich, daher werden diese erst in Kapitel 13 für den dort vorliegenden Fall festgelegt.

Zur Ermittlung der Abweichungen in jedem Zeitschritt lassen sich die relativen Abweichungen  $Y(t)/\hat{Y}^k(t)$  der Ergebnisdaten bzw. die relativen Abweichungen der Sensitivitätsindizes  $\mu_i(t)/\hat{\mu}_i^k(t)$ ,  $\sigma_i(t)/\hat{\sigma}_i^k(t)$  und  $\mu_i^*(t)/\hat{\mu}_i^{*k}(t)$  nutzen. Diese geben eine prozentuale Abweichung der ungemittelten von den gemittelten Daten an. Auch verwenden lassen sich die quadratischen Abweichungen  $(Y(t) - \hat{Y}^k(t))^2$ , die durch Graphen eine optische Erkennung der Zeitpunkte mit großen Abweichungen ermöglichen.

Bei dem hier beschriebenen Verfahren zur sequentiellen Auswertung der Sensitivitäten wird das gleitende Mittel auf die Ergebnisdaten angewendet, um dann aus den gemittelten Daten Sensitivitätsindizes zu berechnen. Man könnte auch ungemittelte Daten zur Sensitivitätsberechnung verwenden und dann auf die Sensitivitätsindizes ein gleitendes Mittel anwenden. Für  $\mu$  und  $\mu^*$  ist diese Reihenfolge irrelevant, da allgemein für Erwartungswerte von beliebigen Zufallsvariablen  $\mathbb{E}(X + Y) = \mathbb{E}(X) + \mathbb{E}(Y)$  gilt. Es gilt jedoch nicht, dass Varianz bzw.

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

Standardabweichung geglätteter Daten gleich der geglätteten Varianz bzw. Standardabweichung sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird mit geglätteten Daten und darauf angewandten Sensitivitätsanalysemethoden gearbeitet.

### 11.2.2. Nutzung gewichteter gleitender Mittelwert

Es lassen sich auch gewichtete gleitende Mittelwerte mit konstanten oder beweglichen Gewichten zur sequentiellen Auswertung der Sensitivitäten nutzen. Dies ermöglicht beispielsweise bei konstanten Gewichten eine unterschiedliche Gewichtung je nach Saison, um beispielsweise Fragestellungen zu Überhitzung im Sommer zu untersuchen. Es ließe sich damit auch eine stärkere Berücksichtigung der Zeiten, in denen Nutzer im Gebäude sind, realisieren, um Fragestellungen zum thermischen Komfort in diesen Zeiten zu beantworten.

Zu den gleitenden Mittelwerte mit beweglichen Gewichten gehören beispielsweise linear gewichtete gleitende Mittelwerte, welche linear aufsteigende Gewichte nutzen und daher einem Punkt, je weiter er in der Vergangenheit liegt, ein desto kleineres Gewicht und damit Einfluss zuweisen. Auch exponentiell geglättete Mittelwerte können verwendet werden, bei denen exponentiell abnehmende Gewichte für weiter in der Vergangenheit liegende Werte verwendet werden.

In dieser Arbeit wird auf die gewichteten gleitenden Mittelwerte nicht weiter eingegangen, deren mögliche Anwendungen in Verbindung mit Sensitivitätsanalyse können zukünftig untersucht werden.

## 11.3. Anpassungen der funktionalen Transformationsmethode

Für die Berechnung der Elementareffekt-Sensitivitätsindizes unter Verwendung von funktionaler Transformation müssen die Elementareffekte für die Koeffizienten der funktionalen Transformation berechnet werden, um anschließend  $\mu$ ,  $\sigma$  und  $\mu^*$  berechnen zu können. Die Definitionen hierfür folgen im Anschluss, im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden dann die Besonderheiten der Fourier-Basis und der Basen, die mittels Hauptkomponentenzerlegung konstruiert werden, dargestellt. Teile dieses Abschnitts wurden bereits in [158] veröffentlicht.

**Definition 11.3.1.** Sei  $FT_K(y)$  eine endliche funktionale Transformation der Dimension  $K \in \mathbb{N}$  einer Funktion  $y$  gegeben durch  $y(t) = \sum_{k=1}^K c_k \Phi_k(t)$ . Dann sind die **funktionalen Elementareffekte** dieser Transformation gegeben durch:

$$fEE_i(k) = \frac{c_k(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_n) - c_k(x_1, \dots, x_n)}{\Delta} \quad (11.11)$$

Hierbei sind  $c_k(x)$ ,  $1 \leq k \leq K$  die Koeffizienten der funktionalen Transformation, die bei Verwendung des Parametervektors  $x \in \Omega$  entstehen.

Es wird also für alle Parameterstichproben eine funktionale Transformation durchgeführt und die Elementareffekte der Koeffizienten für jede einzelne Parameterstichprobe ermittelt. Für die Verwendung in Verbindung mit dem Sampling der Elementareffekt-Methode wird dann  $fEE_i^j(k)$  als funktionaler Elementareffekt des  $k$ -ten Koeffizienten der funktionalen Transformation bei Veränderung des  $i$ -ten Parameters in der  $j$ -ten Trajektorie bestimmt.

Die Definition der aus den Elementareffekten berechneten Sensitivitätsindizes für die Koeffizienten der funktionalen Transformation ist wie folgt:

**Definition 11.3.2.** Für  $1 \leq i \leq n$  und  $1 \leq k \leq K$  werden folgende Sensitivitätsindizes definiert:

$$\mu_f(i, k) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r fEE_i^j(k) \quad (11.12)$$

$$\mu_f^*(i, k) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |fEE_i^j(k)| \quad (11.13)$$

$$\sigma_f(i, k) = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (fEE_i^j(k) - \mu_f(i, k))^2} \quad (11.14)$$

Hierbei ist  $fEE_i^j(k)$  der funktionale Elementareffekt des  $k$ -ten Koeffizienten der funktionalen Transformation bei Veränderung des  $i$ -ten Parameters in der  $j$ -ten Trajektorien, wobei insgesamt  $r$  Trajektorien berücksichtigt werden.

Um zu bestimmen, wie viele Basisfunktionen und damit Koeffizienten für die Sensitivitätsanalyse verwendet werden, können die Fehlerwerte  $MSE(y, FT_K(y))$  bzw.  $RMSE(y, FT_K(y))$  für verschiedene Werte für  $K$  ausgewertet werden. Hierbei wird die mittlere Abweichung über den gesamten Simulationszeitraum betrachtet. Es können auch wie bei der sequentiellen Auswertung relative Abweichungen für jeden Zeitschritt analysiert werden.

Da der Effekt, der durch eine bestimmte Basisfunktion beschrieben wird, und damit die Bedeutung der zugehörigen Sensitivität nicht unbedingt im Vorfeld klar ist, müssen die Basisfunktionen interpretiert werden. Das Vorgehen hierzu wird im Folgenden für die Fourier-Basis und die durch Hauptkomponentenzerlegung erzeugte Basis in Hinblick auf Anwendung in energetischen Stadtquartiersmodellen beschrieben. Für andere Basisfunktionen kann das Vorgehen entsprechend angepasst werden, dies ist aber nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

### 11.3.1. Fourier-Basis

Die Fourier-Basis besteht aus der konstanten Basisfunktion 1, sowie Sinus- und Cosinus-Kurven  $\sin(\omega t)$ ,  $\cos(\omega t)$ ,  $\sin(2\omega t)$ ,  $\cos(2\omega t)$ , ...,  $\sin(n\omega t)$ ,  $\cos(n\omega t)$  mit ansteigender Frequenz. Der Koeffizient  $c_1$ , der zur konstanten Basisfunktion gehört, kann als Mittelwert der Zeitreihe interpretiert werden. Die höheren Koeffizienten zeigen auf, welche periodischen Verhalten den transformierten Daten zugrunde liegen.

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

In Hinblick auf 8760 stündliche Werte der energetischen Simulation von Quartieren im Jahr und den Schwankungen, die durch Klimadaten beeinflusst werden, sind insbesondere die Fourier-Koeffizienten  $c_2$  und  $c_3$ , die eine Sinus- bzw. Cosinus-Kurve mit Periodenlänge von einem Jahr repräsentieren, sowie die Koeffizienten  $c_{730}$  und  $c_{731}$ , welche eine Sinus- bzw. Cosinus-Kurve mit Periodenlänge von 24 Stunden repräsentieren, von Interesse. Da die Sinus- und Cosinus-Kurven nicht verschoben sind, also beispielsweise die zu  $c_3$  gehörige Cosinus-Kurve am 1. Januar um 0 Uhr ihr Maximum hat, in der Stunde  $8760/4 = 2190$  den Wert 0 annimmt, in der Stunde  $8760/2 = 4380$  ihr Minimum hat, und in der Stunde  $8760 \cdot 3/4 = 6570$  wieder den Wert 0 annimmt, um am 31. Dezember wieder ihr Maximum anzunehmen, dies aber nicht mit den die Simulation beeinflussenden Temperatur- und Strahlungsschwankungen übereinstimmt, werden auch die sonstigen Koeffizienten von 0 verschieden sein, allerdings in geringerem Umfang als die oben erwähnten Koeffizienten.

Prinzipiell lassen sich die fünf wichtigsten Basisfunktionen der Fourier-Basis wie folgt interpretieren: Der Koeffizient  $c_1$  stellt eine konstante Verschiebung der Zielgröße dar, eine Veränderung dieses Koeffizienten sagt also etwas darüber aus, ob die Ergebniskurve insgesamt nach oben oder unten verschoben wird. Der Koeffizient  $c_2$  gibt Aufschluss über Effekte, die im Winter kaum, im Frühjahr positiven, im Herbst negativen und im Sommer wieder kaum Änderungen auslösen. Im Gegensatz dazu erklärt  $c_3$  Effekte, die im Winter hohe Änderungen auslösen, die zum Sommer hin abnehmen, um dann wieder anzusteigen. In Hinblick auf den in Deutschland kalten Winter und damit hohen Heizwärmebedarf von Gebäuden ist dieser Koeffizient daher höchst interessant. Für die tagesweisen Schwankungen repräsentiert  $c_{730}$  Effekte, die Nachts kaum, zum Morgen hin größere, Mittags wieder kaum und abends negativen Änderungen bewirken. Der Koeffizient  $c_{731}$  beschreibt mit der täglichen Cosinus-Kurve Effekte, die nachts große positive und mittags negative Änderungen bewirken, ist also in Hinblick auf die nachts generell niedrigeren Temperaturen und den dadurch höheren Heizwärmebedarf von Interesse.

Die restlichen Koeffizienten spielen bei der Auswertung eine untergeordnete Rolle, da hier die sonstigen Schwankungen verteilt auf die verschiedenen Basisfunktionen abgebildet werden. Dies erschwert die Interpretation sehr. In der Vorveröffentlichung [158] wurden für diese Koeffizienten daher keine Sensitivitätsindizes berechnet.

Generell lassen sich die mittels Elementareffekt-Methode berechneten Sensitivitätsindizes für die Koeffizienten der Fourier-Transformation wie folgt interpretieren:  $\mu_f^*$  gibt den Gesamteinfluss eines Parameters auf die jeweilige Fourier-Basisfunktion wieder. Hierbei lässt sich nicht erkennen, ob ein positiver oder negativer Einfluss gegeben ist, aber für ein Parameterranking bzgl. des jeweiligen Koeffizienten lässt sich dieser Wert nutzen. Das Vorzeichen des Effekts lässt sich durch den Wert von  $\mu_f$  bestimmen. Ein positiver Wert für  $\mu_f$  sagt aus, dass der durch die jeweilige Sinus- oder Cosinus-Funktion repräsentierte Effekt auftritt, bei einem negativen Wert wird eine Spiegelung der Funktion an der Zeitachse dargestellt, d.h. die im Abschnitt oben dargestellten Effekte beispielsweise für  $c_{731}$  verkehren sich in ihr Gegenteil und beschreiben Effekte, die nachts negative, mittags positive Änderungen der Zielgröße

zur Folge haben. Der Wert  $\sigma_f$  gibt die Wechselwirkungseffekte mit anderen Parametern und nicht-linearen Einflüsse auf die jeweilige Frequenz wieder.

**Beispiel 11.3.3.** *Beispielhafte Auswirkung auf Fourier-Koeffizienten:*

- *Änderungen an Parametern, die die gesamte Simulationszeit über konstant sind und konstante Ergebnisänderungen bewirken, wie beispielsweise eine U-Wert-Verringerung der Wand normalerweise zu geringerem Heizenergiebedarf über das ganze Jahr führt, erzeugen eine Veränderung des Koeffizienten  $c_1$ .*
- *Wenn eine Nachtlüftung aktiv ist, so wird im Vergleich zu einem Basisfall ohne Nachtlüftung eine Veränderung des Koeffizienten  $c_{731}$ , der die Cosinus-Kurve mit Maximum in der Nacht und Periodenlänge einem Tag repräsentiert, auftreten.*
- *Wenn Tag- und Nachtlüftung aktiv sind, so wird im Vergleich zu einem Basisfall ohne diese Lüftung sowohl der Koeffizient  $c_{730}$  als auch  $c_{731}$  eine Änderung aufzeigen.*

#### 11.3.2. Hauptkomponentenzerlegung

Bei der mittels Hauptkomponentenzerlegung erzeugten Funktionsbasis für eine Menge von Ergebnisdaten hängt die mögliche Interpretation der einzelnen Koeffizienten maßgeblich von der Bedeutung der jeweiligen Hauptkomponente ab. Hierfür kann, wie in 5.5 beschrieben, der Mittelwert aller Zeitreihen plus bzw. minus eines Vielfachen der Hauptkomponente dargestellt werden, um den jeweiligen Effekt zu erkennen. Gegebenenfalls muss hierbei auf kürzere Zeitintervalle wie einen Tag oder eine Woche zurückgegriffen werden, um Effekte erkennen zu können. Beispielsweise wenn tägliche Schwankungen zu- oder abnehmen, aber im Mittelwert gleichbleiben. Dann ist dies in einem Jahresdiagramm kaum erkennbar, insbesondere wenn zur Darstellung Mittelwerte verwendet werden.

Positive Koeffizienten für eine Hauptkomponente bedeuten, dass der durch die Hauptkomponente repräsentierte Effekt in der Zeitreihe auftritt, negative Werte der Koeffizienten bedeuten dass sich der Effekt umkehrt, d.h. an der Zeitachse gespiegelt wird. Es hat sich gezeigt, dass eine grafische Jahresdarstellung der Hauptkomponente wie oben beschrieben mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden einen ersten Eindruck über den repräsentierten Effekt gibt. Ist schon an dieser Stelle feststellbar, was für ein Effekt dies ist, also beispielsweise eine generelle Verschiebung nach oben, so sollte dennoch stichprobenhaft anhand einzelner Tage oder Wochen kontrolliert werden, ob nicht durch die Darstellung mittels gleitenden Mittelwerts bestimmte Aspekte der Hauptkomponente nicht sichtbar sind. Ist in der Jahresdarstellung kein eindeutiges Verhalten erkennbar, so sollte die Hauptkomponente mit kürzeren Mittelungsintervallen oder ganz ohne Mittelung über kürzere Zeiträume (Monat, Woche, Tag) dargestellt und interpretiert werden.

Ist der durch eine Hauptkomponente repräsentierte Effekt erkannt, so können die Sensitivitätsindizes der Elementareffekt-Methode interpretiert werden.  $\mu_f^*$  spiegelt dabei den Gesamteinfluss eines Parameters auf den entsprechenden Koeffizienten wider und wird auch für das Parameterranking jeder Hauptkomponente verwendet. Die Richtung des Effekts ist



## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode

mittels des Vorzeichens von  $\mu_f$  identifizierbar.  $\sigma_f$  zeigt wieder das Vorhandensein von nicht-linearen Einflüssen oder Wechselwirkungen mit anderen Parametern. Die Darstellung der Sensitivitätsindizes kann entweder mittels Morris-Plot erfolgen, oder es werden nur die Werte von  $\mu_f^*$  dargestellt, vgl. Abschnitt 5.5.

### 11.4. Anpassungen für dynamische Parameter

Die Modifikationen zur Auswertung hinsichtlich Zeitreihenzielgrößen wurde in den beiden vorhergehenden Abschnitten beschrieben. Zur Untersuchung der in Abschnitt 10.4 vorgestellten Ereignisparameter sind weitere Anpassungen der Elementareffekt-Methode notwendig, da diese Methode ursprünglich für konstante Parameter definiert ist.

Die in Abschnitt 5.4.3 dargestellte iPSA-Methode ist für ein durch ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen gegebenes Problem definiert. Sie untersucht die unterschiedlichen Einflüsse von Parameteränderungen, die zu unterschiedlichen Zeiten stattfinden können. Die Idee dieser Methode wird im Folgenden auf die sequentielle sowie die durch funktionale Transformation erfolgende Auswertung von Sensitivitäten übertragen.

Ereignisparameter sind dadurch definiert, dass zu einem variablen Zeitpunkt  $\tau$  ein Parameter  $P$  mit Startwert  $P_0$  um einen bestimmten Wert  $\Delta P$  geändert wird, diese Änderung bleibt für eine variable Zeit  $\Delta t$  aktiv, danach nimmt der Parameter wieder seinen Ursprungswert  $P_0$  an.

Das Sampling der Ereignisparameter erfolgt wie bei den anderen Parameterarten auch durch das Erzeugen von Trajektorien aus dem diskretisierten Parameterraum  $\Omega^k$ . D.h. die möglichen Startzeitpunkte  $\tau$  und Dauern  $\Delta t$  eines Ereignisses werden gemäß einer vorgegebenen Verteilung aus  $\Omega^k$  ermittelt. Hierbei ist, wie in Abschnitt 11.1.1 bereits angesprochen, die Anzahl an Diskretisierungsstufen  $p$  von entscheidender Bedeutung. Je kleiner  $p$  ist, desto weniger mögliche Zeitpunkte bzw. Dauern können  $\tau$  und  $\Delta t$  annehmen.

Bei skalaren Zielgrößen können die Auswirkungen auf die Zielgröße bei verschiedenen Startzeiten, Dauern und Parameterwerten direkt bestimmt werden. Es werden also für die Startzeit und Dauer sowie den Wert der Parameteränderung des Ereignisses die Elementareffekte berechnet und daraus die entsprechenden Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  ermittelt.

Bei Zeitreihenzielgrößen und der sequentiellen Auswertung der Sensitivitäten können für die Variation der Ereignisparameter  $\tau$ ,  $\Delta t$  und  $\Delta P$  ebenfalls direkt die Elementareffekte berechnet werden, dies wird im Folgenden genauer dargestellt.

Bei der Variation von  $\tau$  werden für die Berechnung der Elementareffekte die Modellergebnisse für zwei unterschiedliche Startzeiten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  des Ereignisses verglichen. Dies wurde in der Vorveröffentlichung [159] bereits thematisiert, hier folgt eine ausführlichere Erläuterung der dabei auftretenden Effekte. Hierfür sei  $Y_1(\cdot)$  das Ergebnis zum Ereignis mit Startzeit  $\tau_1$  und  $Y_2(\cdot)$  das Ergebnis zum Ereignis mit Startzeit  $\tau_2$ . Ohne Einschränkung der Allgemeinheit

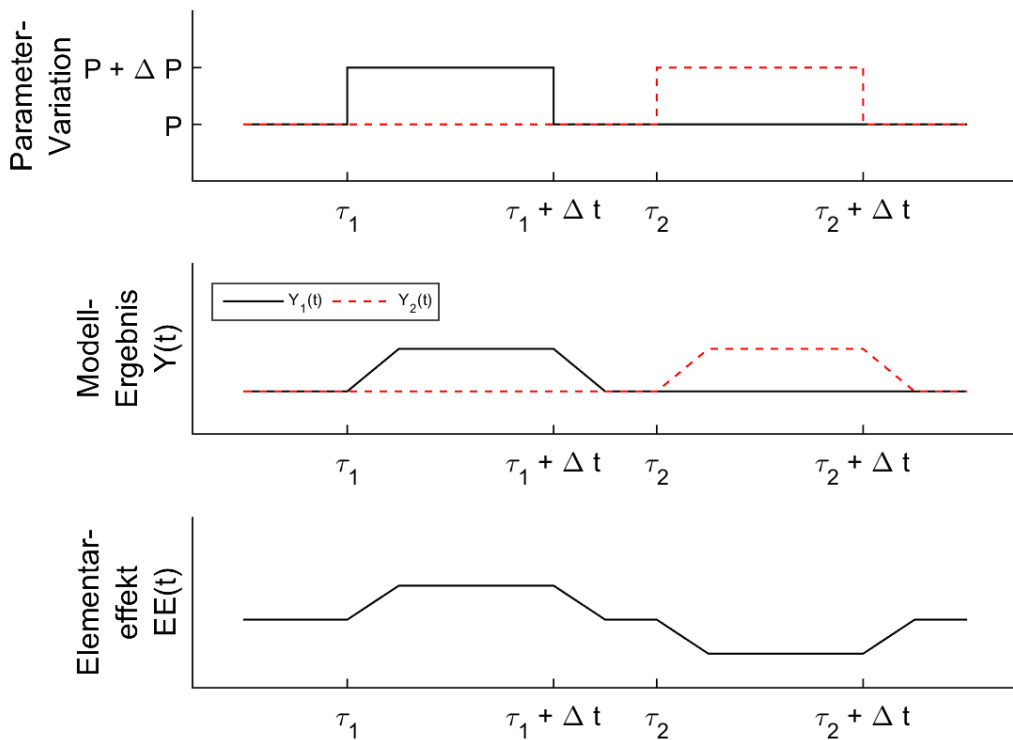


Abbildung 11.1.: Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisstartzeiten und sich nicht überschneidender Ereignisdauer

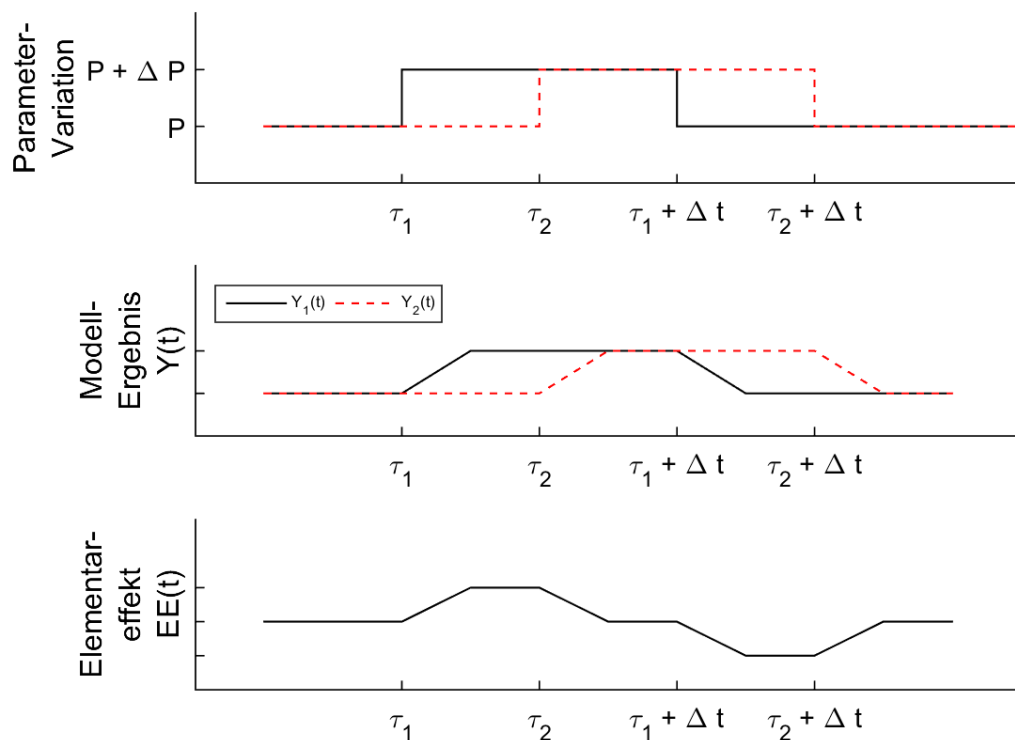
sei  $\tau_1 < \tau_2$ . Wenn man davon ausgeht, dass bei beiden Startzeiten das Ereignis einen Einfluss auf das Ergebnis hat, so werden sich die Ergebniszeitreihen  $Y_1$  und  $Y_2$  zum Zeitpunkt  $\tau_1$  und  $\tau_2$  unterscheiden, d.h.  $Y_1(\tau_1) \neq Y_2(\tau_1)$  und  $Y_1(\tau_2) \neq Y_2(\tau_2)$ . Ohne Beschränkung der Allgemeinheit gelte  $Y_1(\tau_1) > Y_2(\tau_2)$ . Dann gilt gemäß Definition 11.2.3:

$$EE(\tau_1) = \frac{Y_1(\tau_1) - Y_2(\tau_1)}{\Delta} \quad (11.15)$$

Somit hat die Elementareffekt-Zeitreihe  $EE$  zur Zeit  $\tau_1$  einen Ausschlag nach oben. Für die Dauer des Ereignisses startend zu  $\tau_1$  unterscheiden sich die Ergebnisse  $Y_1$  und  $Y_2$ , daher wird auch hier die Elementareffekt-Kurve von 0 abweichen. Hierbei muss unterschieden werden, ob  $\tau_1 + \Delta t < \tau_2$  gilt oder nicht. Ist dies der Fall und die beiden Ereignisse sind also zeitlich komplett zueinander versetzt, so wird sich, sofern das zum Zeitpunkt  $\tau_2$  startende Ereignis einen richtungsmäßigen gleichen Einfluss auf das Ergebnis hat, startend bei  $\tau_2$  ein Ausschlag nach unten aufweisen. Dieses Verhalten ist beispielhaft in Abbildung 11.1 dargestellt.

In dieser und den folgenden schematischen Darstellungen wird angenommen, dass sich das Modellergebnis bei Eintreten und Beenden des Ereignisses jeweils nicht sprunghaft ändert, sondern eine stetige Änderung erfährt, die dann zu einer gewissen zeitlichen Verzögerung bis zum Erreichen eines Niveaus führt. Bei realen Simulationsdaten von Gebäudemodellen

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode



**Abbildung 11.2.: Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisstartzeiten und sich überschneidender Ereignisdauer**

wird allerdings nicht solch eine geradlinige Darstellung möglich sein, da die Daten zumeist wesentlich mehr zeitliche Variationen beinhalten, u.a. aufgrund der Klimaeinflüsse. Auch wird angenommen, dass die Zielgröße bei der Parameteränderung nach Ende eines Ereignisses wieder auf den Ausgangswert zurückgeht, was bei Simulationsdaten alleine aufgrund des dynamischen Verhaltens der Zielgröße normalerweise nicht gegeben ist.

Wenn  $\tau_1 + \Delta t \geq \tau_2$  gilt und sich die Dauer des zu  $\tau_1$  startenden Ereignisses mit dem zur Zeit  $\tau_2$  startenden Ereignis überschneidet, so ergibt sich für die Elementareffekt-Zeitreihe schematisch die in Abbildung 11.2 dargestellte Form, da bei der Berechnung der Elementareffekt-Zeitreihe die Überlappung der Ereignisse berücksichtigt wird. Die Form ist also analog wie im vorherigen Fall, aber die Zeitpunkte des Anstiegs und des Abfalls unterscheiden sich.

Durch diese angestellten Überlegungen wird noch nicht berücksichtigt, wie sich die unterschiedlichen Startzeitpunkte auf das langfristige Verhalten des Modells auswirken. So kann es sein, dass über den Zeitpunkt  $\tau_2 + \Delta t$ , also das Ende des später startenden Ereignisses, hinaus die Modellergebnisse noch voneinander abweichen. Beispielsweise weil durch die thermische Speicherfähigkeit eines Gebäudes Verzögerungen auftreten. Dies ist in der Elementareffekt-Kurve durch einen von 0 verschiedenen Wert über den Zeitpunkt  $\tau_2 + \Delta t$  hinaus ersichtlich.

Für die Variation der Ereignislänge  $\Delta t$  bei jeweils gleichem Startzeitpunkt  $\tau$  und gleicher

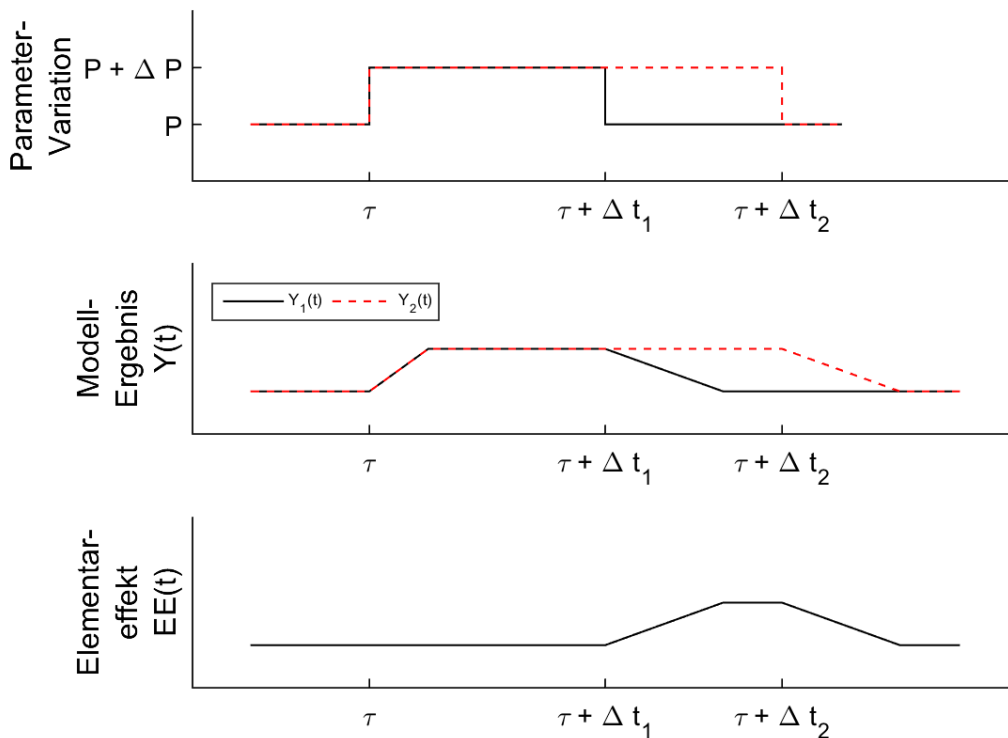


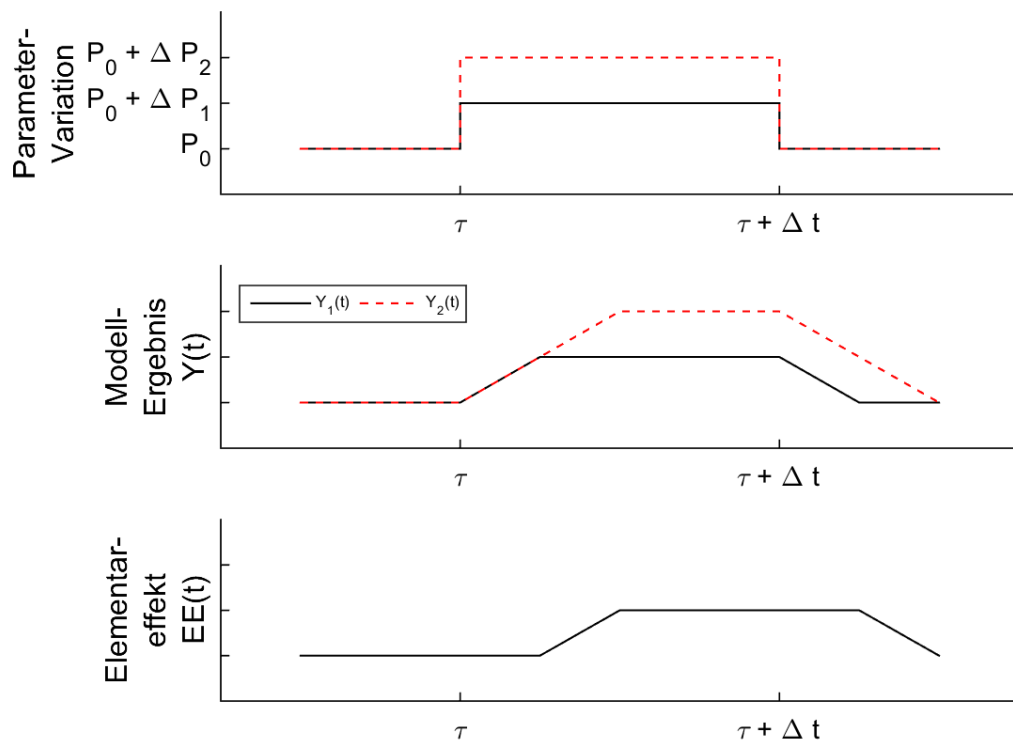
Abbildung 11.3.: Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Ereignisdauern  $\Delta t_1$  und  $\Delta t_2$

durch das Ereignis ausgelösten Parameteränderung  $\Delta P$  seien  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  die unterschiedlichen zu untersuchenden Ereignisdauern und  $Y_1$  und  $Y_2$  die zugehörigen Modellergebnisse. Dann gilt im Allgemeinen, dass  $Y_1(t) = Y_2(t)$  für  $\tau \leq t \leq \tau + \Delta t_1$  und  $Y_1(t) \neq Y_2(t)$  für  $\tau + \Delta t_1 < t \leq \tau + \Delta t_2$ , da das Ereignis bei Modellergebnis  $Y_2$  über den Zeitpunkt  $\Delta t_1$  hinaus andauert. Für die Elementareffekt-Zeitreihe bedeutet dies, dass  $EE(t) = 0$  für  $\tau \leq t \leq \tau + \Delta t_1$  und  $EE(t) \neq 0$  für  $\tau + \Delta t_1 < t \leq \tau + \Delta t_2$  gilt. Dies wird schematisch in Abbildung 11.3 dargestellt. Die längerfristigen Auswirkungen der Ereignisse werden in der Elementareffekt-Zeitreihe mit  $EE(t)$  für  $t > \tau + \Delta t_2$  repräsentiert.

Für die Variation der durch das Ereignis ausgelösten Parameteränderung  $\Delta P$  bei jeweils gleichem Startzeitpunkt  $\tau$  und gleicher Ereignisdauer  $\Delta t$  seien  $\Delta P_1$  und  $\Delta P_2$  zwei unterschiedliche Werte für die Parameteränderung und  $Y_1$  und  $Y_2$  die dazugehörigen Modellergebnisse. Dann gilt im Allgemeinen  $Y_1(t) \neq Y_2(t)$  für  $\tau \leq t \leq \tau + \Delta t$ , da in dieser Zeit der Parameter  $P$  jeweils unterschiedliche Werte  $P_0 + \Delta P_1$  bzw.  $P_0 + \Delta P_2$  annimmt. Die direkte Auswirkung wird also durch  $EE(t)$  für  $\tau \leq t \leq \tau + \Delta t$  repräsentiert, die längerfristigen Auswirkungen durch  $EE(t)$  für  $t > \tau + \Delta t$ . Eine schematische Darstellung der in diesem Fall resultierenden Elementareffekt-Zeitreihe ist in Abbildung 11.4 dargestellt.

Für die aus den Elementareffekt-Zeitreihen berechneten sequentiellen Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\mu^*$  und  $\sigma$  können teils ebenfalls die schematischen Auswirkungen der unterschiedlichen zu variierenden Ereignisparametern beschrieben werden.

## 11. Anpassungen der Elementareffekt-Methode



**Abbildung 11.4.:** Elementareffekt-Zeitreihe bei unterschiedlichen Parameteränderungen  $\Delta P_1$  und  $\Delta P_2$

Bei der Untersuchung unterschiedlicher Startzeiten für Ereignisse treten die Spitzen nach oben und unten auf, wie in den Abbildungen 11.1 und 11.2 zu sehen ist, und dies wirkt sich entsprechend auch auf den Mittelwert  $\mu$  über alle Elementareffekte aus. Allerdings sind bei mehr als zwei Trajektorien die Spitzen aufgrund der Mittelung normalerweise flacher als bei der Elementareffekt-Zeitreihe.

Bei der Variation der Ereignisdauer  $\Delta t$  wie in Abbildung 11.3 treten Änderungen von  $\mu$  jeweils zu den Zeiten auf, zu denen in einer Trajektorie das Ereignis noch aktiv ist, in der anderen Trajektorie nicht mehr. Hier ergibt sich dann also eine einzelne Spitze für die Zeitreihe von  $\mu$ . Ebenso tritt eine einzelne Spitze bei Variation des Parameterwerts, also unterschiedlichen Werten  $\Delta P_1$  und  $\Delta P_2$  wie in Abbildung 11.4, auf, sobald die Elementareffekt-Zeitreihe von Null verschieden ist. Diese Spitze ist durch die Mittelung flacher als bei der Elementareffekt-Zeitreihe.

Für die Zeitreihe von  $\mu^*$  gilt das soeben gesagte in analoger Weise, allerdings sind hier die Ausschläge immer positiv, da  $\mu^*$  als Mittelwert der Absolutbeträge der Elementareffekt-Zeitreihen berechnet wird. Bei der Zeitreihe für  $\sigma$  sind die Spitzen ebenfalls immer positiv auf Grund der Quadrierung, die Wechselwirkungseffekte mit anderen Parametern sind allerdings nicht allgemein einzuschätzen und daher ist hier keine schematische Auswirkung beschreibbar.

Diese schematischen Auswirkungen auf die Zeitreihen der Sensitivitätsindizes gelten bei ein-

maligen Ereignissen. Sobald Ereignisse periodisch auftreten können die Auswirkungen hiervon erheblich abweichen, da sich dann die langfristigen Auswirkungen eines vorhergegangenen Ereignisses mit den Auswirkungen eines darauf folgendes Ereignisses überschneiden können.

Zukünftig können die hier beschriebenen Auswirkungen benutzt werden, um einen Sensitivitätsindex analog zu dem in der iPSA-Methode beschriebenen zu definieren. Dies erfolgt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

Bei Zeitreihenzielgrößen, die mittels funktionaler Transformation ausgewertet werden, ist eine Erläuterung der auftretenden Fälle für die Elementareffekte und die davon abgeleiteten Sensitivitätsindizes nicht in der Allgemeinheit wie bei sequentieller Auswertung möglich, da es hierbei stark auf die verwendete Funktionsbasis ankommt. Bei der Fourier-Basis können durch einen Ereignisparameter sowohl die Amplitude als auch die Frequenz beeinflusst werden, insbesondere bei periodischen Ereignissen. Bei der durch Hauptkomponentenzerlegung erzeugten Funktionsbasis ist es möglich, dass sich durch Ereignisparameter eine Verschiebung von einer Hauptkomponente zu einer anderen als Haupteffekt einstellt. Dies lässt sich aber auch nur im jeweiligen Einzelfall ermitteln. Daher wird hier nicht weiter auf die Auswirkung der Sensitivitätsanalyse dynamischer Parameter im Falle von Auswertung mittels funktionaler Transformation eingegangen.

Für die Anwendung der Sensitivitätsanalyse mit dynamischen Parametern existieren zwei mögliche Umsetzungsalternativen in Modellen. Zum einen können die Schedules, die ein Ereignis definieren, im Vorfeld entsprechend erzeugt werden, d.h. für alle unterschiedlichen Startzeitpunkte, Ereignisdauern und Variationen des beeinflussten Parameterwerts wird ein eigenes Modell erstellt. Dies bedeutet, dass nur Ereignisse untersucht werden können, die sich auf ein einzelnes Gebäude auswirken. Die zweite Möglichkeit ist, während des Simulationslaufs, der beispielsweise per FMI (vgl. Kapitel G) gestartet worden sein kann oder über BCVTB gesteuert wird, auf das Modell zuzugreifen und zu entsprechenden Ereignisstartzeitpunkten Änderungen eines Parameters zu aktivieren und diese nach Ende des Ereignisses wieder auf den Ausgangswert zurückzusetzen. Bei dieser zweiten Methode können daher auch Ereignisse untersucht werden, deren Start von Ergebniswerten mehrerer Modellen abhängt oder die mehrere Gebäude parallel betreffen. Dies ist daher eine wesentlich flexiblere Lösung zur Steuerung von Ereignissen, die allerdings im Allgemeinen aufgrund des höheren Kommunikationsaufwands zwischen den Modellen auch mit längerer Rechenzeit einhergeht.

Die Parametervariationen für Ereignisse können, wie in Kapitel 10 beschrieben, entweder für Einzelgebäude oder für alle Gebäude gemeinsam durchgeführt werden.



**Teil V.**

# **Exemplarische Sensitivitätsanalyse**





In diesem Teil der Arbeit wird anhand des Modells EmMi-transient eine exemplarische Sensitivitätsanalyse mittels der in Teil IV vorgestellten Methodik durchgeführt. Dies demonstriert das Vorgehen der Analyse sowie mögliche Erkenntnisse, da sich dadurch gewinnen lassen. Das Vorgehen lässt sich auf beliebige andere Modelle, die Zeitreihenergebnisse erzeugen, übertragen. Die gewonnenen Erkenntnisse dagegen sind nur für das Modell EmMi-transient und den damit untersuchten Block gültig. Dies ist bereits durch die Unterschiede in den Ergebnissen für die verschiedenen Szenarien, in denen der Block diversen Sanierungsmaßnahmen bzw. Annahmen an die Heizungsanlagen unterworfen wird, ersichtlich. Für einen anderen Gebäudeblock bzw. ein anderes Quartier können sich andere Aussagen ergeben.

Der Teil gliedert sich in eine Beschreibung des Modells EmMi-transient in Kapitel 12 mit einer Bewertung gegenüber vorhandenen Modellen, einer Darstellung des analysierten Gebäudeblocks mit den verwendeten Daten und Sanierungsszenarien sowie die Definition der für die Sensitivitätsanalyse verwendeten Parameter. Die Ergebnisse des Modells und der Sensitivitätsanalyse werden in Kapitel 13 präsentiert.

Die Sensitivitätsanalyse erfolgt zuerst mittels einer sequentiellen Auswertung der Sensitivitäten, im Anschluss wird eine Auswertung mittels funktionaler Transformation durch Hauptkomponentenzerlegung vorgestellt. Es werden dabei nur konstante Parameter betrachtet. Durch Ereignisse beeinflusste Parameter wie etwa unterschiedliche Fensterlüftungszeiten sind aufgrund des Umfangs und der Rechenzeit nicht Gegenstand dieser Beispieluntersuchung.

Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ergibt sich, dass sich die Parametereinflüsse in den Szenarien und vor allem hinsichtlich der betrachteten Zielgrößen unterscheiden. Im Allgemeinen sind neben den thermischen Eigenschaften des Tragwerksteils der Außenwände bei ungedämmten Gebäuden bzw. der Dämmung bei gedämmten Gebäuden die Solltemperatur und die Luftwechselrate von großer Bedeutung für alle betrachteten Zielgrößen. Auch die Höhe des jährlichen Haushaltsstrombedarf beeinflusst die Zielgrößen maßgeblich.

Eine Übersicht der Simulationsergebnisse wird in Abschnitt 13.1 gegeben. Die detaillierte Betrachtung der Sensitivitätsanalyseergebnisse findet sich in Abschnitt 13.2. In Abschnitt 13.3 werden daraus Empfehlungen für die zukünftige Modifikation des Modells und die Datenerfassung für die einflussreichen Parametern abgeleitet.



## 12. Modell EmMi-transient

Für die beispielhafte Anwendung der in Teil IV beschriebenen Sensitivitätsanalysemethodik wird das Modell EmMi-transient für einen Block bestehend aus 25 Wohngebäuden eingesetzt. Eine kurze Beschreibung dieses Modells, zukünftige Validierungsmöglichkeiten dafür und eine Darstellung der für die Parametrisierung verwendeten Daten sowie die für die Sensitivitätsanalyse variierten Parameter und deren Wertebereiche und Verteilungen findet sich in den folgenden Abschnitten. Eine ausführliche Beschreibung der Modellierung ist im Anhang in Teil VII zu finden. Eine schematische Darstellung der Modellierung in EmMi-transient ist in Abbildung 12.1 gezeigt.

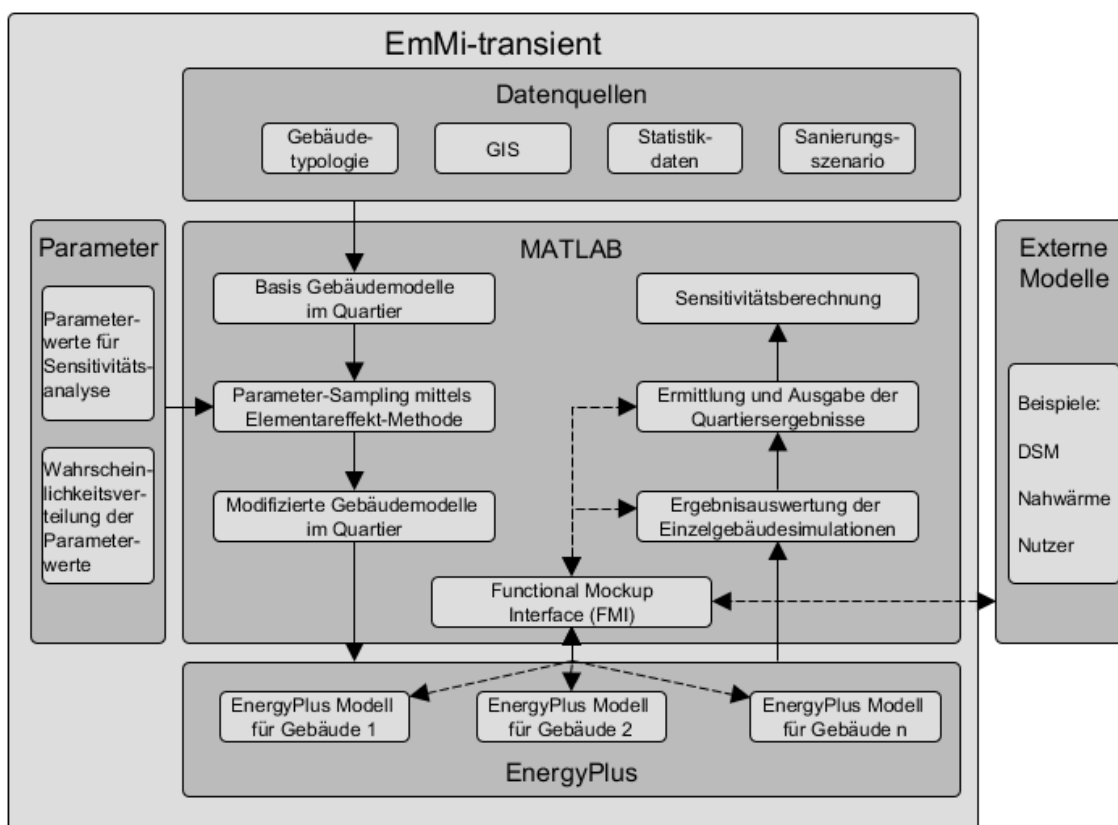


Abbildung 12.1.: Schematische Darstellung von EmMi-transient

### 12.1. Beschreibung

Das Modell EmMi-transient ist ein in MATLAB erstelltes Werkzeug, mit dem statistische, gebäudetypologische und verortete Daten genutzt werden (vgl. Anhang A), um transien-

## 12. Modell EmMi-transient

te Gebäudesimulationsmodelle für EnergyPlus zu erstellen. Dabei wird der Grundriss und Standort der Gebäude und die gegenseitige Verschattung berücksichtigt und es werden Gebäudetypologien zur Erstellung der einzelnen Bauteile verwendet (vgl. Anhang B). Die Modellierung der Heizungssysteme nutzt vordefinierte typische Systeme (vgl. Anhang C), der Strombedarf der Haushaltsgeräte wird über vordefinierte Lastprofile berechnet, die Stromerzeugung durch PV-Anlagen durch vordefinierte Systeme (vgl. Anhang D). Die Modellierung des Nutzerverhaltens ist stark vereinfacht, da auch die vorhandenen Datenquellen hierzu wenige Informationen bereitstellen (vgl. Anhang E). Es ist möglich, die Gebäudesimulationsmodelle gekoppelt laufen zu lassen und somit quartiersweite Sanierungsszenarien zu untersuchen (vgl. Anhang G). Zusammengefasst wird der Ablauf eines EmMi-transient Simulationslaufs in Anhang H.

### 12.2. Zukünftige Validierung

Das Gesamtmodell EmMi-transient ist derzeit weder analytisch, noch logisch oder empirisch (vgl. Abschnitt 3.4) validiert.

Eine analytische Validierung ist prinzipbedingt nicht möglich, da keine exakten Lösungen für die Gleichungen, die das energetische Verhalten eines Quartiers beschreiben, angegeben werden können.

Eine logische Validierung mit anderen Modellen, wie sie in Kapitel 6 aufgeführt sind, wäre denkbar, allerdings sind auch die dort aufgeführten Stadtmodelle entweder gar nicht oder nur mit Daten eines Beispielquartiers validiert. Auch sind die bereits vorhandenen Modelle zumeist auf wenige Aspekte konzentriert oder nutzen stationäre anstelle von dynamischen Berechnungsverfahren. Daher wären auch nur einzelne Aspekte logisch validierbar. Dennoch sind für zukünftige Untersuchungen mittels EmMi-transient entsprechende Vergleiche geplant.

Eine empirische Validierung für den in dieser Beispielanwendung untersuchten Gebäudeblock ist mangels entsprechender Messdaten, beispielsweise zum Energieverbrauch, auch nicht durchführbar. Für eine empirische Validierung wären neben den eigentlichen Zielgrößen auch eine Vielzahl an Parametern, die die realistischen Randbedingungen beschreiben, zusätzlich zu erfassen. Ohne diese Randbedingungen ist eine empirische Validierung sinnlos, da das Modell dann nicht die Realität abbilden kann. Und eine empirische Validierung unter idealisierten Randbedingungen ist für ein reales Stadtquartier nicht durchführbar. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die zukünftige Entwicklung eines Quartiers untersucht werden soll und diese Entwicklung per se mit Unsicherheiten behaftet ist.

Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen, an die TABULA Gebäudetypologie angelehnten, in EnergyPlus erstellten und durch EmMi-transient parametrisierten Gebäudemodelle [216] aufgrund der Validierung von EnergyPlus [197] verlässliche Ergebnisse liefern. Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Sensitivitätsanalysen wird

es daher ermöglicht, Aussagen zum Einfluss und der notwendigen Genauigkeit einzelner Parameter abzuleiten, um diese zukünftig in Feldstudien zu erfassen. Dies kann dann für eine empirische Validierung unter Berücksichtigung der einflussreichsten Randbedingungen genutzt werden.

Idealerweise wären neben den einflussreichsten Randbedingungsparametern auch die mindestens stündlich aufgelösten Energieverbrauchsdaten der unterschiedlichen Energieversorgungssysteme sowie die entsprechenden Klimabedingungen zu erfassen. Ein Vergleich mit monatlichen oder jährlichen Verbrauchszahlen kann ein erster Schritt sein, allerdings wird dann die in EmMi-transient abgebildete Dynamik und damit vermutlich auch der Einfluss erneuerbarer Energiesysteme vernachlässigt.

Zusammengefasst ist derzeit eine Validierung von EmMi-transient also nicht möglich, aber die im Folgenden durchgeführten Sensitivitätsanalysen sind ein Schritt in Richtung Validierung. Auch andere Modelle lassen sich mit dieser Methodik auf ihr Verhalten hin untersuchen. Daher werden Entwickler damit in die Lage versetzt, ein besseres Verständnis für die modellierten Zusammenhänge zu erhalten.

## 12.3. Einordnung hinsichtlich vorhandender Modelle

EmMi-transient ist ein sehr detailliertes, auf thermischer Gebäudesimulation basierendes, physikalisches bottom-up Modell.

Die Datengrundlage des Modells ist zum einen stichprobenbasiert, da GIS-Daten für den jeweils zu untersuchenden Gebäudebestand verwendet werden, die Auskunft über Geometrie, Orientierung, Anbausituation und gegenseitige Verschattung der einzelnen Gebäude geben und zur Erstellung der Modellgeometrie genutzt werden. Die hierfür verwendeten LoD1 Daten enthalten starke Vereinfachungen vor allem der Dachgeometrie, die durch die zukünftige Verwendung von Daten gemäß LoD2 oder höher oder von BIM-Modellen vermieden werden können.

Andererseits ist die Datengrundlage auch archetypenbasiert, da jedes zu untersuchende Gebäude einen Gebäudetyp zugewiesen bekommt, der die Bauteilaufbauten, Fensterflächenverteilung und Konfiguration des Heizungssystems und sonstiger Anlagentechnik repräsentiert. Im Rahmen der in EnergyPlus vorhandenen Teilmodelle sind die Konfigurationen der Gebäude fast beliebig an real existierende Gebäude erweiter- und anpassbar. Das größte Problem hierbei ist die Verfügbarkeit von Daten zur Parametrisierung.

EmMi-transient ist derzeit nur in der Lage, Wohngebäude abzubilden. Dies liegt zum einen an der vorhandenen Datengrundlage, die für Wohngebäude zwar unvollständig, aber wesentlich besser als für Nichtwohngebäude ist. Zum anderen wäre für Nichtwohngebäude eine Abbildung der Gebäude als Mehrzonenmodelle notwendig [214], da sich die Nutzungsarten in den einzelnen Teilen von Nichtwohngebäuden erheblich unterscheiden können.

## 12. Modell EmMi-transient

Die in EmMi-transient abgebildeten Anlagentechniken orientieren sich an den Systemen, die in TABULA [125] ermittelt wurden. Die Vielfalt der in der Realität vorkommenden Konfigurationen kann damit nur teilweise abgedeckt werden. Auch sind einige Einschränkungen bei der Modellierung der Anlagentechnik, wie die Aufstellung der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Keller aufgrund der eingeschränkten Funktion bei niedrigen Außenlufttemperaturen oder die Ankopplung des Solarthermiekreises über einen Wärmetauscher im Trinkwarmwasserrücklauf, vorhanden, die zukünftig verbessert werden sollten.

Durch die Möglichkeit, Sanierungsmaßnahmen durch Szenarien zu untersuchen, sind Prognosen für die zukünftige Entwicklung von Quartieren möglich. Sofern größere Gebäudebestände als im hier vorliegenden Fall untersucht werden besteht auch die Möglichkeit, Sanierungen durch die in [187] vorgestellte zufallsbasierte Berechnung abzuschätzen. Bei kleinen Gebäudebeständen ist dies aufgrund der damit eingeführten Unsicherheiten nicht sinnvoll.

Im Vergleich zu den im Kapitel 6 vorgestellten existierenden Stadtmodellen erlaubt es EmMi-transient, Interaktionen zwischen Gebäuden über FMI abzubilden und somit quartiersweite Maßnahmen zu untersuchen. Dies ist nach bestem Wissen des Autors ein Alleinstellungsmerkmal, da somit detaillierte Gebäudemodelle beispielsweise mit thermischen oder elektrischen Netzmodellen gekoppelt werden können und damit auch Auswirkungen von Maßnahmen an Gebäuden auf das Netz oder Potentiale von DSM untersucht werden können. Aufgrund der detaillierten Gebäudemodelle mit der enthaltenen Anlagentechnik sind somit Aussagen zur variablen Eigenstromnutzung und Stromeinspeisung möglich, die beispielsweise bei Verwendung von RC-Modellen nicht durchführbar sind, da in diesen keine Informationen zur Anlagentechnik enthalten sind. Durch die Nutzung von FMI ist auch eine Schnittstelle gegeben, mit der andere dynamische Modelle, etwa zur Abbildung des Nutzerverhaltens oder des Energiesystems, angekoppelt werden können, hier wird sich aus Sicht des Autors in Zukunft noch ein weites Anwendungsfeld erschließen.

Die aus der Verwendung von thermischer Gebäudesimulation resultierende lange Rechenzeit wird durch parallel laufende Simulationen in Grenzen gehalten. Für die Berechnung einzelner Szenarien ist die Rechenzeit mit wenigen Stunden überschaubar, bei Untersuchung von Sensitivitäten mit vielen Parametervariationen kann die Berechnung mehrere Tage dauern. Da solche Untersuchungen zumeist nur wenige Male durchgeführt werden, um Empfehlungen zur genaueren Datenerfassung oder Modifikation der Modellierung abzuleiten, ist dies akzeptabel. Für den Einsatz als Optimierungswerkzeug dagegen ist EmMi-transient in dieser Form aufgrund der langen Rechenzeit nicht geeignet, hierfür sind beispielsweise RC-Modelle wesentlich leistungsfähiger.

Die Untersuchung von Sensitivitäten ist notwendig, da in vorhandenen Modellen Abweichungen aggregierter Zielgrößen zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten von bis zu 99 % gefunden wurden [214]. Da für die dynamischen Zielgrößen der Sensitivitätsanalyse im Vorfeld nicht bekannt ist, welche Parameter sich hier als einflussreich erweisen könnten, ist die Notwendigkeit der detaillierten Modellierung gegeben. Dies betrifft insbesondere auch die Untersuchung der Parameter, die bei Quartiersmaßnahmen untersucht werden können.

Ökonomische Betrachtungen, wie die Kosten für Sanierungen und die damit zu erzielenden Einsparungen, werden hier aufgrund des mangelnden Fachwissens des Autors außen vor gelassen. Dies ist aber eine wichtige Komponente wenn das Modell als Planungsinstrument eingesetzt werden soll, da die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen ein entscheidendes Kriterium für deren Durchführung ist. Die in dieser Arbeit vorgestellte Sensitivitätsanalysemethodik lässt sich auch mit ökonomischen Zielgrößen anwenden, sofern diese korrekt im Modell abgebildet werden.

Schlussendlich ist die ausführliche Modelldokumentation im Anhang in Teil VII dazu gedacht, die Modellierung transparent zu dokumentieren und dadurch nachvollziehbarer zu gestalten als dies in existierenden Modellen zumeist der Fall ist [135, S. 1696].

## 12.4. Exemplarischer Block der Nürnberger Weststadt

Für die exemplarische Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Sensitivitätsanalysemethodik wird ein Gebäudeblock aus dem Quartier „Nürnberger Weststadt“ verwendet. Dieses Quartier wurde im Rahmen des Projekts „Stadtlabor Nürnberger Weststadt“ an der Technischen Universität München bearbeitet. In dem Projekt wurden die zukünftigen Transformationsprozesse unter Beachtung der entsprechenden Randbedingungen untersucht, die zu einer nachhaltigen Entwicklung des Quartiers bis 2050 führen. Hierfür wurden insbesondere ökologische Kriterien wie Energienachfrage und Ressourcenverbrauch betrachtet sowie die verschiedenen, an der Transformation beteiligten Akteure. Auch die Integration erneuerbarer Energien in das Energieangebot waren Bestandteil des Projekts. Um die Variabilität der zukünftigen Entwicklung zu berücksichtigen, wurden drei Zukunftsvorstellungen entwickelt, welche zu unterschiedlichen Entwicklungspfaden führen. Diese wurden beispielhaft in Handlungsansätze für diverse strategische Standorte des Quartiers umgesetzt. [191, 1.1, 1.2]

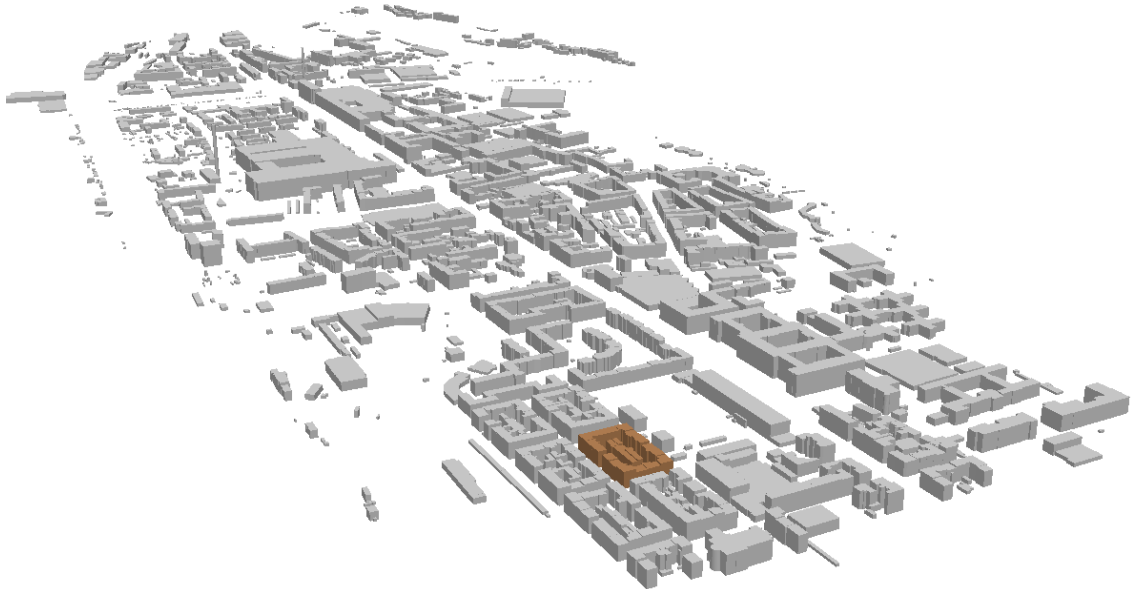
Das Quartier hat eine Fläche von rund 250 Hektar und besteht größtenteils aus Gebäuden mit Mischnutzung und einem mehr oder weniger starken Wohnanteil. Mehr als 50 % der Gebäude stammen aus der Zeit vor 1948. [191, 2.1]

Die ca. 1,2 Mio. m<sup>2</sup> Gebäudefläche teilen sich auf 42 % Wohnfläche und 58 % Nichtwohnfläche auf, bei Betrachtung nur der beheizten Gebäudefläche ist die Verteilung etwa 50 % und 50 %. Mehr als 75 % der Gebäude wurden vor Einführung der Wärmeschutzverordnung von 1978 errichtet, daher übersteigt der durchschnittliche Heizwärmebedarf der Wohngebäude den deutschlandweiten Durchschnitt von 177 kWh/m<sup>2</sup>a. Ca. 70 % der Gebäude sind kleine Mehrfamilienhäuser mit bis zu zwölf Wohneinheiten. Das Quartier ist größtenteils an das Gas- und Fernwärmenetz angebunden, das Fernwärmenetz wird durch zwei Heizkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung gespeist. [191, 2.6]

Der in dieser Arbeit untersuchte Gebäudeblock ist in Abbildung 12.2 dargestellt und wurde ausgewählt, da hier eine praktisch reine Wohnnutzung vorliegt. Außerdem spielt gegenseitige Verschattung eine Rolle. Er liegt im Stadtteil Gostenhof West und umfasst 25 Gebäude der



## 12. Modell EmMi-transient



**Abbildung 12.2.: Darstellung des gesamten Quartiers (grau) und des untersuchten Blocks (braun)**

Baualtersklassen 1860 - 1918, 1919-1948 und 1958-1968 mit einer aggregierten Wohnfläche von 10426 m<sup>2</sup>.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Daten, die für die folgende exemplarische Untersuchung eines Blocks verwendet werden, eingegangen. Diese Daten umfassen GIS-Daten zur Gebäudegeometrie und der Lage der Gebäude, statistische Angaben zu den Gebäuden sowie Daten aus der Gebäudetypologie zum Aufbau der Gebäudehülle.

### 12.4.1. GIS-Daten

Die aus [9] bezogenen GIS-Daten des Quartiers sind in Abbildung 12.3(a) dargestellt, die mittels SimplifyBuilding vereinfachten Gebäudeumrisse sind in Abbildung 12.3(b) dargestellt. Die Unterschiede sind zum einen die einfacheren Gebäudeumrisse, aber auch die entfernten kleinen Gebäude mit Grundflächen von weniger als 25 m<sup>2</sup>.

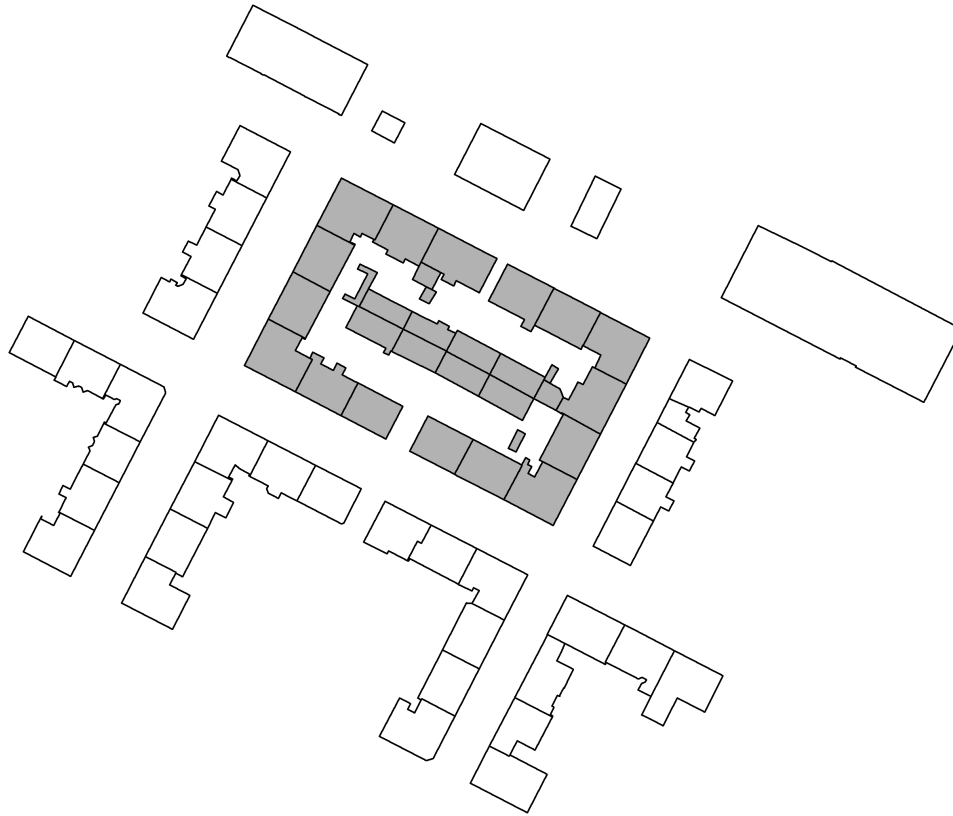
In Abbildung 12.4 sind die Gebäude nochmals dreidimensional mit den im Feld HOEHEGEB hinterlegten Höhen dargestellt.

In Tabelle 12.1 sind die in der Shapedatei manuell ergänzten Werte (vgl. auch Tabelle A.1) für alle Gebäude des Blocks aufgeführt.

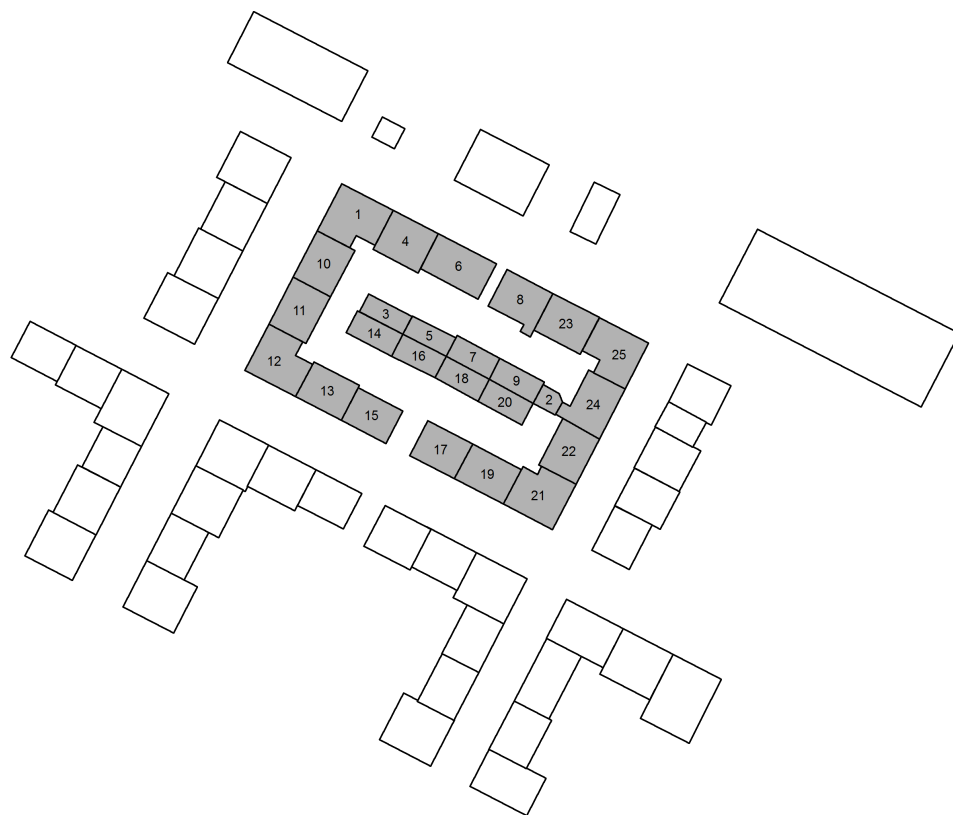
### 12.4.2. Statistische Daten

Die seitens der Stadt Nürnberg zur Verfügung gestellten Daten für die Blöcke im Quartier Nürnberger Weststadt sind vertraulich und werden daher hier nicht dargestellt. Diese Daten beinhalten aggregierte Angaben zur Baualtersklasse der Gebäude, den Gebäudetyp

## 12.4. Exemplarischer Block der Nürnberger Weststadt



(a) Unveränderte LoD1 Daten des Blocks (dunkel) mit Nachbargebäuden (hell)

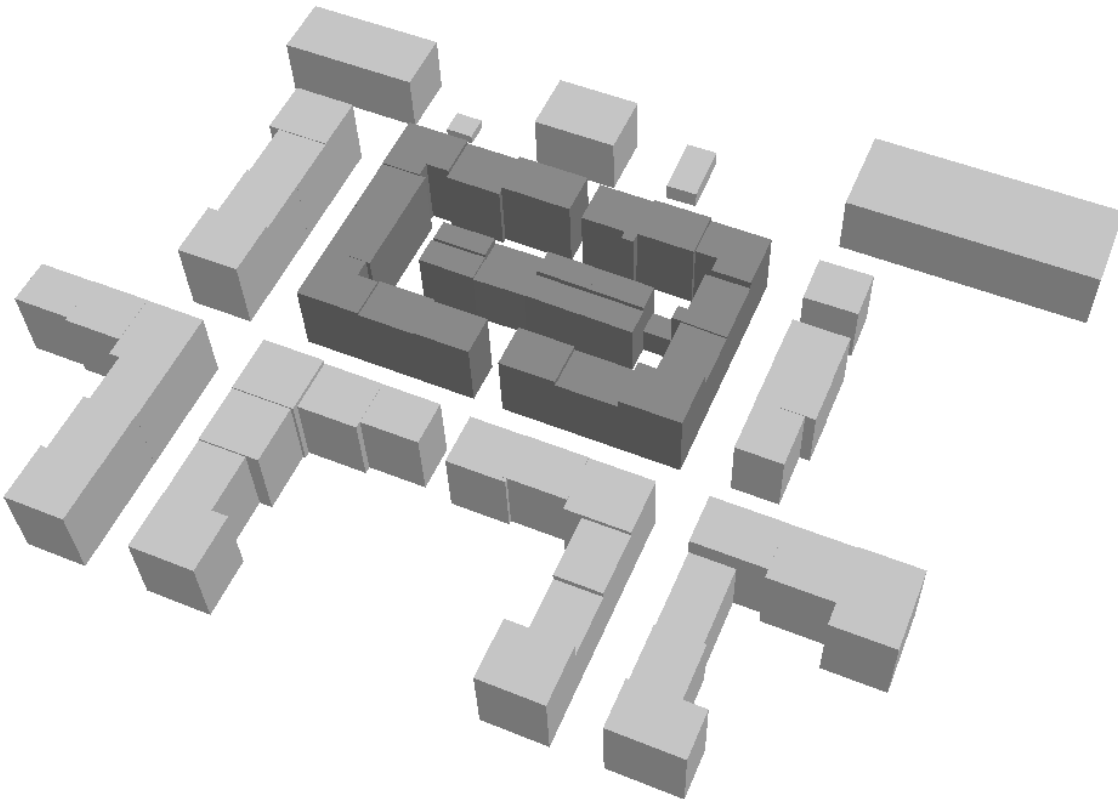


(b) Vereinfachte LoD1 Daten des Blocks (dunkel, mit ObjectID wie in Tabelle 12.1) mit Nachbargebäuden (hell)

**Abbildung 12.3.: LoD1 Daten des untersuchten Blocks**

Tabelle 12.1.: Tabelle mit manuell ergänzten Werten der Shapedatei

ObjectID	ID Gebäudetyp	Anzahl Geschosse	Ge-BAK	Anzahl Wohneinheiten	Keller vorhanden	Keller Tiefe	Keller beheizt	Dach beheizt
1	2	5	1948	10	1	3	0	1
2	5	1	1948	1	1	3	0	0
3	4	4	1948	4	1	3	0	1
4	2	5	1948	10	1	3	0	1
5	4	4	1948	4	1	3	0	1
6	6	5	1968	8	1	3	0	1
7	4	4	1948	4	1	3	0	1
8	2	5	1948	10	1	3	0	0
9	4	4	1948	4	1	3	0	1
10	2	5	1948	9	1	3	0	1
11	2	5	1948	10	1	3	0	1
12	1	5	1918	10	1	3	0	1
13	1	5	1918	9	1	3	0	1
14	3	4	1948	4	1	3	0	1
15	1	5	1918	9	1	3	0	1
16	3	4	1948	4	1	3	0	1
17	1	5	1918	9	1	3	0	1
18	3	4	1948	4	1	3	0	1
19	1	5	1918	9	1	3	0	1
20	3	4	1948	4	1	3	0	1
21	1	5	1918	10	1	3	0	1
22	1	5	1918	9	1	3	0	1
23	2	5	1948	9	1	3	0	1
24	1	5	1918	10	1	3	0	1
25	6	5	1968	13	1	3	0	1



**Abbildung 12.4.: Dreidimensionale Darstellung der LoD1 Daten des Blocks (dunkel) mit Nachbargebäuden (hell)**

(EFH, ZFH, MFH 3-6 Wohneinheiten, MFH 7-12 Wohneinheiten, MFH 13-19 Wohneinheiten, MFH 20+ Wohneinheiten), der Anzahl der Wohneinheiten und die Wohnfläche. Allerdings stimmen diese Daten, wenn man sie mit den in GIS abgebildeten Daten vergleicht, nicht überein. So sind für den untersuchten Block nur 24 Wohngebäude in der Statistik enthalten, in GIS sind 25 Gebäude enthalten. Da die statistischen Daten aggregiert für den Block vorliegen, wurde die Festlegung der Gebäudebaualtersklasse und der Anzahl der Wohneinheiten manuell vorgenommen, die Daten hierzu sind in Tabelle 12.1 aufgeführt. Dies führt dazu, dass die Verteilung wahrscheinlich nicht der Realität entspricht, zur Demonstration der Sensitivitätsanalysemethodik ist dies jedoch ausreichend. Die gesamte Wohnfläche in den Gebäuden des Blocks beträgt laut den statistischen Daten 10426 m<sup>2</sup>.

Die Energieträgerstruktur des gesamten Quartiers ist in [191, Abbildung 17] angegeben. Für die folgenden Untersuchung wird jedoch anhand der Szenarien in Abschnitt 12.5 der Energieträger für jeden Gebäudetyp des Blocks festgelegt. Daher spielen die hierfür vorhandenen statistischen Daten in dieser Untersuchung keine Rolle.

Der Haushaltsstrombedarf wird gemäß [261, 6.2.2] auf 3000 kWh pro Haushalt festgelegt. In [80, Tabelle 57] sind weitere Quellen angegeben, mit denen der Strombedarf je nach Haushaltgröße variiert werden kann.

## 12. Modell EmMi-transient

**Tabelle 12.2.: Zuordnung der EmMi-transient Gebäudetypen zu TABULA Gebäudetypen**

ID Gebäudetyp EmMi	TABULA Gebäudetyp	Baualtersklasse	EFH/MFH	Beschreibung
1	DE.N.MFH.02.Gen	1860-1918	MFH	Blockrandbebauung
2	DE.N.MFH.03.Gen	1919-1948	MFH	Blockrandbebauung
3	DE.N.MFH.03.Gen	1919-1948	MFH	Gebäude im Innenhof, Pultdach nach Süden
4	DE.N.MFH.03.Gen	1919-1948	MFH	Gebäude im Innenhof, Pultdach nach Norden
5	DE.N.MFH.03.Gen	1919-1948	EFH	Gebäude im Innenhof
6	DE.N.MFH.05.Gen	1958-1968	MFH	Blockrandbebauung

**Tabelle 12.3.: U-Werte der unsanierten Bauteile in W/(m<sup>2</sup>K)**

BAK	Außenwand	Dach	Fenster	Boden	oberste Geschossdecke
1860-1918	2,2	1,3	2,7	0,88	1,0
1919-1948	1,7	1,4	3,0	1,0	0,65
1958-1968	1,2	0,8	3,0	1,08	0,51

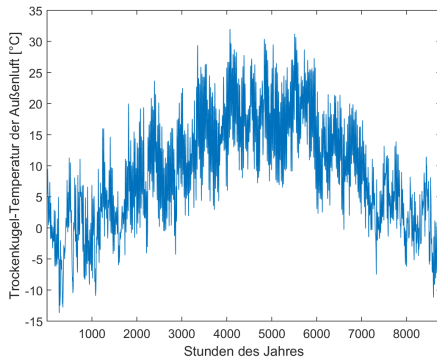
### 12.4.3. Gebäudetypologie

Es werden für die Modellierung des Ausgangszustands der Gebäude die Gebäudetypen DE.N.MFH.02.Gen (Baualtersklasse 1860-1918), DE.N.MFH.03.Gen (Baualtersklasse 1919-1948), und DE.N.MFH.05.Gen (Baualtersklasse 1958-1968) aus TABULA [125] verwendet. In der Typologie sind diese Gebäude als typischerweise 3- bis 5-geschossig mit Sattel- oder Flachdach beschrieben, das Dachgeschoss ist selten ausgebaut bzw. beheizt, die Decken sind Holzbalkendecken oder massive Stahlbetondecken, das Mauerwerk ist ein- oder zweischalig aus Vollziegeln oder Hohlblocksteinen und es sind starke Wärmebrücken an auskragenden Balkonen vorhanden. Daher entsprechen diese Gebäudetypen in etwa den Gebäuden im untersuchten Gebiet. In Tabelle 12.2 ist die Zuordnung der in EmMi-transient modellierten Gebäudetypen zu den TABULA Gebäudetypen aufgeführt. Hierbei wurden sechs Gebäudetypen definiert. Diese repräsentieren die verschiedenen Baualtersklassen der Blockrandbebauung, sowie die nach Süden bzw. Norden orientierten Gebäude mit Pultdach im Hof des Blocks und das EFH im Innenhof. Die Unterscheidung der nach Süden und Norden orientierten Gebäude im Hof ist wichtig für die Möglichkeit, PV oder Solarthermie zuweisen zu können.

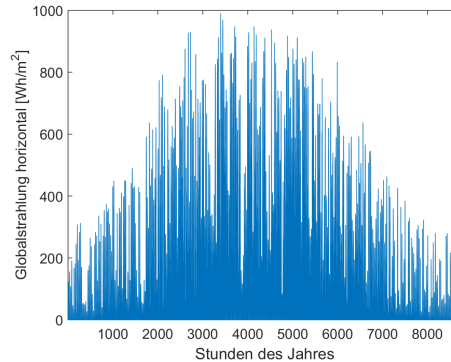
Die verwendeten U-Werte für die einzelnen Bauteile der Baualtersklassen im unsanierten Zustand sind in Tabelle 12.3 dargestellt. Die sonstigen Parameter der Bauteile wie Dichte, Dicke und Wärmespeicherfähigkeit sind wie in Abschnitt B.3 definiert.

### 12.4.4. Klimadaten

Die Klimadaten für die thermische Gebäudesimulation wurden mittels Meteororm erzeugt (vgl. Abb. 12.5(a) und 12.5(b)) und werden als unveränderlich angenommen. Klimadaten als



(a) Stündlicher Trockenkugeltemperaturverlauf



(b) Stündliche Globalstrahlung auf horizontale Fläche

**Abbildung 12.5.: Klimadaten für Nürnberg, mittels Meteonorm erzeugt**

Teil der Sensitivitätsanalyse werden im Ausblick in Abschnitt 15.2 angeschnitten, aber nicht im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Bei der Erzeugung wurden die standardmäßigen Strahlungs- und Temperaturmodelle verwendet, für geneigte Flächen wird das Modell nach Perez verwendet und die Zeitperiode für die Temperatur ist 1996 - 2005, für die Strahlung 1981 - 2000. Die geografische Breite ist auf  $49,500^\circ$ , die geografische Länge auf  $11,083^\circ$ , die Höhe auf 312 m gesetzt.

Die verwendete Trockenkugeltemperatur und Globalstrahlung sind in Abbildung 12.5(a) und 12.5(b) dargestellt. Die minimale Temperatur ist  $-13,7^\circ\text{C}$ , die maximale Temperatur  $32,0^\circ\text{C}$ . Die maximale Globalstrahlungsleistung beträgt  $990\text{ W/m}^2$ .

## 12.5. Sanierungsszenarien

Im Rahmen des Projekts Stadtlabor Nürnberger Weststadt wurden drei mögliche Zukunftsvorstellungen für das Quartier aus der Analyse des Stadtteils sowie globalen Entwicklungstrends entwickelt. Diese beziehen sich jeweils auf den Transformationsprozess bis zum Jahr 2050 und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

In der Zukunftsvorstellung „Managed Care“ werden eher kleine, lokale Projekte realisiert, die zu einem durchmischten Wohnquartier führen. Dies bedeutete, dass Nachverdichtung und Aufwertung vorhandenen Wohnraums durchgeführt wird, wobei auf Grund beschränkter Mittel nur moderate Anforderungen an Sanierungen gestellt werden. Die Sanierungen erfolgen auf dem Niveau der Energieeinsparverordnung 2009 [30] bei insgesamt ansteigender Sanierungsquote. PV wird auf allen dafür geeigneten Dachflächen genutzt.

In der Hypothese der Zukunftsvorstellung „Knowledge Economy Hub“ ist die Weststadt ein Wirtschaftsstandort, der eine Führungsrolle innerhalb der Stadt einnimmt und anspruchsvolle Arbeitsplätze bietet. Durch eine hohe Investitionsbereitschaft steigt die Sanierungsquote

## 12. Modell EmMi-transient

auf 90 % an, wobei hocheffiziente Konzepte umgesetzt werden. Aber auch ein hoher Anteil Ersatzneubau wird realisiert. Hierbei werden die Dachflächen ebenfalls maximal zur PV-Stromerzeugung genutzt.

In der Zukunftsvorstellung „Subsistance Economy“ wird eine lokale Kreislaufwirtschaft, die auf Wachstum verzichtet und den Ressourceneinsatz senkt, prognostiziert. Durch einen Rückgang der Bevölkerungszahl werden weniger Wohngebäude benötigt, Neubau findet kaum statt. Es wird nur eine geringe Sanierungsquote realisiert und die Anforderungen an Sanierungen bleiben moderat. Aber auch hier wird PV auf den Dachflächen genutzt.

In dieser Arbeit werden für die Untersuchung der Sensitivitäten nicht diese Szenarien genutzt, da hierfür die Transformationsprozesse bis zum Endzustand des Gebäudebestands untersucht und abgebildet werden müssten, und somit Annahmen über den zeitlichen Fortschritt der Sanierungen an jedem einzelnen Gebäude getroffen werden müssten. Stattdessen werden die extremen Fälle untersucht, in denen alle Gebäude des Blocks bestimmten Maßnahmen unterworfen werden. Dies erlaubt es, die Bandbreite der Sensitivitäten je nach Szenario zu ermitteln. Für Untersuchungen, die zu Umsetzungsempfehlungen führen sollen, müssten die Szenarien differenzierter erstellt werden. Die Maßnahmen der Szenarien werden in Tabelle 12.4 beschrieben.

Eine sanierte Gebäudehülle bedeutet, dass die in Tabelle 12.5 beschriebenen Maßnahmen bei allen Gebäuden durchgeführt werden. Diese Maßnahmen orientieren sich an den in TABULA [126] definierten zukunftsweisenden Modernisierungspaketen und sind für alle Baualtersklassen gleich definiert. In den Szenarien mit unsanierter Gebäudehülle werden die Bauteile gemäß dem Erstellungszustand, wie in Abschnitt 12.4.3 beschrieben, verwendet.

Im Rahmen dieser beispielhaften Anwendung werden nur Gas- und Wärmepumpenheizungen betrachtet, auch wenn im untersuchten Quartier ein Fernwärmeanteil vorhanden ist. Dies hat den Hintergrund, dass bei der modellierten Fernwärmeübergabestation Verluste im Fernwärmenetz extern berechnet werden müssten. Dies könnte beispielsweise durch Ankopplung an ein Fernwärmemodell, wie im Ausblick in Kapitel 15 beschrieben, geschehen. Aber da dies noch nicht umgesetzt ist wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Ölheizungen werden nicht betrachtet, da sich diese modelltechnisch außer im Wirkungsgrad nicht von gasgefeuerten Anlagen unterscheiden.

In den Szenarien mit Solarthermie wird diese unterstützend für die Trinkwarmwasserbereitung verwendet, dabei erfolgt die Modellierung wie in Abschnitt C.1.5 beschrieben. In den Szenarien mit PV wird auf den bei den entsprechenden Gebäudetypen zur Verfügung stehenden Dachflächen PV gemäß der Modellierungsbeschreibung in Abschnitt D.2 hinzugefügt. In den Szenarien mit Wärmepumpe wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe wie in Abschnitt C.1.3 beschrieben in allen Gebäuden modelliert, mit den dort genannten Einschränkungen hinsichtlich der Realitätsnähe der Modellierung.

Es werden für die beispielhafte Sensitivitätsanalyse in dieser Arbeit keine Szenarien mit den in Abschnitt G.2 beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Innenraumsolltempe-

Tabelle 12.4.: Übersicht der untersuchten Szenarien

Name	Hülle	Anlagentechnik
U.GAS	unsaniert	Gaskessel
U.GASPV	unsaniert	Gaskessel, PV auf Dachflächen
U.GASST	unsaniert	Gaskessel, Solarthermieanlage zur Trinkwarmwasserunterstützung
U.WP	unsaniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe
U.WPPV	unsaniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe, PV auf Dachflächen
U.WPST	unsaniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe, Solarthermieanlage zur Trinkwarmwasserunterstützung
S.GAS	saniert	Gaskessel
S.GASPV	saniert	Gaskessel, PV auf Dachflächen
S.GASST	saniert	Gaskessel, Solarthermieanlage zur Trinkwarmwasserunterstützung
S.WP	saniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe
S.WPPV	saniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe, PV auf Dachflächen
S.WPST	saniert	Luft-Wasser-Wärmepumpe, Solarthermieanlage zur Trinkwarmwasserunterstützung

Tabelle 12.5.: Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

BAK	Wand	Dach	Fenster	Boden	oberste Geschossdecke
1860-1918	24 cm Dämmung (WLS 035) außen	Dämmung (WLS 035) im Sparrenzwischenraum und zusätzliche Dämmlage, insgesamt 30 cm	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit $U = 0,80$ $W/(m^2K)$ , $g = 0,6$	12 cm Dämmung (WLS 035) unterseitig	-
1919-1948	24 cm Dämmung (WLS 035) außen	Dämmung (WLS 035) im Sparren-Zwischenraum und zusätzliche Dämmlage, insgesamt 30 cm	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit $U = 0,80$ $W/(m^2K)$ , $g = 0,6$	12 cm Dämmung (WLS 035) unterseitig	-
1958-1968	24 cm Dämmung (WLS 035) außen	Dämmung (WLS 035) im Sparren-Zwischenraum und zusätzliche Dämmlage, insgesamt 30 cm	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit $U = 0,80$ $W/(m^2K)$ , $g = 0,6$	12 cm Dämmung (WLS 035) unterseitig	-

ratur bei PV-Stromüberschuss untersucht, da dies die Rechenzeit durch die Verwendung von FMI stark ansteigen lässt und die Auswertung den Rahmen der Arbeit übersteigt. Stattdessen wird auf die Vorveröffentlichung [157] verwiesen, in der die Möglichkeiten, die durch die FMI-Kopplung entstehen und dadurch zu untersuchenden Fragestellungen beschrieben werden.



## 12.6. Parameter der Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden die für die Sensitivitätsanalyse des Beispielquartiers in EmMi-transient verwendeten Parameter mit ihren jeweiligen Wertebereichen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen festgelegt. Jedes einzelne Gebäudemodell hat mindestens 96 Parameter, die über EmMi-transient variiert werden können. Dies gilt bei einschichtigen Bauteilen, bei mehrschichtigen Aufbauten kommen pro Schicht 8-9 Parameter hinzu. Insgesamt sind in den EnergyPlus-Modellen mehrere Tausend Parameter vorhanden, je nach Gebäudegeometrie und abgebildeter Anlagentechnik. Für die reine Gebäudegeometrie sind bei einem Eckgebäude mit sechs Wänden ca. 500 Parameterwerte notwendig, die Verschattung durch die umliegenden 24 Gebäude verwendet insgesamt ca. 4500 Parameterwerte. Die Gebäudemodelle ohne Geometrie und Verschattung benötigen zwischen 950 Parameterwerten bei Gasheizung ohne Solarthermie und ohne PV bis hin zu 1480 Parameterwerten bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Solarthermieunterstützung und PV. Diese Parameteranzahlen wurden direkt aus den erzeugten EnergyPlus-Modellen durch Zählen aller Parameter der Teilmodelle ermittelt, daher sind beispielsweise auch die Eckpunkte einzelner Bauteile oder Namen von Schedules hierin enthalten. Ein großer Teil dieser Parameter ist, wie in Teil VII beschrieben, auf Standardwerte festgelegt worden bzw. wird aus der Geometrie bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Sensitivitätsanalyse nur stetige Parameter verwendet, die diskreten Parameter wie Art der Heizungssysteme oder Vorhandensein einer PV-Anlage werden durch die Szenarien (vgl. Abschnitt 12.5) festgelegt. Dabei wird der Parameterraum in  $p=4$  Stufen unterteilt und  $\Delta = \frac{2}{3}$  gewählt (vgl. Abschnitt 5.3.6). Weiterhin werden jeweils  $s=15$  Trajektorien erzeugt und daraus die  $r=10$  Trajektorien ausgewählt, die die größte Distanz zueinander haben (vgl. Abschnitt 5.3.6.1). Diese Festlegung orientiert sich an den Empfehlungen aus [47] und [226]. Das Parametersampling wird, wie in Kapitel 10 beschrieben, für alle Gebäude gemeinsam durchgeführt, um den generellen Einfluss der Parameter auf das gesamte Quartier untersuchen zu können.

Gruppierung von Parametern wird für die Wärmeleitfähigkeit von Wandtragwerk und Dach, die Dicke der Dämmung von Wand und Dach, die Dichte von Wandtragwerk und Innenwand, die Dichte von Wanddämmung und Dachdämmung, die Solltemperatur der Heizung tagsüber und nachts sowie den Wirkungsgrad der Heizkreis- und Solarkreispumpe verwendet.

Im Folgenden werden die mittels Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameter beschrieben und Wertebereiche sowie Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Werte inklusive der dafür verwendeten Quellen angegeben. Eine Übersicht der konstanten Parameter findet sich in Tabelle 12.6. Die Untersuchung dynamischer Parameter wie den Zeiten für die Nachtabsenkung oder Dauern von Fensterlüftungsereignissen hinsichtlich ihrer Sensitivitäten übersteigen den Rahmen dieser Arbeit und werden hier daher nicht weiter verfolgt. Stattdessen wird für die Anwendung der zugrundeliegenden Methodik auf die Vorveröffentlichung [159] verwiesen.

Die Wärmeleitfähigkeit des Tragwerkteils der Außenwand wird relativ mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung 0,5 W/(mK) um den in der Gebäudetypologiedatei vorge-

Tabelle 12.6.: Variierte konstante Parameter

Name	Kurzbezeichnung	Einheit	Var.	Vert.	Abs. Min.	Abs. Max.	Mittel	Std. Abw.	Min.	Max.	Quelle
Wärmeleitfähigkeit Tragwerk Außenwand	$\lambda_{AW,TW}$	W/(mK)	rel.	normal	0,25	3,5	-	0,2	-	-	[69, Tabelle 1] [63, Tabelle 3]
Dicke Tragwerk Außenwand	$d_{AW,TW}$	m	rel.	normal	0,115	0,49	-	0,1	-	-	DIN 1053-1, übliche Wandstärken
Spez. Wärmespeicherfähigkeit Tragwerk Außenwand	$c_{p,AW,TW}$	J/(kgK)	abs.	gleich	800	1700	-	-	800	1700	[63, Tab. 3, 4]
Wärmeleitfähigkeit Dämmung Außenwand	$\lambda_{AW\&DA,D}$	W/(mK)	rel.	normal	0,020	0,192	-	0,01	-	-	[69, Tabelle 2]
Dicke Dämmung Außenwand	$d_{AW\&DA,D}$	m	rel.	normal	0,06	0,24	-	0,05	-	-	[126, Tab. 10]
Spez. Wärmespeicherfähigkeit Außenwand Dämmung	$c_{p,AW,D}$	J/(kgK)	abs.	gleich	1000	2300	-	-	1000	2300	[63]
Wärmeleitfähigkeit Dämmung Dach	$\lambda_{AW\&DA,D}$	W/(mK)	rel.	normal	0,020	0,192	-	0,01	-	-	[69, Tabelle 2]
Dicke Dämmung Dach	$d_{AW\&DA,D}$	m	rel.	normal	0,12	0,30	-	0,05	-	-	[126, Tab. 10]
Spez. Wärmespeicherfähigkeit Innenwand	$c_{p,IW}$	J/(kgK)	abs.	gleich	800	1700	-	-	800	1700	[63]
Dichte Tragwerk Außenwand	$\rho_{AW\&IW,TW}$	kg/m <sup>3</sup>	rel.	normal	1600	2400	-	200	-	-	[63, Tabelle 4]
Dichte Innenwand	$\rho_{AW\&IW,TW}$	kg/m <sup>3</sup>	rel.	normal	1600	2400	-	200	-	-	[63, Tabelle 4]
Dichte Dämmung Außenwand	$\rho_{AW\&DA,D}$	kg/m <sup>3</sup>	rel.	normal	10	150	-	35	-	-	[63, Tabelle 4]
Dichte Dämmung Dach	$\rho_{AW\&DA,D}$	kg/m <sup>3</sup>	rel.	normal	10	150	-	35	-	-	[63, Tabelle 4]
KGF/BGF-Faktor	$KGF/BGF$	-	abs.	gleich	0,137	0,200	-	-	0,137	0,200	[134, Abb. 4, 8]
U-Wert Fenster	$U_{win}$	W/(m <sup>2</sup> K)	rel.	normal	0,80	5,8	-	0,1	-	-	[125]
g-Wert Fenster	$g_{win}$	-	abs.	gleich	0,55	0,80	-	-	0,55	0,80	[125]
Luftwechselrate	$Luftwechsel$	h <sup>-1</sup>	abs.	gleich	0,2	1,37	-	-	0,2	1,37	[174]
Wirkungsgrad Heizkessel	$\eta_{Kessel}$	-	abs.	gleich	0,57	0,97	-	-	0,57	0,97	[165, Teil III, Tabelle 20]
COP Wärmepumpe	$WP_{COP}$	-	abs.	gleich	2,2	3,5	-	-	2,3	3,5	[165, Teil III, Tabelle 12]
Leistung Wärmepumpe	$WP_P$	W	rel.	normal	20000	100000	-	5000	-	-	-
Volumen Trinkwarmwasserspeicher	$TWW_{Vol}$	m <sup>3</sup>	abs.	gleich	-	-	-	-	0,2	1,5	-
Volumen Pufferspeicher Wärmepumpe	$WP_{Vol}$	m <sup>3</sup>	abs.	gleich	-	-	-	-	0,1	0,3	[165]
Innenraum Sollltemperatur tagsüber	$Solltemperatur$	°C	abs.	normal	18	26	18,25	4	-	-	[231]
Innenraum Sollltemperatur nachts	$Solltemperatur$	°C	abs.	gleich	16	18	-	-	16	18	[199]
Wirkungsgrad Heizkreispumpe	$\eta_{pumpen}$	-	abs.	gleich	0,05	0,5	-	-	0,05	0,5	[209]
Wirkungsgrad Solarthermiekreispumpe	$\eta_{pumpen}$	-	abs.	gleich	0,07	0,2	-	-	0,07	0,2	[81, S. 66]
Jährlicher Haushaltsstrombedarf pro Haushalt	$Q_{el,HH}$	kWh	rel.	normal	1690	4784	-	500	-	-	[80, Tabelle 57]

## 12. Modell EmMi-transient

gebenen Wert variiert. Das absolute Minimum ist auf 0,25 W/(mK) gemäß den Werten für entsprechende Materialien aus [69, Tabelle 1] und [63, Tabelle 3] festgelegt und um Probleme bei der Berechnung der Transferfunktionen in EnergyPlus, welche für die Ermittlung der Wärmeleitung verwendet werden, auszuschließen. Das absolute Maximum ist gemäß dem höchsten Wert aus [63, Tabelle 3] auf 3,5 W/(mK) gesetzt.

Die Dicke des Tragwerkteils der Außenwand wird relativ mittels Normalverteilung mit Standardabweichung 0,1 m um den in der Gebäudetypologie vorgegebenen Wert variiert. Das absolute Minimum ist gemäß DIN 1053-1 für tragende Bauteile auf einen Wert von 0,115 m festgelegt, das absolute Maximum auf 0,49 m als maximal übliche Wandstärke.

Die spezifische Wärmespeicherfähigkeit des Tragwerkteils der Außenwand wird mit einer Gleichverteilung mit Minimum 800 J/(kgK) (Tondachziegel) und Maximum 1700 J/(kgK) (Holz) gemäß [63, Tab. 3, 4] variiert. Die Gleichverteilung wird angesetzt, da in den Gebäudetypologiedaten kein Referenzwert für die spezifische Wärmespeicherfähigkeit gegeben ist. In EnergyPlus ist der Wert nach unten mit 100 J/(kgK) begrenzt, darunter liefert das Programm einen Fehler.

Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung der Außenwand wird relativ mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung 0,01 W/(mK) um den in der Gebäudetypologiedatei vorgegebenen Wert variiert. Die Standardabweichung entspricht 28,5 % des Standardwerts von 0,035 W/(mK) für Dämmmaterialien. Das absolute Minimum ist auf 0,020 W/(mK) gesetzt gemäß den Werten für entsprechende Materialien aus [69, Tabelle 2] und um Probleme bei der Berechnung der Transferfunktionen in EnergyPlus auszuschließen. EnergyPlus akzeptiert keine Materialien mit einer Wärmeleitfähigkeit kleiner 0,001 W/(mK). Das absolute Maximum ist gemäß dem höchsten Wert aus [69, Tabelle 2] auf 0,192 W/(mK) gesetzt.

Die Dicke der Dämmung der Außenwand ist relativ normalverteilt mit Standardabweichung 0,05 m um den in der Gebäudetypologiedatei vorgegebenen Wert. Das absolute Minimum ist auf 0,06 m, das absolute Maximum auf 0,24 m gemäß [126, Tab. 10] festgesetzt. In [247] wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen, dies könnte zukünftig auch hier umgesetzt werden.

Die spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Dämmung der Außenwand wird mit einer Gleichverteilung mit Minimum 1000 J/(kgK) (Siliconschaum) und Maximum 1700 J/(kgK) (Polyethylenschaum) gemäß [63, Tab. 3] variiert. Die Gleichverteilung wird angesetzt, da in den üblichen Gebäudetypologiedaten kein Referenzwert für die spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Dämmung angegeben ist. In EnergyPlus ist der Wert nach unten mit 100 J/(kgK) begrenzt, darunter liefert das Programm einen Fehler.

Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung des Dachs wird wie die Dämmung der Außenwand relativ normalverteilt variiert mit Standardabweichung 0,01 W/(mK), absolutem Minimum 0,020 W/(mK) und absolutem Maximum 0,192 W/(mK) gemäß [69, Tabelle 2].

## 12.6. Parameter der Sensitivitätsanalyse

Die Dicke der Dämmung des Dachs ist relativ normalverteilt mit Standardabweichung 0,05 m um den in der Gebäudetypologiedatei vorgegebenen Wert. Das absolute Minimum ist auf 0,12 m, das absolute Maximum auf 0,30 m gemäß [126, Tab. 10] festgesetzt.

Die spezifische Wärmespeicherefähigkeit der Innenwände wird wie die des Tragwerks der Außenwand mit einer Gleichverteilung zwischen 800 J/(kgK) und 1700 J/(kgK) absolut variiert.

Die Dichte des Materials des Außenwandtragwerks und der Innenwände wird jeweils relativ variiert mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung 200 kg/m<sup>3</sup>, absolutem Minimum von 1600 kg/m<sup>3</sup> (Wert für extra weichen Kalkstein aus [63, Tabelle 3]) und absolutem Maximum von 2400 kg/m<sup>3</sup> (Maximalwert für Vollziegel aus [63, Tabelle 4]).

Die Dichte der Dämmung der Außenwand und der Dämmung des Dachs wird jeweils relativ variiert mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung von 35 kg/m<sup>3</sup>, absolutem Minimum von 10 kg/m<sup>3</sup> (minimaler Wert aus [63, Tabelle 4]) und absolutem Maximum von 150 kg/m<sup>3</sup> (orientiert an Werten aus [63, Tabelle 4]).

Der KGF/BGF-Faktor, der für die Erzeugung der Innenwände verwendet wird, wird mittels Gleichverteilung absolut variiert im Bereich von 13,7 % (minimaler Wert für MFH) bis 20,0 % (maximaler Wert für EFH) gemäß [134].

Der U-Wert der Fenster wird als relativ variiert mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung von 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) um den gegebenen Referenzwert aus der Gebäudetypologie angenommen. Das absolute Minimum wird auf 0,80 W/(m<sup>2</sup>K) gesetzt, was einer 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung gemäß TABULA [125] entspricht, das absolute Maximum wird auf 5,8 W/(m<sup>2</sup>K) gesetzt, was einer 1-Scheiben-Verglasung entspricht.

Der g-Wert der Fenster wird mit einer Gleichverteilung absolut variiert im Bereich 0,55 bis 0,80, dies sind die minimalen bzw. maximalen Werte aus TABULA [125].

Die Luftwechselrate durch Infiltration und Fensteröffnung wird absolut mit einer Gleichverteilung zwischen 0,20 h<sup>-1</sup> und 1,38 h<sup>-1</sup> variiert. Der Minimalwert von 0,20 h<sup>-1</sup> entstammt [174, Bild 8.5] als dort ermittelten minimalen Wert für den Luftwechsel bei einer Kippstellung mit 2 cm Öffnungsweite und Nachtlüftung, das Maximum 1,38 h<sup>-1</sup> ergibt sich aus [174, Bild 8.5] als Luftwechselrate bei Kippstellung mit 10 cm Öffnungsweite und permanenter Lüftung. In [68, 8.4.2 g)] ist ein hygienisch mindestens notwendiger Luftwechsel von 0,5 h<sup>-1</sup> angegeben, dieser Wert könnte auch als Minimum verwendet werden, ist allerdings über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant. Gemäß [68, 8.4.2 h)] kann während der Nutzungszeit, die bei Wohngebäuden von 6 bis 23 Uhr definiert ist, für Fensterlüftung der Wert auf bis zu 3 h<sup>-1</sup> erhöht werden, für Nachtlüftung auf 2 h<sup>-1</sup>. Eine Alternative zu diesen Werten wäre die Verwendung der in [52] definierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $25 n^2 e^{-5 n^2}$  zur Festlegung stochastisch ermittelter Luftwechselraten oder die in [247] beschriebene Verwendung einer Nakagami Verteilung mit Formparameterwert 1,5 und Skalierungsparameterwert 0,3. Dies erfolgt nicht im Rahmen dieser Arbeit.

## 12. Modell EmMi-transient

Der Wirkungsgrad eines Heizkessels wird unabhängig vom Energieträger Gas oder Öl im Bereich zwischen 57 % (Wert aus [165, Teil III, Tabelle 20, S. 29] für Konstanttemperaturkessel atmosphärisch vor 1978 mit 11 kW Nennleistung und Überdimensionierungsfaktor 4,0) und 97 % (Wert aus [165, Teil III, Tabelle 20, S. 29] für Brennwertkessel Gas ab 1995) mittels Gleichverteilung absolut variiert. Dies erfolgt, da keine Information über den Sanierungsstand der Heizungssysteme vorhanden ist.

Der COP der Wärmepumpe wird im Bereich zwischen 2,2 und 3,5 variiert, dies entspricht den Werten aus [165, Teil III, Tabelle 12, S. 19]. Da diese Werte für unterschiedliche Wärmequellen der Wärmepumpen gegeben sind, kann somit ermittelt werden, wie wichtig es ist, die Art der Wärmepumpe genau zu kennen, auch wenn in den Gebäudemodellen immer von einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgegangen wird.

Die Leistung der Wärmepumpe wird relativ variiert mit Normalverteilung mit Standardabweichung von 5 kW um den in der Gebäudetypologie vorgegebenen Referenzwert. Das absolute Minimum ist auf 20 kW gesetzt, das absolute Maximum auf 100 kW. Das Minimum wurde durch Testsimulationen für die minimal notwendige Leistung zur Erreichung der Solltemperaturen bei den gegebenen klimatischen Bedingungen ermittelt. Das Maximum wurde abgeschätzt, ist aber hier auch eher nebensächlich, da der Wirkungsgrad der Wärmepumpe linear modelliert wurde.

Das Speichervolumen des Wärmepumpenpufferspeichers wird absolut variiert mit einer Gleichverteilung zwischen 100 l und 300 l. Diese Werte orientieren sich an dem Wert von 200 l, der in [165, Teil III, S. 26] angegeben ist.

Das Speichervolumen des Trinkwasserspeichers wird absolut variiert mit einer Gleichverteilung mit Minimum 200 l und Maximum 1500 l. Diese Werte sind eigene Festlegungen, da keine entsprechenden Quellen gefunden wurden.

Die Raumsolltemperatur am Tag, also standardmäßig zwischen 5 Uhr und 22 Uhr, wird mit einer Normalverteilung um den Mittelwert  $18,25^{\circ}\text{C}$  mit einer Standardabweichung von 4 K absolut variiert. Diese Werte entstammen [231] für Gebäude, die vor 1995 errichtet wurden. Zusätzlich wird das absolute Minimum auf  $18^{\circ}\text{C}$  festgesetzt, das absolute Maximum auf  $26^{\circ}\text{C}$ . Für Gebäude ab 1995 ist in [231] ein Mittelwert von  $20^{\circ}\text{C}$  mit Standardabweichung 2,5 K angegeben. In [52] wird eine Normalverteilung mit Mittelwert  $20^{\circ}\text{C}$  und Standardabweichung 1,2 K angegeben.

Der Wert der Raumsolltemperatur in der Nacht, wenn die Nachtabenkung aktiv ist, wird absolut variiert mit einer Gleichverteilung zwischen  $16^{\circ}\text{C}$  und  $18^{\circ}\text{C}$ . Das Maximum wurde so gewählt, damit die Nachtabenkungstemperatur nicht die Solltemperatur während des Tages übersteigen kann. Unter einer Raumtemperatur von  $18^{\circ}\text{C}$  kann es rechtliche Probleme geben [77]. Dennoch soll die Nachtabenkung hier untersucht werden und daher wurde das Minimum auf  $16^{\circ}\text{C}$  festgelegt, da es sonst bei einer minimalen Raumsolltemperatur am Tag von  $18^{\circ}\text{C}$  zu keiner Nachtabenkung käme.

## 12.6. Parameter der Sensitivitätsanalyse

Der Wirkungsgrad der Heizkreispumpe wird gemäß [209] absolut variiert mit einer Gleichverteilung zwischen 5 % und 50 %.

Der Wirkungsgrad der Solarthermiekreispumpe wird gemäß [81, S. 66] absolut variiert mit einer Gleichverteilung zwischen 7 % und 20 %.

Der jährliche Haushaltsstrombedarf pro Haushalt wird relativ mit einer Normalverteilung mit Standardabweichung 500 kWh um die in der Gebäudetypologie vorgegebenen Werte variiert. Das absolute Minimum wird gemäß [80, Tabelle 57] auf 1690 kWh als Minimum für einen 1-Personen-Haushalt festgesetzt, das absolute Maximum auf 4784 kWh für das Maximum eines 4-Personen-Haushalts festgesetzt.

Es gibt viele weitere Parameter, die variiert werden könnten. Dies erfolgt nicht im Rahmen dieses Fallbeispiels, im Ausblick in Abschnitt 15.2 wird auf zukünftige zusätzliche Untersuchungsmöglichkeiten eingegangen.



## 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse beziehen sich auf das verwendete Quartiersmodell EmMi-transient (vgl. Abschnitt 12.1), den damit untersuchten Gebäudeblock (vgl. Abschnitt 12.4) und die Parametervariationen, wie sie in Tabelle 12.6 definiert sind. Für andere Parameter oder Wertebereiche, andere Gebäude als Untersuchungsobjekt oder andere Quartiersmodelle werden die Ergebnisse höchstwahrscheinlich anders ausfallen.

Um einen Überblick über den gesamten Ergebnisraum der Simulationen in den Szenarien zu erhalten, werden in Abschnitt 13.1 die Modellergebnisse aggregiert sowie zeitlich aufgelöst dargestellt und qualitativ bewertet.

Dabei und im weiteren Verlauf der Ergebnisdarstellung wird eine Systematik mit dem Zeichen \* als Wildcard zur Benennung der Szenarien verwendet. So steht beispielsweise U\_\* für alle Szenarien mit unsanierter Gebäudehülle, \*\_GAS\* für alle Szenarien mit Gaskesseln, \*\_PV für alle Szenarien mit PV-Anlagen, U\_\*ST für alle Szenarien mit unsanierter Gebäudehülle und Solarthermie und \*\_WPPV für Szenarien mit Wärmepumpe und PV-Anlage bei sanierter oder unsanierter Gebäudehülle.

Für die Demonstration der Sensitivitätsanalyse wird zuerst der sequentielle Ansatz verwendet, bei dem die Sensitivitäten über den Jahresverlauf berechnet und dargestellt werden. Dies erfolgt für alle in Abschnitt 12.5 beschriebenen Sanierungsszenarien und die Zielgrößen Endenergiebedarf für die Wärmeversorgung, durchschnittliche Innenraumtemperatur sowie ins Netz eingespeiste und aus dem Netz bezogene elektrische Energie.

Im Anschluss werden die Ergebnisdaten mittels Hauptkomponentenzerlegung funktional transformiert und die Sensitivitäten bzgl. der entsprechenden Hauptkomponentengewichtungen dargestellt. Dies erfolgt ausführlich für das Szenario U\_GAS und die Zielgrößen Endenergiebedarf und durchschnittliche Innenraumtemperatur. Die hierdurch zustande gekommenen Ergebnisse für die anderen Szenarien und Zielgrößen werden in Abschnitt 13.2.2.3 zusammengefasst wiedergegeben. Eine Auswertung mittels Fourier-Transformation wird nicht dargestellt, eine beispielhafte Anwendung davon findet sich in der Vorveröffentlichung [158].

In den Tabellen 13.1 bis 13.4 sind für die verschiedenen Szenarien die einflussreichsten Parameter auf die Zielgrößen Endenergiebedarf, durchschnittliche Innenraumtemperatur sowie bezogene und eingespeiste elektrische Energie aufgeführt. Als einflussreich gelten dabei die Parametergruppen, bei denen  $\widehat{\mu}^*$ <sup>167</sup> zu einem beliebigen Zeitpunkt mindestens 10 % des Maximalwerts des Sensitivitätsindex für alle Parametergruppen überschreitet. Die Dynamik



### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

**Tabelle 13.1.: Parameter mit Einfluss auf den Endenergiebedarf**

Szenario	U_*	S_*
*_GAS	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, $\eta_{Kessel}$ , Solltemperatur, $Q_{el,HH}$	Luftwechsel, Solltemperatur, $\eta_{Kessel}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $Q_{el,HH}$
*_GASPV	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, $\eta_{Kessel}$ , Solltemperatur, $Q_{el,HH}$	Luftwechsel, Solltemperatur, $\eta_{Kessel}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $d_{AW,TW}$ , $d_{AW\&DA,D}$
*_GASST	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, $\eta_{Kessel}$ , Solltemperatur	Luftwechsel, Solltemperatur, $\eta_{Kessel}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $d_{AW\&DA,D}$
*_WP	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, Solltemperatur, $Q_{el,HH}$ , $WPCOP$ , $WPP$	Luftwechsel, $WPCOP$ , Solltemperatur, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $WPP$ , $Q_{el,HH}$
*_WPPV	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, Solltemperatur, $Q_{el,HH}$ , $WPCOP$ , $WPP$	Luftwechsel, $WPCOP$ , Solltemperatur, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $WPP$ , $Q_{el,HH}$
*_WPST	$\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , Luftwechsel, Solltemperatur, $Q_{el,HH}$ , $WPCOP$ , $WPP$	Luftwechsel, $WPCOP$ , Solltemperatur, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $WPP$ , $Q_{el,HH}$

**Tabelle 13.2.: Parameter mit Einfluss auf die durchschnittliche Innenraumtemperatur**

Szenario	U_*	S_*
*_GAS	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$
*_GASPV	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $d_{AW\&DA,D}$
*_GASST	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$	Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $d_{AW\&DA,D}$
*_WP	$WPP$ , Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $U_{win}$	$\lambda_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , Luftwechsel, $WPP$ , Solltemperatur, $Q_{el,HH}$
*_WPPV	$WPP$ , Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$	$\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , Luftwechsel, $WPP$ , Solltemperatur, $Q_{el,HH}$
*_WPST	$WPP$ , Solltemperatur, Luftwechsel, $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $g_{win}$ , $Q_{el,HH}$ , $U_{win}$	$\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $g_{win}$ , Luftwechsel, $WPP$ , Solltemperatur, $Q_{el,HH}$

der Ergebniszeitreihen wird hierbei nur insofern berücksichtigt als dass offensichtlich einflussreichere Parameter in der Aufzählung zuerst genannt werden, wobei der Einfluss zeitlich variabel ist.

Zusammengefasst sind bei fast allen Szenarien und Zielgrößen die Parameter *Infiltration* und *Solltemperatur* als einflussreich eingestuft. In ungedämmten Gebäuden sind die thermischen Eigenschaften des Tragwerkteils der Außenwände, bei gedämmten Gebäuden die thermischen Eigenschaften der Außenwanddämmung einflussreich. Bei durch Wärmepumpen beheizten Gebäuden sind der COP und die Leistung der Wärmepumpe sowie teilweise der Haushaltsstrombedarf bedeutsam. Der Wirkungsgrad der Pumpen wird teilweise als einflussreich eingeordnet. Für die durchschnittliche Innenraumtemperatur und teilweise den Endenergiebedarf sind die thermischen Eigenschaften der Fenster wichtig. Eine detaillierte Be-

Tabelle 13.3.: Parameter mit Einfluss auf die bezogene elektrische Energie

Szenario	U_*	S_*
*_GAS	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i>
*_GASPV	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i>	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i>
*_GASST	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i>
*_WP	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $W_{PCOP}$ , $W_{PP}$ , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $W_{PCOP}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $W_{PP}$
*_WPPV	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $W_{PCOP}$ , $W_{PP}$ , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $W_{PCOP}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $W_{PP}$
*_WPST	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $W_{PCOP}$ , $W_{PP}$ , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $U_{win}$	<i>Luftwechsel</i> , <i>Solltemperatur</i> , $Q_{el,HH}$ , $W_{PCOP}$ , $\eta_{Pumpen}$ , $\lambda_{AW\&DA,D}$ , $d_{AW\&DA,D}$ , $U_{win}$ , $W_{PP}$

Tabelle 13.4.: Parameter mit Einfluss auf die eingespeiste elektrische Energie

Szenario	U_*	S_*
*_GASPV	$Q_{el,HH}$ , $\eta_{Pumpen}$ , <i>Solltemperatur</i>	$Q_{el,HH}$
*_WPPV	$Q_{el,HH}$ , <i>Solltemperatur</i> , <i>Luftwechsel</i> , $\lambda_{AW,TW}$ , $d_{AW,TW}$ , $TWW_{Vol}$	$Q_{el,HH}$ , <i>Solltemperatur</i> , <i>Luftwechsel</i> , $TWW_{Vol}$

wertung der Sensitivitäten wird in Abschnitt 13.2 durchgeführt. In Abschnitt 13.3 werden daraus Empfehlungen für die zukünftige Datenerfassung im untersuchten Quartier abgeleitet.

## 13.1. Modellergebnisse in den Szenarien

Als Zielgrößen der Sensitivitätsanalyse werden der Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung aller Gebäude des Blocks, die durchschnittliche Temperatur in der Vollgeschosszone der Gebäude sowie die aus dem Netz bezogene und ins Netz eingespeiste elektrische Energie betrachtet.

Der Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung wird bei gasbefeuerten Heizungsanlagen aus der EnergyPlus-Variablen *Boiler Gas Energy* des Gaskessels ausgelesen, bei Wärmepumpenheizungsanlagen aus der Variable *Cooling Coil Water Heating Electric Energy* des Wärmepumpenmodells. Diese Größen repräsentieren die Energie, die zur Erzeugung der Wärme für die Raumbeheizung sowie die Warmwasserbereitung benötigt wird, nicht jedoch den Haushaltsstrom oder die elektrische Hilfsenergie für die Steuerung und Pumpen der Heizungsanlage. Daher unterscheidet sich der hier dargestellte Endenergiebedarf von der in Kapitel 9 gegebenen Definition.

Die Innenraumtemperatur wird aus der EnergyPlus-Variable *Zone Mean Air Temperature* der Vollgeschosszone ausgelesen und erlaubt es, Einflüsse von Parametern auf Solltempera-

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

turänderungen sowie Aussagen zur Überhitzung oder Unterkühlung von Gebäuden zu machen.

Der aus dem Netz bezogene Strombedarf enthält die für alle elektrischen Geräte benötigte Energie, also insbesondere auch für elektrisch betriebene Wärmepumpensysteme und die zugehörigen Pumpen. Er wird aus der EnergyPlus-Variable *Cogeneration Electricity Purchased* ausgelesen.

Der ins Netz eingespeiste Strom wird aus der EnergyPlus-Variable *Cogeneration Electricity Surplus Sold* ausgelesen und summiert für jedes Gebäude die elektrische Energie, die lokal erzeugt und nicht direkt durch Haushalts- oder Heizungsgeräte verbraucht wird. Dies wird daher ins Stromnetz eingespeist. Diese Größe wird nur bei Szenarien mit lokaler Stromerzeugung, also hier in den PV-Szenarien, betrachtet.

Einen Überblick über den gesamten Ergebnisraum in den Szenarien verschaffen Tabelle 13.5 sowie die Boxplots in Abbildung 13.1. Für die Tabellenwerte sind die jährlichen Summenwerte über alle Zeitschritte genommen, wobei in jedem Zeitschritt das Minimum, der Mittelwert oder das Maximum über alle Zeitreihen für die Summierung verwendet werden. Es zeigt sich, dass eklatante Unterschiede zwischen den Szenarien existieren und auch die Ergebnisspanne innerhalb der Szenarien sehr groß ist. Diese großen Unterschiede stammen vor allem aus Simulationsläufen, in denen einflussreiche Parameter die minimalen oder maximalen Werte ihres Definitionsbereichs annehmen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die im Abschnitt 13.2 dargestellten Sensitivitätsanalyseergebnisse für die genauere zukünftige Modellierung zu berücksichtigen und die entsprechenden einflussreichen Parameter genauer zu bestimmen.

Allgemein lassen sich folgende Beobachtungen festhalten:

- Der jährliche Endenergiebedarf in \*\_GAS\*-Szenarien ist 3,8 bis 4,5 mal höher als in \*\_WP\*-Szenarien.
- Die Szenarien U\_\* haben im Vergleich zu den S\_\*-Szenarien im Mittel einen um den Faktor 1,9 bis 2,3 höheren jährlichen Endenergiebedarf.
- Die Szenarien U\_\* haben im Vergleich zu den S\_\*-Szenarien im Mittel einen um den Faktor 1,1 bis 1,5 höheren Strombezug.
- Durch PV- und Solarthermieanlagen steigt der Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung geringfügig an. Gründe hierfür können bei den Solarthermieszenarien die Wärmeverluste durch zusätzliche Leitungen sein, bei den PV-Szenarien geringere Transmissionswärmegewinne durch das Dach auf Grund der darüber liegenden PV-Module. Dies wird bei der Bewertung nochmals genauer angesprochen.
- Die Szenarien S\_\* weisen wesentlich höhere durchschnittliche Innenraumtemperaturen auf als die Szenarien U\_\*, dies ist durch die zusätzliche Dämmung und verbesserte Fenster zu erklären.
- Die Szenarien \*\_WP\* haben im Vergleich zu den \*\_GAS\*-Szenarien im Mittel einen um den Faktor 1,5 bis 2,6 höheren Strombezug.

Tabelle 13.5.: Jährlich summierter Endenergiebedarf, bezogene und eingespeiste elektrische Energie in MWh

Szenario	Endenergiebedarf Wärmeversorgung			Bezogene elektrische Energie			Eingespeiste elektrische Energie		
	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
U_GAS	781	3915	12500	367	851	1780	0	0	0
U_GASPV	494	4150	12390	272	716	1593	22	43	82
U_GASST	908	4262	10610	366	705	1499	0	0	0
U_WP	278	863	2368	718	1685	3382	0	0	0
U_WPPV	344	922	2359	658	1691	3421	13	34	70
U_WPST	311	969	2511	893	1840	3464	0	0	0
S_GAS	152	1716	6469	356	766	1273	0	0	0
S_GASPV	157	2116	7056	263	662	1277	25	44	82
S_GASST	218	1986	5496	354	621	1177	0	0	0
S_WP	56	447	1572	474	1183	2439	0	0	0
S_WPPV	50	477	1715	371	1099	2555	17	40	79
S_WPST	56	515	1830	532	1233	2648	0	0	0

In den folgenden Abschnitten wird das dynamische Verhalten der Zielgrößen im Jahresverlauf genauer dargestellt.

### 13.1.1. Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung

In der Abbildung 13.2 werden die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte des Endenergiebedarfs für die Wärmeversorgung in kWh aller Berechnungen im jeweiligen Szenario mit einem gleitenden Mittelwert über 23 Stunden dargestellt.

Hierbei ist der große Unterschied zwischen Minimal- und Maximalwert-Kurven auffällig. Generell ist der Verlauf des Endenergiebedarfs vor allem von der Außentemperatur beeinflusst. Die stündlichen Maximalwerte unterscheiden sich stark zwischen den Szenarien U\_GAS\*, U\_WP\*, S\_GAS\* und S\_WP\*, der Einsatz von PV oder Solarthermie hat dagegen nur geringere Auswirkungen auf den Verlauf. Dies hängt vermutlich mit der im Vergleich zum Gebäudevolumen geringen Dachfläche, die für diese Energieerzeugungssysteme zur Verfügung steht, zusammen.

### 13.1.2. Durchschnittliche Innenraumtemperatur

In Abbildung 13.3 werden die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der durchschnittlichen Innenraumtemperatur in °C dargestellt.

In den Szenarien U\_GAS\* folgt der Verlauf der Innenraumtemperatur außer zur Sommerzeit jeweils der vorgegebenen Solltemperatur, in der Sommerzeit kommt es zu leicht erhöhten Temperaturen.

In den Szenarien U\_WP\* sind die Minimalwertkurven teils deutlich unter der Solltemperaturkurve, dies ist auf Simulationsläufe mit zu geringer Wärmepumpenleistung zurückzuführen.

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

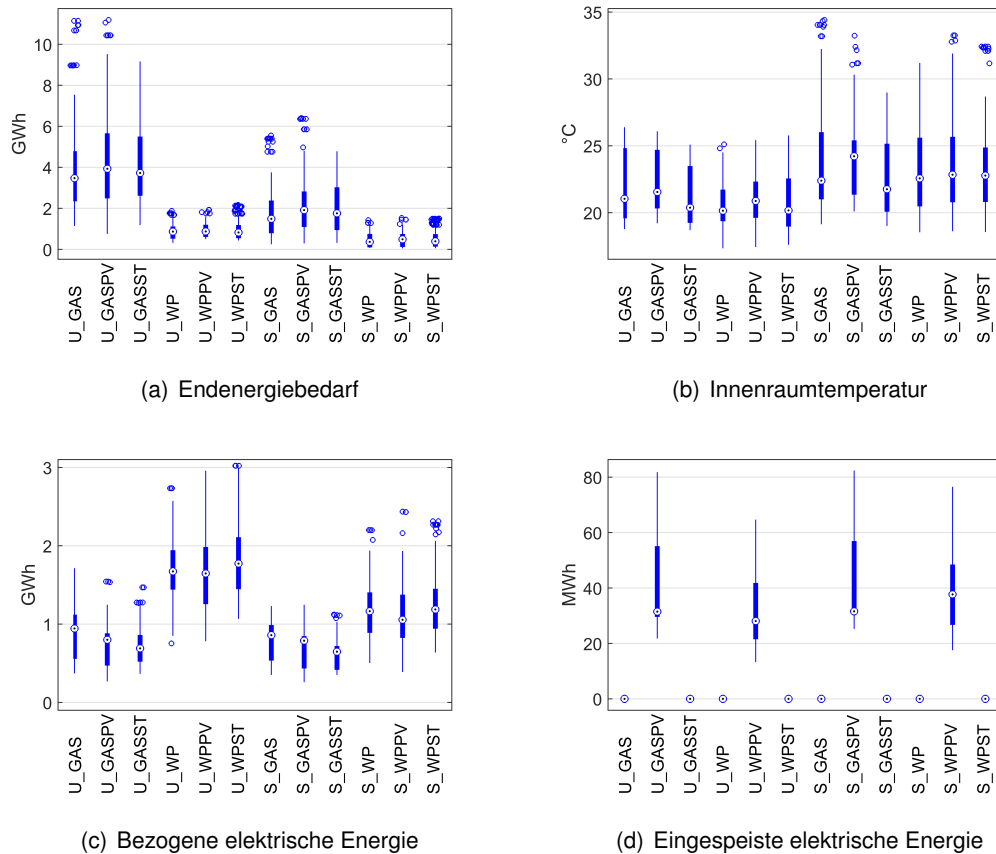


Abbildung 13.1.: Boxplotdiagramme aller Szenarien

Die Mittelwertkurve ist dagegen immer im Bereich der Solltemperatur, daher sind die starken Temperaturunterschreitungen im Winter auf einzelne Simulationsläufe zurückzuführen. Eine Überhitzungsproblematik im Sommer besteht wie auch bei den U\_GAS\*-Szenarien kaum.

In den Szenarien S\_GAS\* wird die Solltemperatur im Winter immer eingehalten, im Sommer kann es hingegen in der Maximalwertkurve zu starken Überhitzungen kommen. Die Mittelwertkurve ist zumeist in akzeptablen Bereichen.

In den Szenarien S\_WP\* kommt es, wie bei U\_WP\*, teilweise noch zu Solltemperaturunterschreitungen, allerdings bei weitem nicht mehr so stark wie im unsanierten Fall. Wie bei S\_GAS\* zeigt die Maximalwertkurve auch hier, dass die Gefahr von Überhitzung besteht.

#### 13.1.3. Bezogene elektrische Energie

In Abbildung 13.4 sind die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der aus dem Netz bezogenen elektrischen Energie in kWh mit einem gleitenden Mittelwert über 23 Stunden dargestellt.

In den \*\_WP\*-Szenarien ist der Strombezug generell höher als in \*\_GAS\*-Szenarien, dies ist den elektrisch betriebenen Wärmepumpen geschuldet. Es lässt sich hier auch feststellen, dass im Sommer bei geringem Heizwärmebedarf trotzdem relativ große Schwankungen

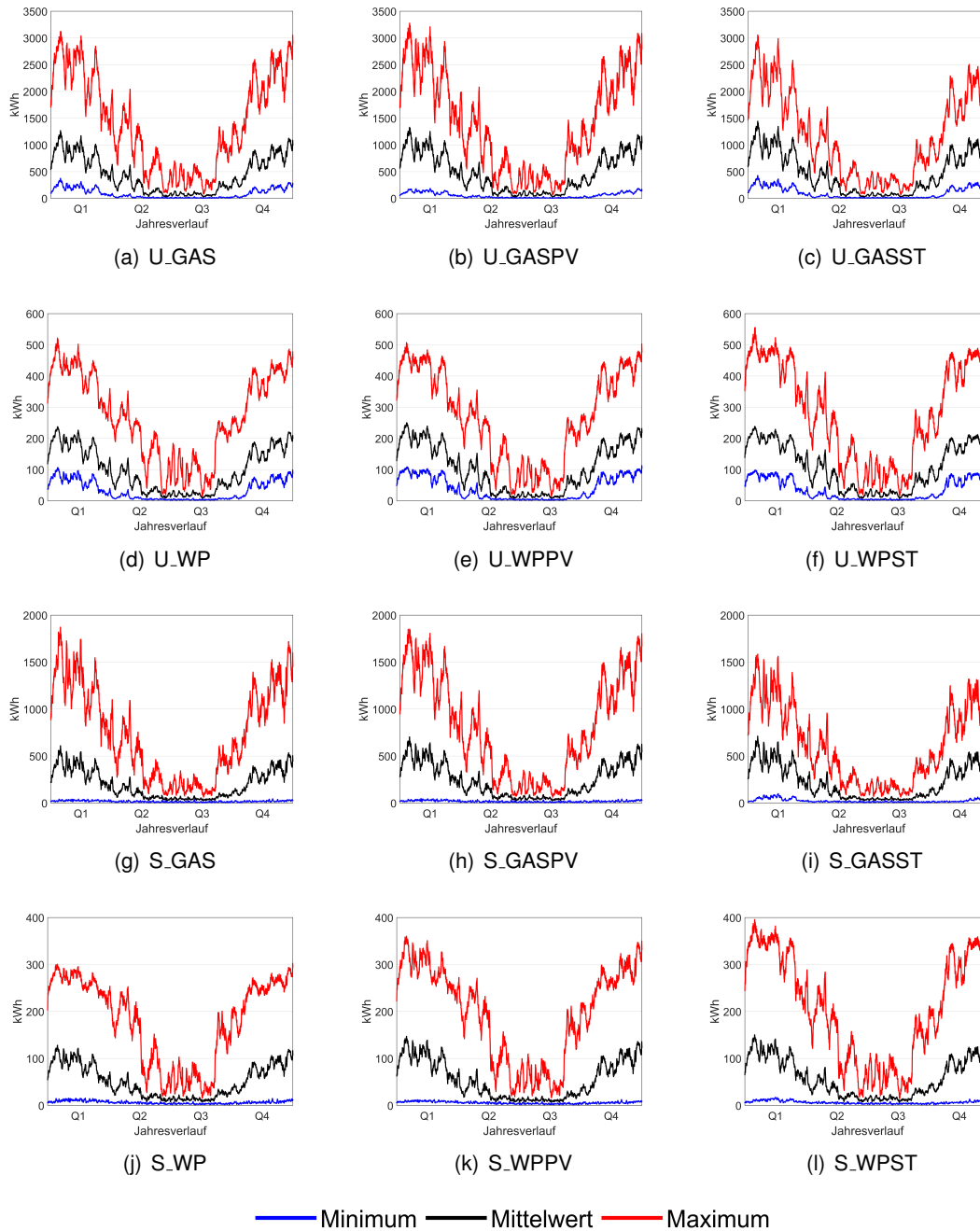
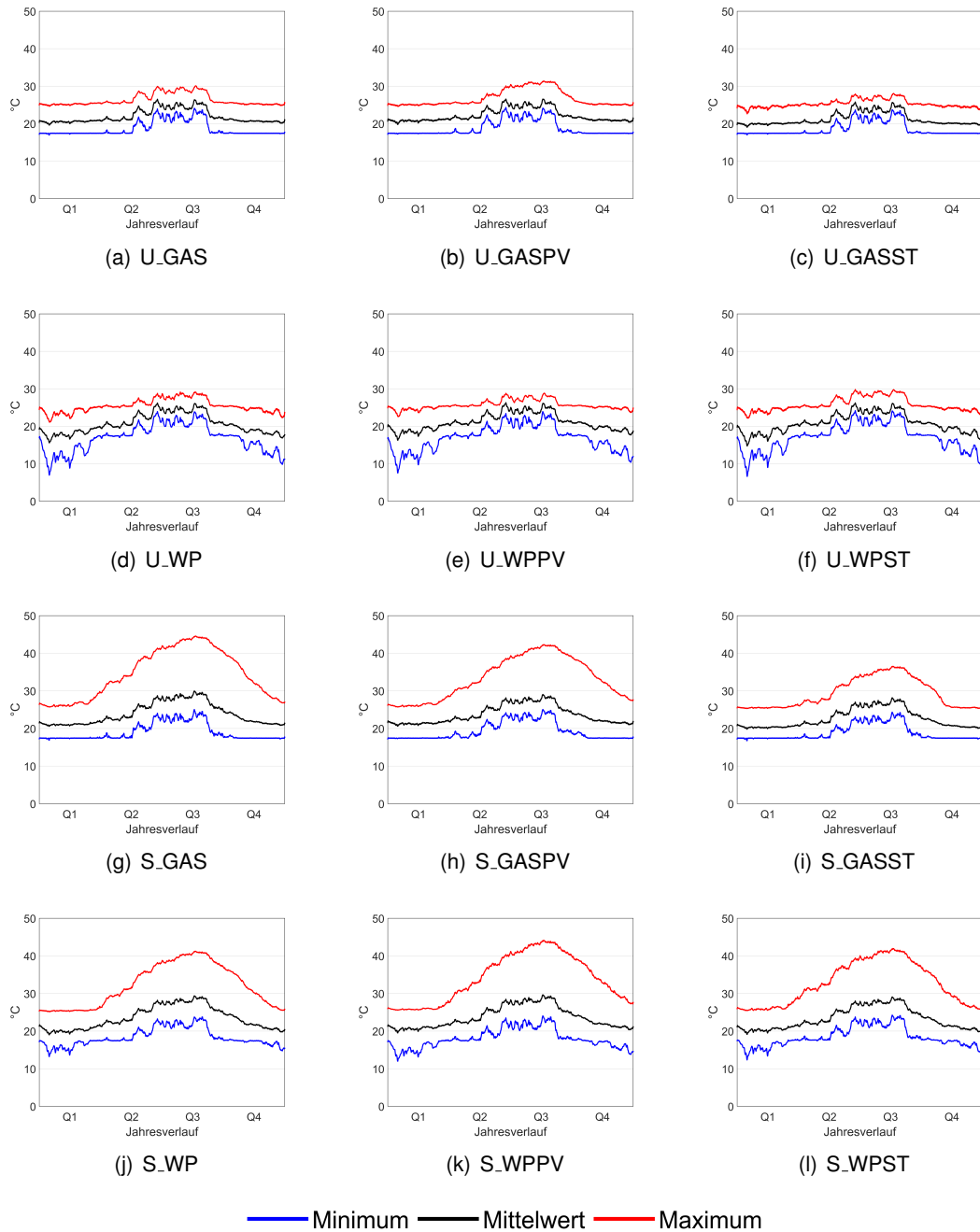


Abbildung 13.2.: Endenergiebedarf zur Wärmeversorgung

im Strombezug zu sehen sind. Diese sind in der Trinkwarmwasserbereitstellung durch die Wärmepumpe begründet. Die allgemein recht großen Schwankungen in der kalten Jahreszeit kommen durch die Heizungspumpe zustande.

In den \*\_ST-Szenarien ist im Sommer, wenn viel Solarthermiewärme vorhanden ist, eine etwas glattere Kurve für den Strombezug zu erkennen. Dies zeigt, dass in dieser Zeit die Solarthermie für die Trinkwasserbereitstellung größtenteils ausreichend ist und daher die Heizkreispumpe nicht betrieben werden muss. Die insgesamt niedrigeren Strombezugswerte in den \*\_ST-Szenarien gegenüber den anderen Szenarien lassen die Vermutung aufkommen,

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen



**Abbildung 13.3.: Durchschnittliche Innenraumtemperatur**

dass die Heizung durch Solarthermieunterstützung seltener betrieben werden muss und daher ein geringerer Hilfsenergiebedarf entsteht.

#### 13.1.4. Eingespeiste elektrische Energie

In Abbildung 13.5 sind die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der ins Netz eingespeisten elektrischen Energie in kWh mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden dargestellt. Das im Vergleich zu den anderen Grafiken lange Mittelungsintervall ist auf Grund der starken

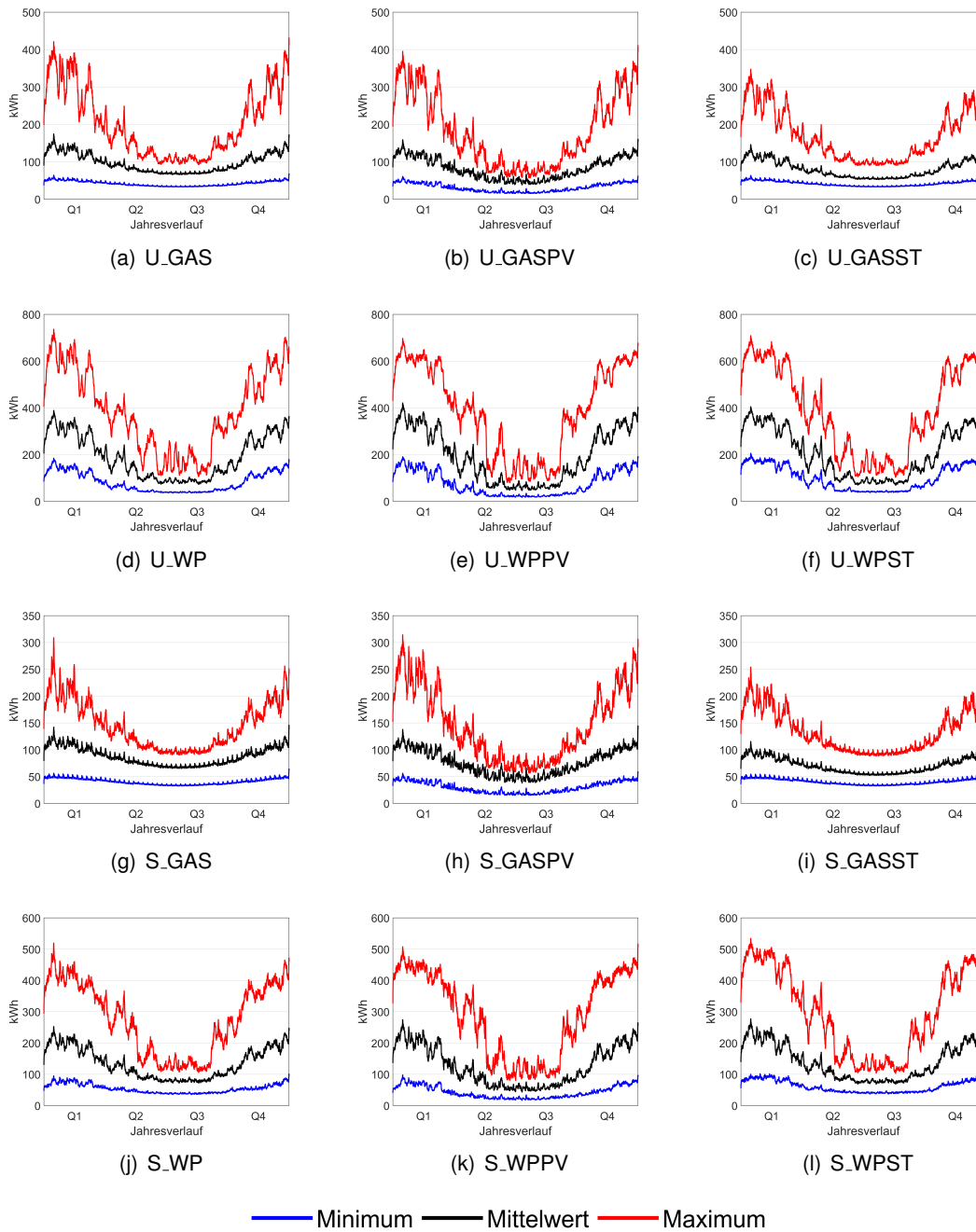


Abbildung 13.4.: Bezogene elektrische Energie



### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Fluktuation der Einspeisung für die Darstellung notwendig.

Für die ins Netz eingespeiste elektrische Energie lässt sich anhand der Ergebnisse vor allem erkennen, dass in den \*\_WP\*-Szenarien weniger Strom eingespeist wird, da dieser vor allem im Sommer direkt lokal für die Wärmepumpen verwendet wird. Allerdings fallen die Zeiten hohen Stromüberschusses im Sommer in die Zeit geringen Heizwärmebedarfs, daher wird hier der Strom hauptsächlich für die Trinkwarmwasserbereitung verwendet.

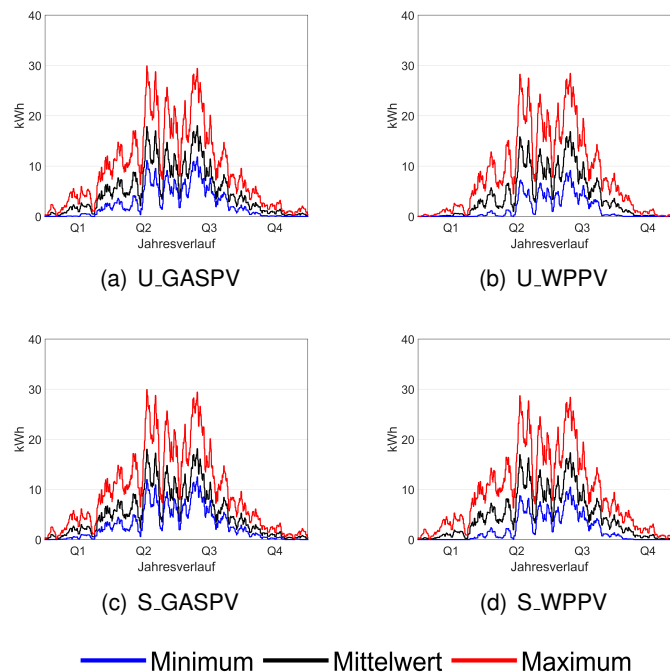


Abbildung 13.5.: Eingespeiste elektrische Energie

## 13.2. Sensitivitäten in den Szenarien

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, welche im folgenden Abschnitt 13.3 interpretiert werden und daraus Empfehlungen für Verbesserungen an der Modellierung sowie die zu erfassenden Daten des Beispielblocks abgeleitet werden. In Abschnitt 13.2.1 wird die sequentielle Auswertung der Sensitivitäten dargestellt und bewertet. In Abschnitt 13.2.2 wird die Auswertung durch funktionale Transformation mittels Hauptkomponenten anhand eines Szenarios mit den Zielgrößen Endenergiebedarf und durchschnittliche Innenraumtemperatur dargestellt und bewertet sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die weiteren Szenarios und Zielgrößen zusammengefasst.

Bei der Auswertung der Sensitivitäten wird im Folgenden als kalte Jahreszeit der Zeitraum bis ca. Stunde 3300, entsprechend etwa dem 17. Mai, und dann wieder ab Stunde 6100, entsprechend etwa dem 11. September, bezeichnet. Die Zeit dazwischen wird als warme Jahreszeit bezeichnet.

**Tabelle 13.6.: Prozentuale Abweichung des minimalen, durchschnittlichen und maximalen durch die Glättung entstandenden Fehlers RMSE vom Mittelwert der jeweiligen Zielgrößen in den Szenarien**

Sanierungs-szenario	Endenergiebedarf			Durchschnittliche Innenraumtemperatur			Bezogene elektrische Energie			Eingespeiste elektrische Energie		
	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
U_GAS	12	64	216	2	6	12	15	40	106	-	-	-
U_GASPV	10	71	212	2	7	14	19	44	117	155	237	379
U_GASST	12	59	156	1	6	13	18	41	101	-	-	-
U_WP	19	43	151	2	5	14	18	35	92	-	-	-
U_WPPV	14	52	147	2	6	13	12	43	95	148	266	428
U_WPST	12	46	153	2	6	14	13	37	94	-	-	-
S_GAS	17	76	261	1	4	8	16	38	68	-	-	-
S_GASPV	15	82	237	2	5	11	20	44	95	165	234	369
S_GASST	15	70	166	1	4	10	20	39	80	-	-	-
S_WP	20	63	184	1	4	8	19	41	94	-	-	-
S_WPPV	13	70	194	1	4	10	19	48	103	148	246	387
S_WPST	12	63	216	1	4	11	18	43	109	-	-	-

### 13.2.1. Sequentielle Auswertung

Die sequentielle Auswertung der Sensitivitäten in diesem Abschnitt erfolgt generell mit geglätteten Ergebnisdaten, welche durch ein gleitendes Mittel über 167 Stunden berechnet wurden.

Die durch diese Glättung der Ergebnisdaten entstehenden Fehler sind in Tabelle 13.6 für die unterschiedlichen Szenarien und Zielgrößen aufgeführt. Dabei wird RMSE für die originalen Ergebnisdaten und die geglätteten Daten für alle Trajektorien und Trajektorienpunkte ermittelt und der Minimal-, Mittel- und Maximalwert all dieser RMSE-Werte ins Verhältnis zum Mittelwert der jeweiligen Zielgröße über alle Trajektorien, Trajektorienpunkte und Zeitpunkte gesetzt. Somit ergibt sich die durchschnittliche prozentuale Abweichung von RMSE zum Mittelwert der Zielgröße im jeweiligen Szenario.

Die prozentualen Abweichungen sind bei der Zielgröße der durchschnittlichen Innenraumtemperatur mit 1 % bis 14 % am geringsten. Dies liegt an den geringen Fluktuationen, die diese Zielgröße hat. Bei der eingespeisten elektrischen Energie in den \*\_PV-Szenarien sind die prozentualen Abweichungen durch die Mittelung mit 148 % bis 428 % am stärksten, hier macht sich die starke Fluktuation durch die nur tagsüber in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung erzeugte und damit für die Einspeisung zur Verfügung stehende elektrische Energie bemerkbar. Bei dem Endenergiebedarf für die Beheizung ist durch die Klimadaten sowie die Nachtabenkung eine ebenfalls teils starke Fluktuation gegeben. Dies macht sich in den Abweichungen von 10 % bis 261 % bemerkbar. Die bezogene elektrische Energie wird maßgeblich vom Haushaltsstrombedarf beeinflusst, dessen zeitlicher Verlauf durch das geglättete Standardlastprofil definiert wird. Daher sind hier die Abweichungen mit 12 % bis 117 % geringer als beim Endenergiebedarf als Zielgröße.

Da die Glättungsfehler erst bei sehr kurzen Mittelungsintervallen von deutlich unter 23 Stunden geringer werden und andererseits die Auswertung durch ein längeres Mittelungsinter-

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

vall vereinfacht wird, wurde das Mittelungsintervall von 167 Stunden ausgewählt. Allerdings wären aufgrund der besonders starken Abweichung der Zielgröße der eingespeisten elektrischen Energie zukünftig zumindest hierfür kürzere Mittelungsintervalle vorzusehen.

Aufgrund der Empfehlung zur Verwendung von  $\mu^*$  für die Erstellung von Parameterrankings [224, S. 100] wird im Folgenden der Wert  $\widehat{\mu^*}^{167}$  für alle Zielgrößen verwendet. Um die Grafiken übersichtlich zu halten, werden nur die Sensitivitäten der Parametergruppen angezeigt, bei denen  $\widehat{\mu^*}^{167}$  zu einem beliebigen Zeitpunkt mindestens 10 % des Maximalwerts des Sensitivitätsindex für alle Parametergruppen überschreitet. Dies bedeutet umgekehrt, dass die Einflüsse der nicht dargestellten Parametergruppen zu keinem Zeitpunkt 10 % des jeweiligen Maximalwerts überschreiten und daher für ein Ranking vernachlässigbar sind.

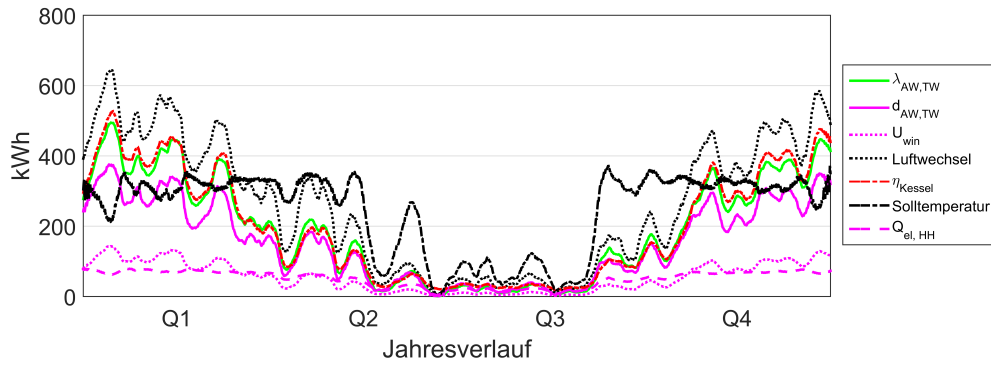
#### 13.2.1.1. Zielgröße Endenergiebedarf

In den Abbildungen 13.6 bis 13.9 wird der Verlauf des Sensitivitätsindex  $\widehat{\mu^*}^{167}$  dargestellt, der aus den mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden geglätteten Ergebnisdaten für den Endenergiebedarf berechnet wurde.

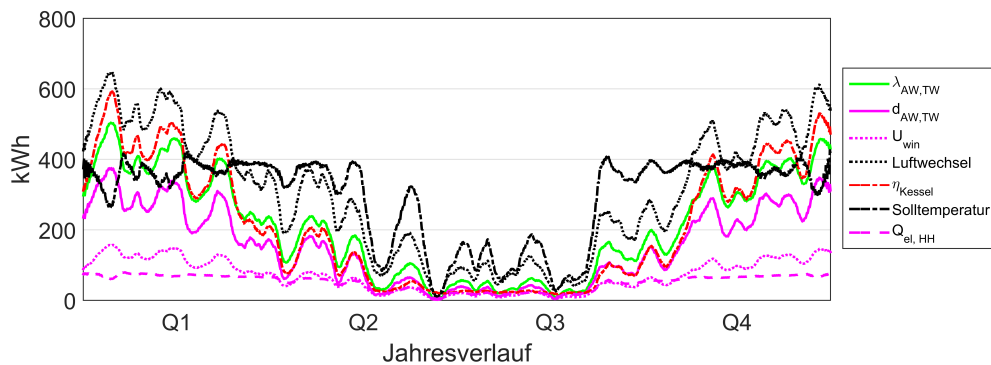
In allen U\_GAS\*-Szenarien sind die thermischen Eigenschaften  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  der Außenwand, der Fenster-U-Wert  $U_{win}$ , die Luftwechselrate *Luftwechsel*, der Kesselwirkungsgrad  $\eta_{Kessel}$  und die *Solltemperatur* einflussreich. Bei U\_GAS und U\_GASPV gehört auch noch der Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  zu den einflussreichsten Parametern, bei U\_GASST jedoch nicht.

Bei den U\_WP\*-Szenarien gehören ebenfalls die thermischen Eigenschaften  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  der Außenwand, der Fenster-U-Wert  $U_{win}$ , die Luftwechselrate *Luftwechsel* und die *Solltemperatur* sowie der Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  zu den einflussreichen Parametern. Darüber hinaus hat der COP der Wärmepumpe  $WP_{COP}$  einen großen Einfluss sowie in der kalten Jahreszeit auch die Leistung der Wärmepumpe  $WPP$ . Dieser letzte Einfluss kann auf eine teilweise zu geringe Leistung der Wärmepumpe zurückgeführt werden, wie auch bei den Sensitivitäten für die Zielgröße Innenraumtemperatur noch gezeigt wird.

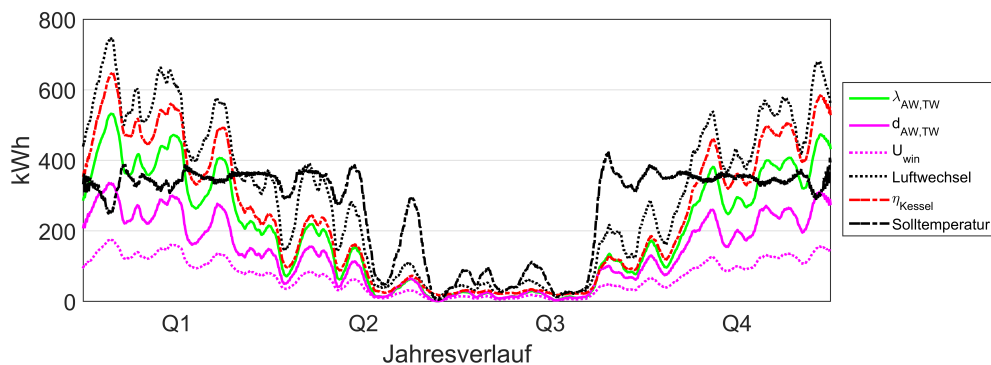
Bei den S\_GAS\*-Szenarien ist während der Heizperiode *Luftwechsel* der Parameter mit dem mit Abstand größten Einfluss, gefolgt von *Solltemperatur* und  $\eta_{Kessel}$ . Auch die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung von Außenwand und Dach  $\lambda_{AW\&DA,D}$  gehört zu den einflussreichen Parametern, die Wärmeleitfähigkeit des Tragwerks dagegen gar nicht mehr. Weiterhin sind  $U_{win}$  aufgrund der Transmissionswärmeverluste der Fenster und  $Q_{el,HH}$  wegen der dadurch resultierenden internen Gewinne einflussreiche Parameter. Die Dicke des Tragwerks  $d_{AW,TW}$  ist im Szenario S\_GASPV einflussreich und die Dicke der Dämmung von Außenwand und Dach  $d_{AW\&DA,D}$  in den Szenarien S\_GASPV und S\_GASST. Im Sommer ist durchgängig  $\eta_{Kessel}$  einflussreich, sobald hier allerdings niedrigere Temperaturen herrschen wird der Einfluss von *Solltemperatur* und *Luftwechsel* wieder stärker.



(a) U\_GAS



(b) U\_GASPV



(c) U\_GASST

Abbildung 13.6.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien U\_GAS\* für Endenergiebedarf

Bei den S\_WP\*-Szenarien sind bei kalten Außenbedingungen immer *Luftwechsel*, *WPCOP* und *Solltemperatur* die einflussreichsten Parameter. Auch die thermischen Eigenschaften der Dämmung  $\lambda_{AW\&DA,D}$  und  $d_{AW\&DA,D}$  sowie  $U_{win}$ ,  $WPP$  und  $Q_{el,HH}$  sind hier einflussreich. Im Sommer ist vor allem *WPCOP* wichtig, wie oben aber auch *Solltemperatur* und *Luftwechsel*.

Im Vergleich zwischen den \*\_GAS\*- und \*\_WP\*-Szenarien lässt sich feststellen, dass die Sensitivitäten bei \*\_GAS\* mehr als 600 kWh zu bestimmten Zeitpunkten erreichen, bei \*\_WP\* nur in der Größenordnung bis 150 kWh liegen. Dies kann so interpretiert werden, dass bei den \*\_GAS\*-Szenarien eine wesentlich höhere Variabilität vorhanden ist und daher für

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

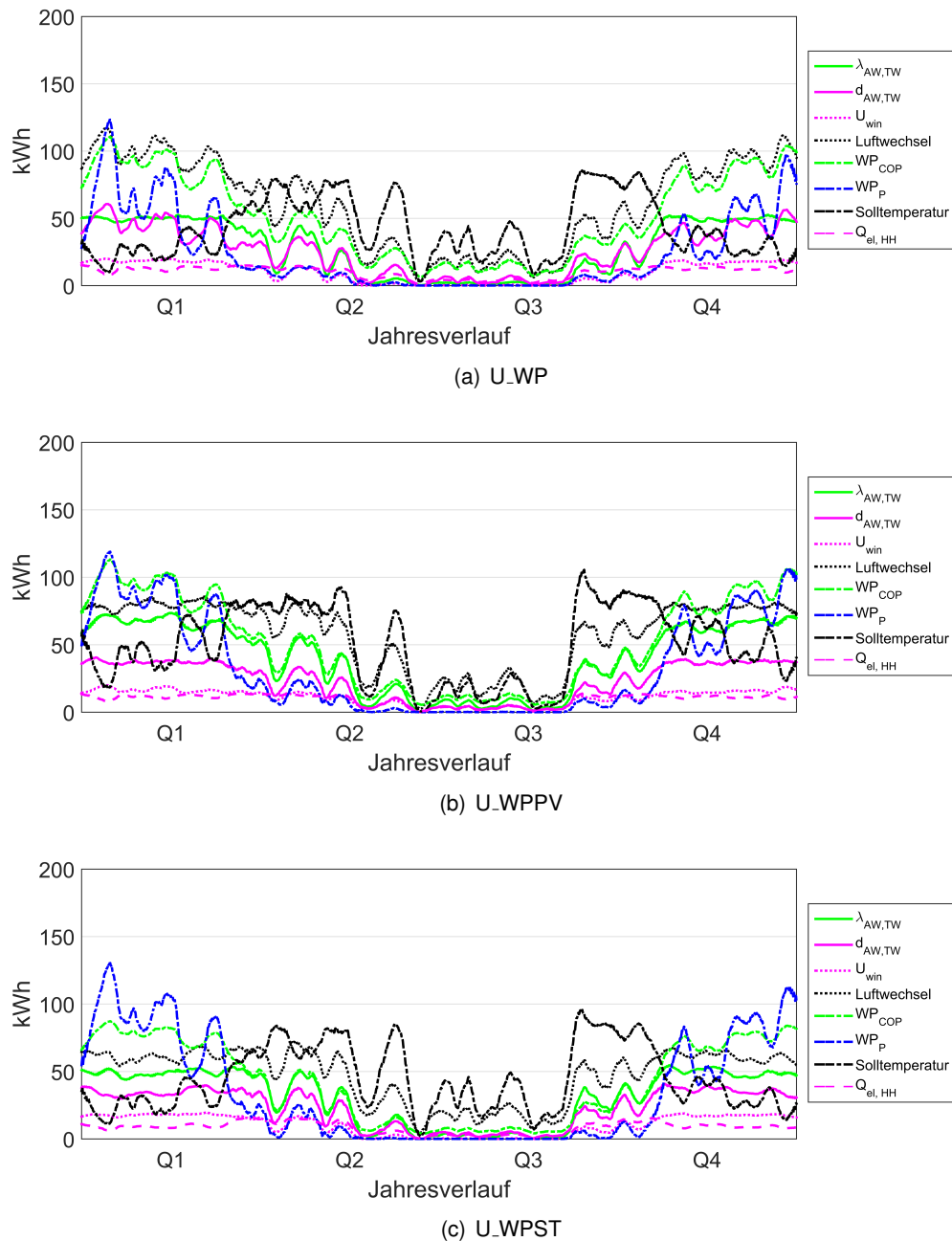


Abbildung 13.7.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien U.WP\* für Endenergiebedarf

verlässliche Vorhersagen die entsprechenden einflussreichen Parameter genauer ermittelt werden müssen.

#### 13.2.1.2. Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur

In den Abbildungen 13.10 bis 13.13 wird der Verlauf des Sensitivitätsindex  $\widehat{\mu}^{*167}$  dargestellt, der aus den mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden geglätteten Ergebnisdaten für die durchschnittliche Innenraumtemperatur berechnet wurde.

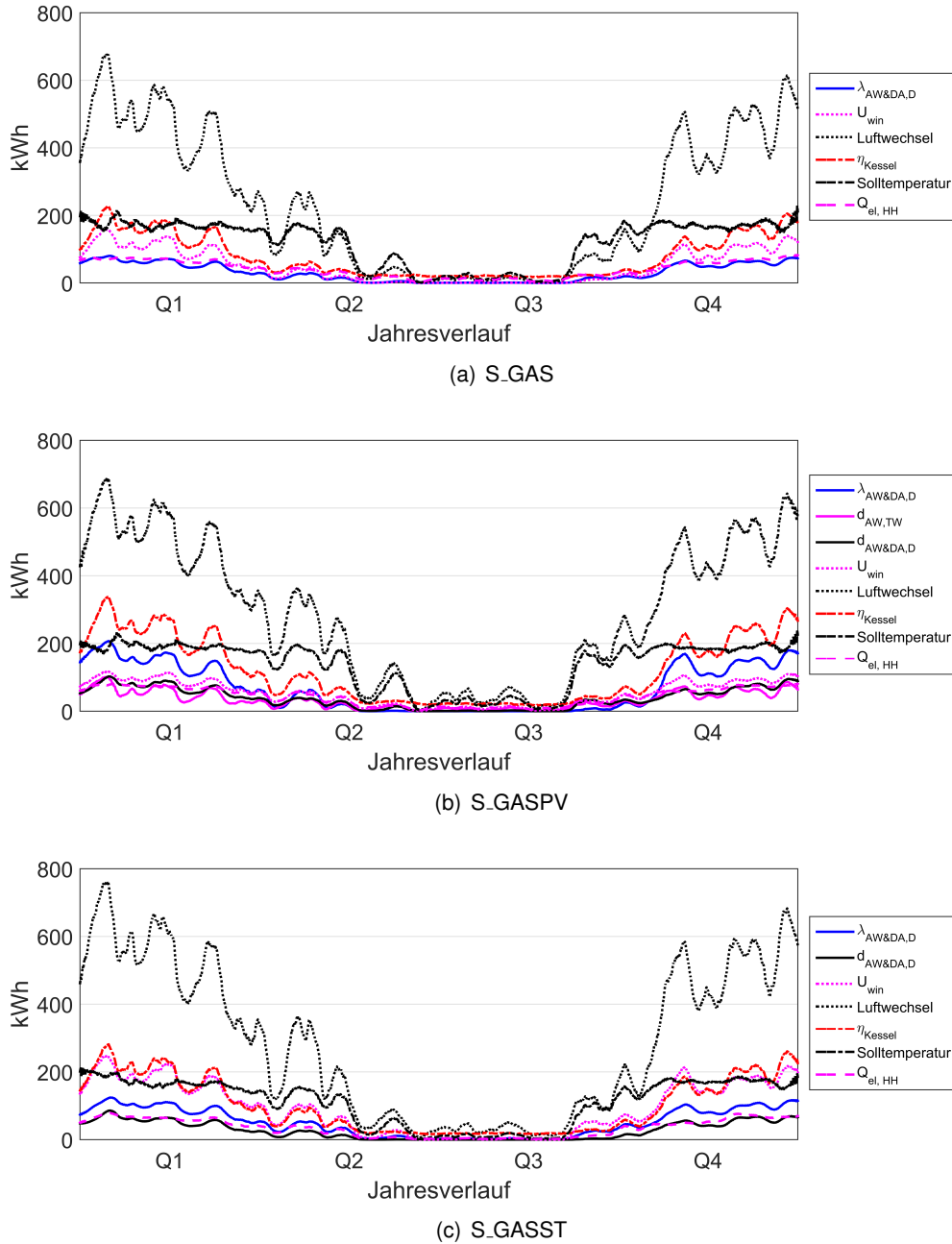


Abbildung 13.8.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S.GAS\* für Endenergiebedarf

In der kalten Jahreszeit ist in den Szenarien U\_GAS\* *Soltemperatur* die mit Abstand einflussreichste Größe, gefolgt von *Luftwechsel*. Im Sommer kehrt sich dies insofern um, als dass *Luftwechsel* hier meistens am einflussreichsten ist. Weiterhin sind die thermischen Eigenschaften der Außenwand  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  sowie  $U_{win}$ ,  $g_{win}$  und  $Q_{el,HH}$  einflussreich, wobei der Einfluss all dieser Größen im Sommer ansteigt und daher vor allem hinsichtlich der Überhitzungsproblematik von Bedeutung ist.

In den U\_WP\*-Szenarien ist bei sehr kalten Außenbedingungen die Wärmepumpenleistung  $W_{PP}$  am einflussreichsten, da hier die Leistung teilweise nicht ausreicht, um die Solltemperatur zu erreichen. Wenn die Leistung ausreichend ist, so ist *Soltemperatur* der einfluss-

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

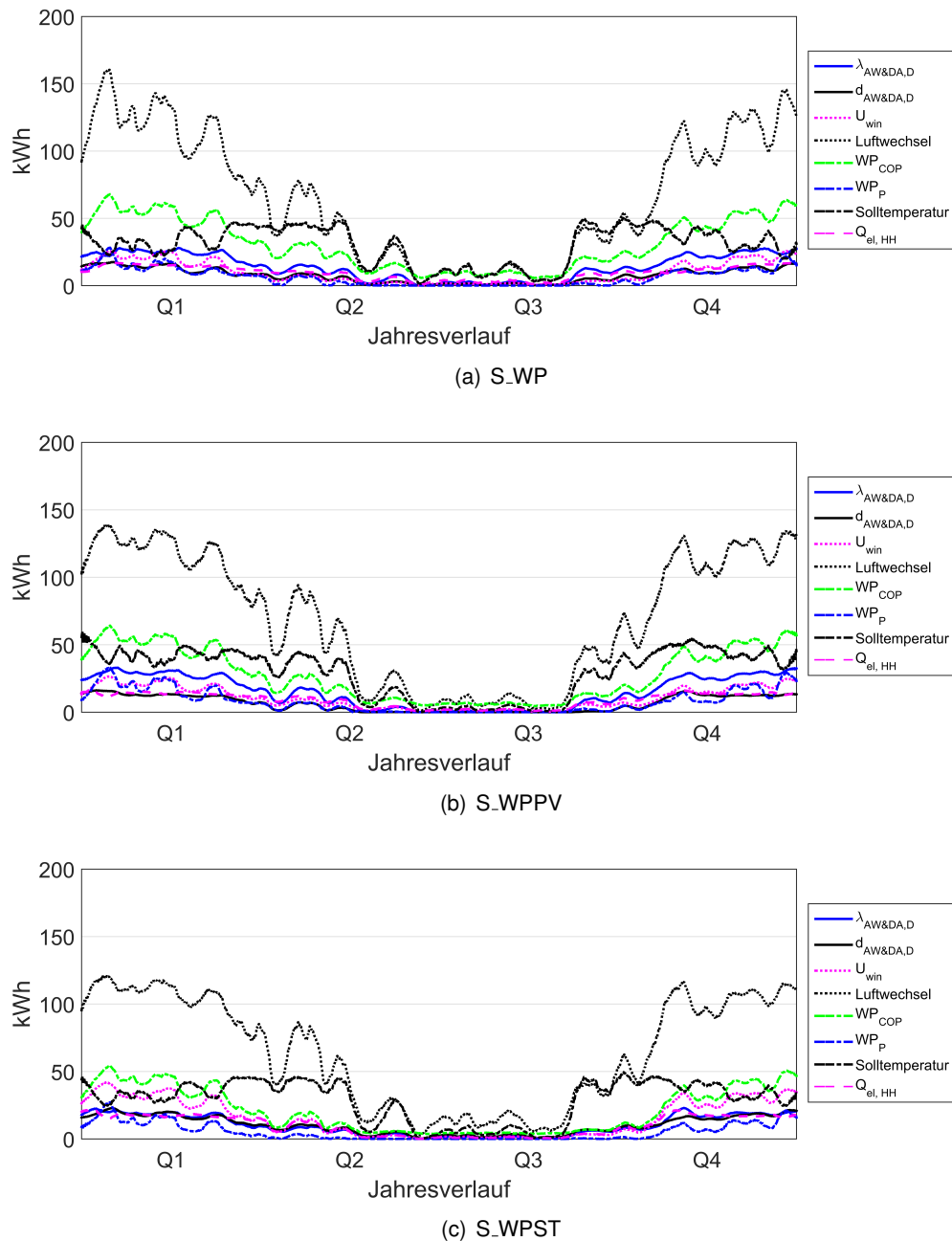


Abbildung 13.9.:  $\hat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S.WP\* für Endenergiebedarf

reichste Parameter, gefolgt von *Luftwechsel*. Im Sommer sind beide etwa gleich bedeutsam. Weiterhin sind wieder die thermischen Eigenschaften der Außenwand  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  sowie  $g_{win}$  und  $Q_{el,HH}$  unter den wichtigsten Parametern. Auffallend ist, dass im Szenario U\_WPPV der Parameter  $U_{win}$  nicht zu den einflussreichen Parametern gehört, in U\_WP und W\_WPST schon.

In den S.GAS\*-Szenarien ist *Solltemperatur* in der kalten Jahreszeit dominierend, gefolgt von *Luftwechsel*. Bei wärmeren Außenbedingungen dreht sich dies wie bei den U\_GAS\*-Szenarien um. Aufgrund der besseren Dämmung der Gebäude geschieht dies wesentlich sanfter als bei unsanierten Gebäuden. Weitere einflussreiche Parameter sind die Wärmeleit-

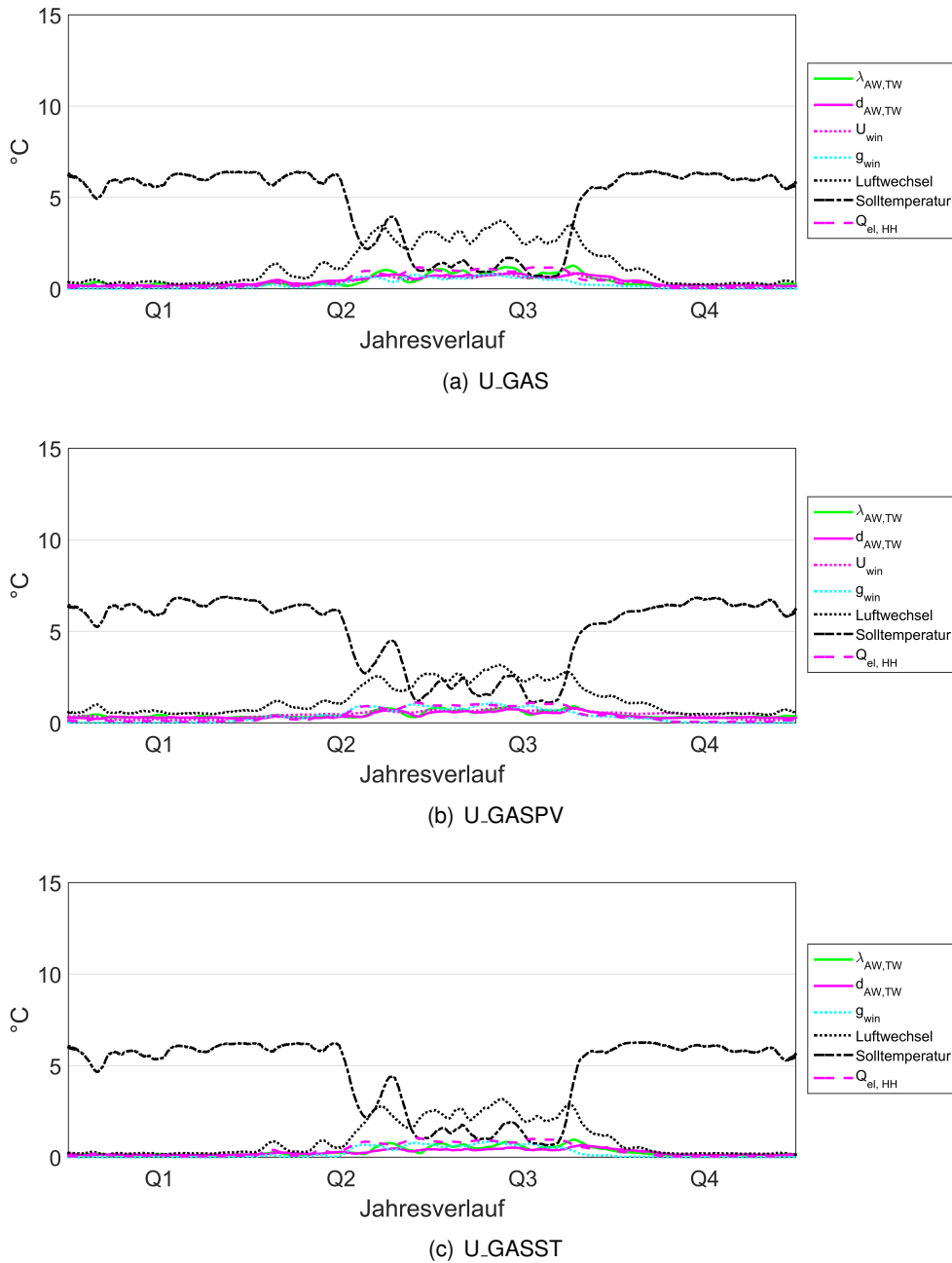


Abbildung 13.10.:  $\widehat{\mu}^*_{167}$  in Szenarien U\_GAS\* für durchschnittliche Innenraumtemperatur

fähigkeit der Dämmung der Außenwand und des Dachs  $\lambda_{AW\&DA,D}$  sowie  $U_{win}$ ,  $g_{win}$  und  $Q_{el,HH}$ . In den Szenarien S\_GASPV und S\_GASST hat auch die Dicke der Wand- und Dachdämmung  $d_{AW\&DA,D}$  Einfluss auf die Innenraumtemperatur. Hierbei fällt auf, dass all diese zuletzt genannten Parameter wieder vor allem bei warmen Außenbedingungen an Einfluss gewinnen und daher mutmaßlich für die Überhitzungsproblematik eine Rolle spielen.

In den S\_WP\*-Szenarien kommt wie in den U\_WP\*-Szenarien auch noch die Leistung der Wärmepumpe  $WP_P$  als einflussreicher Parameter hinzu, allerdings mit wesentlich geringem Einfluss, da die teilweise zu geringe Leistung der Wärmepumpe durch die gut gedämmte Gebäudehülle nicht mehr so stark ins Gewicht fällt.



### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

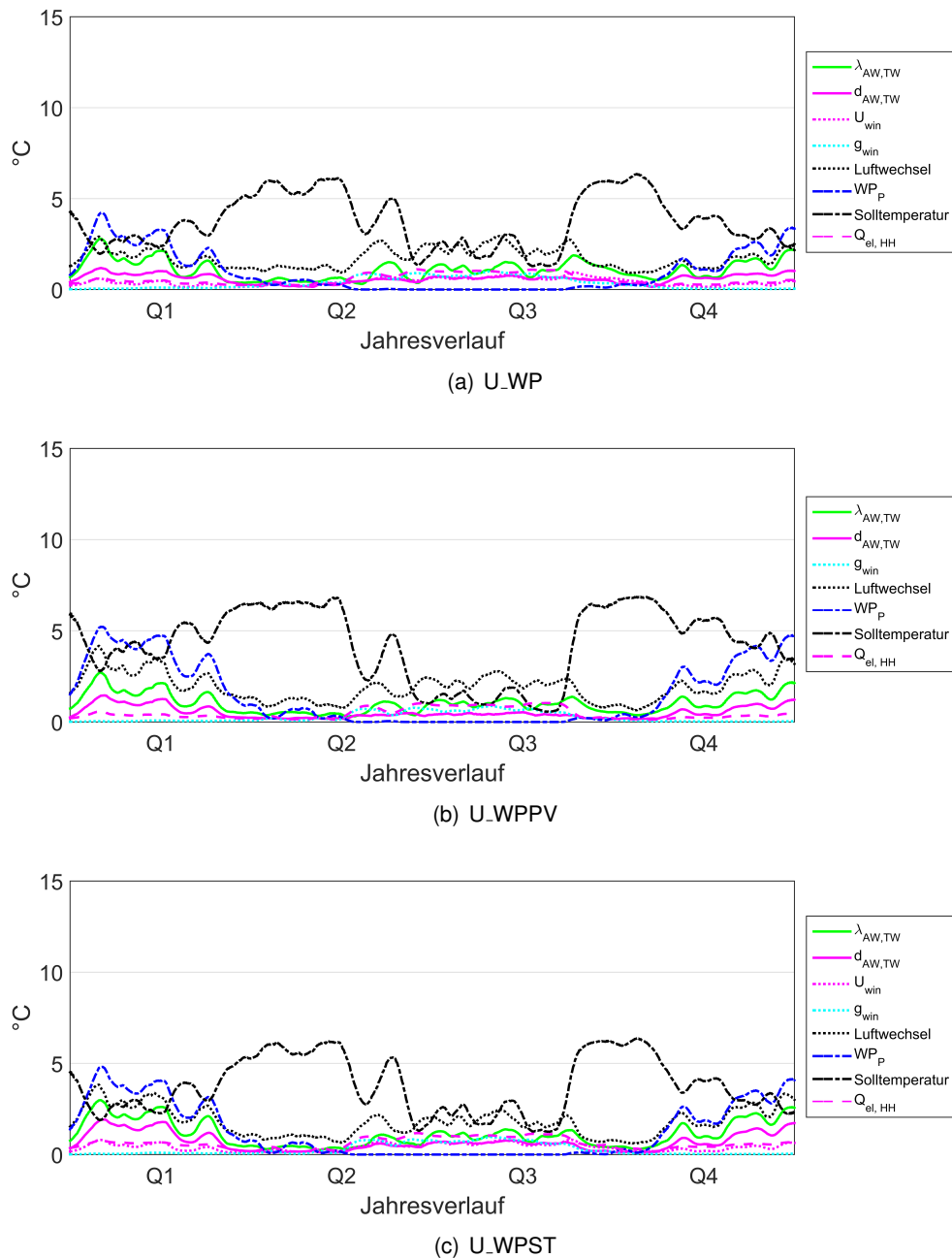


Abbildung 13.11.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien U.WP\* für durchschnittliche Innenraumtemperatur

#### 13.2.1.3. Zielgröße bezogene elektrische Energie

In den Abbildungen 13.14 bis 13.17 wird der Verlauf des Sensitivitätsindex  $\widehat{\mu}^{*167}$  dargestellt, der aus den mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden geglätteten Ergebnisdaten für die aus dem Netz bezogene elektrische Energie berechnet wurde.

In den Szenarien U.GAS\* ist über das gesamte Jahr der Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  sehr stark beeinflussend. Während der Heizperiode wird dies teilweise vom Wirkungsgrad der Pumpen  $\eta_{Pumpen}$  übertroffen. Während dieser Zeit haben auch *Solltemperatur*, *Luftwechsel* sowie  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  einen größeren Einfluss, da diese Parameter den Heizungsbe-

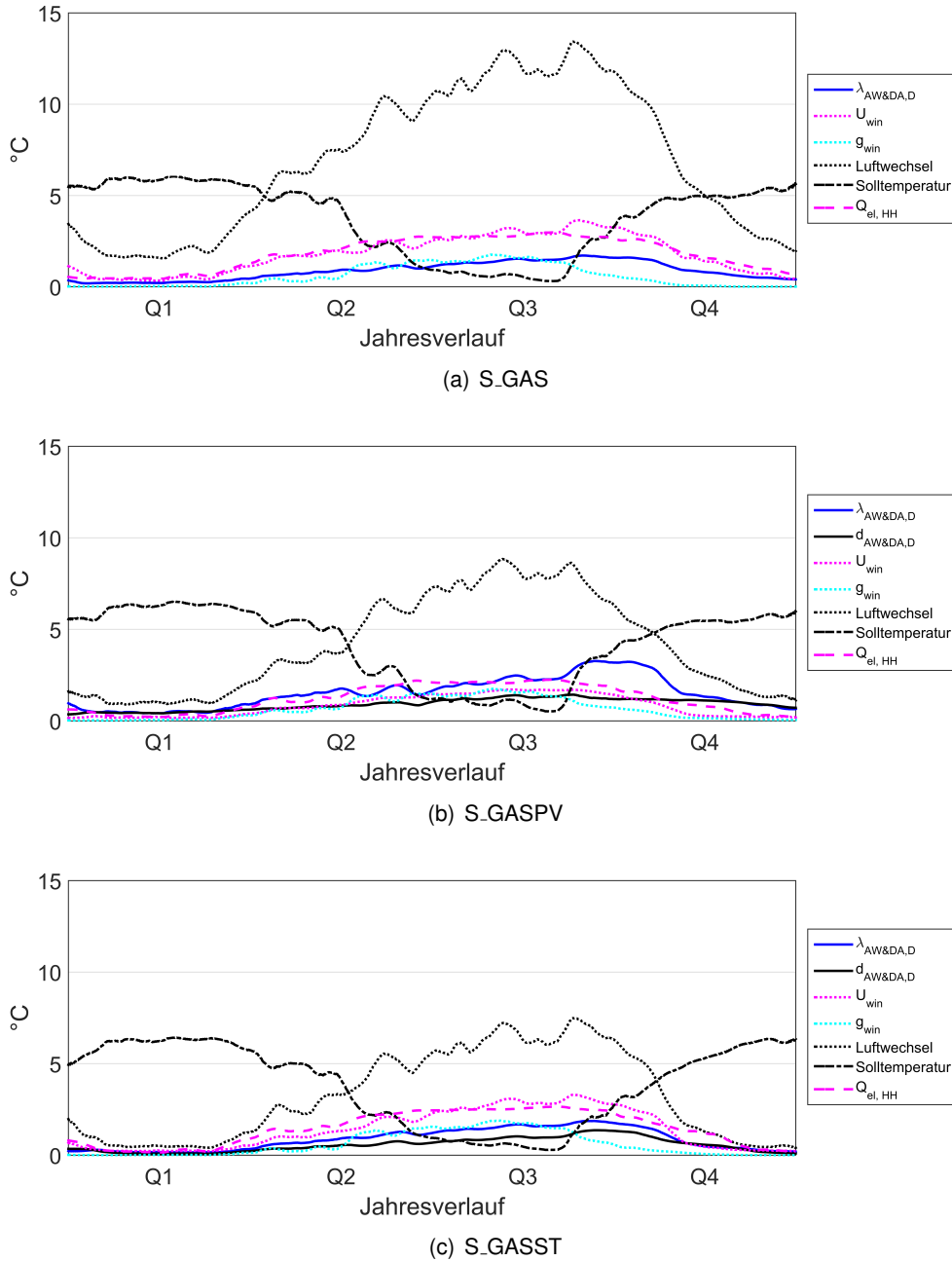


Abbildung 13.12.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S\_GAS\* für durchschnittliche Innenraumtemperatur

trieb und damit den Hilfsenergiebedarf der Heizung beeinflussen. Im Szenario U\_GASPV spielen die thermischen Eigenschaften der Außenwand eine geringere Rolle für die bezogene elektrische Energie.

Die Sensitivitäten der Szenarien U\_WP\* unterscheiden sich stark hinsichtlich der Zielgröße Strombezug von den U\_GAS\* Szenarien.  $Q_{el, HH}$  gehört zwar über das gesamte Jahr hinweg ebenfalls zu den einflussreichen Parametern, aber in den einzelnen Szenarien gibt es vor allem im Winter und der Übergangszeit einige Unterschiede. In U\_WP sind in der kalten Jahreszeit vor allem Luftwechsel und  $WP_{COP}$  sehr einflussreich, gefolgt von  $\lambda_{AW, TW}$ ,  $d_{AW, TW}$ ,  $WP_P$ ,  $Q_{el, HH}$ ,  $\eta_{Pumpen}$ , Solltemperatur und  $U_{win}$ . In der Übergangszeit wird

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

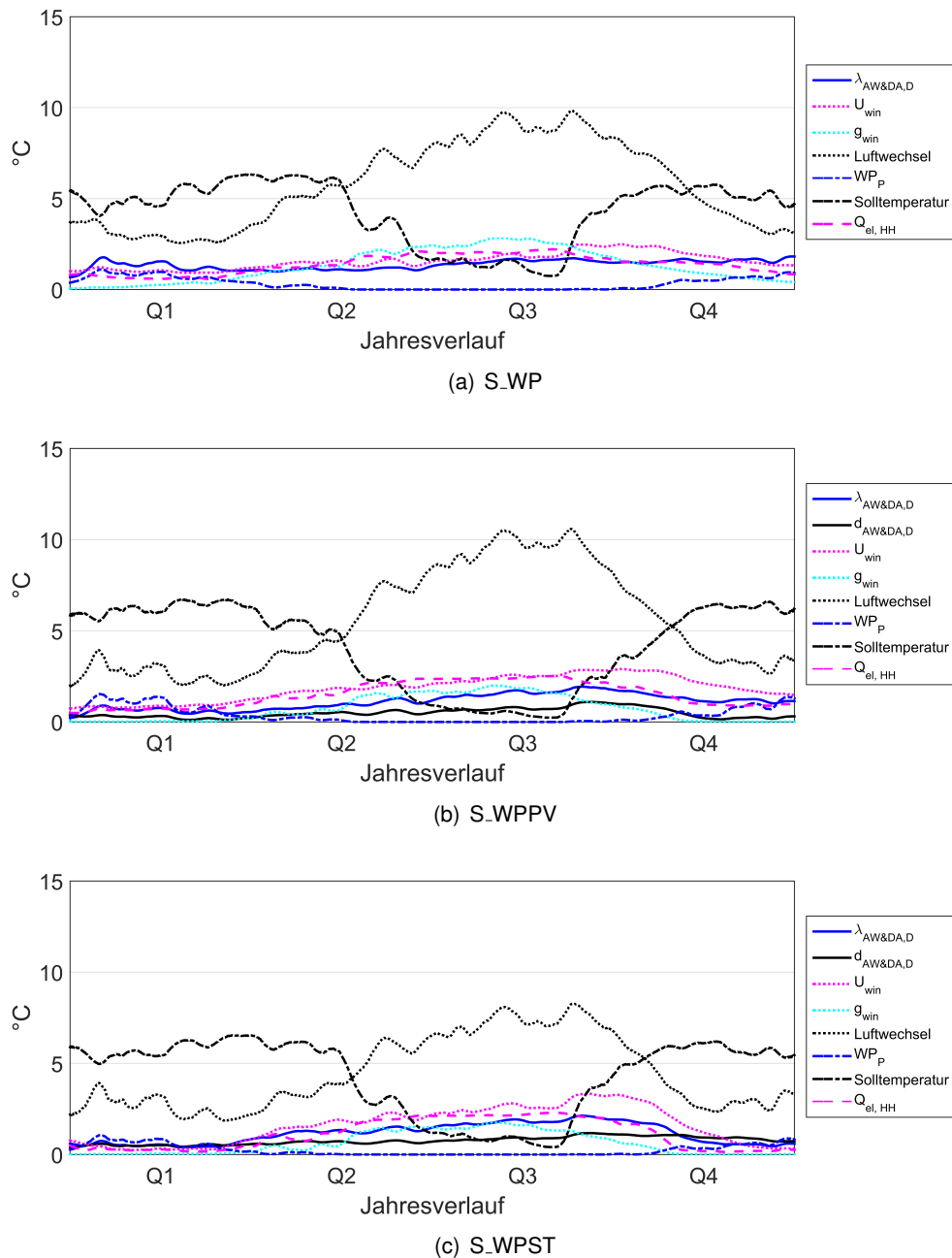


Abbildung 13.13.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S.WP\* für durchschnittliche Innenraumtemperatur

*Solltemperatur* die einflussreichste Größe, während der Sommerzeit ist  $Q_{el,HH}$  am einflussreichsten. Im Szenario U\_WPPV ist im Winter der Einfluss von *Luftwechsel* und  $\lambda_{AW,TW}$  ähnlich, gefolgt von  $WPCOP$ ,  $\eta_{Pumpen}$  und den vorher bereits genannten Parametern. Im Szenario U\_WPST hingegen ist im Winter vor allem  $\eta_{Pumpen}$  einflussreich, gefolgt von  $WP_P$ ,  $\lambda_{AW,TW}$ , *Luftwechsel* und den restlichen zuvor genannten Parametern. In der Übergangszeit übernehmen dann *Solltemperatur* und *Luftwechsel* die Position der einflussreichsten Parameter, um im Sommer von  $Q_{el,HH}$  teilweise übertroffen zu werden.

Die Sensitivitäten in den Szenarien S\_GAS\* sind wiederum ähnlich wie in U\_GAS\*, allerdings ist bei diesen sanierten Szenarien der Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  immer am einfluss-

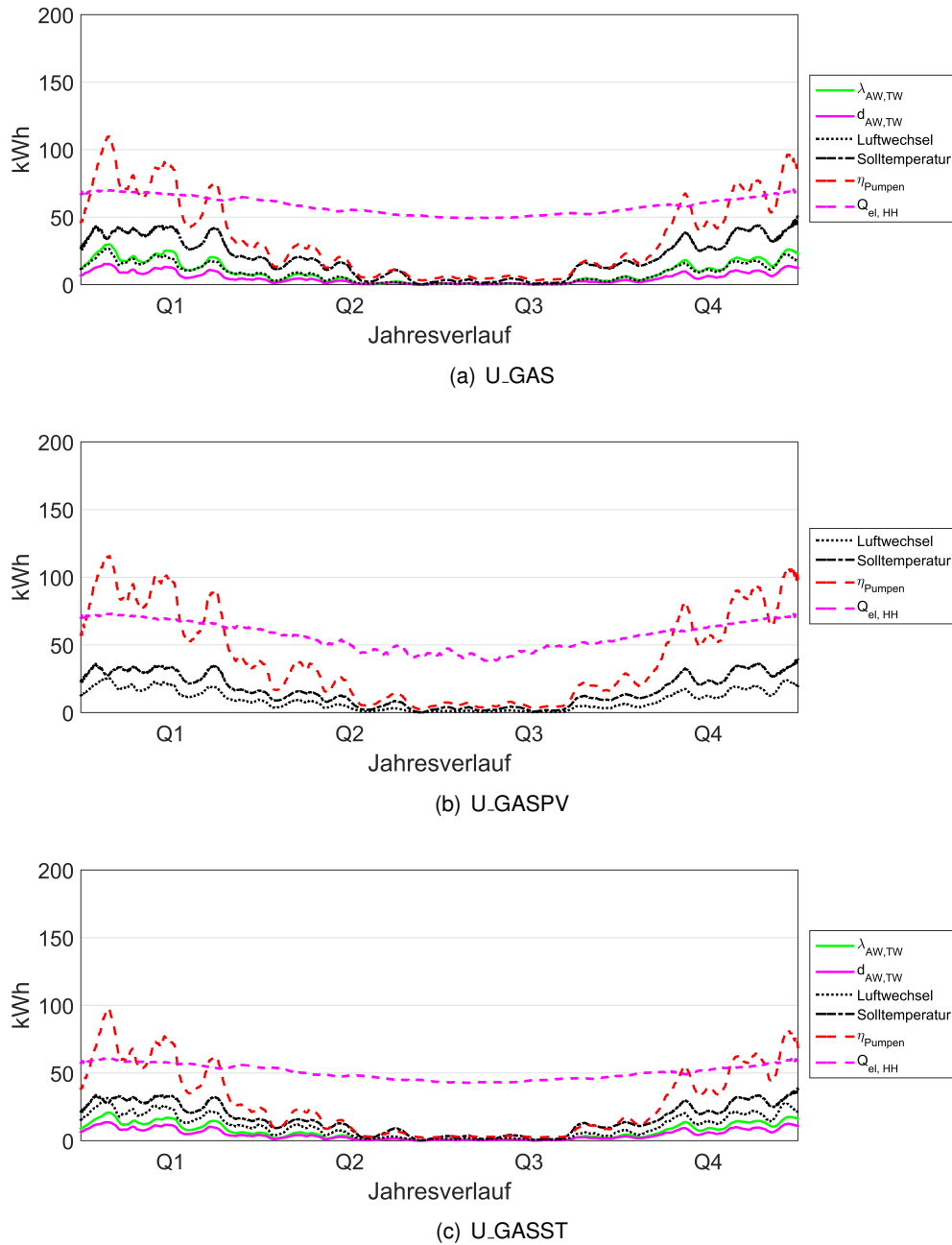


Abbildung 13.14.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien U\_GAS\* für bezogene elektrische Energie

reichsten hinsichtlich der bezogenen elektrischen Energie. Dahinter folgen die Parameter  $\eta_{Pumpen}$ , *Luftwechsel* und *Solltemperatur*. Im Szenario S\_GASST haben auch  $\lambda_{AW\&DA,D}$  und  $U_{win}$  einen gewissen Einfluss.

In den Szenarien S\_WP\* ähneln sich die Sensitivitäten. Im Winter ist *Luftwechsel* der mit Abstand einflussreichste Parameter gefolgt von  $W_{PCOP}$ , *Solltemperatur* und  $Q_{el,HH}$ . Weitere beeinflussende Parameter sind  $\lambda_{AW\&DA,D}$ ,  $d_{AW\&DA,D}$ ,  $U_{win}$ ,  $W_{PP}$  und  $\eta_{Pumpen}$ . Im Sommer wird der Strombezug maßgeblich von  $Q_{el,HH}$  beeinflusst, da hier die Wärmeverluste und damit die Beheizung des Gebäudes nur eine untergeordnete Rolle spielen.

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

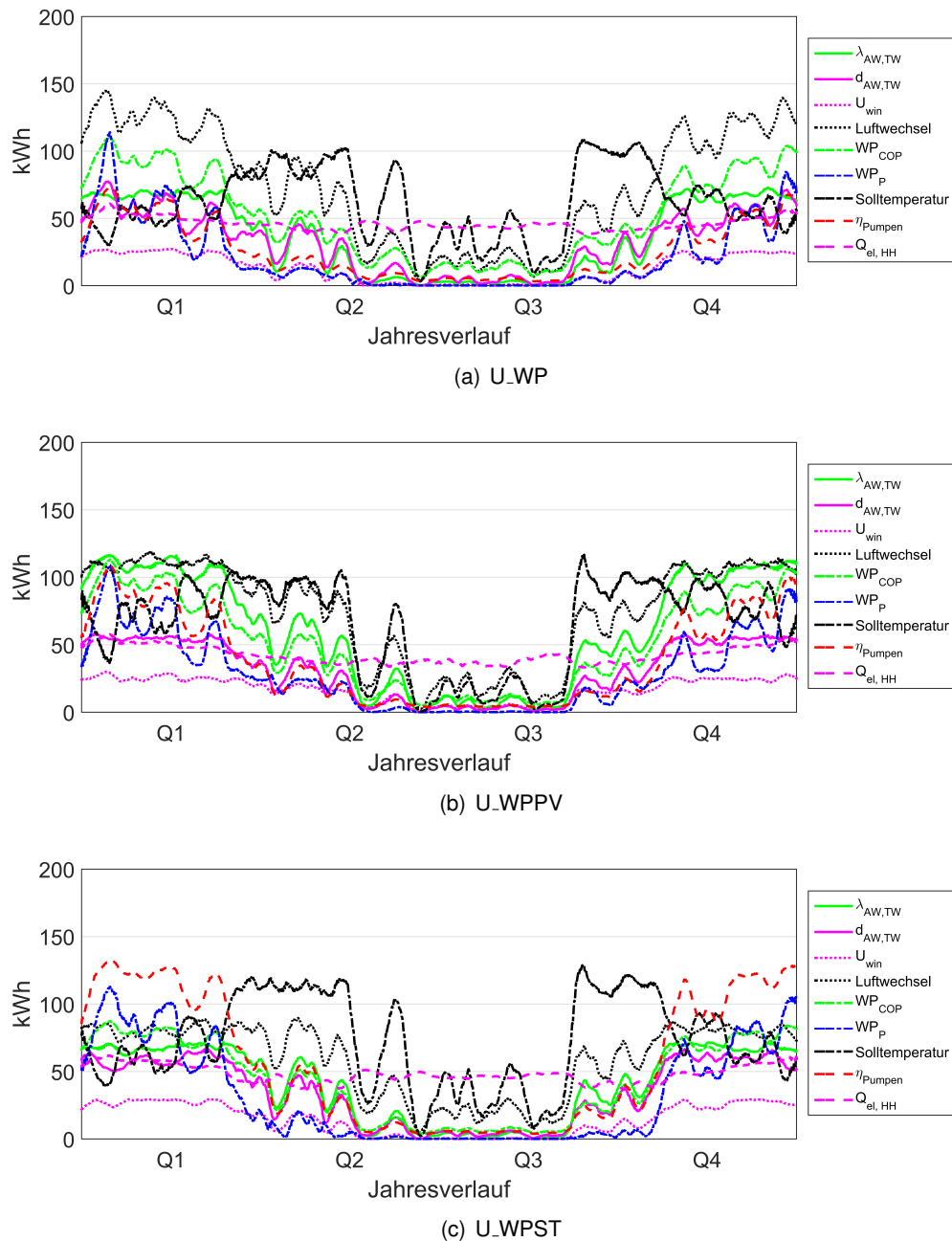


Abbildung 13.15.:  $\widehat{\mu}^{167}$  in Szenarien U\_WP\* für bezogene elektrische Energie

#### 13.2.1.4. Zielgröße eingespeiste elektrische Energie

In den Abbildungen 13.18 und 13.19 wird der Verlauf des Sensitivitätsindex  $\widehat{\mu}^{167}$  dargestellt, der aus den mit einem gleitenden Mittelwert über 167 Stunden geglätteten Ergebnisdaten für die ins Netz eingespeiste elektrische Energie berechnet wurde.

In allen \*\_PV-Szenarien wird die Stromspeisung im Sommer, wenn viel PV-Strom erzeugt wird, vor allem durch den Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  beeinflusst.

Im Szenario U\_GASPV hat auch der Parameter  $\eta_{Pumpen}$  ganzjährigen Einfluss auf die Stromspeisung, da die Pumpen während des Betriebs elektrische Energie benötigen, sowie

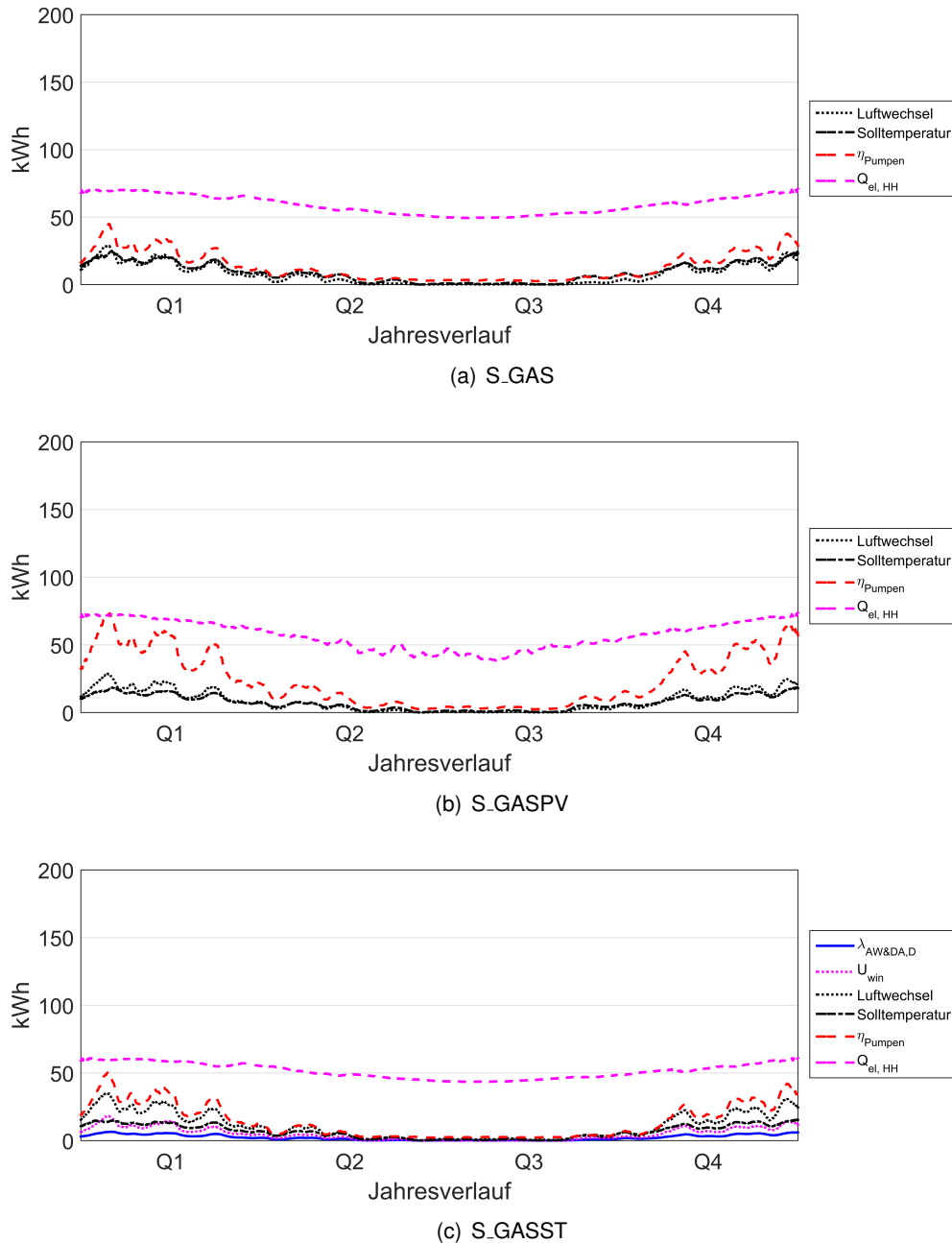


Abbildung 13.16.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S\_GAS\* für bezogene elektrische Energie

die *Solltemperatur*, die beeinflusst, wann und wie oft die Heizung betrieben wird.

Im Szenario U\_WPPV ist nach  $Q_{el,HH}$  auch die *Solltemperatur* und der *Luftwechsel* einflussreich, außerdem auch das Volumen des Trinkwarmwasserspeichers  $TWW_{Vol}$ , da durch größere Trinkwasserspeicher der Wärmepumpenbetrieb außerhalb von PV-Erzeugungszeiten teilweise vermieden werden kann. Auch die thermischen Eigenschaften  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  der Außenwand haben einen Einfluss.

Im Szenario S\_GASPV ist außer  $Q_{el,HH}$  kein weiterer Parameter von Bedeutung, da im Vergleich zu U\_GASPV wesentlich geringere Heizlasten auftreten und somit der elektrische Energiebedarf der Heizung insgesamt geringer ist.

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

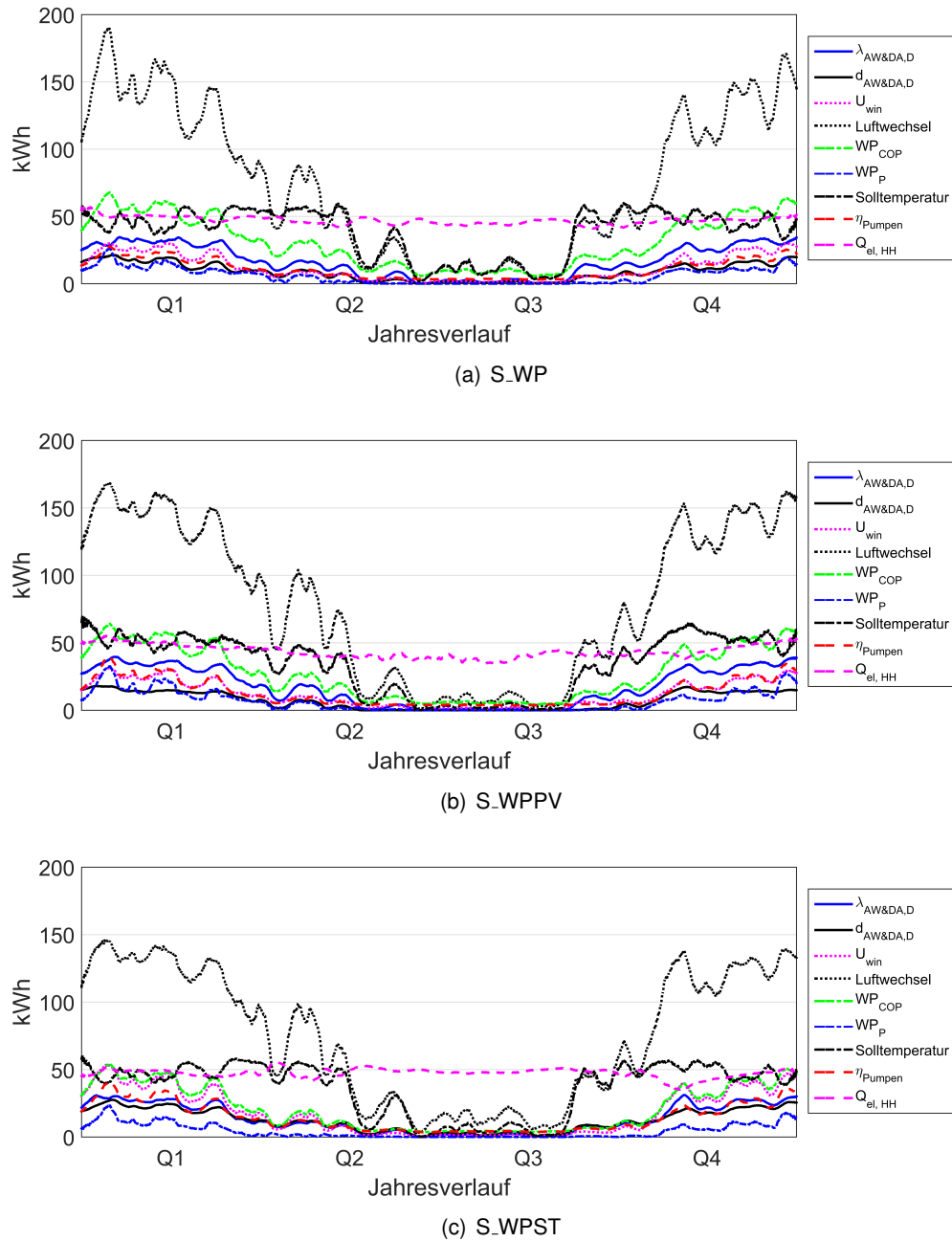


Abbildung 13.17.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S.WP\* für bezogene elektrische Energie

Im Szenario S.WPPV ähneln die Sensitivitäten denen in U.WPPV, allerdings spielen die thermischen Eigenschaften der Außenwand keine Rolle, der Einfluss von *Solltemperatur* und *Luftwechsel* ist etwas geringer, der Einfluss von  $TWW_{Vol}$  ist in etwa gleich.

#### 13.2.2. Auswertung mit funktionaler Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung

In diesem Abschnitt wird eine beispielhafte ausführliche Auswertung für die Zielgrößen Endenergiebedarf und durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U.GAS mittels funk-

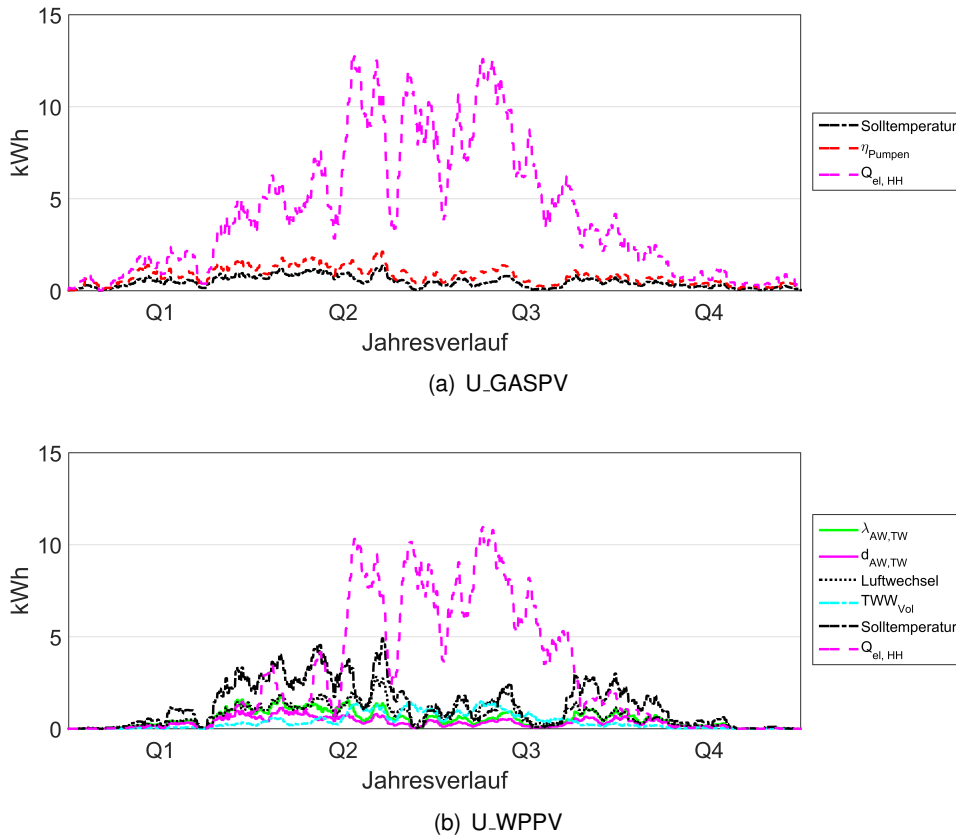


Abbildung 13.18.:  $\widehat{\mu}^*_{167}$  in Szenarien U\_\*PV für Stromeinspeisung

tionaler Transformation durch Hauptkomponentenzerlegung durchgeführt. Hierfür werden die wichtigsten Hauptkomponenten, die in den Grafiken mit PC bezeichnet sind, mit gleitenden Mittelwerten über das gesamte Jahr sowie als stündliche Werte für einzelne Tage als Abweichung von der Mittelwertkurve, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, dargestellt und interpretiert. Im Anschluss werden die Sensitivitäten  $\mu_f^*$  der Parametergruppen bzgl. der entsprechenden Hauptkomponentengewichtungen dargestellt.

Die durch die funktionale Transformation der Ergebnisdaten mit zwei Hauptkomponenten bei der Zielgröße Endenergiebedarf bzw. drei Hauptkomponenten bei der Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur entstandenden Abweichungen werden analog wie bei der sequentiellen Auswertung als minimaler, mittlerer und maximaler RMSE im Verhältnis zum Mittelwert der Zielgröße über alle Trajektorien, Trajektorienpunkte und Zeitpunkte in Tabelle 13.7 dargestellt. Dabei sind die prozentualen Abweichungen für die Zielgröße Endenergiebedarf größer als bei der Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur. Dies liegt zum einen an der geringeren Anzahl an Hauptkomponenten aber auch an den geringeren Fluktuationen der Temperaturen. Die prozentualen Abweichungen liegen im Bereich von 4 % bis 106 % für den Endenergiebedarf bzw. 0 % bis 6 % für die Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur. Weiterhin lässt sich feststellen, dass die prozentualen Abweichungen des Endenergiebedarfs bei den \*\_WP\*-Szenarien durchgängig größer als bei den \*\_GAS\*-Szenarien ist. Durch eine Verwendung von drei Hauptkomponenten für die funktionale Transformation der Zielgröße Endenergiebedarf ließe sich die prozentuale Abweichung auf Werte zwischen 4 %



### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

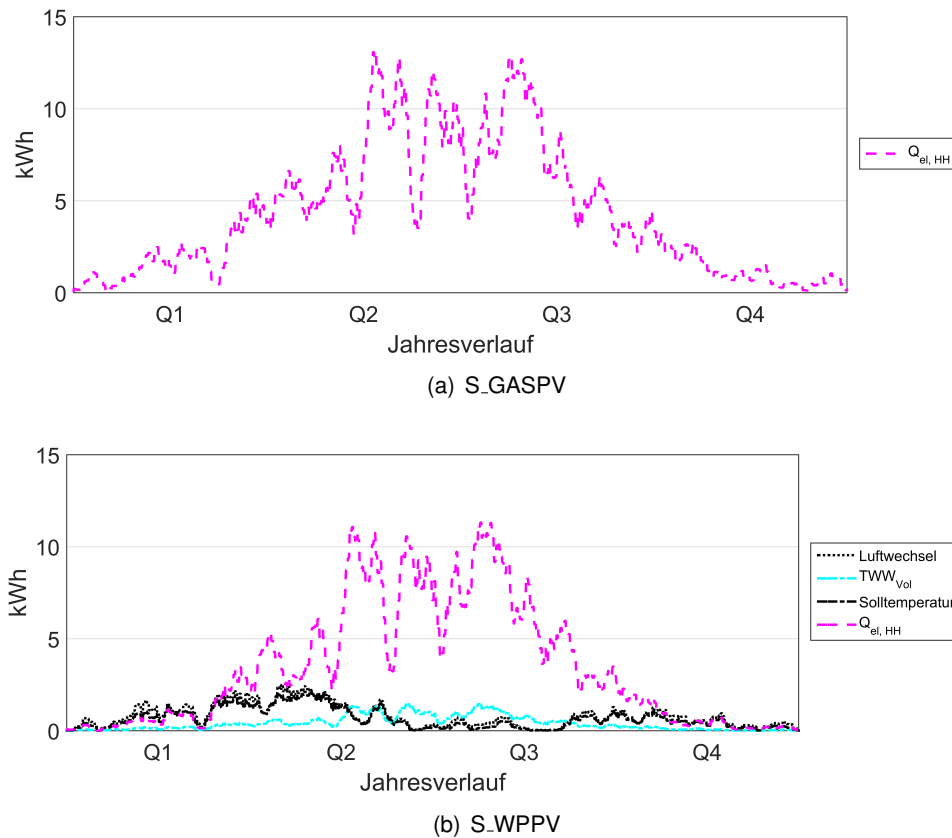


Abbildung 13.19.:  $\widehat{\mu}^{*167}$  in Szenarien S\_\*PV für Stromeinspeisung

und 58 % reduzieren.

#### 13.2.2.1. Zielgröße Endenergiebedarf in Szenario U\_GAS

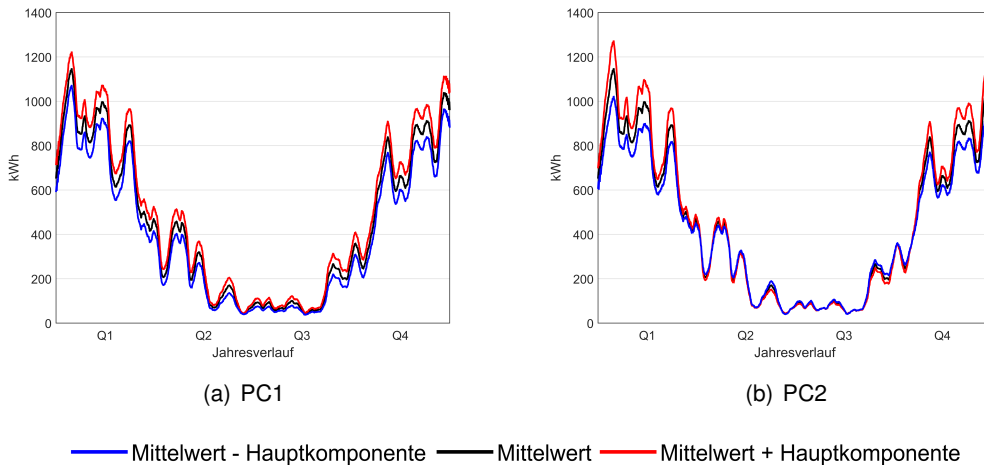
Für die Zielgröße Endenergiebedarf im Szenario U\_GAS ergibt die Hauptkomponentenanalyse, dass Hauptkomponente 1 (PC1) etwa 90 % der Datenvariabilität erklärt, Hauptkomponente 2 (PC2) etwa 8 %. Alle weiteren Hauptkomponenten sind für die verbleibenden 2 % verantwortlich und werden daher nicht weiter betrachtet.

Die Hauptkomponente PC1 stellt in der kalten Jahreszeit in Abbildung 13.21(a) den Effekt eines erhöhten Endenergiebedarfs tagsüber und eines minimal niedrigeren Endenergiebedarfs nachts dar. In der warmen Jahreszeit in Abbildung 13.21(b) stellt diese Hauptkomponente tagsüber eine Erhöhung dar, nachts ist hier praktisch keine Abweichung von der Mittelwertkurve zu erkennen. In Abbildung 13.20(a) mit gleitenden Mittelwerten ist der Trend zur allgemeinen Erhöhung zu sehen, hier ist die minimale Erniedrigung im Winter nachts nicht erkennbar.

Die Hauptkomponente PC2 stellt in der kalten Jahreszeit in Abbildung 13.21(c) tagsüber eine leichte Abweichung, nachts eine etwas stärkere Abweichung von der Mittelwertkurve nach oben dar. In der warmen Jahreszeit in Abbildung 13.21(d) repräsentiert sie tagsüber meist

**Tabelle 13.7.: Prozentuale Abweichung des minimalen, mittleren und maximalen durch funktionale Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung entstandenden Fehlers RMSE vom Mittelwert der jeweiligen Zielgrößen in den Szenarien**

Sanierungsszenario	Endenergiebedarf			Durchschnittliche Innenraumtemperatur		
	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
U_GAS	5	11	23	0	1	2
U_GASPV	5	10	23	0	1	6
U_GASST	4	12	30	0	1	3
U_WP	8	22	71	1	2	5
U_WPPV	9	20	41	1	2	5
U_WPST	9	19	40	1	2	4
S_GAS	11	18	36	1	2	3
S_GASPV	8	15	43	1	2	5
S_GASST	6	17	42	0	2	4
S_WP	10	27	69	1	2	4
S_WPPV	9	25	106	1	2	5
S_WPST	7	23	82	1	2	5

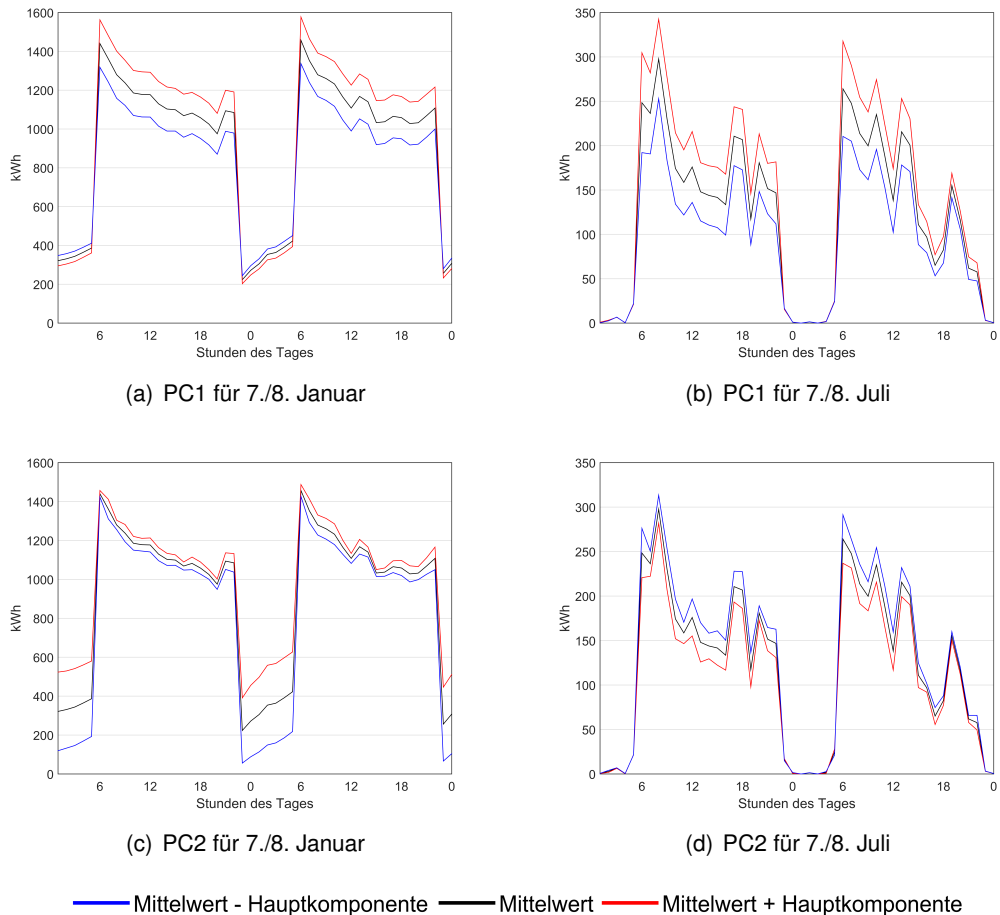


**Abbildung 13.20.: Hauptkomponenten PC1 und PC2 mit gleitendem Mittel über 167 Stunden für Zielgröße Endenergiebedarf im Szenario U\_GAS**

einen etwas niedrigeren Energiebedarf, nachts ist praktisch keine Abweichung von der Mittelwertkurve sichtbar. Dies zeigt sich auch in Abbildung 13.20(b) in der Darstellung mit gleitenden Mittelwerten. Allerdings kommt es in der Übergangszeit tagsüber teilweise auch zu geringen Abweichungen nach unten, dies ist in den Grafiken nicht ersichtlich. Zur Erkennung dieses Effekts wurde die Hauptkomponente PC2 tageweise dargestellt und über das gesamte Jahr ausgewertet.

Wie in Abbildung 13.22 zu sehen, sind für die Hauptkomponente PC1 der Zielgröße Endenergiebedarf maßgeblich die Parameter *Solltemperatur*, *Luftwechsel*,  $\eta_{Kessel}$ ,  $\lambda_{AW,TW}$ ,  $d_{AW,TW}$ ,  $U_{win}$ ,  $Q_{el,HH}$ ,  $KGF/BGF$  und  $g_{win}$  die beeinflussenden Faktoren. Die Hauptkomponente PC2 wird maßgeblich von den Parametern *Luftwechsel*, *Solltemperatur*,  $\lambda_{AW,TW}$ ,  $\eta_{Kessel}$ ,  $d_{AW,TW}$ ,  $U_{win}$ ,  $Q_{el,HH}$  und  $KGF/BGF$  beeinflusst.

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen



**Abbildung 13.21.:** Hauptkomponenten PC1 und PC2 für Zielgröße Endenergiebedarf an ausgewählten Tagen im Szenario U\_GAS

#### 13.2.2.2. Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur in Szenario U\_GAS

Für die Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U\_GAS ergibt die Hauptkomponentenanalyse, dass Hauptkomponente 1 (PC1) etwa 91 % der Datenvariabilität erklärt, Hauptkomponente 2 (PC2) etwa 6 % und Hauptkomponente 3 (PC3) etwa 1,5 %. Alle weiteren Hauptkomponenten sind für die verbleibenden 1,5 % verantwortlich und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Die Hauptkomponente PC1 stellt ganzjährig eine Erhöhung der Innenraumtemperatur dar, wie in Abbildung 13.23(a) zu sehen ist. In der kalten Jahreszeit, wie beispielhaft in Abbildung 13.24(a) für zwei Wintertage dargestellt, ist die Erhöhung etwas stärker als in der warmen Jahreszeit, wie beispielhaft in Abbildung 13.24(b) zu sehen.

Die Hauptkomponente PC2 ist aus Abbildung 13.23(b) nur für die warme Sommerzeit relativ eindeutig zu interpretieren, hier tritt eine zusätzliche Erwärmung auf, wie auch in Abbildung 13.24(d) gut zu sehen ist. In der kalten Jahreszeit dagegen ist in der Grafik mit gleitendem Mittelwert zu sehen, dass die Temperatur absinkt. In Abbildung 13.24(c) kann man genauer

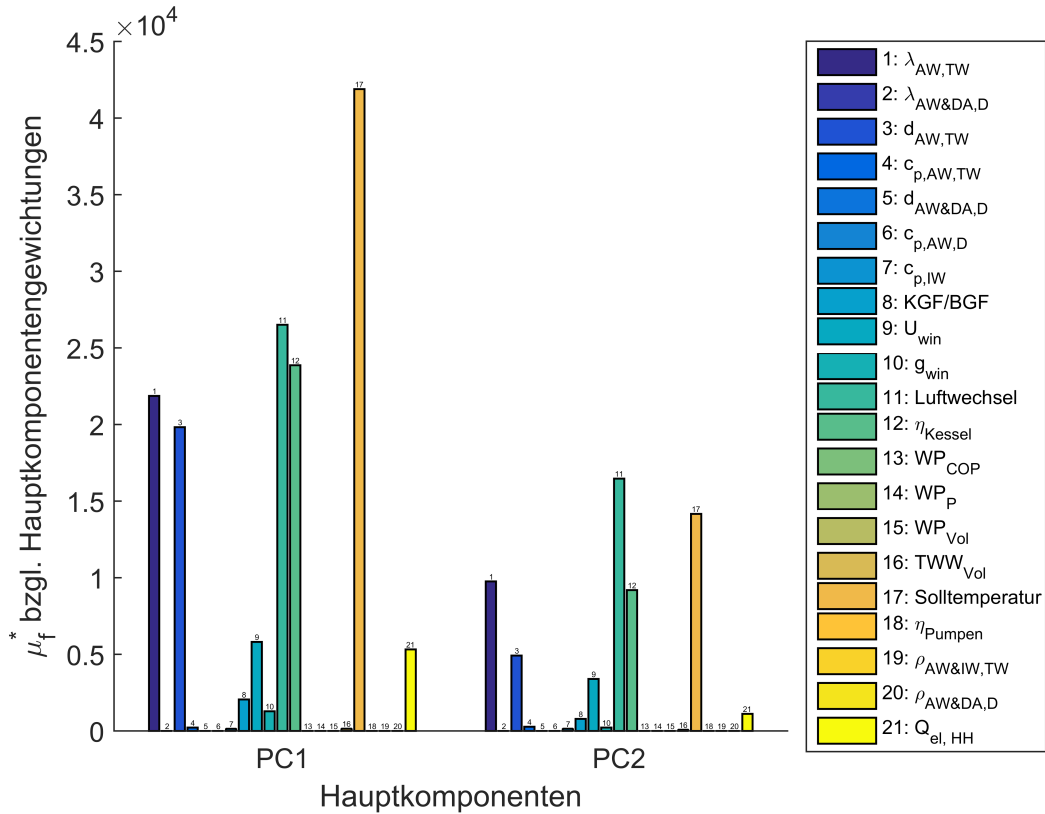


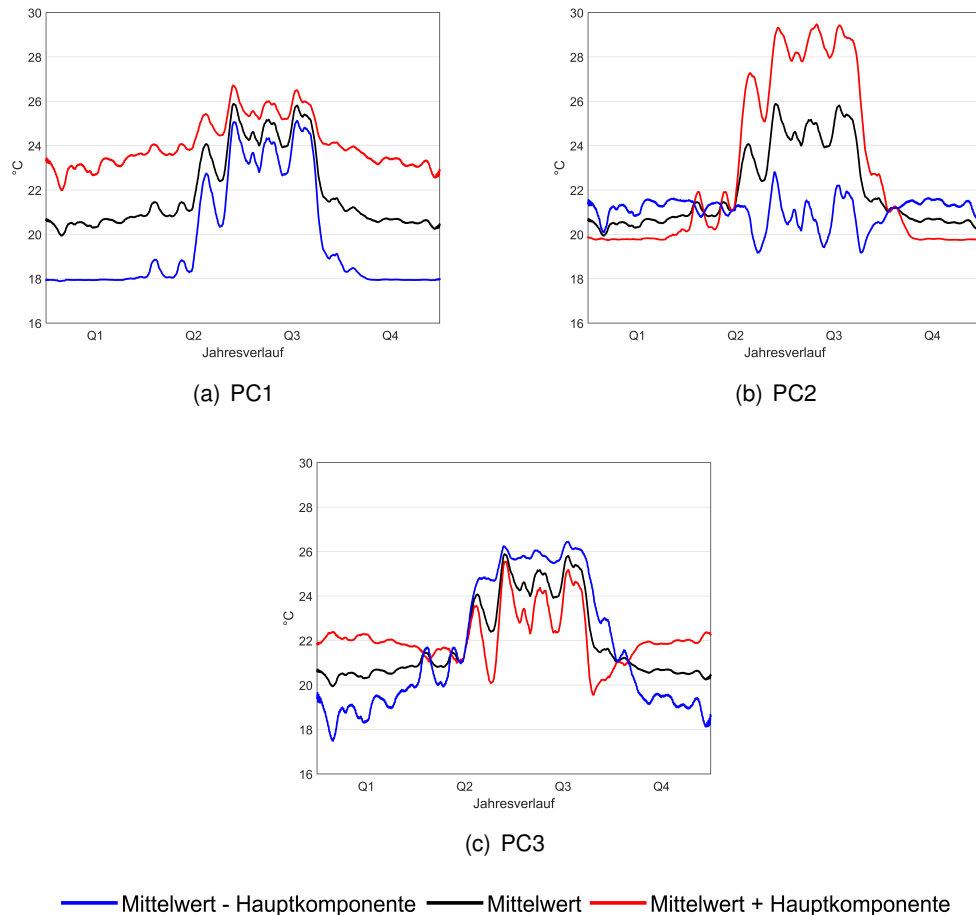
Abbildung 13.22.: Sensitivitäten  $\mu_f^*$  bzgl. Hauptkomponentengewichtungen der Hauptkomponentenzerlegung für die Zielgröße Endenergiebedarf im Szenario U.GAS

sehen, dass diese Hauptkomponente tagsüber unterhalb der Mittelwertkurve liegt, nachts darüber. In dieser Zeit repräsentiert sie also eine Dämpfung der Temperaturschwankung.

Die Hauptkomponente PC3 ist gemäß der Darstellung mit gleitendem Mittelwert in Abbildung 13.23(c) in der kalten Jahreszeit für eine höhere Innenraumtemperatur verantwortlich, in der warmen Jahreszeit für eine niedrigere. Bei der detaillierten Betrachtung für den beispielhaften Wintertag in Abbildung 13.24(e) ist ersichtlich, dass die Erhöhung der Temperatur vor allem in der Nachtabsenkungszeit geschieht, tagsüber ist nur eine geringe Abweichung von der Mittelwertkurve zu sehen. In der warmen Jahreszeit, beispielsweise in Abbildung 13.24(f), repräsentiert diese Hauptkomponente immer eine Abkühlung, die jedoch tagsüber wesentlich stärker ausfällt als nachts.

In Abbildung 13.25 sind die Werte des Sensitivitätsindex  $\mu_f^*$  für die Hauptkomponentengewichtungen der Parameter bzgl. der Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur dargestellt. Für die Hauptkomponente PC1 ist demzufolge die *Solltemperatur* der maßgeblich beeinflussende Parameter, gefolgt von *Luftwechsel*,  $Q_{el,HH}$ ,  $\lambda_{AW,TW}$ ,  $d_{AW,TW}$ ,  $U_{win}$ ,  $g_{win}$  und *KGF/BGF*. Für die Hauptkomponente PC2 sind die Parameter *Luftwechsel* gefolgt von *Solltemperatur*,  $Q_{el,HH}$ ,  $\lambda_{AW,TW}$ ,  $d_{AW,TW}$ ,  $U_{win}$  und  $g_{win}$  die maßgeblich beeinflussenden Faktoren. Für die Hauptkomponente PC3 sind *Solltemperatur*, *Luftwechsel*,  $d_{AW,TW}$ ,  $\lambda_{AW,TW}$ , *KGF/BGF*,  $U_{win}$ ,  $Q_{el,HH}$  und  $g_{win}$  beeinflussend.

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen



**Abbildung 13.23.:** Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC3 mit gleitendem Mittel über 167 Stunden für Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U\_GAS

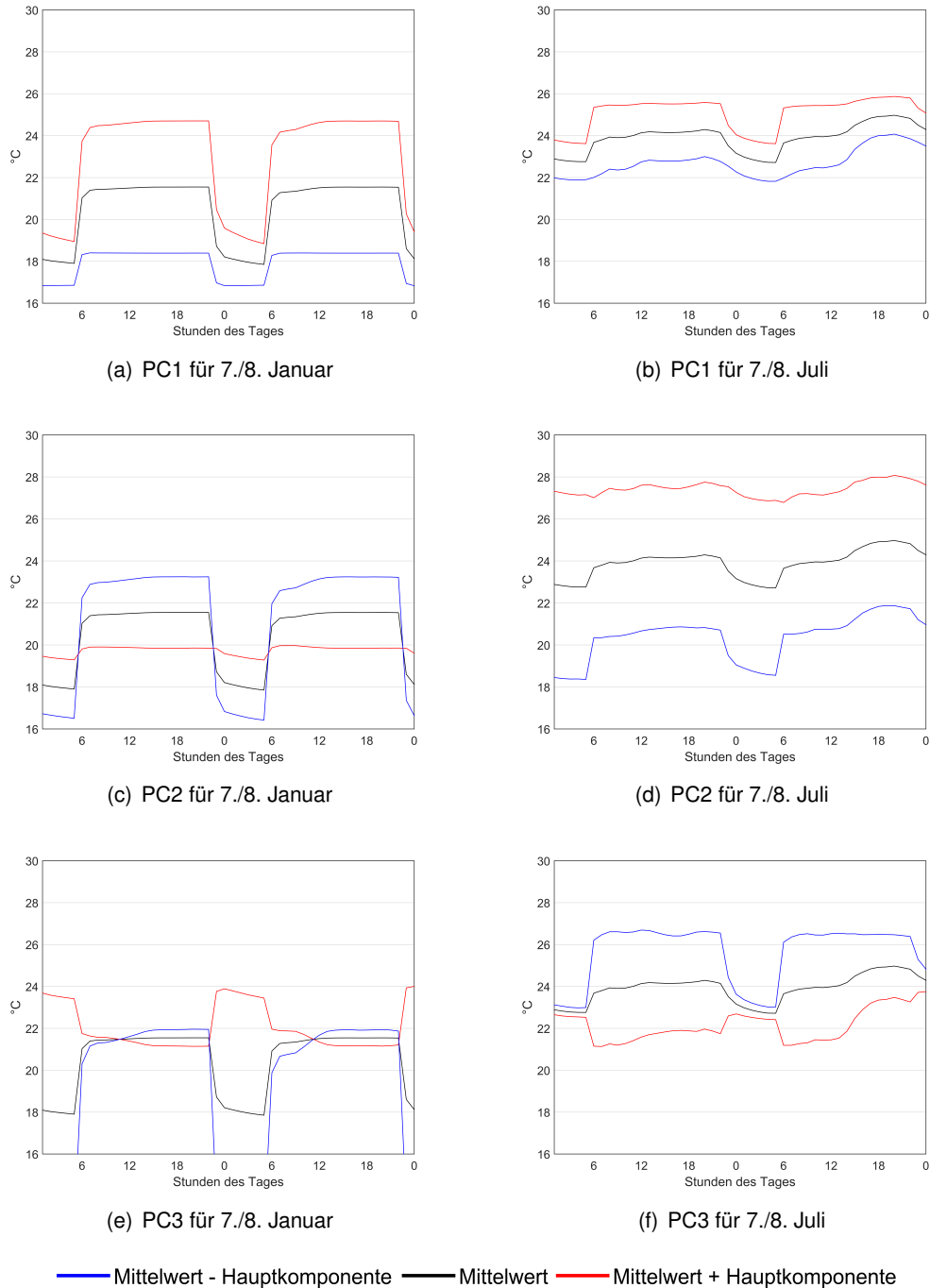
#### 13.2.2.3. Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse mittels Hauptkomponentenzerlegung

Wegen des Umfangs der Auswertung der mittels Hauptkomponentenzerlegung berechneten Sensitivitäten wird in diesem Abschnitt eine Zusammenfassung dieser Auswertung gegeben. Dabei werden für jedes Szenario und jede Zielgröße die ersten drei Hauptkomponenten erstellt und die Sensitivitäten der Parameter bzgl. deren Hauptkomponentengewichtung untersucht. Es wird hierbei also nicht auf die Interpretation der durch die Hauptkomponenten dargestellten Effekte eingegangen.

In den Szenarien S\_\* sind die Parameter  $\lambda_{AW\&DA,D}$  und  $d_{AW,D}$ , in den Szenarien U\_\* die Parameter  $\lambda_{AW\&DA,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  beeinflussend für die Zielgrößen Endenergiebedarf und durchschnittliche Innenraumtemperatur. In allen Szenarien haben *Solltemperatur* und *Luftwechsel* großen Einfluss auf diese beiden Zielgrößen,  $U_{win}$  und  $g_{win}$  haben einen geringen Einfluss. In den \*\_GAS\*-Szenarien ist für den Endenergiebedarf immer auch  $\eta_{Kessel}$  von Bedeutung, in den \*\_WP\*-Szenarien vor allem  $WP_{COP}$  und teilweise auch  $WP_P$ .

Für die bezogene elektrische Energie sind die Parameter  $Q_{el,HH}$ ,  $\eta_{Pumpen}$ , *Solltemperatur*

### 13.2. Sensitivitäten in den Szenarien



**Abbildung 13.24.: Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC3 für Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur an ausgewählten Tagen im Szenario U\_GAS**

und *Luftwechsel* bedeutsam, in den \*\_WP\*-Szenarien auch  $WP_{COP}$  und  $WPP$ . In den \*\_GAS\*-Szenarien sind vor allem  $Q_{el,HH}$  und  $\eta_{Pumpen}$  von Bedeutung. Bei den S\_WP\*-Szenarien ist *Luftwechsel* der einflussreichste Parameter bzgl. dieser Zielgröße.

Für die eingespeiste elektrische Energie ist vor allem der Parameter  $Q_{el,HH}$  bedeutsam.

Die Parameter der spezifischen Wärmespeicherfähigkeiten  $c_{p,AW,TW}$ ,  $c_{p,AW,D}$ ,  $c_{p,IW}$  sowie die Volumen des Trinkwarmwasserspeichers  $TWW_{Vol}$  und des Wärmepumpenspeichers

### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

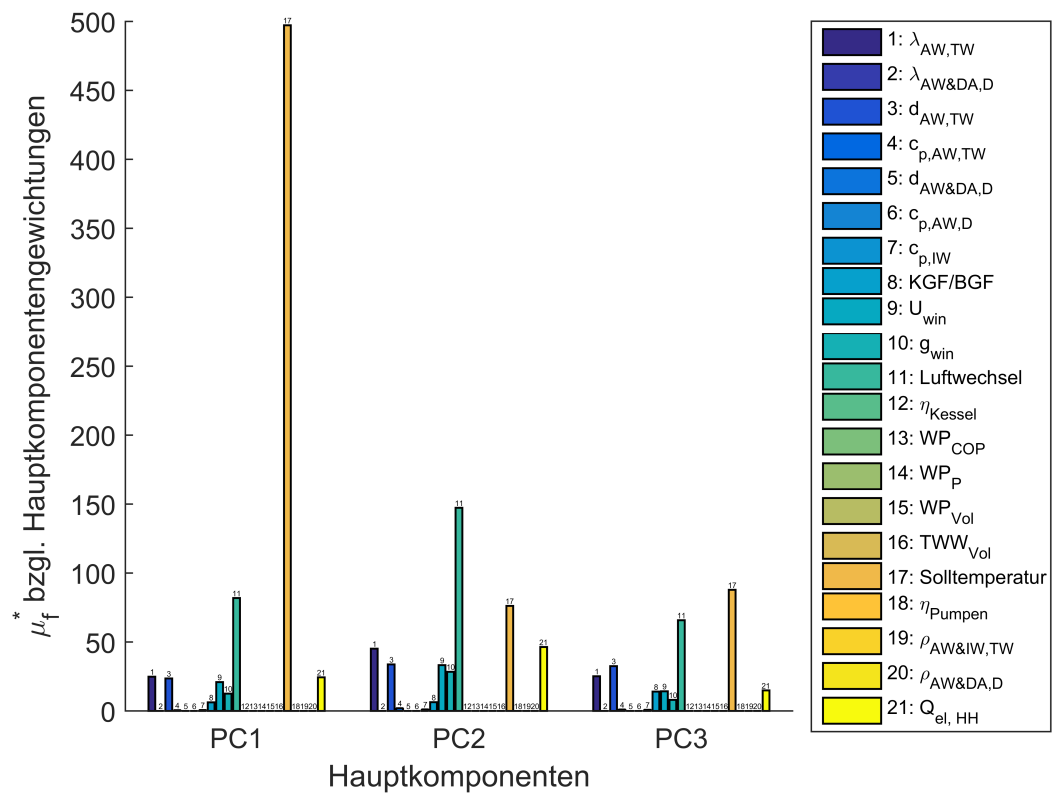


Abbildung 13.25.: Sensitivitäten  $\mu_f^*$  bzgl. Hauptkomponentengewichtungen der Hauptkomponentenzerlegung für die Zielgröße durchschnittliche Innenraumtemperatur im Szenario U.GAS

$WP_{Vol}$  spielen kaum eine Rolle, unabhängig vom Szenario und der Zielgröße.

### 13.3. Abgeleitete Empfehlungen

In diesem Abschnitt werden aus den Sensitivitätsanalyseergebnissen Empfehlungen sowohl für die Erfassung von Daten für die untersuchten Parameter als auch für die Verbesserung der Modellierung in EmMi-transient abgeleitet.

Die thermischen Eigenschaften  $\lambda_{AW,TW}$  und  $d_{AW,TW}$  des Tragwerksteils der Außenwand im ungedämmten Zustand bzw.  $\lambda_{AW\&DA,D}$  und  $d_{AW\&DA,D}$  der Dämmung von Außenwand und Dach im gedämmten Zustand sollten vor allem zur Bestimmung des Endenergiebedarfs und der durchschnittlichen Innenraumtemperatur genau bekannt sein. Aber auch bei der Zielgröße der bezogenen elektrischen Energie spielen sie, insbesondere bei Wärmepumpenheizung, eine Rolle. Durch die Gebäudetypologien wurde bereits eine gute Datengrundlage geschaffen, die allerdings vor allem die U-Werte beinhaltet und nicht die Schichtaufbauten, welche für die Abbildung der Konstruktionen notwendig sind. Hier wäre daher wünschenswert, wenn zukünftig Typgebäude mit entsprechend detaillierten Bauteilaufbauten erzeugt würden. Dies würde auch Angaben zur spezifischen Wärmespeicherfähigkeit beinhalten, die sich hier zwar als nicht besonders einflussreich herausgestellt hat, aber nichtsdestotrotz in den Gebäudesimulationen als Eingangsgröße verwendet wird.

Der U-Wert der Fenster ist ebenfalls in Gebäudetypologiedaten hinterlegt, seine Abweichung wirkt sich in allen Szenarien vor allem auf Endenergiebedarf und die durchschnittliche Innenraumtemperatur aus. Der g-Wert der Fenster beeinflusst hauptsächlich die durchschnittliche Innenraumtemperatur und ist ebenso in Gebäudetypologiedaten hinterlegt. Wenn allerdings auch Verschattungselemente betrachtet werden sollen, so könnte dies durch variable g-Werte, also einen dynamischen Parameter, abgebildet werden. Die dann auftretenden Einflüsse müssen zukünftig untersucht werden.

Bei den Parametern der Anlagentechnik hat sich gezeigt, dass bei Gasheizungen der Wirkungsgrad, bei Wärmepumpen der COP und die Leistung in fast allen Szenarien einflussreich bzgl. der Zielgrößen sind und daher genau erfasst werden sollten. Der Wirkungsgrad der Pumpen, sowohl der Heizkreispumpen als auch der Solarkreispumpen, ist vor allem hinsichtlich der bezogenen elektrischen Energie von Interesse. Bzgl. der anderen Zielgrößen spielt er eine untergeordnete Rolle. Die Volumen der Trinkwarmwasser- und Wärmepumpenpufferspeicher haben ebenfalls kaum Einfluss.

Die Parameter des Luftwechsels und der Solltemperatur sind in allen Szenarien bzgl. fast aller Zielgrößen von großer Relevanz. Gleichzeitig sind dies Werte, welche in unterschiedlichen Gebäuden stark variieren können. Eine Erfassung der Solltemperatur könnte in Wohngebäuden, die normalerweise keine Gebäudeleittechnik haben, nur durch Befragung der Bewohner, kommunikationsfähige Thermostatventile oder entsprechende Messtechnik erfolgen. Die Luftwechselrate ist messtechnisch nur mit sehr großem Aufwand zu erfassen. Hier könnten jedoch Angaben zur Luftdichtheit aus Energieausweisen sowie Informationen zum



### 13. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Fensterlüftungsverhalten der Bewohner, beispielsweise durch Fensterkontakte, benutzt werden. Dabei ist allerdings noch zu untersuchen, wie sich die Dynamik, beispielsweise der Fensterlüftung, auf die Zielgrößen auswirkt.

Für die Zielgröße der eingespeisten elektrischen Energie ist vor allem wichtig, den Haushaltsstrombedarf  $Q_{el,HH}$  korrekt zu ermitteln. Da diese Größe für Abrechnungszwecke seitens der Energieversorger benötigt wird und in jedem Haushalt Stromzähler vorhanden sind ist dies relativ einfach möglich, wenn Datenschutzvorbehalte außen vor bleiben. Durch die zukünftig geplante Nutzung von Smart Metern könnten sogar zeitlich höher aufgelöste Daten ermittelt und für die Modellierung verwendet werden. Dadurch wäre eine Nutzung des Standardlastprofils zumindest für die Validierung unnötig. Für zukünftige Prognosen kann es weiterhin eingesetzt werden, sofern keine Stromlastmodelle angekoppelt werden. Für die bezogene elektrische Energie ist diese Größe natürlich auch sehr einflussreich, für die anderen Zielgrößen ist der Haushaltsstrombedarf vor allem zur Ermittlung der internen Gewinne von Bedeutung, aber hat insgesamt dort eine untergeordnete Bedeutung.

Hinsichtlich der Modellierung in EmMi-transient lässt sich aus den Untersuchungen feststellen, dass vor allem die Wärmepumpen und Solarthermieanlagen modifiziert werden sollten. Die Wärmepumpen basieren auf der unrealistischen Annahme der Aufstellung im Keller und die Leistung ist für die Beheizung unter kalten Klimabedingungen nicht immer ausreichend. Hier könnte zukünftig eine vorgeschaltete automatische Heizlastberechnung hilfreich sein. Für die Solarthermieanlage ist zu untersuchen, wieso die Verluste des gesamten Heizungssystems ansteigen und damit zu höherem jährlichen Energiebedarf führen. Auch die Anbindung an den Trinkwarmwasserkreis über einen Wärmetauscher sollte überdacht und auf eine realistischere Modellierung umgestellt werden. Die Volumen der Warmwasserspeicher können aufgrund des hier festgestellten geringen Einflusses auf die Zielgrößen auf feste Werte gesetzt werden, ebenso die spezifischen Wärmespeicherfähigkeiten der Bauteilschichten.

**Teil VI.**

## **Fazit und Zusammenfassung**



Die in dieser Arbeit vorgestellte Sensitivitätsanalysemethodik ermöglicht es, den zeitlich veränderlichen Verlauf des Einflusses von Parametern auf dynamische Zielgrößen zu bewerten. Hierdurch kann untersucht werden, wie sich die Zielgrößen im saisonalen bzw. im tages- und stundenweisen Verlauf verhalten. Dies wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um Empfehlungen für die Datenerfassung von gebäuderelevanten Parametern für eine zukünftige Modellvalidierung zu erstellen. Darüber hinaus wird die Methodik eingesetzt, um Modellentwicklern zu ermöglichen, Vertrauen in ihre Modellierung zu erhalten bzw. Verbesserungsvorschläge für die Modellierung zu erarbeiten. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik wird also für die Ermittlung der wichtigsten Stellschrauben eines Modells unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens der Parameter und Zielgrößen eingesetzt und kann hierbei wertvolle Dienste leisten.

Im Kontext von Quartiersmodellen ist dies nach Wissen des Autors die erste Anwendung einer dynamischen Sensitivitätsanalysemethode zur Ermittlung der sich zeitlich verändernden Parametereinflüsse auf unterschiedlichste, in Quartieren relevante Zielgrößen. Durch die Anpassung und den Einsatz der Elementareffekt-Methode ist es im Gegensatz zu anderen Sensitivitätsanalysemethoden möglich, auch rechenzeitintensive Modelle mit vielen Parametern zu untersuchen. Dabei werden sowohl die direkten Einflüsse als auch Einflüsse durch Wechselwirkungen mit anderen Parametern und nicht-lineare Einflüsse in die Bewertung mit einbezogen.

Die Methodik wurde derart angepasst, dass die verschiedenen Aspekte existierender Stadt- und Quartiersmodelle berücksichtigt werden können. Daher ist der Einsatz der Methodik nicht auf das hier untersuchte Modell EmMi-transient beschränkt, sondern lässt sich, sofern die technischen Voraussetzungen gegeben sind, auf beliebige dynamisch rechnende Modelle anwenden. Dies können sowohl rein energetische Quartiersmodelle sein, als auch Modelle des Energiesystems oder ökonometrische Modelle. Auch Modelle von Einzelgebäuden können hinsichtlich ihrer Dynamik untersucht werden, beispielsweise wenn komplexe Regelungen der Anlagentechnik oder adaptive Fassadensysteme zum Einsatz kommen. In diesem Fall könnte die Methodik derart angepasst werden, dass nicht nur Parametereinflüsse ermittelt werden, sondern eine multi-objektive Optimierung bzgl. dynamischer Zielgrößen durchgeführt werden kann.

Die gesellschaftliche Relevanz der Methodik ist hinsichtlich der Möglichkeit zur Bewertung des Einsatzes von regenerativen und damit meist hochgradig dynamischen Energieerzeugungssystemen gegeben. Durch die Nutzung von entsprechenden Modellen und der Umsetzung der damit ermittelten Erkenntnisse lässt sich so die netzdienliche Integration von Energieerzeugungssystemen in Quartieren bewerkstelligen. Gleichzeitig kann dabei die zukünftige Entwicklung der Quartiere berücksichtigt werden und es können somit Fehlplanungen minimiert werden. Insbesondere für zukünftige „Smart Cities“ mit ihrer allumfassenden Vernetzung und der dadurch entstehenden Komplexität ist eine zielgerichtete, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Bewertungsmethodik unumgänglich.

Es muss dabei auch auf die Herausforderungen bei der Anwendung der Methodik eingegan-

gen werden. Zum einen sind für die Ermittlung der Parametereinflüsse die zugrundeliegenden Verteilungen der Parameterwerte von entscheidender Bedeutung. Diese Verteilungen sind daher gemäß wissenschaftlichen Grundsätzen und verlässlichen Datengrundlagen zu definieren. Zum anderen ist für die Auswertung der Sensitivitäten wichtig, die durch eine vorgenommene Glättung oder endliche funktionale Transformation entstehenden Fehler zu quantifizieren und bei der Bewertung der Einflüsse zu berücksichtigen.

In den folgenden beiden Kapiteln wird die Methodik hinsichtlich ihres wissenschaftlichen Mehrwerts und des Praxisbezugs bewertet sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Erweiterungen sowohl der Methodik als auch des untersuchten Modells EmMi-transient gegeben.

## 14. Bewertung und Übertragbarkeit der Methodik

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Sensitivitätsanalysemethode mittels Elementareffekten ist dazu geeignet, Modelle zu untersuchen, die das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden, Quartieren oder Städten abbilden. Insbesondere kann die Dynamik, die sowohl den Parametern als auch den Zielgrößen dieser Modelle innewohnt, durch die sequentielle Auswertung der Sensitivitäten sowie durch den Ansatz der funktional transformierten Zielgrößen, beispielsweise mittels Hauptkomponentenzerlegung, und den für die zugehörigen Koeffizienten berechneten Sensitivitätsindizes bewertet werden. Das Vorgehen hierfür wird transparent mit allen dafür notwendigen Schritten dargestellt.

Die Anwendung dieser Methodik mit den Zeitreihen Endenergiebedarf, durchschnittliche Innenraumtemperatur sowie bezogene und eingespeiste elektrische Energie als Zielgrößen und konstanten Parametern wird anhand des Modells EmMi-transient detailliert vorgestellt. Dabei können die klimabedingt jahreszeitlich schwankenden Einflüsse durch sequentielle Sensitivitätsanalyse genauer untersucht werden. Durch Nutzung von gleitenden Mittelwerten lässt sich hieraus ein Ranking für die einflussreichsten Parameter ermitteln. Allerdings werden dabei kurzzeitige Schwankungen in der Zielgröße vernachlässigt und daher ergeben sich teilweise große prozentuale Abweichungen zwischen Originaldaten und gemittelten Daten. Durch Nutzung der ungemittelten Zielgrößen lässt sich dies vermeiden, hierdurch wird allerdings die Auswertung wesentlich aufwändiger. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind nur für das untersuchte Quartier gültig, für andere Untersuchungsgebiete mit entsprechend anderen Daten zur Parametrisierung werden sie andere Erkenntnisse zutage fördern. Dieser sequentielle Sensitivitätsanalyseansatz lässt sich auf andere Modelle übertragen, sofern die entsprechenden technischen Voraussetzungen gegeben sind. Hierauf wird weiter unten eingegangen.

Die Einflüsse der konstanten Parameter auf tägliche Schwankungen der Zeitreihenzielgrößen Endenergiebedarf und durchschnittliche Innenraumtemperatur kann mittels der mit Hauptkomponenten transformierten Sensitivitäten analysiert werden. Hierbei ist die größte Schwierigkeit, die Effekte der einzelnen Hauptkomponenten zu ermitteln. Sobald diese bekannt sind ist die Auswertung der Sensitivitäten unproblematisch. Es werden mit dieser Methode auch kurze Schwankungen der Zielgrößen berücksichtigt, die bei der sequentiellen Auswertung mit gleitenden Mitteln vernachlässigt werden. Auch diese Methodik lässt sich auf andere Modelle übertragen und kann dort zur Ermittlung der Parametereinflüsse auf die unterschiedlichen, durch die Hauptkomponenten repräsentierten Effekte genutzt werden.

#### 14. Bewertung und Übertragbarkeit der Methodik

Der Vergleich der Sensitivitäten für unterschiedliche Zielgrößen kann genutzt werden, um abzuwägen, welche Parameter für alle oder nur für einzelne Zielgrößen relevant sind und mit welcher Priorität diese daher zu ermitteln sind.

Die Untersuchung dynamischer Parameter wurde bereits in der Vorveröffentlichung [159] demonstriert. Diese wird aufgrund des zusätzlichen Simulations- und Auswertungsaufwands nicht in die Dissertation übernommen. Hiermit lassen sich zukünftig insbesondere Parameter, die das Nutzerverhalten oder die Betriebsweisen der Heizungsanlage repräsentieren, untersuchen.

Da die mittels dieser Sensitivitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse nur für das untersuchte Modell des Fallbeispielquartiers gelten, lassen sich die hier erarbeiteten Ergebnisse auch nur zur Verbesserung dieses Modells nutzen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass andere Quartiere ähnlich, aber nicht gleich aufgebaut sind und sich die Modellverbesserungen daher auch dort bemerkbar machen. Eine noch bestehende Herausforderung, um real umsetzbare Maßnahmen bewerten zu können, ist, deren finanzielle Auswirkungen im Modell als Kostenzielgröße einzuführen. Hierzu müssen jedoch auch die zukünftigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen prognostiziert werden. Dies führt zu neuen Unsicherheiten bei der Bewertung.

Zusammengefasst werden für das untersuchte Modell EmMi-transient im Beispielquartier für die meisten Szenarien und Zielgrößen die Parameter *Infiltration* und *Solltemperatur* als einflussreich eingestuft. Bei ungedämmten Gebäuden sind die thermischen Eigenschaften des Tragwerkteils der Außenwände, bei gedämmten Gebäuden die thermischen Eigenschaften der Außenwanddämmung einflussreich. Bei durch Wärmepumpen beheizten Gebäuden sind der COP und die Leistung der Wärmepumpe sowie teilweise der Haushaltsstrombedarf bedeutsam. Diese verallgemeinerten Erkenntnisse stimmen großteils mit den Ergebnissen der bereits in der Literatur durchgeführten Sensitivitätsanalysen, die in Kapitel 7 dargestellt wurden, überein. Allerdings wurde dort die Dynamik der Einflüsse unberücksichtigt gelassen, diese kann mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik untersucht werden.

Für den aktuellen Stand des untersuchten Modells EmMi-transient kann festgehalten werden, dass vor allem Daten zum Luftwechsel, der Raumsolltemperatur und deren zeitlichen Veränderungen erfasst werden sollten, um die Modellierung zu verbessern. Als Vorbereitung für eine empirische Modellvalidierung mit gemessenen Verbrauchs- und Nutzerdaten können die Erkenntnisse ebenfalls genutzt werden, um die zu erfassenden Messdaten festzulegen und daraus Messkonzepte abzuleiten. Für eine Validierung von EmMi-transient unter Verwendung realer Messdaten soll zukünftig ein Quartier gefunden werden, in dem mittels eines Monitoringsystems diese entsprechenden Vergleichsdaten über einen Zeitraum von mehreren Jahren erfasst werden.

Als Anwender für die Methodik kommen alle Personen und Institutionen infrage, die Modelle zum energetischen Verhalten von Gebäuden, Quartieren oder Städten entwickeln oder einsetzen und daher Interesse daran haben, die Einflüsse von unsicheren Parametern auf die Zielgrößen zu ermitteln. Vor allem für die Bewertung der Auswirkung von Maßnahmen, die

die zukünftig vermehrt zum Einsatz kommenden erneuerbaren Energieträger betreffen, etwa im Falle von Lastverschiebungsmaßnahmen durch DSM, ist eine Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge in den Simulationen notwendig. Aber auch bei der Bewertung der durch den Klimawandel induzierten Effekte kann die Methodik hilfreich sein, um beispielsweise Abwägungen zwischen Überhitzungsproblematik und Lastspitzen des elektrischen Energiebedarfs durch Kühlgeräte anzustellen.

Für die Übertragung der vorgestellten Sensitivitätsanalysemethoden auf andere Modelle ist als technische Voraussetzung vor allem der Aspekt der Modellerzeugung wichtig. Es muss eine automatische Erzeugung der Simulationsmodelle bzw. eine Veränderung vorhandener Modelle gemäß dem für die Elementareffekt-Methode durchgeführten Parametersampling möglich sein, da eine manuelle Erzeugung der Modelle zu aufwändig und fehlerträchtig ist. Weiterhin müssen die Ergebnisdaten in einem maschinenlesbaren Format vorliegen, d.h. im einfachsten Fall als Textdateien. Eine rein grafische Auswertung ist nicht geeignet. Zum anderen ist es vorteilhaft, wenn der Aufruf der Simulationen automatisiert erfolgt und eine Fehlerbehandlung beinhaltet, um bei Abbruch einer Simulation diese erneut zu starten oder als fehlerhaft zu kennzeichnen.





# 15. Ausblick

In diesem Kapitel wird ein Ausblick auf mögliche Modifikationen des Modells EmMi-transient gegeben sowie auf zukünftige, das Thema dieser Dissertation ergänzende und darauf aufbauende Fragen, Anwendungen und Erweiterungen der Sensitivitätsanalysemethodik.

## 15.1. Erweiterungen EmMi-transient

Die Einschränkung der Anwendung von EmMi-transient auf den in dieser Arbeit untersuchten Block ist vor allem der Rechenzeit geschuldet. Durch Einsatz von Cloud Computing Diensten ist es aber denkbar, auch größere Gebiete zu simulieren. Dies wurde mittels der LRZ Compute Cloud [171] bereits bei den Simulationen in dieser Arbeit erprobt. Gleichzeitig kann auch eine thematische Ausweitung erfolgen. So ist zum einen eine Erweiterung des Modells um Ergebnisse zur grauen Energie und den Kosten geplant. Andererseits ist über die FMI Schnittstelle die Möglichkeit gegeben, andere Modelle an EmMi-transient zu koppeln und daher auf die dort bereits implementierte Expertise zurückgreifen zu können. Die Herausforderung hierbei ist die Synchronisierung der Modelle bezüglich der auszutauschenden Variablen und der Zeitschritte. Vor allem interessant wären Verbindungen zu Modellen, die die Infrastruktur und Mobilität abbilden. Für eine Anbindung an das Energiesystemmodell URBS wurden in [191] bereits Versuche unternommen. Hierbei war jedoch keine interaktive Kopplung der Modelle möglich, sondern es wurden Ergebnisdaten ausgetauscht.

Eine Erweiterung auf größere Gebiete sollte zugleich mit einer Ausweitung auf Nichtwohngebäude einhergehen, da reine Wohnsiedlungen selten vorkommen. Dies bedeutet, dass entsprechende Daten zur Parametrisierung der Nichtwohngebäude, vergleichbar den Gebäudetypologiedaten in [125], vorhanden sein müssten. Dies ist derzeit nicht der Fall. Zusätzlich wäre noch die Herausforderung zu meistern, die Gebäude aus den GIS-Daten bezüglich ihrer Nutzungsart zu klassifizieren, da in den GIS-Daten keine entsprechenden Angaben vorhanden sind. Weiterhin müsste die Zonierung der Gebäude detaillierter ausfallen, da sich die Nutzungsrandbedingungen in Nichtwohngebäuden wesentlich stärker als im Wohnbereich unterscheiden können [214].

Um die Nutzer der Gebäude als Individuen mit jeweils eigenen Tätigkeiten zu integrieren, können agentenbasierte Modelle zum Einsatz kommen, um ein hybrides Gesamtmodell zu erstellen. Dies würde es beispielsweise ermöglichen, Anwesenheit in den unterschiedlichen Gebäuden oder die Nutzung von Geräten detaillierter abzubilden.

## 15. Ausblick

Durch die Kopplung der Einzelgebäudesimulationen per FMI, wie es bereits in EmMi-transient implementiert ist, entstehen vielfältige Optionen zur Untersuchung dezentraler Energieversorgungssysteme und Lastverschiebemaßnahmen. So wurde testweise bereits ein BHKW mit saisonalem thermischen Speicher und Solarthermieunterstützung abgebildet, wobei das Modell hierfür stark vereinfacht war und zukünftig realistischer gestaltet werden muss. Hierbei könnten zusätzlich auch Abwärmenutzungspotentiale untersucht werden.

Die Untersuchung zu DSM Maßnahmen innerhalb der Gebäude, wie in [157] umgesetzt, ist ebenfalls eine vereinfachte Abbildung von Interaktionen zwischen Energieverbrauchern, in diesem Fall Wärmepumpen, und Stromerzeugungssystemen, hier PV-Anlagen. Durch eine genauere Modellierung des lokalen Stromnetzes, die Einbindung der Haushaltsgeräte über interaktive Modelle wie in [128] oder Integration von Modellen zur Stromspeicherung in stationären Akkus oder Elektrofahrzeugen ergeben sich weitere zu untersuchende Szenarien.

Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen könnte mittels einer Berechnung gemäß VDI 2067 erfolgen. Allerdings beeinflussen die ökonomischen Annahmen, die für Wirtschaftlichkeitsberechnungen wie die Methode des abgezinnten Zahlungsstrom oder Lebenszykluskostenmethoden zu treffen sind, maßgeblich deren Ergebnisse [50]. Daher muss hier genau abgewogen werden, welche Methoden zum Einsatz kommen. Zur Untersuchung der Auswirkungen der ökonomischen Parameter können die in dieser Arbeit vorgestellten Sensitivitätsanalysemethoden verwendet werden.

Als nächste kleinere Schritte, die sich aus der Verwendung des Modells in dieser Arbeit ergeben haben, ist geplant, die Implementierung der Solarthermieanlagen sowie der Luft-Wasser-Wärmepumpen zu verbessern, da es hier zu unrealistischen Effekten kommt bzw. unrealistische Annahmen an die Systemkonfiguration getroffen werden müssen. Weiterhin soll die Verwendung von LoD2 Daten ermöglicht werden, um die Geometrie vor allem der Dächer genauer abzubilden. Bzgl. der Modellierung der Gebäudehülle ist eine Berücksichtigung von Wärmebrücken über pauschale U-Wert-Zuschläge geplant sowie eine Untersuchung zur Abbildung inhomogener Bauteile wie sie für Dachaufbauten oder Holzständerbauweisen benötigt werden.

Auch modifizierte Sanierungsszenarien, in denen z.B. nur Teile der Gebäude saniert werden oder die Dämmschichten schrittweise aufgebracht werden, sollen definiert und mit dem Modell simuliert werden. Dies kann auch die Implementierung von Lüftungsanlagen beinhalten, da diese im Wohnungsneubau durchaus zum Einsatz kommen.

### 15.2. Erweiterung der Sensitivitätsanalysemethodik

Im Laufe dieser Arbeit haben sich einige weiterführende Fragestellungen bzgl. der Sensitivitätsanalysemethodik ergeben, die zukünftig weiterverfolgt und untersucht werden sollen.

So ist geplant, die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zu nutzen, um das untersuchte Modell zu vereinfachen und die Anzahl der zu analysierenden Parameter zu reduzieren, sofern das bei einer weiterhin angedachten Verwendung von EnergyPlus möglich ist. Anschließend kann die dynamische Sensitivitätsanalyse mittels einer varianzbasierten Methode erneut durchgeführt werden, um quantitative Sensitivitätsindizes zu erhalten. Sowohl die sequentielle als auch die auf funktionaler Transformation basierende Sensitivitätsanalysemethode sind hierfür verwendbar.

Als vorbereitender Schritt hierfür können auch die Elementareffekte zweiter und höherer Ordnung berechnet werden, um Wechselwirkungen zwischen Parametern qualitativ zu bewerten. Dies erfolgte im Rahmen dieser Arbeit bisher nicht.

Die Bewertung des Einflusses dynamischer Parameter kann zukünftig mit der vorgestellten Methodik erfolgen, um eine Entscheidungsgrundlage für die Erfassung relevanter Daten zu haben. Hierbei können vor allem bei dynamischen Parametern, die das Nutzerverhalten repräsentieren, auch Wechselwirkungen auftreten, die ggf. durch varianzbasierte Sensitivitätsanalysemethoden genauer einzuschätzen sind. Zusätzlich kann untersucht werden, inwiefern sich für die dynamischen Parameter ein Sensitivitätsindex analog der Größe  $iS$  aus der iPSA-Methodik definieren lässt, der sowohl kurz- als auch langfristige Auswirkungen von Ereignissen quantifiziert.

Die in der exemplarisch durchgeführten Sensitivitätsanalyse definierten Parameter können zukünftig nicht nur für den gesamten Gebäudebestand gleichzeitig variiert werden, sondern auf unterschiedlichen Ebenen wie in [121]. Dies kann ggf. die systematischen und zufälligen Abweichungen besser beschreiben als das hier verwendete gleichzeitige Parametersampling für alle Gebäude. Allerdings ist dann zu beachten, dass der Einfluss von Parametern, die nur einzelne Gebäude betreffen, auf die für den gesamten Gebäudebestand definierte Zielgröße voraussichtlich relativ klein ausfällt. Um dies zu kompensieren, kann die Idee der Makroparameter aus [42] aufgenommen werden, bei der mehrere Parameter für die Auswertung zu einem Makroparameter zusammengefasst werden. Die Gruppierung der Elementareffekt-Methode könnte hierfür angepasst und verwendet werden. Für varianzbasierte Methoden müsste eine vergleichbare Möglichkeit geschaffen werden.

Die sequentielle Auswertung der Sensitivitäten kann zukünftig mit gewichteten gleitenden Mittelwerten erfolgen, hierdurch können beispielsweise jahrzeitliche Einflüsse stärker oder schwächer berücksichtigt werden. Die Möglichkeiten, die sich hierdurch ergeben, sind nach Wissen des Autors noch nicht Gegenstand der Forschung. Ähnlich können auch Gewichtungen bei der Hauptkomponentenzerlegung wie in [172] verwendet werden, auch hier ist nicht bekannt, dass dies im Kontext von Gebäudesimulationen untersucht wurde.

Für die Auswertung der Sensitivitäten mittels funktionaler Transformation können weitere Funktionsbasen hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz bei der Bewertung von Gebäudesimulationen untersucht werden. Die Fourier-Basis wurde bereits in [158] eingesetzt und ist vor allem dann von Interesse, wenn Regelmäßigkeiten beispielsweise durch Ereignisse untersucht werden sollen. Bei der Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung kann

## 15. Ausblick

untersucht werden, wie sich eine Hauptkomponentenzerlegung, die auf Daten aus verschiedenen Szenarien aufbaut, einsetzen lässt. Dies könnte die Auswertung vereinfachen, da die Hauptkomponenten für alle Szenarien dann nur einmal hinsichtlich ihres repräsentierten Effekts analysiert werden müssen.

Die Sanierungsszenarien können auch, abweichend vom Vorgehen in dieser Arbeit, als diskrete Parameter Gegenstand der Sensitivitätsanalyse sein. Da die Einflüsse einiger der bisher betrachteten Parameter maßgeblich vom Sanierungsszenario abhängen, müssen dann vor allem auch die Wechselwirkungseinflüsse mittels des Sensitivitätsindex  $\sigma$  oder den Elementareffekten höherer Ordnung bewertet werden.

Weitere Parameter, die die Gebäude maßgeblich beeinflussen und in hohem Maße dynamisch sind, sind die verwendeten Klimadaten. Sowohl die saisonalen als auch die täglichen Schwankungen der Außenlufttemperatur und Einstrahlung haben großen Einfluss auf die Wärmeströme im Gebäude. Vor allem vor dem Hintergrund des Klimawandels sind dessen Auswirkungen ein relevantes Forschungsgebiet, welche auch die möglichen Sanierungsoptionen von Gebäuden und den darin herrschenden thermischen Komfort betreffen. Mittels sequentieller Sensitivitätsanalyse lassen sich die Einflüsse in Abhängigkeit der Klimadaten darstellen, um qualitative Zusammenhänge zu ermitteln. In zukünftigen Untersuchungen kann auch die Sensitivitätsanalysemethode, mit ggf. notwendigen Anpassungen, zur Untersuchung des Einflusses der Klimadaten herangezogen werden. Hierbei kann an Arbeiten wie [176] des Zentrums Stadtnatur und Klimaanpassung der TUM angeknüpft werden, um gegenüber dem Klimawandel robuste Sanierungsvarianten für Gebäude zu ermitteln.

Da die realen Klimadaten nicht direkt beeinflusst werden können wäre dies eher als eine Art der Unsicherheitsbewertung zu betrachten. Eine Unsicherheitsbewertung von Stadtmodellen ist für eine Vielzahl von Parametern, die auch zukünftig nicht exakt, sondern nur mit Unsicherheiten behaftet erfasst werden können, eine gute Möglichkeit, um die Unsicherheiten in den Zielgrößen für szenarische Betrachtungen bewusst zu machen.

Abschließend werden weitere Parameter von EmMi-transient mit ihren Besonderheiten dargestellt, die derzeit nicht in die Sensitivitätsanalyse aufgenommen wurden jedoch zukünftig hierdurch bewertet werden können.

Die Gebäudegeometrie kann hinsichtlich der im Vorfeld erfolgten Vereinfachung der Gebäudeumrisse untersucht werden. Auch die Fensterflächenanteile können variiert werden, hierbei wäre aber eine Umstellung innerhalb von EmMi-transient notwendig, da die Geometrieerzeugung derzeit vor der Variation der Parameter erfolgt. Durch Verwendung von LoD3 GIS Daten können die Positionen der Fenster, der exakte Dachaufbau sowie die gegenseitige Verschattung von Gebäuden untersucht werden. Insbesondere wäre hier auch interessant, wie sich der verwendete Algorithmus für die Erzeugung von Dachformen im Vergleich zu detaillierten Dachgeometrien in solchen LoD3 Daten verhält. Parameter zum Vorhandensein und der Tiefe und Beheizungsart eines Kellers können, sofern verfügbar, ebenfalls untersucht werden.

Bezüglich der opaken Bauteile existieren noch Parameter zur thermischen, solaren und sichtbaren Absorptionsrate sowie zur Rauigkeit der Oberflächen, die Gegenstand zukünftiger Sensitivitätsanalysen sein können. Auch wäre für opake Bauteile denkbar, verschiedene Bauteilkonstruktionsarten als diskreten Parameter einzuführen, um den Einfluss der Gebäudetypologie auf die Modellergebnisse zu untersuchen.

Die Anlagentechnik betreffend können Parameter, die für die Auslegung der Systeme verwendet werden, also insbesondere die Temperaturen der verschiedenen Wasserkreise der Heizung und die Außenlufttemperatur sowie die Frischwassertemperatur und die Temperaturen und die Menge des abgezapften Wassers, variiert werden. Die Lufttemperatur im Keller, welche als Wärmequelle für die Luft-Wasser-Wärmepumpe verwendet wird, wäre zukünftig zu untersuchen. Auch eine Untersuchung hinsichtlich Abschaltzeiten der Heizung im Sommer bzw. eine Nachtabschaltung zu bestimmten Zeiten wäre von Interesse.

Für das Verteil- und Übergabesystem können zukünftig die Parameter der Heizkörper, die Länge, Durchmesser und Dämmung der Rohrleitungen sowie weitere Parameter der Pumpen, insbesondere der Pumpe für die Trinkwasserzirkulation, welche derzeit noch nicht untersucht werden, variiert werden.

Die durch das Nutzerverhalten beeinflussten Parameter, angefangen bei Anwesenheit von Personen und deren Wärmelast und resultierende Benutzung elektrischer Geräte, Verwendung von Trinkwarmwasser oder Veränderung des Luftwechsels durch Fensteröffnung können zukünftig wesentlich genauer hinsichtlich ihres Einflusses auf die relevanten Zielgrößen untersucht werden als es im Rahmen dieser Arbeit möglich ist.

Ebenfalls können die aus quartiersweiten Maßnahmen wie einem Nahwärmenetz oder elektrischer Lastverschiebung resultierenden Ereignisse durch die dynamischen Sensitivitätsanalysemethoden untersucht werden, um auch hier die Einflüsse besser zu verstehen.



# Literaturverzeichnis

- [1] ALBERS, Karl-Josef; RECKNAGEL, Hermann; SPRENGER, Eberhard: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte*. 77. Aufl., 2015/2016, grundlegend überarb. München: DIV Dt. Industrie-verl, 2015 (Recknagel Edition). ISBN 9783835671362
- [2] AMT FÜR STADTFORSCHUNG UND STATISTIK FÜR NÜRNBERG UND FÜRTH: *Gebäude und Wohnen - Stadtforschung und Statistik für Nürnberg und Fürth*. 2016.  
URL: [https://www.nuernberg.de/internet/statistik/wohnen\\_nbg.html](https://www.nuernberg.de/internet/statistik/wohnen_nbg.html) – Zu-griffsdatum: 01.06.2016
- [3] ANDERSON, B. R.: *BREDEM-12: Model description, 2001 update*. Watford: CRC, 2002. ISBN 1860815367
- [4] ANDERSON, B. R.: *BR. Bd. 439: BREDEM-8: Model description, 2001 update*. Watford: BRE, 2002. ISBN 1860815375
- [5] ANDERSON, John: *Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment*. München, Technische Universität München, Disser-tation, 2014.  
URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1221435/1221435.pdf> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [6] ANSTETT-COLLIN, F.; GOFFART, J.; MARA, T.; DENIS-VIDAL, L.: Sensitivity analysis of complex models: Coping with dynamic and static inputs. In: *Reliability Engineering & System Safety* 134 (2015), S. 268–275
- [7] AYDINALP-KOKSAL, Merih; UGURSAL, V. I.: Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consump-tion in the residential sector. In: *Applied Energy* 85 (2008), Nr. 4, S. 271–296
- [8] BAUER, Martin: Renewable Energy and Thermal Comfort in Buildings as Smart Grid Components. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environ-ment Conference 2016*, 2016, S. 982–991. ISBN 978-3-00-052213-0
- [9] BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG: *3D-Gebäudemodell LoD1*. 2016.  
URL: <http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html> – Zugriffsda-tum: 22.02.2016



## LITERATURVERZEICHNIS

- [10] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK: *Bautätigkeit und Wohnungsbestand*. 2013.  
URL: <https://www.statistik.bayern.de/statistik/bautaetigkeit/00052.php> – Zugriffsdatum: 31.05.2016
- [11] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK: *Zensus 2011: Gemeindedaten Gebäude und Wohnungen: Kennziffer F/GWZ 1.1*. 2014
- [12] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK: *Baufertigstellungen in Bayern im Jahr 2015: Kennziffer F II 2 j 2015*. 2016
- [13] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK: *Erhebungsunterlagen zur Bautätigkeitsstatistik*. 2016.  
URL: <https://www.statistik.bayern.de/erhebungen/00587.php> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [14] BDEW: *Standardlastprofile Strom*. 2016.  
URL: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_Standartlastprofile](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Standartlastprofile) – Zugriffsdatum: 29.06.2016
- [15] BIGALKE, Uwe; ZHANG, Yang; KUNDE, Jan; SCHMITT, Martina; ZENG, Yang; DISCHER, Henning; BENSMANN, Katharina; STOLTE, Christian ; DEUTSCHE ENERGIEAGENTUR GMBH (Hrsg.): *dena-Gebäudereport 2015*. 2015
- [16] BILJECKI, Filip; LEDOUX, Hugo; STOTER, Jantien: An improved LOD specification for 3D building models. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 59 (2016), S. 25–37
- [17] BLES, Markus: *Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs*. 2002
- [18] BÖHNISCH, Helmut; ERBAS, Kemal; NAST, Michael; SCHREITMÜLLER, Konrad: Nahwärme im Gebäudebestand - Anlagenaspekte und Umsetzung. In: *FVS Themen* (2001), S. 82–91.  
URL: <http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:238881:1/component/escidoc:238880/13272.pdf>
- [19] BOLAY, Sebastian; MEYER, Markus ; DIHK, B. S. (Hrsg.): *Faktenpapier Eigenerzeugung und Stromdirektlieferung: Chancen — Risiken — Rechtsrahmen*. 2015.  
URL: <http://www.dihk.de/ressourcen/downloads/eigenerzeugung-strom/> – Zugriffsdatum: 15.03.2015
- [20] BORN, Rolf; DIEFENBACH, Nikolaus; LOGA, Tobias ; IWU (Hrsg.): *Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie*. 2003
- [21] BOTZLER, Sebastian; KELLERMANN, Laura: KNOWLEDGE BASED BEHAVIOUR MODELLING: DEPENDENCIES AND ENERGY CONSUMPTION IMPACT OF SPECIFIC

- OCCUPANT BEHAVIOUR PARAMETERS. In: LOPES, Marta A. R. (Hrsg.); ANTUNES, C. H. (Hrsg.); MARTINS, A. G. (Hrsg.); SILVA, L. (Hrsg.): *4th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency*, 2016. ISBN 978-989-95055-9-9
- [22] BOUYER, Julien; INARD, Christian; MUSY, Marjorie: Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 7, S. 1549–1559
- [23] BREUER, H. ; SIEMENS (Hrsg.): *Städte digital managen*. 2014.  
URL: <http://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/infrastruktur-und-finanzierung/lebensqualitaet-in-staedten-virtuell-managen.html> – Zugriffsdatum: 05.02.2015
- [24] BROWNSWORD, R.A; FLEMING, P.D; POWELL, J.C; PEARSALL, N.: Sustainable cities – modelling urban energy supply and demand. In: *Applied Energy* 82 (2005), Nr. 2, S. 167–180
- [25] BRÜGGEMANN, Thilo; BOTH, Petra v.: Mehrdimensionales und multiskaliges Informationsmodell für den Anwendungskontext energieeffiziente Stadtentwicklung. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings to BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 84–91
- [26] BRUHNS, Harry: Identifying Determinants of Energy Use in the UK nondomestic Stock. In: BERTOLDI, Paolo (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings: IEECB focus 2008* Bd. 24401, Office for Official Publications of the European Communities, 2010, S. 389–400. ISBN 978-92-79-16017-2
- [27] BRUSE, Michael; BRUSE, Daniela ; ENVI-MET GMBH (Hrsg.): *ENVI-met 4. A holistic microclimate model*. 2016.  
URL: <http://www.envi-met.info> – Zugriffsdatum: 01.07.2016
- [28] BUHL, W. F.; CURTIS, R. B.; KERRISK, J. F.; LOKMANHEKIM, M.; HIRSCH, J. J.; GATES, S. D.; CHOI, S. C.; SCHNURR, N. M.; WINKELMANN, Frederick C. ; YORK, D. A. (Hrsg.); CAPPIELLO, C. C. (Hrsg.): *DOE-2 Engineers Manual (Version 2.1A)*. 1982
- [29] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich: EEWärmeG*. 2011.  
URL: [http://www.enev-online.de/eewaermeg/2011/11.03.04\\_eewaermeg\\_2011\\_bmu\\_konsolidierte\\_fassung\\_stand\\_11.02.24.pdf](http://www.enev-online.de/eewaermeg/2011/11.03.04_eewaermeg_2011_bmu_konsolidierte_fassung_stand_11.02.24.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [30] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Energieeinsparverordnung: EnEV*. 2009.  
URL: [http://www.enev-online.org/enev\\_2009\\_volltext/](http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/) – Zugriffsdatum: 12.12.2016

## LITERATURVERZEICHNIS

- [31] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Energieeinsparverordnung: EnEV*. 2014.  
URL: [http://www.enev-online.com/enev\\_2014\\_volltext/](http://www.enev-online.com/enev_2014_volltext/) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [32] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG: *Perspektiven der Urbanisierung - Städte nachhaltig gestalten*. 2014
- [33] BUNDESNETZAGENTUR: *PV-Datenmeldungen und EEG-Vergütungssätze*. 2016.  
URL: [http://www.bundesnetzagentur.de/cln\\_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn\\_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn\\_EEG-VergSaetze\\_node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1931/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze_node.html) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [34] BUNDESREGIERUNG: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. 2010.  
URL: [https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/\\_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5)  
– Zugriffsdatum: 06.09.2016
- [35] BUNDESREGIERUNG: *Bilanz zur Energiewende 2015*. 2015
- [36] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. 2014.  
URL: [https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2014\\_11\\_BSW\\_Solar\\_Faktenblatt\\_Solarwaerme.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2014_11_BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [37] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. 2016.  
URL: [https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2016\\_3\\_BSW\\_Solar\\_Faktenblatt\\_Solarwaerme.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2016_3_BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [38] BURHENNE, Sebastian; HERKEL, Sebastian: Methodik zur Unsicherheitsbewertung und Sensitivitätsanalyse für thermische Gebäudesimulationen. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings to BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 439–444
- [39] BURHENNE, Sebastian; JACOB, Dirk; HENZE, Gregor P.: Sampling based on Sobol' sequences for Monte Carlo techniques applied to building simulation. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2011*, 2011, S. 1816–1823
- [40] BURHENNE, Sebastian; TSVETKOVA, Olga; JACOB, Dirk; HENZE, Gregor P.; WAGNER, Andreas: Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses. In: *Building and Environment* 62 (2013), S. 143–154
- [41] BUSCH, Martin: *Zur Effizienten Kopplung von Simulationsprogrammen*. Kassel: Kassel University Press, 2012. ISBN 978-3-86219-296-0

- [42] CALLEJA RODRÍGUEZ, Gloria; CARRILLO ANDRÉS, Antonio; DOMÍNGUEZ MUÑOZ, Fernando; CEJUDO LÓPEZ, JOSÉ MANUEL; ZHANG, Yi: Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. In: *Energy and Buildings* 67 (2013), S. 79–87
- [43] CAMPBELL, Katherine; MCKAY, Michael D.; WILLIAMS, Brian J.: Sensitivity analysis when model outputs are functions. In: *Reliability Engineering & System Safety* 91 (2006), Nr. 10-11, S. 1468–1472
- [44] CAMPOLONGO, F.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A.: Tackling quantitatively large dimensionality problems. In: *Computer Physics Communications* 117 (1999), Nr. 1-2, S. 75–85
- [45] CAMPOLONGO, Francesca; BRADDOCK, Roger: The use of graph theory in the sensitivity analysis of the model output: a second order screening method. In: *Reliability Engineering & System Safety* 64 (1999), Nr. 1, S. 1–12
- [46] CAMPOLONGO, Francesca; CARIBONI, Jessica; SALTELLI, Andrea: An effective screening design for sensitivity analysis of large models. In: *Environmental Modelling & Software* 22 (2007), Nr. 10, S. 1509–1518
- [47] CAMPOLONGO, Francesca; SALTELLI, Andrea: Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods. In: *Reliability Engineering & System Safety* 57 (1997), Nr. 1, S. 49–69
- [48] CASTIES, Manfred: *Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Nutzerverhalten und Heizenergieverbrauch,-bedarf von Wohngebäuden*. VWF, Verlag für Wissenschaft und Forschung, 1997
- [49] CHENG, Vicky; STEEMERS, Koen: Modelling domestic energy consumption at district scale: A tool to support national and local energy policies. In: *Environmental Modelling & Software* 26 (2011), Nr. 10, S. 1186–1198
- [50] COPIELLO, Sergio: Buildings energy retrofit: dealing with uncertainty. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 174–183. ISBN 978-3-00-052213-0
- [51] CORRADINI, Roger: *Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2013.  
URL: [https://www.ffe.de/download/article/464/Dissertation\\_Roger\\_Corradini.pdf](https://www.ffe.de/download/article/464/Dissertation_Roger_Corradini.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [52] CORRADO, V.: About simplification assumptions for the evaluation of building thermal performance. In: CARMELIET, Jan (Hrsg.); HENS, HUGO S. L. C (Hrsg.); VERMEIR, Gerrit (Hrsg.): *Research in building physics*, A.A. Balkema, 2003, S. 657–674. ISBN 978-90-5809-565-7
- [53] CORTES, Corinna; VAPNIK, Vladimir: Support-vector networks. In: *Machine Learning* 20 (1995), Nr. 3, S. 273–297

## LITERATURVERZEICHNIS

- [54] CRAWLEY, Drury B.; HAND, Jon W.; KUMMERT, Michaël; GRIFFITH, Brent T.: Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. In: *Building and Environment* 43 (2008), Nr. 4, S. 661–673
- [55] CRAWLEY, Drury B.; LAWRIE, Linda K.; WINKELMANN, Frederick C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. Joe; PEDERSEN, Curtis O.; STRAND, Richard K.; LIESEN, Richard J.; FISHER, Daniel E.; WITTE, Michael J.; GLAZER, Jason: EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. In: *Energy and Buildings* 33 (2001), Nr. 4, S. 319–331
- [56] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Testreferenzjahre*. 2016.  
URL: [http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez\\_themen/try/try\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez_themen/try/try_node.html) – Zugriffsdatum: 02.05.2016
- [57] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Testreferenzjahre*. 2016.  
URL: <http://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> – Zugriffsdatum: 02.05.2016
- [58] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *EnEV-Registrierstelle*. 2016.  
URL: <https://www.dibt.de/de/Geschaeftsfelder/GF-EnEV-Registrierstelle.html> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [59] DIN: *DIN V 4108-6:2003-06 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden*. 2003-06
- [60] DIN: *DIN V 4701-10:2003-08 - Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*. 2003-08
- [61] DIN: *DIN V 4701-12:2004-02 - Energetische Bewertung heiz und raumluftechnischer Anlagen im Bestand Teil 12: Wärmeerzeuger und Trinkwassererwärmung*. 2004-02
- [62] DIN: *DIN EN 15265:2007-11 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren*. 2007-11
- [63] DIN: *DIN EN ISO 10456:2008-04 - Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchte-technische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutzrechtlichen Nenn- und Bemessungswerte*. 2008-04
- [64] DIN: *DIN EN 12831:2008-07 Beiblatt 1 - Heizsysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Nationaler Anhang NA*. 2008-07
- [65] DIN: *DIN EN ISO 13790:2008-09 - Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung*. 2008-09
- [66] DIN: *DIN V 18599:2011-12 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung*. 2011-12

- [67] DIN: *DIN EN 15251:2012-12 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. 2012-12
- [68] DIN: *DIN 4108-2:2013-02 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. 2013-02
- [69] DIN: *DIN 4108-4:2013-02 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*. 2013-02
- [70] DIN: *DIN V 18599-1 Berichtigung 1 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Berichtigung zu DIN V 18599-1:2011-12*. 2013-05
- [71] DIN: *DIN V 18599-5 Berichtigung 1 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, Berichtigung zu DIN V 18599-5:2011-12*. 2013-05
- [72] DIN: *DIN V 18599-8 Berichtigung 1 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen, Berichtigung zu DIN V 18599-8:2011-12*. 2013-05
- [73] DIN: *DIN V 18599-9 Berichtigung 1 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen, Berichtigung zu DIN V 18599-9:2011-12*. 2013-05
- [74] DIN: *DIN EN ISO 13370:2015-06 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren*. 2015-06
- [75] DIN: *DIN EN ISO 6946:2016-06 - Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*. 2016-06
- [76] DORFNER, Johannes: *GIS-based mapping tool of urban energy demand for room heating and hot water*. 2011
- [77] DOSPIL, Joachim; HANHÖRSTER, Hedwig: *Tabellen für die Rechtspraxis 2000/2001*. Köln: Heymanns, 2000 (Praxiswissen Recht). ISBN 3-452-23896-2
- [78] DÖTSCH, Christian; TASCHENBERGER, Jan; SCHÖNBERG, Ingo: *UMSICHT-Schriftenreihe / Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT*. Bd. Bd. 6: *Leitfaden Nahwärme*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 1998. ISBN 978-3-8167-5186-1

## LITERATURVERZEICHNIS

- [79] DVGW: *Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen - Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums - Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen*. 2004-04
- [80] EBERLE, Sofie: *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energiebedarf von Gebäuden - Entwicklung von zeitlich hoch aufgelösten Nutzerprofilen für Mehrfamilienhäuser: Masterthesis*. 2014
- [81] EICKER, Ursula (Hrsg.): *Solare Technologien für Gebäude*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2012. ISBN 978-3-8348-1281-0
- [82] EICKER, Ursula; NOUVEL, Romain; SCHULTE, Claudia; SCHUMACHER, Jürgen; COORS, Volker: 3D-Stadtmodelle für die Wärmebedarfsberechnung. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings to BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 1–7
- [83] ELNABAWI, Mohamed H.; HAMZA, Neveen; DUDEK, Steven: Use and Evaluation of the ENVI-met Model for Two Different Urban Forms in Cairo, Egypt: Measurements and Model Simulations. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, S. 2800–2806. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [84] ENDISCH, Christian: *Optimierungsstrategien für die Identifikation mechatronischer Systeme*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2009
- [85] ESRI: *Gebäude vereinfachen*. 2016.  
URL: <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/coverage-toolbox/simplify-building.htm> – Zugriffsdatum: 18.07.2016
- [86] FARZANA, Shazia; LIU, Meng; BALDWIN, Andrew; HOSSAIN, Md. U.: Multi-model prediction and simulation of residential building energy in urban areas of Chongqing, South West China. In: *Energy and Buildings* 81 (2014), S. 161–169
- [87] FIRTH, S. K.; LOMAS, K. J.: Investigating CO2 Emission Reductions in Existing Urban Housing Using a Community Domestic Energy Model. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Building Simulation Conference*, 2009, S. 2098–2105
- [88] FIRTH, S. K.; LOMAS, K. J.; WRIGHT, A. J.: Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. In: *Building Research & Information* 38 (2010), Nr. 1, S. 25–41
- [89] FONSECA, Jimeno A.; SCHLUETER, Arno: Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. In: *Applied Energy* 142 (2015), S. 247–265
- [90] FOUCQUIER, Aurélie; ROBERT, Sylvain; SUARD, Frédéric; STÉPHAN, Louis; JAY, Arnaud: State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013), S. 272–288

- [91] FRANK, Milena; LOGA, Tobias; SCHAEDE, Margrit; WEISSMANN, Claudia: Eigendeckung des Strombedarfs von Niedrigstenergiehäusern durch Photovoltaik-Anlagen - Verrechnung mit unterschiedlichen Zeitschrittweiten ergänzend zur EnEV. In: *Bauphysik* 37 (2015), Nr. 2, S. 81–95
- [92] FRAUNHOFER IBP: *District Energy Concept Adviser*. 2015.  
URL: <http://www.district-eca.de/index.php?lang=de> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [93] FRIEDRICH, Malte; BECKER, Daniela; GRONDEY, Andreas; LASKOWSKI, Franziska; ERHORN, Hans; ERHORN-KLUTTIG, Heike; HAUSER, Gerd; SAGER, Christina; WEBER, Hannah ; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.): *CO2 Gebäudereport 2007*. 2007
- [94] FUCHS, M.; DIXIUS, Thomas; TEICHMANN, J.; LAUSTER, M.; STREBLOW, R.; MÜLLER, D.: Evaluation of interactions between buildings and district heating networks. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, S. 96–103. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [95] FUCHS, M.; LAUSTER, M.; TEICHMANN, J.; MÜLLER, D.: Modularer Modellansatz zur Simulation von Energiesystemen auf Quartiersebene. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings to BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 348–353
- [96] GAETANI, Isabella; HOES, Pieter-Jan; HENSEN, Jan L.: Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy. In: *Energy and Buildings* 121 (2016), S. 188–204
- [97] GARCIA SANCHEZ, D.; LACARRIÈRE, B.; MUSY, M.; BOURGES, B.: Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods. In: *Energy and Buildings* 68 (2014), S. 741–750
- [98] GEISSLER, Achim; HAUSER, Gerd: Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden. In: *bau zeitung* 51 (1997), Nr. 3, S. 79–83
- [99] GLOBAL ALLIANCE ON BUILDINGS AND CONSTRUCTION ; UNEP (Hrsg.): *COP21, Buildings Day and the Global Alliance on Buildings and Construction*. 2016.  
URL: [http://sustainable-fireengineering.ie/wp-content/uploads/2015/02/CoP21\\_Buildings-Day.pdf](http://sustainable-fireengineering.ie/wp-content/uploads/2015/02/CoP21_Buildings-Day.pdf) – Zugriffsdatum: 06.09.2016
- [100] GLOOR, Rolf: *Wärmepumpe*. 2014.  
URL: <http://www.energie.ch/waermepumpe> – Zugriffsdatum: 02.06.2016
- [101] GORETZKI, Peter: *GOSOL - das solar+energetische Städtebausimulationsprogramm*. 2013.  
URL: <http://home.arcor.de/gosol/gosol.htm> – Zugriffsdatum: 18.12.2015



## LITERATURVERZEICHNIS

- [102] GOTTWALT, Sebastian; KETTER, Wolfgang; BLOCK, Carsten; COLLINS, John; WEINHARDT, Christof: Demand side management—A simulation of household behavior under variable prices. In: *Energy Policy* 39 (2011), Nr. 12, S. 8163–8174
- [103] GRATZL-MICHLMAIR, Markus; HEIMRATH, Richard; SCHRANZHOFER, Hermann: Einflussparameter auf Heizwärmebedarf und Kühlbedarf von Gebäuden in verschiedenen Berechnungsmethoden von EN ISO 13790. In: *Bauphysik* 32 (2010), Nr. 5, S. 296–302
- [104] GRÜNDER, Doreen: *Validierung von ENVI-met für die Lagunenstadt El Gouna, Ägypten*. 2013.  
URL: [http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/Stadtklima/Bachelor\\_Masterarbeiten/BA\\_DGruender.pdf](http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/Stadtklima/Bachelor_Masterarbeiten/BA_DGruender.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [105] HALL, Monika; GEISLER, Achim: Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden. In: *Bauphysik* 37 (2015), Nr. 2, S. 115–123
- [106] HAMACHER, Thomas; DORFNER, Johannes: *urbs: A linear optimisation model for distributed energy systems*. 2015.  
URL: <https://urbs.readthedocs.org/en/latest/> – Zugriffsdatum: 29.07.2016
- [107] HAN, Soong-Oh: *Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse als Beitrag zur Bewertung der Zuverlässigkeit adaptiver Struktursysteme*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2011
- [108] HAUSLADEN, Gerhard; AUER, Thomas; SCHNEEGANS, Jakob; KLIMKE, Klaus; RIEMER, Hana: *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme*. 2014.  
URL: [http://www.klima.ar.tum.de/fileadmin/w00bky/www/Publikationen/Endbericht\\_Lastverhalten\\_von\\_Gebaeuden.pdf](http://www.klima.ar.tum.de/fileadmin/w00bky/www/Publikationen/Endbericht_Lastverhalten_von_Gebaeuden.pdf) – Zugriffsdatum: 18.02.2016
- [109] HEIPLE, Shem; SAILOR, David J.: Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), Nr. 8, S. 1426–1436
- [110] HENNING, Hans-Martin; PALZER, Andreas: A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies—Part I: Methodology. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014), S. 1003–1018
- [111] HIMBURG, Stefan: Energetische Bilanzierung von Wohngebäuden nach DIN V 18599. In: *Bauphysik* 33 (2011), Nr. 2, S. 99–110
- [112] HIRST, Eric; GOELTZ, Richard; WHITE, Dennis: Determination of household energy using ‘fingerprints’ from energy billing data. In: *International Journal of Energy Research* 10 (1986), Nr. 4, S. 393–405
- [113] HOIER, Anna; ERHORN, Hans; PFNÜR, Andreas; MÜLLER, Nikolas ; INSTITUT FÜR WÄRME UND OELTECHNIK E.V. (Hrsg.): *Energetische Gebäudesanierung in*

Deutschland. 2013.

URL: [http://www.real-estate.bwl.tu-darmstadt.de/media/bwl9/dateien/arbeitspapiere/Energetische\\_\\_Gebauedesanierung\\_in\\_Deutschland\\_gesamt.pdf](http://www.real-estate.bwl.tu-darmstadt.de/media/bwl9/dateien/arbeitspapiere/Energetische__Gebauedesanierung_in_Deutschland_gesamt.pdf) – Zugriffsdatum: 01.06.2016

- [114] HOPFE, Christina: *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization*, Technische Universiteit Eindhoven, Dissertation, 2009
- [115] HORN, Rafael: Planning of ecologically and economic optimized district refurbishments. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 932–941. ISBN 978-3-00-052213-0
- [116] HÖRNER, Michael; JEDEK, Christoph; CISCHINSKY, Holger: Die Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -verbrauch bei Nichtwohngebäuden - ein empirischer Ansatz. In: *Bauphysik* 37 (2015), Nr. 5, S. 284–295
- [117] HOWARD, B.; PARSHALL, L.; THOMPSON, J.; HAMMER, S.; DICKINSON, J.; MODI, V.: Spatial distribution of urban building energy consumption by end use. In: *Energy and Buildings* 45 (2012), S. 141–151
- [118] HUANG, Y.Joe; BRODRICK, J.: A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire U.S. building stock. In: *Proceedings to 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2000, S. 135–148
- [119] HUBER, Jörg; NYTSCH-GEUSEN CHRISTOPH: Development of modeling and simulation strategies for large-scale urban districts. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2011*, 2011, S. 1753–1760
- [120] HUGHES, Martin; PALMER, Jason; CHENG, Vicky; SHIPWORTH, David: Sensitivity and uncertainty analysis of England's housing energy model. In: *Building Research & Information* 41 (2013), Nr. 2, S. 156–167
- [121] HUGHES, Martin; PALMER, Jason; CHENG, Vicky; SHIPWORTH, David: Global sensitivity analysis of England's housing energy model. In: *Journal of Building Performance Simulation* (2014), S. 1–12
- [122] HUNG, Stephen H.; MENDELSON, N. S.: Handcuffed designs. In: *Discrete Mathematics* 18 (1977), Nr. 1, S. 23–33
- [123] INTERNATIONALES INSTITUT FÜR NACHHALTIGKEITSANALYSE UND -STRATEGIEN: *GEMIS-Informationen*. 2016.  
URL: <http://iinas.org/ueber-gemis.html> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [124] ISELE, André; HÖFKER, Gerrit; PRZYBILLA, Heinz-Jürgen; MÜLLER-SIEGERT, Rebecca: Entwicklung eines Gebäudeinformationssystems mit einem Bottom-Up-Modell zur Berechnung des Energiebedarfs von Stadtquartieren. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.):

## LITERATURVERZEICHNIS

- Proceedings to BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 316–323
- [125] IWU: *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project: Final Project Report*. 2012.  
URL: [http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA\\_FinalReport.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_FinalReport.pdf) – Zugriffsdatum: 24.11.2016
- [126] IWU: *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. neue Ausg. Darmstadt: Wohnen und Umwelt, 2015. ISBN 978-3-941140-47-9
- [127] JACOB, Dirk; BURHENNE, Sebastian; HERKEL, Sebastian; WAGNER, Andreas; DODIER, Robert H.; HENZE, Gregor P.: Comparing two methods of stochastic modeling for buildings. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2011*, 2011, S. 1784–1791
- [128] JAMBAGI, Akhila; KRAMER, Michael; CHENG, Vicky: Residential Electricity Demand Modelling. In: IEEE (Hrsg.): *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015, S. 1–6
- [129] JENSEN, Soren O.: Validation of building energy simulation programs: a methodology. In: *Energy and Buildings* 22 (1995), Nr. 2, S. 133–144
- [130] JOHNSTON, David: *A physically-based energy and carbon dioxide emission model of the UK housing stock*. Leeds, Leeds Metropolitan University, Dissertation, 2003
- [131] JOLIFFE, I.; MORGAN, B.: Principal component analysis and exploratory factor analysis. In: *Statistical Methods in Medical Research* 1 (1992), Nr. 1, S. 69–95
- [132] JONES, P. J.; LANNON, S.; WILLIAMS, J.: Modelling building energy use at urban scale. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings to Seventh International IBPSA Conference*, 2001, S. 175–180
- [133] JUDKOFF, R.; NEYMARK, J.; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Hrsg.): *Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. 1995
- [134] KALUSCHE, Wolfdieter: Grundflächen und Planungskennwerte von Wohngebäuden. In: GRALLA, Mike (Hrsg.); SUNDERMEIER, Matthias (Hrsg.): *Innovation im Baubetrieb*. Köln: Werner Verlag, 2011, S. 35–47.  
URL: [https://www-docs.tu-cottbus.de/bauoekonomie/public/Forschung/Publicationen/Kalusche-Wolfdietrich/2011/Udo\\_Blecken\\_Grundfl%C3%A4chen\\_Wohnbauten.pdf](https://www-docs.tu-cottbus.de/bauoekonomie/public/Forschung/Publicationen/Kalusche-Wolfdietrich/2011/Udo_Blecken_Grundfl%C3%A4chen_Wohnbauten.pdf) – Zugriffsdatum: 01.03.2016
- [135] KAVGIC, M.; MAVROGIANNI, A.; MUMOVIC, D.; SUMMERFIELD, A.; STEVANOVIC, Z.; DJUROVIC-PETROVIC, M.: A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. In: *Building and Environment* 45 (2010), Nr. 7, S. 1683–1697

- [136] KAVGIC, M.; MUMOVIC, D.; SUMMERFIELD, A.; STEVANOVIC, Z.; ECIM-DJURIC, O.: Uncertainty and modeling energy consumption: Sensitivity analysis for a city-scale domestic energy model. In: *Energy and Buildings* 60 (2013), S. 1–11
- [137] KEIRSTEAD, James; JENNINGS, Mark; SIVAKUMAR, Aruna: A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), Nr. 6, S. 3847–3866
- [138] KIM, Eui-Jong; PLESSIS, Gilles; HUBERT, Jean-Luc; ROUX, Jean-Jacques: Urban energy simulation: Simplification and reduction of building envelope models. In: *Energy and Buildings* 84 (2014), S. 193–202
- [139] KIRCHNER, Almut; MATTHES, Felix C. ; PROGNOSE AG (Hrsg.); ÖKO-INSTITUT E.V. (Hrsg.): *Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*. 2009
- [140] KLAUS, Thomas; VOLLMER, Carla; WERNER, Kathrin; LEHMANN, Harry; MÜSCHEN, Klaus ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. 2010.  
URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieziel-2050> –  
Zugriffsdatum: 06.09.2016
- [141] KLEEBERGER, Markus: *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energiebedarf von Einfamilienhäusern - Entwicklung zeitlich hoch aufgelöster Nutzerprofile: Masterthesis, Technische Universität München*. 2014
- [142] KLEIN, Konstantin; KALZ, Doreen; HERKEL, Sebastian: Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl. In: *Bauphysik* 36 (2014), Nr. 2, S. 49–58
- [143] KLEY, Christian; BOCKELMANN, Franziska; FISCH, M. N.: Konzept mit Zukunft – Steigerung des Eigenstromverbrauchs im Plus-Energie-Haus Berghalde. In: OTTI (Hrsg.): *30. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, OTTI, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Inst., 2015 (OTTI - Training, Seminare, Tagungen), S. 124–125. ISBN 978-3943891454
- [144] KOHLER, N.; SCHWAIGER, B.; BARTH, B.; KOCH, M.: Mass flow, energy flow and costs of the German building stock. In: CSTB (Hrsg.): *2nd international conference on buildings and the environment*, 1997, S. 11–18
- [145] KOKOGIANNAKIS, Georgios; CLARKE, J.; STRACHAN, Paul: Impact of using different models in practice - a case study with the simplified methods of ISO 13790 standard and detailed modelling programs. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference*, 2007, S. 39–46
- [146] KRANZL, Lukas; STADLER, Michael; HUBER, Claus; HAAS, Reinhard; RAGWITZ, Mario; BRAKHAGE, Anselm; GULA, Adam; FIGORSKI, Arkadiusz: Deriving efficient policy portfolios promoting sustainable energy systems—Case studies applying Invert simulation tool. In: *Renewable Energy* 31 (2006), Nr. 15, S. 2393–2410

## LITERATURVERZEICHNIS

- [147] LAMBONI, Matieyendou; MAKOWSKI, David; LEHUGER, Simon; GABRIELLE, Benoit; MONOD, Hervé: Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models. In: *Field Crops Research* 113 (2009), Nr. 3, S. 312–320
- [148] LAMBONI, Matieyendou; MONOD, Hervé; MAKOWSKI, David: Multivariate sensitivity analysis to measure global contribution of input factors in dynamic models. In: *Reliability Engineering & System Safety* 96 (2011), Nr. 4, S. 450–459
- [149] LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG, BREITBAND UND VERMESSUNG: *Kundeninformation LoD1*. 2015.  
URL: [http://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/3759/Kundeninformation\\_LoD1.pdf](http://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/3759/Kundeninformation_LoD1.pdf) – Zugriffsdatum: 22.02.2016
- [150] LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG, BREITBAND UND VERMESSUNG: *Faltblatt 3D-Gebäudemodelle*. 2016.  
URL: [http://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/4211/Faltblatt\\_LoD1.pdf](http://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/4211/Faltblatt_LoD1.pdf) – Zugriffsdatum: 22.02.2016
- [151] LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG, BREITBAND UND VERMESSUNG: *LoD2 Arbeitsstand*. 2016.  
URL: [http://www.geodaten.bayern.de/download/uebersicht\\_LOD/LoD2\\_Internetuebersicht.pdf](http://www.geodaten.bayern.de/download/uebersicht_LOD/LoD2_Internetuebersicht.pdf) – Zugriffsdatum: 15.02.2016
- [152] LANDTAG BADEN-WÜRTTEMBERG: *Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie in Baden-Württemberg: EWärmeG*. 2015.  
URL: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5\\_Energie/Energieeffizienz/EWaermeG\\_BW/150317\\_Novelle\\_Erneuerbare\\_Waerme-Gesetz.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/EWaermeG_BW/150317_Novelle_Erneuerbare_Waerme-Gesetz.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [153] LAYCOCK, R. G.; DAY, A. M.: Automatically Generating Roof Models from Building Footprints. In: SKALA, Václav (Hrsg.): *WSCG '2003*, Union Agency, 2003, S. 81–84. ISBN 80-903100-2-8
- [154] LEHR, Ulrike; MÖNNIG, Anke; WOLTER, Marc I.; LUTZ, Christian; SCHADE, Wolfgang; KRAIL, Michael ; GWS (Hrsg.): *Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - ein Vergleich*. 2011
- [155] LI, Francis: *Spatially explicit techno-economic optimisation modelling of UK heating futures*. London, University College London, Dissertation, 2013
- [156] LIN, Q. G.; HUANG, G. H.: A dynamic inexact energy systems planning model for supporting greenhouse-gas emission management and sustainable renewable energy development under uncertainty—A case study for the City of Waterloo, Canada. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), Nr. 8, S. 1836–1853
- [157] LINDAUER, Manuel: FMI-Kopplung von EnergyPlus mit MATLAB zur Abbildung von Interaktionen im Distrikt-Modell EmMi-transient. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Procee-*

- dings of CESBP 2016 and BauSIM 2016*, Fraunhofer IRB Verlag, 2016, S. 811–817. ISBN 978-3-8167-9798-2
- [158] LINDAUER, Manuel: Global dynamic sensitivity analysis using functional transformation for energy simulation of residential quarters. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of CESBP 2016 and BauSIM 2016*, Fraunhofer IRB Verlag, 2016, S. 803–810. ISBN 978-3-8167-9798-2
- [159] LINDAUER, Manuel: Global impulse sensitivity analysis for building energy simulation of residential quarters. In: CESB16 (Hrsg.): *Proceeding to CESB2016: Central Europe towards Sustainable Building*, Grada Publishing, 2016, S. 579–586. ISBN 978-80-271-0248-8
- [160] LINDAUER, Manuel: Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 602–611. ISBN 978-3-00-052213-0
- [161] LINDAUER, Manuel; NEMETH, Isabell: Instationäre Energiebedarfs- und Angebotssimulation eines Stadtquartiers mit Einbeziehung des Nutzerverhaltens. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of BauSIM 2014: 5th German-Austrian Conference of IBPSA*, 2014, S. 477–483. ISBN 978-3-00-047160-5
- [162] LÖDL, M.; KERBER, G.; WITZMANN, R.; HOFFMANN, C.; METZGER, M.: Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. In: *Alte Ziele - neue Wege*, Verl. der TU, 2010, S. 1–14. ISBN 978-3-85125-083-1
- [163] LOGA, Tobias ; IWU (Hrsg.): *Die Heizperiodenbilanz im Vergleich zum Monatsbilanzverfahren: Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6*. 2004.  
URL: [http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/werkzeuge/iwu-heizperiodenbilanz-dez\\_2004.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/iwu-heizperiodenbilanz-dez_2004.pdf) – Zugriffsdatum: 22.12.2016
- [164] LOGA, Tobias ; IWU (Hrsg.): *Deutsche Gebäudetypologie*. 2005
- [165] LOGA, Tobias; DIEFENBACH, Nikolaus; KNISSEL, Jens; BORN, Rolf: *Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden*. 2005
- [166] LOMAS, Kevin J.; EPEL, Herbert: Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. In: *Energy and Buildings* 19 (1992), Nr. 1, S. 21–44
- [167] LOONEN, ROOL C. G. M.; HENSEN, Jan L.: Dynamic sensitivity analysis for performance-based building design and operation. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, S. 299–305. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [168] LOULOU, Richard: ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. part II: mathematical formulation. In: *Computational Management Science* 5 (2008), Nr. 1-2, S. 41–66

## LITERATURVERZEICHNIS

- [169] LOULOU, Richard; LABRIET, Maryse: ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. In: *Computational Management Science* 5 (2008), Nr. 1-2, S. 7–40
- [170] LÖWNER, Marc-O.; BRENNER, Joachim; GRÖGER, Gerhard; GRUBER, Ulrich; HÄFELE, Karl-Heinz; SCHLÜTER, Sandra: CityGML 2.0 - Ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle. Teil 1: Datenmodell. In: *zfv* 137 (2012), Nr. 6, S. 340–349
- [171] LRZ: *The LRZ Compute Cloud*. 2016.  
URL: [http://www.lrz.de/services/compute/cloud\\_en/](http://www.lrz.de/services/compute/cloud_en/) – Zugriffsdatum: 12.08.2016
- [172] LUDÄSCHER, Bertram (Hrsg.); MAMOULIS, Nikos (Hrsg.): *Scientific and Statistical Database Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008 (Lecture Notes in Computer Science). ISBN 978-3-540-69476-2
- [173] LÜDEMANN, Bruno: *Auslegung, Energiebedarf und Komfort von Anlagen zur Heizung und Warmwasserbereitung im Niedrigenergiehaus bei Berücksichtigung des Nutzerverhaltens*. Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2002
- [174] MAAS, Anton: *Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung*. Kassel, Universität Gesamthochschule Kassel, Dissertation, 1995.  
URL: [http://www.uni-kassel.de/fb6/bpy/de/forschung/abgeschlprojekte/pdfs/maas\\_diss.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb6/bpy/de/forschung/abgeschlprojekte/pdfs/maas_diss.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [175] MACUMBER, D. L.; BALL, I. B.; LONG, N. L.: A graphical tool for cloud-based building energy simulation. In: ASHRAE/IBPSA-USA (Hrsg.): *Building Simulation Conference*, 2014, S. 87–94
- [176] MADERSPACHER, Johannes; GEYER, Philipp; AUER, Thomas; LANG, Werner: COMPARISON OF DIFFERENT META MODEL APPROCHES WITH A DETAILED BUIDING MODEL FOR LONG-TERM SIMULATIONS. In: IBPSA (Hrsg.): *Building Simulation 2015 - Conference Proceedings*, 2015, S. 106–113
- [177] MASTRUCCI, Alessio; BAUME, Olivier; STAZI, Francesca; LEOPOLD, Ulrich: Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. In: *Energy and Buildings* 75 (2014), S. 358–367
- [178] MASTRUCCI, Alessio; BAUME, Olivier; STAZI, Francesca; SALVUCCI, Susanna; LEOPOLD, Ulrich: A GIS-based approach to estimate energy savings and indoor thermal comfort for urban housing stock retrofitting. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of BauSIM 2014: 5th German-Austrian Conference of IBPSA*, 2014, S. 190–197. ISBN 978-3-00-047160-5
- [179] MAVROGIANNI, A.; DAVIES, M.; KOLOKOTRONI, M.; HAMILTON, I.: A GIS-based bottom-up space heating demand model of the London domestic stock. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Building Simulation Conference*, 2009, S. 1061–1067

- [180] METEOTEST: *Meteonorm*. 2010.  
URL: <http://www.meteonorm.com> – Zugriffsdatum: 29.06.2016
- [181] MIKKOLA, Jani; LUND, Peter D.: Models for generating place and time dependent urban energy demand profiles. In: *Applied Energy* 130 (2014), S. 256–264
- [182] MODELICA ASSOCIATION: *FMI Support in Tools*. 2016.  
URL: <https://fmi-standard.org/tools> – Zugriffsdatum: 05.07.2016
- [183] MODELISAR: *Functional Mock-up Interface for Co-Simulation 1.0*. 2010.  
URL: [https://svn.modelica.org/fmi/branches/public/specifications/v1.0/FMI\\_for\\_CoSimulation\\_v1.0.pdf](https://svn.modelica.org/fmi/branches/public/specifications/v1.0/FMI_for_CoSimulation_v1.0.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [184] MODELON: *FMI Toolbox for MATLAB/Simulink*. 2016.  
URL: <http://www.modelon.com/products/fmi-toolbox-for-matlab/> – Zugriffsdatum: 29.06.2016
- [185] MOORE, G.: Cramming more components onto integrated circuits. In: *Electronics* 38 (1965), Nr. 8, S. 114–117
- [186] MORRIS, Max D.: Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. In: *Technometrics* 33 (1991), Nr. 2, S. 161–174
- [187] NEMETH, Isabell: *Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor: Am Beispiel von drei Landkreisen in Bayern*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2011
- [188] NEMETH, Isabell; ELBEL, Konstanze; HOPPE, Michaela; LINDAUER, Manuel; SCHNEIDER, Patricia; WINDEKNECHT, Mark; HAMACHER, Thomas; HAUSER, Gerd; HAUSLADEN, Gerhard; LANG, Werner ; VEREINIGUNG DER BAYERISCHEN WIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Energetische Gebäudesanierung in Bayern*. 2012
- [189] NEMETH, Isabell; LINDAUER, Manuel: Adaptation of a stochastic simulation model for long-term investigation of the development of the energy demand in larger building stocks. In: BORRMANN, André (Hrsg.): *19th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2012 (ICE12)*. Red Hook, NY: Curran, 2014, S. 172–181. ISBN 9781634395489
- [190] NEMETH, Isabell; LINDAUER, Manuel; AHLHAUS, Philipp: Geo-Referenced Modeling of an Urban Quarter for the Assessment of Refurbishment Potentials and Energy Supply Strategies. In: HAUSER, Gerd (Hrsg.); LÜTZKENDORF, Thomas (Hrsg.); ESSIG, Natalie (Hrsg.): *Implementing sustainability - barriers and chances*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013, S. 291–301. ISBN 978-3-8167-8982-6
- [191] NEMETH, Isabell; SCHINABECK, Judith; GEBHARDT, Vera-Karina; THIELEN, Korinna; MICHAELI, Mark; LANG, Werner ; LANG, Werner (Hrsg.); MICHAELI, Mark (Hrsg.); THIERSTEIN, Alain (Hrsg.); WULFHORST, Gebhard (Hrsg.); KELLER, Regine (Hrsg.); HAMACHER, Thomas (Hrsg.): *Stadtlabor Nürnberger Weststadt*. 2012.



## LITERATURVERZEICHNIS

- URL: [http://www.znb.mse.tum.de/fileadmin/w00bfz/www/Forschung/Stadtlabor\\_Nuernberger\\_Weststadt\\_web.pdf](http://www.znb.mse.tum.de/fileadmin/w00bfz/www/Forschung/Stadtlabor_Nuernberger_Weststadt_web.pdf) – Zugriffsdatum: 21.12.2016
- [192] NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe: A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. In: *Applied Energy* 113 (2014), S. 1043–1058
- [193] NOUIDUI, Thierry; WETTER, Michael; ZUO, Wangda: Functional mock-up unit for co-simulation import in EnergyPlus. In: *Journal of Building Performance Simulation* 7 (2013), Nr. 3, S. 192–202
- [194] NOUIDUI, Thierry S.; LORENZETTI, David M.; WETTER, Michael: *EnergyPlusToFMU*. 2016.  
URL: <http://simulationresearch.lbl.gov/fmu/EnergyPlus/export/userGuide/download.html> – Zugriffsdatum: 29.06.2016
- [195] NOUVEL, Romain; SCHULTE, Claudia; EICKER, Ursula; PIETRUSCHKA, Dirk; COORS, Volker: CityGML-based 3D city model for energy diagnostics and urban energy policy support. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, S. 218–225. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [196] NOUVEL, Romain; ZIRAK, M.; DASTAGEERI, H.; COORS, Volker; EICKER, Ursula: Urban energy analysis based on 3D city model for national scale applications. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of BauSIM 2014: 5th German-Austrian Conference of IBPSA*, 2014, S. 83–90. ISBN 978-3-00-047160-5
- [197] NREL: *Testing and Validation*. 2015.  
URL: <https://energyplus.net/testing> – Zugriffsdatum: 27.07.2016
- [198] OLADOKUN, Michael G.; ODESOLA, Isaac A.: Household energy consumption and carbon emissions for sustainable cities – A critical review of modelling approaches. In: *International Journal of Sustainable Built Environment* 4 (2015), Nr. 2, S. 231–247
- [199] OPPERMAN, Jens: *Untersuchung der Sensitivität von Heizungs-/Lüftungsanlagen in Niedrigenergiehäusern*. Kassel, Universität Kassel, Dissertation, 2003.  
URL: <http://d-nb.info/968862896/34> – Zugriffsdatum: 13.06.2016
- [200] OSCHATZ, Bert: *Forschungsinitiative Zukunft Bau. Bd. F 2737: Erarbeitung eines Leitfadens zum Abgleich Energiebedarf - Energieverbrauch*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl, 2009. ISBN 978-3-8167-8203-2
- [201] OSTERHAGE, Tanja; CALÌ, Davide; STREBLOW, Rita; MÜLLER, Dirk: Ergebnisse einer energetischen Sanierung: Abweichung zwischen Energiebedarf und Verbrauch - ist nur der Nutzer Schuld? In: *Bauphysik* 37 (2015), Nr. 2, S. 100–104
- [202] PALZER, Andreas; HENNING, Hans-Martin: A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from

- renewable energy technologies – Part II: Results. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014), S. 1019–1034
- [203] PALZER, Andreas; HENNING, Hans-Martin: A Future German Energy System with a Dominating Contribution from Renewable Energies: A Holistic Model Based on Hourly Simulation. In: *Energy Technology* 2 (2014), Nr. 1, S. 13–28
- [204] PANNIER, Marie-lise; PEUPOORTIER, Bruno; SCHALBART, Patrick: Building life cycle assessment: investigation of influential parameters in a helpful decision tool. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 158–167. ISBN 978-3-00-052213-0
- [205] PEARSON, Karl: On lines and planes of closest fit to a system of points in space. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 6 (1901), Nr. 2, S. 559–572
- [206] PERUMAL, Thanneer M.; GUNAWAN, Rudiyanto: Impulse Parametric Sensitivity Analysis. In: *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, 2011, S. 9686–9690
- [207] PERUMAL, Thanneer M.; GUNAWAN, Rudiyanto: Understanding dynamics using sensitivity analysis: caveat and solution. In: *BMC systems biology* 5 (2011), S. 41
- [208] PERUMAL, Thanneer M.; WU, Yan; GUNAWAN, Rudiyanto: Dynamical analysis of cellular networks based on the Green's function matrix. In: *Journal of theoretical biology* 261 (2009), Nr. 2, S. 248–259
- [209] PICHLER, Josef ; GRIN (Hrsg.): *Energieeffizienz von Heizungspumpen*. 2004
- [210] RAFTERY, Paul; LEE, Edwin; WEBSTER, Tom; HOYT, Tyler; BAUMAN, Fred: Effects of furniture and contents on peak cooling load. In: *Energy and Buildings* 85 (2014), S. 445–457
- [211] RAGER, J.; REBEIX, D.; MARÉCHAL, F.; CHERIX, G.; CAPEZZALI, M.: MEU: An urban energy management tool for communities and multi-energy utilities. In: SCARTEZZINI, Jean-Louis (Hrsg.): *Proceedings to CISBAT 2013*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013, S. 897–902. ISBN 978-2-8399-1280-8
- [212] RAMOS, F.; SIRET D; MUSY, M.: A 3D GIS for managing building rehabilitation process. In: UNIVERSITY OF GÄVLE (Hrsg.): *Proc. 12th Int. Conf. on Geoinformatics*, 2004, S. 518–524
- [213] RAMSAY, J. O.; SILVERMAN, B. W.: *Functional data analysis*. 2nd ed. New York: Springer, 2005 (Springer series in statistics). ISBN 978-0-387-40080-8
- [214] REINHART, Christoph F.; CEREZO DAVILA, Carlos: Urban building energy modeling – A review of a nascent field. In: *Building and Environment* 97 (2016), S. 196–202

## LITERATURVERZEICHNIS

- [215] REINHART, Christoph F.; DOGAN, Timur; JAKUBIEC, J. A.; RAKHA, Tarek; SANG, Andrew: UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, S. 476–483. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [216] RICHTER, Christian: *Methodik zur Erstellung von Gebäudesimulationsmodellen aus der TABULA-Gebäudetypologie: Masterthesis, Technische Universität München*. 2014
- [217] RICHTER, W.: *Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht: Kurzfassung*. 2003.  
URL: [https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf\\_d\\_F\\_2425.pdf](https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf_d_F_2425.pdf) – Zugriffsdatum: 13.06.2016
- [218] RIEDIGER, Nicole; SICK, Friedrich; KEISER, Jan: Buildings as active components in smart grids. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 168–173. ISBN 978-3-00-052213-0
- [219] ROBINSON, D.; CAMPBELL, N.; GAISER, W.; KABEL, K.; LE-MOUEL, A.; MOREL, N.; PAGE, J.; STANKOVIC, S.; STONE, A.: SUNtool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. In: *Solar Energy* 81 (2007), Nr. 9, S. 1196–1211
- [220] ROBINSON, D.; STANKOVIC, S.; MOREL, N.; DEQUE, F.; RYLATT, M.; KABELE, K.; MANOLAKAKI, E.; NIEMINEN, J.: Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods: project SUNTool. In: AUGENBROE, Godfried (Hrsg.); HENSEN, Jan (Hrsg.): *Building simulation 2003*, Organizing Committee Building Simulation 2003, 2003, S. 1117–1122. ISBN 90-386-1566-3
- [221] ROBINSON, Darren; HALDI, F.; KÄMPF, J.; LEROUX, P.M; PEREZ, D.; RASHEED, A.; WILKE, U.: CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Building Simulation Conference*, 2009, S. 1083–1090
- [222] RYAN, Emily M.; SANQUIST, Thomas F.: Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. In: *Energy and Buildings* 47 (2012), S. 375–382
- [223] SAILOR, David J.; LU, Lu: A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. In: *Atmospheric Environment* 38 (2004), Nr. 17, S. 2737–2748
- [224] SALTELLI, A.: *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Hoboken, NJ: Wiley, 2004. ISBN 0-470-87093-1
- [225] SALTELLI, A.: *Sensitivity analysis of scientific models*. Hoboken, N.J. and Chichester: Wiley and John Wiley [distributor], 2007. ISBN 9780470059975

- [226] SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M.: *Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis*. Chichester: Wiley, 2000. ISBN 0471998923
- [227] SARTORI, Igor; WACHENFELDT, Bjørn J.; HESTNES, Anne G.: Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction. In: *Energy Policy* 37 (2009), Nr. 5, S. 1614–1627
- [228] SCHLÖMER, Claus; HOYMAN, Jana; WALTERSBACH, Matthias ; BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (Hrsg.): *Raumordnungsprognose*. 2016.  
URL: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/ UeberRaumb Beobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/raumordnungsprognose\\_node.html](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/ UeberRaumb Beobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/raumordnungsprognose_node.html) – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [229] SCHLÖSSL, Hans-Joachim; RIEDL, Klaus; HOFMANN, Martin; NIRSCHL, Thomas; WISMETH, Monika; WIGLEND, Herbert; ZAUNMÜLLER-BLAU, Agathe; THIEMANN, Joachim; KAMPE, Karen ; STADT NÜRNBERG, WIRTSCHAFTSREFERAT, AMT FÜR WOHNEN UND STANDENTWICKLUNG (Hrsg.): *Vorbereitende Untersuchungen Weststadt*. 2010.  
URL: [https://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/planen/weststadt\\_vu.pdf](https://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/planen/weststadt_vu.pdf) – Zugriffsdatum: 04.03.2016
- [230] SCHÖNTHALER, Konstanze; ANDRIAN-WERBURG, Stefan v.; VAN RÜTH, Petra; HEMPEN, Susanne ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Monitoringbericht 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*. 2015.  
URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/monitoringbericht\\_2015\\_zur\\_deutschen\\_anpassungsstrategie\\_an\\_den\\_klimawandel.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/monitoringbericht_2015_zur_deutschen_anpassungsstrategie_an_den_klimawandel.pdf) – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [231] SCHRÖDER, Franz P.; BOEGELEIN, Tobias; ENGLER, Hans J.; OHLWAERTER, Christian: Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern. Rückwirkung des Sanierungsstandes auf das Nutzerverhalten. In: *HLH Lueftung/Klima* 61 (2010), Nr. 11, S. 22–25
- [232] SHIMODA, Yoshiyuki; FUJII, Takuro; MORIKAWA, Takao; MIZUNO, M.: Development of Residential end-use Simulation model at city scale. In: AUGENBROE, Godfried (Hrsg.); HENSEN, Jan (Hrsg.): *Building simulation 2003*, Organizing Committee Building Simulation 2003, 2003, S. 1201–1208. ISBN 90-386-1566-3
- [233] SHIMODA, Yoshiyuki; FUJII, Takuro; MORIKAWA, Takao; MIZUNO, Minoru: Residential end-use energy simulation at city scale. In: *Building and Environment* 39 (2004), Nr. 8, S. 959–967
- [234] SHORROCK, L. D.; DUNSTER, J. E.: The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. In: *Energy Policy* 25 (1997), Nr. 12, S. 1027–1037

## LITERATURVERZEICHNIS

- [235] SHORROCK, L. D.; HENDERSON, G.: BREHOMES - a physically based model of the energy use of the United Kingdom housing stock. In: IBPSA CONFERENCE (Hrsg.): *Proceedings to BuildingSim 1991*, 1991, S. 497–503
- [236] SIEMENS: *City in a Digital Nutshell*. 2014.  
URL: <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/infrastructure-and-finance/livable-and-sustainable-cities-virtual-urban-planning.html> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [237] SOBOL, I.M.: Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 55 (2001), Nr. 1-3, S. 271–280
- [238] STADLER, Ingo: *Dialogfähige Energiemanagementsysteme im Kontext von Energieverbrauch und Nutzerverhalten*. Als Ms. gedr. Berlin: Dissertation.de, 2001 (Premium). ISBN 3898252817
- [239] STADLER, Michael; KRANZL, Lukas; HUBER, Claus; HAAS, Reinhard; TSIOLIARIDOU, Elena: Policy strategies and paths to promote sustainable energy systems—The dynamic Invert simulation tool. In: *Energy Policy* 35 (2007), Nr. 1, S. 597–608
- [240] STATISTA: *Photovoltaik - Installierte Leistung nach Bundesland 2015*. 2016.  
URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/250881/umfrage/installierte-photovoltaikleistung-nach-bundesland/> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [241] STATISTA: *Prognose der Pro-Kopf-Wohnflächenentwicklung bis 2030*. 2016.  
URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155747/umfrage/prognose-der-wohnflaechenentwicklung-bis-2030/> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [242] STATISTA: *Statistiken zum Thema Photovoltaik*. 2016.  
URL: <http://de.statista.com/themen/156/photovoltaik/> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [243] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Bautätigkeit und Wohnungen 2014: Fachserie 5 Reihe 1*. 2015
- [244] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Bevölkerungsvorausberechnung*. 2016.  
URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Bevoelkerungsvorausberechnung.html> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [245] STEIN, Britta; DIEFENBACH, Nikolaus; LOGA, Tobias: Monitoring of Energy-Saving Processes in Residential Building Stocks. In: ZEBAU (Hrsg.): *Proceedings of SBE16: Sustainable Built Environment Conference 2016*, 2016, S. 856–865. ISBN 978-3-00-052213-0

- [246] STEIN, Britta; LOGA, Tobias; DIEFENBACH, Nikolaus: *EPISCOPE synthesis report*. Bd. No. 1: *Inclusion of new buildings in residential buildingtypologies: Steps towards NZEBs exemplified for different European countries*. 2014. ISBN 9783941140424
- [247] STINNER, S.; STREBLOW, R.; MÜLLER, D.: Dynamic Uncertainty Analysis of the Building Energy Performance in City Districts. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of BauSIM 2014: 5th German-Austrian Conference of IBPSA*, 2014, S. 656–663. ISBN 978-3-00-047160-5
- [248] STOCKER, Andrea; GROSSMANN, Anett; MADLENER, Reinhard; WOLTER, Marc I.: Sustainable energy development in Austria until 2020: Insights from applying the integrated model “e3.at”. In: *Energy Policy* 39 (2011), Nr. 10, S. 6082–6099
- [249] STOCKER, Andrea; GROSSMANN, Anett; WOLTER, Marc I. ; GWS (Hrsg.): *Das integrierte Umwelt-Energie-Wirtschaft-Modell E3.at: Modelldokumentation*. 2011
- [250] STRBAC, Goran: Demand side management: Benefits and challenges. In: *Energy Policy* 36 (2008), Nr. 12, S. 4419–4426
- [251] SWAN, Lukas G.; ISMET UGURSAL, V.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.: Implementation of a Canadian residential energy end-use model for assessing new technology impacts. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Building Simulation Conference*, 2009, S. 1429–1436
- [252] SWAN, Lukas G.; UGURSAL, V. I.: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), Nr. 8, S. 1819–1835
- [253] THIEL, Susan: *Validierung des Stadtklimamodells ENVImet mit räumlich stationär und mobil gemessenen Daten in der Dresdner Neustadt*. 2014.  
URL: <http://forschungsinfo.tu-dresden.de/detail/abschlussarbeit/32313>  
– Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [254] THOMAS, Daren; MILLER, Clayton; KÄMPF, J.; SCHLUETER, Arno: Multiscale Co-Simulation of Energyplus and CitySim Models derived from a Building Information Model. In: IBPSA GERMANY (Hrsg.): *Proceedings of BauSIM 2014: 5th German-Austrian Conference of IBPSA*, 2014, S. 469–476. ISBN 978-3-00-047160-5
- [255] TIAN, Wei: A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013), S. 411–419
- [256] TIAN, Wei; CHOUDHARY, Ruchi: Energy use of buildings at urban scale: a case study of London school buildings. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2011*, 2011, S. 1702–1709
- [257] TRCKA, Marija; WETTER, Michael; HENSEN, Jan L.: AN IMPLEMENTATION OF CO-SIMULATION FOR PERFORMANCE PREDICTION OF INNOVATIVE INTEGRATED

## LITERATURVERZEICHNIS

- HVAC SYSTEMS IN BUILDINGS. In: IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Building Simulation Conference*, 2009, S. 724–731
- [258] URBAN, Dieter; MAYERL, Jochen: *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss., 2011 (Studien-skripten zur Soziologie). ISBN 978-3-531-17345-0
- [259] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY: *External Interface(s) Application Guide*. 2015.  
URL: [https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v8.4.0/ExternalInterfaces\\_Application\\_Guide.pdf](https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.4.0/ExternalInterfaces_Application_Guide.pdf) – Zugriffsdatum: 18.07.2016
- [260] VANTHOOR, B.H.E.; VAN HENTEN, E. J.; STANGHELLINI, C.; VISSER, P.H.B. d.: A methodology for model-based greenhouse design: Part 3, sensitivity analysis of a combined greenhouse climate-crop yield model. In: *Biosystems Engineering* 110 (2011), Nr. 4, S. 396–412
- [261] VDI: *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*. 2008-05
- [262] WAGNER, Andreas (Hrsg.): *Photovoltaik Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-662-48639-9
- [263] WALTER, Emmanuel; KÄMPF, J.: *A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values*. 2015.  
URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/214754/files/p%28139%29v2.pdf> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [264] WEBER, Juri; ECKER-BRINKMANN, Astrid; BUDDE, Eike; WÖSSNER, Simon; ERHORN-KLUTTIG, Heike ; FRAUNHOFER IBP (Hrsg.): *Technical Manual District Energy Concept Adviser: Version 1.1*. 2014
- [265] WETTER, Michael: *Modelica Buildings Library*. 2016.  
URL: <https://simulationresearch.lbl.gov/modelica> – Zugriffsdatum: 05.07.2016
- [266] WETTER, Michael; NOUIDUI, Thierry S.; HAVES, Philip: *Building Controls Virtual Test Bed*. 2015.  
URL: <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb> – Zugriffsdatum: 12.12.2016
- [267] WETTER, Michael; VAN TREECK, Christoph; HENSEN, Jan L.: *New generation computational tools for building and community energy systems*. 2013.  
URL: <http://www.iea-annex60.org/downloads/Annex60Proposal.pdf> – Zugriffsdatum: 18.07.2016
- [268] WINTERSEEL, Bernd: *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energiebedarf von Wohnheimen: Masterarbeit*. 2014

- [269] WIRTH, Harry ; FRAUNHOFER ISE (Hrsg.): *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. 2016.  
URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [270] WOLFF, Dieter; JAGNOW, Kati: *Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung*. 2011.  
URL: <https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/fernwaermestudie.pdf> – Zugriffsdatum: 06.06.2016
- [271] WOLFF, Dieter; TEUBER, Peter; BUDDE, Jörg; JAGNOW, Kati ; WOLFENBÜTTEL, FH (Hrsg.): *Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln*. 2004
- [272] YAMAGUCHI, Y.; SHIMODA, Y.; MIZUNO, M.: Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 5, S. 580–592
- [273] YAMAGUCHI, Y.; SHIMODA, Y.; MIZUNO, M.: Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective: Case study in a Japanese business district. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 1, S. 1–12
- [274] YAMAGUCHI, Yohei; SHIMODA, Yoshiyuki; MIZUNO, Minoru ; IBPSA CONFERENCE (Hrsg.): *Development of District Energy System Simulation Model based on Detailed Energy Demand Model*. 2003
- [275] YANG, Xiaoshan; ZHAO, Lihua; BRUSE, Michael; MENG, Qinglin: An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. In: *Energy and Buildings* 54 (2012), S. 243–251
- [276] ZENTRUM FÜR UMWELTBEWUSSTES BAUEN: *Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen*. 2010.  
URL: <http://www.altbaukonstruktionen.de> – Zugriffsdatum: 01.06.2016
- [277] ZHANG, Yi; KOROLIJA, Ivan: *JEPlus - An EnergyPlus simulation manager for parametrics*. 2016.  
URL: <http://www.jeplus.org> – Zugriffsdatum: 18.07.2016
- [278] ZHAO, Hai-xiang; MAGOULÈS, Frédéric: Feature Selection for Predicting Building Energy Consumption Based on Statistical Learning Method. In: *Journal of Algorithms & Computational Technology* 6 (2012), Nr. 1, S. 59–78





# Glossar

<b>Additivitätseigenschaft</b>	Ein Modell $y$ ist additiv, wenn $y(\Delta u_1 + \Delta u_2) = y(\Delta u_1) + y(\Delta u_2)$ gilt.
<b>ArcGIS</b>	GIS-Software
<b>ARIMA</b>	Auto-Regressive Integrated Moving Average: statistisches Modell
<b>BAK</b>	Baualtersklasse eines Gebäudes
<b>Basis</b>	Basis eines Vektorraums
<b>Basisfunktion</b>	Eine Funktion, die Bestandteil einer Funktionsbasis ist
<b>BCVTB</b>	Building Controls Virtual Test Bed: Softwareplattform zur Kopplung von Simulationswerkzeugen
<b>BGF</b>	Bruttogrundfläche: gesamte überbaute Fläche eines Gebäudes
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BIM</b>	Building Information Model(ing)
<b>Black-box</b>	Modellierungsansatz basierend auf statistischen oder maschinellen lernenden Verfahren, daher ist Einblick in black-box Modelle kaum möglich
<b>Bottom-up</b>	Modellierungstechnik, bei der aus einzelnen Modellen für Entitäten (bspw. Gebäude) ein Modell für den gesamten Untersuchungsraum (bspw. Quartier) erstellt wird
<b>BREDEM</b>	BRE Domestic Energy Model: stationäres Energiebedarfsberechnungsverfahren, vorrangig in Großbritannien eingesetzt
<b>CDA</b>	Conditional Demand Analysis: spezielle Regressionsanalyse
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics: Strömungssimulation
<b>CityGML</b>	GIS Datenformat
<b>COP</b>	Coefficient of Performance: Angabe zum Wirkungsgrad eines Wärmepumpensystems
<b>COP 2015</b>	Klimagipfel 2015 in Paris
<b>DH</b>	Doppelhaus
<b>Diskreter Parameter</b>	Parameter, der nur Werte aus einer endlichen Menge annehmen kann
<b>Diskretisierung</b>	Unterteilung eines kontinuierlichen Intervalls in eine endliche Menge von Punkten
<b>DSM</b>	Demand Side Management: Lastverschiebemaßnahmen, die den Strombedarf an das Stromangebot anpassen

- Dynamische Zielgröße** Ergebnisgröße eines Modells, welche zeitlich aufgelöste Daten enthält, und die als Zielgröße für eine Sensitivitätsanalyse verwendet wird, siehe auch zeitabhängige Funktion
- Dynamischer Parameter** Parameter, der über die Simulationszeit verändert werden kann, beispielsweise durch ein Ereignis
- EE** siehe Elementareffekt
- EFH** freistehendes Einfamilienhaus
- Elementareffekt** Aus den Werten der Zielfunktion berechnete Zwischengröße in der Elementareffekt-Methode, die die Veränderung der Zielfunktion bei einem veränderten Parameter repräsentiert
- EmMi-transient** Modell EmMi-transient, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde
- EMS** Energy Management System: Teil von EnergyPlus, der zur dynamischen Veränderung von Modellen während der Simulationszeit verwendet werden kann
- ENA** Eigenstromnutzungsanteil: Verhältnis der Eigennutzung des lokal im Gebäude oder Quartier erzeugten Stroms zu dem lokal erzeugten Strom
- Energiebedarf** Rechnerisch ermittelter Wert für die Energie, die benötigt wird, um ein Gebäude auf vorgegebenem Temperaturniveau zu halten
- Energieverbrauch** Messtechnisch ermittelter Wert für die verbrauchte Energie, die für den Betrieb eines Gebäudes benötigt wird; dabei wird das reale Klima und Nutzerverhalten mit berücksichtigt
- EnergyPlus** Anlagen- und Gebäudesimulationstool
- EnEV** Energieeinsparverordnung: Verordnung über Energieeffizienzanforderungen an Gebäude
- Ereignis** Definiert die Zeit und Dauer sowie den Wert einer Änderung eines dynamischen Parameters
- Ereignisparameter** Dynamischer Parameter, der durch ein Ereignis beeinflusst wird
- ESP-r** Anlagen- und Gebäudesimulationstool
- fEE** funktionaler Elementareffekt: Elementareffekt, der aus der sich durch eine Parametervariation ergebende Änderung der Koeffizienten einer funktionalen Transformation berechnet wird
- FFT** Fast Fourier Transformation: effizienter Algorithmus zur Berechnung der diskreten Fourier-Transformation
- FMI** Functional Mockup Interface: Schnittstelle zur Kopplung von Simulationswerkzeugen, die jeweils in einer FMU gekapselt sind
- FMU** Functional Mockup Unit: Gekapseltes Simulationswerkzeug, dass mittels FMI mit anderen Simulationswerkzeugen gekoppelt wird
- Fourier-Basis** Funktionsbasis des Funktionsraums der integrierbaren Funktionen, die aus einer konstanten Funktion sowie Sinus- und Cosinus-Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen aufgebaut ist
- FT** Funktionale Transformation: Darstellung einer zeitabhängigen Transformation als eine Linearkombination von Funktionen, die eine Funktionsbasis bilden

- Funktion** Abbildung  $f$ , die die Werte ihres Parametervektors  $x$  auf einen Funktionswert  $f(x)$  abbildet
- Funktionsbasis** Menge von Funktionen, die einen Funktionsraum aufspannt
- Funktionsraum** Vektorraum von Funktionen
- GAMS** General Algebraic Modeling System: Mathematisches Modellierungstool
- GAS** Im Kontext Sanierungsszenarie: Gaskessel als Heizung
- GIS** Geoinformationssystem: Räumliche Daten (siehe auch LoD0 bis LoD4) und Programme zur Anzeige und Bearbeitung dieser Daten
- Glättung** Mathematische Methode zur Verringerung der Krümmung einer Funktionskurve bei gleichzeitig möglichst guter Erhaltung der Charakteristik der ursprünglichen Funktion, siehe z.B. zentrierter gleitender Mittelwert
- Grey-box** Hybrides Modell, verwendet sowohl physikalische als auch statistische Modellierungstechniken
- Hauptkomponente** Eine Basisfunktion einer mittels Hauptkomponentenzerlegung ermittelten Funktionsbasis
- Hauptkomponentengewichtung** Koeffizienten für die Hauptkomponenten bei einer funktionalen Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung
- Hauptkomponentenzerlegung** Mathematische Methode zur Bestimmung einer Funktionsbasis bestehend aus den sog. Hauptkomponenten, die die Charakteristik von vorgegebenen Funktionen möglichst gut annähert
- IDA-ICE** Anlagen- und Gebäudesimulationstool
- iPSA** Impulsparametrische Sensitivitätsanalyse: Sensitivitätsanalysemethode zur Ermittlung des Einflusses zeitlich veränderbarer Parameter
- KGF** Konstruktionsgrundfläche: Anteil an der Brutto-Grundfläche, den die Wände besetzen
- KWK** Kraft-Wärme-Kopplung: Anlagen, die zeitgleich elektrische Energie und Wärme erzeugen
- LCA** Life Cycle Assessment: Untersuchung der Umweltwirkungen eines Gebäudes während seines Lebensweges
- LHS** Latin Hypercube Sampling: Methode zum Sampling von Parametern für Sensitivitätsanalysen
- Linearitätseigenschaft** Ein Modell  $y$  ist linear, wenn  $y(\beta \cdot \Delta u) = \beta \cdot y(\Delta u)$  gilt.
- LoD0** Level of Detail 0: beinhaltet Gebäudegrundriss und teilweise Dachumriss
- LoD1** Level of Detail 1: beinhaltet Gebäudegrundrisse als Polygone sowie mittlere Höhe als Datenfeld
- LoD2** Level of Detail 2: beinhaltet Gebäudehülle als dreidimensionale Flächen, somit ist auch Dachform enthalten
- LoD3** Level of Detail 3: beinhaltet Gebäudehülle als dreidimensionale Flächen und Fenster auf den Flächen

## Glossar

<b>LoD4</b>	Level of Detail 4: beinhaltet Gebäudehülle als dreidimensionale Flächen und Fenster auf den Flächen sowie Innenräume
<b>MARS</b>	Multivariate Adaptive Regression Splines: spezielle Regressionsmethode
<b>MATLAB</b>	Programmierungsumgebung und Simulationswerkzeug
<b>Meteonorm</b>	Software zur Erzeugung von Klimadaten
<b>MFH</b>	Mehrfamilienhaus mit 3 und mehr Wohneinheiten
<b>Mittelwert</b>	siehe zentrierter gleitender Mittelwert
<b>Modelica</b>	Objektorientierte, gleichungsbasierte Modellierungssprache
<b>MSE</b>	Mean Squared Error: mittlerer quadratischer Fehler
<b>OAT</b>	One-at-a-time: Samplingverfahren, bei dem für jedes neue Sample jeweils nur ein Parameter variiert wird
<b>PC</b>	Principal Component: siehe Hauptkomponente
<b>PCC</b>	Partial Correlation Coefficient: Korrelationskoeffizient, der den linearen Zusammenhang zwischen zwei Größen aufzeigt und als Sensitivitätsindex verwendet werden kann
<b>PCM</b>	Phase Changing Material: Phasenwechselmaterial, welches neben sensibler auch latente Wärmespeicherung nutzt
<b>PCP</b>	Parallel Coordinate Plots: Darstellungsmethoden für vieldimensionale Daten
<b>PLS</b>	Partial Least Squares: Mathematische Methode zur Approximation einer vorgegebenen Funktion durch eine lineare Regression
<b>PPD</b>	Predicted Percentage of Dissatisfied: vorhergesagter Anteil mit den thermischen Bedingungen unzufriedener Personen
<b>PRCC</b>	Partial Rank Correlation Coefficient: Rangkorrelationskoeffizient, der als Sensitivitätsindex verwendet werden kann
<b>PV</b>	Photovoltaik: Technik zur Gewinnung von elektrischer Energie aus solarer Einstrahlung
<b>RC-Modell</b>	Widerstands-Kapazitäts-Modell: Vereinfachtes Modell, in dem Wärmeleitung durch Widerstände und Wärmespeicherung durch Kapazitäten repräsentiert wird
<b>Reboundeffekt</b>	Effekt, dass Energieeinsparungen durch nachteiliges Nutzerverhalten teilweise wieder aufgehoben werden
<b>Regression</b>	Mathematische Methode zur Modellierung der Beziehungen zwischen verschiedenen Größen
<b>Relevanz</b>	Relevanz eines Modells, Verhältnis der einflussreichen Parametern zur Gesamtzahl an Parametern
<b>RH</b>	Reihenhaus
<b>RIQR</b>	Relativer Interquartils-Abstand: Statistische Größe zur Bewertung der Dynamik von Zeitreihen
<b>RMSE</b>	Root Mean Squared Error: Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
<b>Sampling</b>	Verfahren zur Erzeugung von Parameterwerten aus einem Parameterraum

<b>Sanierungsszenario</b>	Szenariodefinition, in der der Sanierungsstand der Gebäudehüllen, die Art der Beheizung und das Vorhandensein lokaler Energieerzeugungssysteme in den Gebäuden des beispielhaft untersuchten Quartiers festgelegt werden
<b>SAP</b>	Standard Assessment Procedure: Verfahren zur Energiebedarfsberechnung, vorrangig in Großbritannien verwendet
<b>Schedule</b>	Zeitplan, der in einer Simulation vorgibt, wann ein Parameter einen bestimmten Wert annimmt
<b>Screening</b>	Sensitivitätsanalyse mit dem Ziel, die wichtigsten Einflussfaktoren eines Modells zu ermitteln
<b>Shape</b>	GIS Datenformat
<b>SimplifyBuilding</b>	Werkzeug innerhalb von ArcGIS, um GIS-Gebäudeumrisse flächentreu zu vereinfachen
<b>Skalar</b>	Einzelne Zahl
<b>SRC</b>	Standardized Regression Coefficient: mittels Regression ermittelter Korrelationskoeffizient, der als Sensitivitätsindex verwendet werden kann
<b>SRCC</b>	Spearman Rank Correlation Coefficient: Rangkorrelationskoeffizient, der als Sensitivitätsindex verwendet werden kann
<b>SRRC</b>	Standardized Rank Regression Coefficient: mittels Regression ermittelter Korrelationskoeffizient, der als Sensitivitätsindex verwendet werden kann
<b>ST</b>	Solarthermie: Technik zur Gewinnung von Wärmeenergie aus solarer Einstrahlung
<b>SVM</b>	Support Vector Machine: Statistisches Verfahren zur Klassifizierung von Daten und zur Regressionsanalyse
<b>TABULA</b>	Europäische Gebäudetypologie
<b>Top-down</b>	Modellierungstechnik, bei der aggregierte Daten für den gesamten Untersuchungsraum (bspw. ein Quartier) auf einzelne Entitäten (bspw. Gebäude) verteilt werden
<b>Trajektorie</b>	Ergebnis des Samplings der Elementareffekt-Sensitivitätsanalysemethode; es ergibt sich dabei eine Abfolge von Parameteränderungen, so dass jeder Parameter in einer Trajektorie genau einmal in- oder dekrementiert wird
<b>Trajektorienpunkt</b>	Ein Punkt, der auf einer Trajektorie liegt, d.h. ein Parametervektor, der im Zuge des Samplings der Elementareffekt-Methode ermittelt wurde
<b>TRNSYS</b>	Transient System Simulation Tool: Anlagen- und Gebäudesimulationstool
<b>TRY</b>	Test Reference Year: Klimadatensatz eines Testreferenzjahres
<b>Validierung</b>	Verfahren zur logischen, empirischen oder analytischen Überprüfung eines Modells auf Korrektheit und Nachvollziehbarkeit
<b>White-box</b>	Modellierungsansatz basierend auf physikalischen Gleichungen, daher ist das Verhalten eines white-box Modells gut nachvollziehbar
<b>Zeitabhängige Funktion</b>	Funktion $f$ , deren Wert $f(p, t)$ neben ihren Parametern $p$ auch von dem Zeitpunkt $t$ abhängt

## *Glossar*

- Zeitreihe** Funktionswerte einer zeitabhängigen Funktion mit Funktionswerten  $f(p, t)$ , bei der der Zeitparameter  $t$  Werte aus einer diskreten Menge annimmt
- Zeitunabhängige Funktion** Funktion  $f$ , deren Wert  $f(p)$  nur von den Parametern  $p$  abhängt und nicht von der Zeit
- zentrierter gleitender Mittelwert** Methode zur Glättung von Zeitreihen, die für die Mittelung zu jedem Mittelungszeitpunkt eine bestimmte Anzahl an Werten davor und danach verwendet
- ZFH** freistehendes Zweifamilienhaus
- Zonierung** Unterteilung eines Gebäudes in thermische Zonen, die meist durch Bauteile voneinander getrennt sind und in denen jeweils homogene Bedingungen herrschen

**Teil VII.**

**Appendix: Modelldokumentation  
EmMi-transient**





In diesem Teil wird das energetischen Stadtmodell EmMi-transient beschrieben. Dieses Modell entstand basierend auf den in [187], [188], [191], [190] beschriebenen Vorarbeiten, Teile der Modellierungsbeschreibung wurden in [161], [160], [159], [157] und [158] vorveröffentlicht.

In Kapitel A wird auf die zur Erstellung und Parametrisierung des Modells verwendete Datengrundlage eingegangen, welche neben GIS-Daten vor allem statistische Daten sowie Gebäudetypologiedaten umfasst. Die eingesetzten Computerprogramme MATLAB, ArcGIS und EnergyPlus und die Methoden zur Datenübergabe zwischen den Programmen werden beschrieben.

In den Kapiteln B bis E wird detailliert das Vorgehen zur Erstellung der EnergyPlus-Gebäude-Modelle und deren automatisierten Parametrisierung durch die für das Quartier bekannten Daten behandelt. Dies ist unterteilt in die Modellierung der Gebäudehülle in Kapitel B, des Heizungssystems in Kapitel C, der elektrischen Systeme in Kapitel D und des Nutzerverhaltens in Kapitel E. Die für die Modellierung verwendeten EnergyPlus-Modelle werden aufgeführt und es wird auf deren Parametrisierung eingegangen. Sofern Parameterwerte dieser EnergyPlus-Modelle dem vorgegebenen Standardwert entsprechen wird nicht darauf eingegangen.

In Kapitel F wird das Vorgehen zur Berücksichtigung des Sanierungsverhaltens in Vergangenheit und Zukunft beschrieben.

In Kapitel G wird auf die Kopplungsmöglichkeiten von Gebäudesimulationen zur Abbildung von Interaktionen zwischen Gebäuden eingegangen.

Der gesamte Ablauf im Modell EmMi-transient und die damit erzielbaren Ergebnisse werden in Kapitel H beschrieben.

Eine Bewertung von EmMi-transient hinsichtlich den bereits vorhandenen Modelle wurde im Hauptteil in Abschnitt 12.3 durchgeführt.



# A. Datengrundlage

Die unabhängig vom untersuchten Quartier vorhandene und für EmMi-transient einsetzbare Datengrundlage beschränkt sich auf drei Arten von Daten:

1. GIS-Daten, die die Geometrie der Gebäude enthalten, aber in der von der Vermessungsverwaltung bereitgestellten Version keine Informationen zur Nutzungsart eines Gebäudes, dessen Alter, Sanierungsstand oder anderen Aspekten enthält.
2. Gebäudetypologiedaten, die in den hier betrachteten Datensätzen ausgehend vom Wohngebäudetyp und der Baualtersklasse Informationen zur Gebäudehülle und teilweise anlagentechnischen Systemen enthält. Diese Gebäudetypologiedaten sind allerdings eher mit Fokus auf quasi-stationäre Energiebedarfsberechnungen ausgelegt, daher sind insbesondere kaum Daten zu dynamischen Parametern wie dem Nutzerverhalten hinterlegt.
3. Statistische Daten, die Informationen zu Wohnflächen, Einwohnern u.ä. enthalten können.

In diesem Kapitel wird auf diese drei Datenarten und die dadurch gelieferten Daten genauer eingegangen. Die darüber hinaus verwendeten Daten für das Fallbeispiel werden in Abschnitt 12.4 erläutert.

## A.1. GIS Daten

Geoinformationssysteme (GIS) erlauben die Eingabe, Verarbeitung und Anzeige ortsbezogener Daten. Dies können geometrische Daten wie Punkte oder Polygone sein, aber auch damit verknüpfte semantische Daten wie das Datum der Erzeugung eines geometrischen Datensatzes. Als Standard für GIS-Daten hat sich das Format CityGML durchgesetzt, häufig kommt auch das Shape-Format zum Einsatz.

Die GIS-Daten für Gebäude unterscheiden sich nach dem Detaillreichtum, den sie nachbilden, vgl. Abbildung A.1. LoD0 Daten enthalten Gebäudegrundrisse und teilweise den Dachumriss als horizontale Fläche mit konstanter Höhe. LoD1 Daten beinhalten die Gebäudeumrisse als Polygone sowie ein Datenfeld mit der mittleren Höhe eines Gebäudes und werden daher auch als Klötzchenmodell bezeichnet. LoD2 Daten bestehen aus Flächen im dreidimensionalen Raum, die die äußere Hülle eines Gebäudes inklusive der Dachform nachbilden. Fenster sind hierbei nicht enthalten. Diese werden erst bei LoD3 Daten mit abgebildet. Bei LoD4 Daten werden auch noch die Innenräume eines Gebäudes nachgebildet. [170]

## A. Datengrundlage

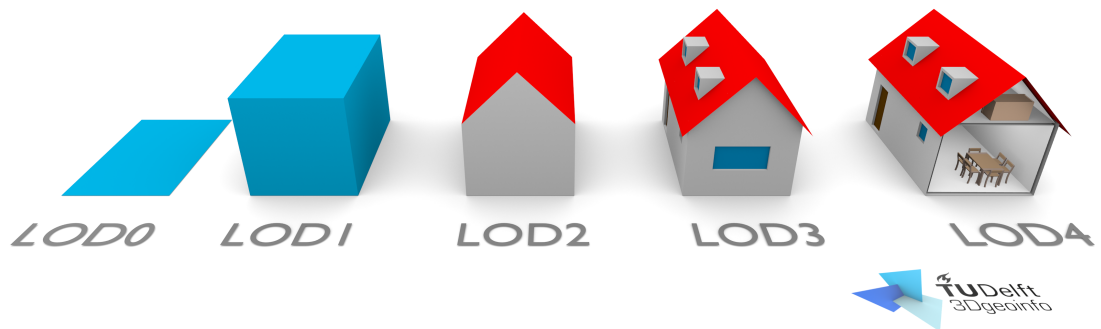


Abbildung A.1.: Darstellung der LoD0 bis LoD4, aus [16]

Tabelle A.1.: Zusätzliche GIS-Datenfelder

Feld	Beschreibung
BAK	Baualtersklasse des Gebäudes
Einheiten	Anzahl Wohneinheiten im Gebäude
WF	Wohnfläche in m <sup>2</sup> im Gebäude
EW_EINH	Durchschnittliche Anzahl Einwohner pro Wohneinheit
bm_exist	Vorhandensein eines Kellers (0 oder 1)
bm_depth	Tiefe des Kellers in m
bm_heated	Beheizung des Kellers (0 oder 1)
bldgtype	ID des Gebäudetyps aus der Gebäudetypologiedatei
rf_heated	Beheizung des Dachgeschosszone, sofern vorhanden (0 oder 1)

In dieser Arbeit werden GIS Daten des LoD1 zur Gewinnung der Gebäudeumrisse, der Position von Gebäuden und der Anbausituation, d.h. ob ein Gebäude freistehend oder ein- oder mehrseitig angebaut ist, verwendet. Hierfür gibt es in Deutschland flächendeckend Daten über die Landesvermessungsämter, für Bayern etwa in [9].

Der Aufbau von flächendeckenden LoD2 Modellen für Deutschland ist derzeit in Arbeit. In Bayern gibt es im Februar 2016 Daten in dieser Detailstufe für 52 der 96 Landkreise [151].

Aufgrund der flächendeckenden Verfügbarkeit von LoD1 Daten werden diese für die Erzeugung der Gebäude in EmMi-transient verwendet. LoD1 Daten können als Shapedatei direkt in MATLAB importiert werden. Zukünftig kann auf LoD2 Daten umgestellt werden, womit die Gebäudegeometrie und insbesondere die Dachform genauer nachgebildet wird. Dafür sind allerdings neue Importfunktionen für die Mapping-Toolbox in MATLAB erforderlich.

Die vom Vermessungsamt verfügbaren LoD1 Daten enthalten keine semantischen Informationen zum Alter eines Gebäudes, der Qualität seiner Gebäudehülle, den beheizten oder unbeheizten Flächen des Gebäudes, der Anzahl der Stockwerke, der Nutzungsart, der Anzahl der Bewohner, den verwendeten Energieträgern zur Beheizung oder der Anlagentechnik. Diese Daten müssen durch Verwendung statistischer Daten für jedes Gebäude ergänzt werden (vgl. Abschnitt A.2). Hierfür wurden in der GIS Shapedatei entsprechende Felder ergänzt, die manuell ausgefüllt werden müssen. Diese Felder sind in Tabelle A.1 aufgeführt, die verwendeten Feldnamen kommen durch die Begrenzung von 10 Zeichen im Shapeformat zustande.

Ein weiteres Problem ist die fehlende geometrische Information über das Vorhandensein von

Kellerräumen in den GIS Daten. Da die GIS Daten größtenteils durch Laserscanningverfahren ermittelt wurden können prinzipbedingt keine unterirdischen Räume erkannt werden. Als Abhilfe wurden daher drei semantische Datenfelder in der Shapedatei ergänzt, die Informationen zum Vorhandensein eines Kellers, dessen Tiefe unter der Erdoberfläche und dessen Beheizung enthalten. Diese Felder müssen manuell ausgefüllt werden, ihre Beschreibung ist in Tabelle A.1 enthalten.

GIS-Daten lassen sich auch nutzen, um statistische Daten zu erzeugen [161]. So lassen sich die Anzahl der Gebäude, ihre Orientierungen und Anbausituationen ermitteln und daraus Häufigkeiten bilden, die beispielsweise für stationäre Berechnungen mit Hilfe des in [165] vorgestellten Flächenschätzverfahrens genutzt werden können. Die Unkenntnis in GIS über die Gebäudeart und die Baualtersklasse stellen dabei ein Problem dar welches entweder durch Nutzung der statistischen Daten hierzu angegangen werden kann oder indem die Gebäudeart und Baualtersklasse manuell für die Gebäude hinzugefügt werden.

## A.2. Statistische Daten

Unter statistischen Daten werden hier solche Daten verstanden, die für eine Gruppe von Gebäuden aggregiert oder durch Stichproben ermittelt und für größere Gebäudebestände hochgerechnet wurden. Eine Aggregation kann sowohl für die Gebäude des untersuchten Quartiers als auch für wesentlich größere Gebäudebestände erfolgt sein. Idealerweise umfasst die Stichprobe der statistischen Daten genau das untersuchte Quartier. Dies ist aber meistens nicht der Fall, da keine entsprechende Datenquelle vorhanden ist. Daher müssen zumeist Daten auf regionaler oder nationaler Ebene auf das jeweils vorliegende untersuchte Quartier übertragen werden [247, S. 658]. Dies ist mit Unsicherheiten verbunden.

In jedem Fall ist eine exakte Zuweisung von Werten aus statistischen Daten zu einem einzelnen Gebäude mit dem Problem behaftet, dass man nicht weiß, ob der Wert für das jeweilige Gebäude wirklich zutreffend ist. Dieser Effekt kann durch wiederholte zufällige Zuweisung der möglichen Werte an die Gebäude und der sich dann für das Ergebnis ergebenden Verteilung quantifiziert werden, also einer Art Monte-Carlo-Simulation über die verfügbaren Daten. Oder es werden wie in dieser Arbeit Sensitivitätsanalysemethoden für die Untersuchung der Einflüsse der Parameter verwendet.

Auf Gemeinde- und Landkreisebene sind in Bayern die Daten der Wohnflächenzählung 1987 verfügbar, welche den Gebäudebestand im Jahr 1987 widerspiegeln. Darauf aufbauend sind statistische Daten zu den Baufertigstellung seit 1988 verfügbar, welche Informationen über die seit 1988 gebauten Wohngebäude enthalten. Seit 2011 werden die Daten des Zensus 2011, für Bayern unter [11] veröffentlicht, als Basis für die weitere Fortschreibung des Wohngebäudebestands verwendet. Durch die Unterschiede bei der methodischen Erfassung weisen Vergleiche dieser Daten zum Teil erhebliche Abweichungen auf. Diese Daten beinhalten Informationen über die Anzahl der Gebäude, die Wohnungen darin und die Wohnfläche sowie über die verwendete Heizungsart. [10]

## A. Datengrundlage

So sind für Bayern mit Stand 2014 gemäß [11] insgesamt 2894875 Wohngebäude mit 5838976 Wohnungen gemeldet, wovon 2380072 Gebäude eine Zentralheizung haben, 95340 per Fernwärme beheizt sind und 18103 Gebäude per Blockheizung bzw. Nahwärme beheizt sind. Etagenheizung ist in 77648 Gebäuden vorzufinden, in 296492 Gebäuden sind Einzel- oder Mehrraumheizungen, unter die auch Nachtspeicherheizungen fallen, vorzufinden. Diese beiden letztgenannten Heizungsarten werden in EmMi-transient nicht weiter betrachtet. Die restlichen 27220 Gebäude besitzen keine Heizung.

Der Bauabgang wird statistisch erfasst [13], ist allerdings nicht über die Internetseiten des Bayerischen Landesamt für Statistik abzurufen.

Bundesweit sind ähnliche Daten seitens der einzelnen Landesämter für Statistik bzw. aggregiert für Deutschland seitens des Bundesamts für Statistik verfügbar.

Angaben über die Art des Heizungssystems, aufgeschlüsselt nach Fern-, Block-, Zentral-, Etagen- oder Einzelraumheizung, und den primär verwendeten Energieträger, aufgeschlüsselt nach Öl, Gas, Strom, Fernwärme, Geothermie, Umweltthermie, Solarthermie, Holz, Biogas, Biomasse und sonstige, sind für Deutschland aggregiert [243] und für Bayern auf Regierungsbezirksebene öffentlich verfügbar [12], die entsprechenden statistischen Berichte werden jährlich aktualisiert.

Für Angaben zu bundesweit vorhandenen und neu installierten PV-Anlagen existieren u.a. Publikationen der Bundesnetzagentur [33], des Fraunhofer ISE [269] sowie von Statista [242]. Bei Statista sind auch Daten auf Länderebene verfügbar [240].

Der Bundesverband Solarwirtschaft stellt regelmäßig deutschlandweit aggregierte Daten zu Solarthermieflächen bereit [37]. In [36] sind Zahlen zum Solarthermiezubau für Bestandsmehrfamilienhäuser angegeben. In [51] sind Angaben zum Potential von Solarthermieanlagen für Gebäude mit einer Wohneinheit vorhanden, so sind in Bayern auf 19,1 % der Einfamilienhäuser Solarthermieanlagen mit einer durchschnittlichen Kollektorfläche von 8,9 m<sup>2</sup> installiert [51, Abb. 5-2].

Daten zum Sanierungsstand von Gebäuden sind nur aggregiert vorhanden, da es keine zentrale Meldestelle für durchgeführte Maßnahmen gibt. Zwar gibt es seit 2014 durch Inkrafttreten der EnEV 2014 [31] gemäß §26c eine Registrierstelle für Energieausweise [58], die vom Deutschen Institut für Bautechnik betrieben wird. Dort ist jedoch nicht vorgesehen, dass Daten von externen Einrichtungen abgefragt werden können. Außerdem sind dort nur Energieausweise zu registrieren, die ab dem 1. Mai 2014 erstellt wurden. Für interne Benutzung ist gemäß EnEV 2014 §26e (2) nur eine Auswertung von Land und Landkreis des Gebäudes zulässig.

Für Angaben zu Sanierungsquoten kann daher nur auf Publikationen wie den CO<sub>2</sub>-Gebäude-report [93] oder Studien zu möglichen Zukunftsszenarien die Sanierung betreffend wie in den Projekten „Energetische Gebäudesanierung in Deutschland“ [113] oder „Energetische Gebäudesanierung in Bayern,“ [188]) zurückgegriffen werden. Diese sind aber für einzelne

Quartiere mit den gleichen Problemen zur konkreten Zuordnung von Sanierungen zu einzelnen Gebäuden behaftet wie andere statistische Daten.

Sanierungsquoten alleine sind für energetische Modellierungen nicht ausreichend, da hierdurch keine Informationen über die Art und Qualität durchgeführter Maßnahmen bekannt sind. In den Vorarbeiten [187], [191] und [188] wurde dies durch Verwendung der Anforderungswerte in der zum Sanierungszeitpunkt jeweils gültigen Wärmeschutz- bzw. Energieeinsparverordnung abgebildet. Dadurch sind jedoch Sanierungen, die über die Mindestanforderungen hinaus gehen, nicht berücksichtigt. hierfür können die Angaben aus der TABULA Gebäudetypologie (siehe Abschnitt A.3) zu typischen Sanierungsmaßnahmen mit unterschiedlichen Effizienzniveaus verwendet werden.

Im jährlich aktualisierten dena-Gebäudereport der Deutschen Energie-Agentur GmbH [15] sind Angaben zur Häufigkeit bestimmter Sanierungsmaßnahmen wie Dämmung der Außenwand, des Dachs oder der Kellerdecke vorhanden, die für die Bestimmung des aktuellen Sanierungsstands verwendet werden können. Auch Angaben zum Energieverbrauch, der Anzahl von neu errichteten Gebäuden, Heizungsanlagen, Solarthermieanlagen und vielen weiteren Größen sind hier vorhanden, allerdings immer bundesweit aggregiert.

Für Annahmen an zukünftige Entwicklungen der für die Wohngebäudebeheizung verwendete Energieträger kann auf die Studie „Modell Deutschland“ des WWF [139] zurückgegriffen werden, in welcher mögliche Änderungen an der Energieträgerverteilung prognostiziert werden. Diese werden über Szenarien zur möglichen technischen und wirtschaftlichen Entwicklung abgeleitet.

Es können auch die Anforderungen aus dem Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) [29] Verwendung finden, um zukünftige Energieträgerszenarien zu entwickeln. Hierin ist beispielsweise festgelegt, dass in Bestandsgebäuden mindestens 15 % des Wärme- und Kälteenergiebedarfs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden muss. Gemäß dem in Baden-Württemberg erlassenen Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie (EWärmeG) [152] bedeutet dies für Solarthermieanlagen, dass bei Wohngebäuden mit höchstens zwei Wohneinheiten  $0,07 \text{ m}^2$  Kollektorfläche pro  $\text{m}^2$  Wohnfläche, bei Wohngebäuden mit mehr Wohneinheiten  $0,06 \text{ m}^2$  Kollektorfläche je  $\text{m}^2$  Wohnfläche genutzt werden müssen.

Die Studie „Grundflächen und Planungskennwerte von Wohngebäuden“ [134] beschäftigt sich mit Flächen in Wohngebäuden. Werte zum Verhältnis zwischen Konstruktionsgrundfläche und Bruttogrundfläche hieraus werden in Abschnitt B.3.4 verwendet, um die Flächen der Innenwände zu ermitteln, welche für die thermische Speicherfähigkeit wichtig sind.

Über vorhandene Daten auf städtischer Ebene oder Gemeindeebene ist keine allgemeine Aussage möglich, da hier jede Verwaltung unterschiedlich vorgeht. Sowohl die Art der vorhandenen Daten als auch die Art der Speicherung können sich unterscheiden. Generell sind



## A. Datengrundlage

jedoch, wenn überhaupt, anonymisierte und beispielsweise auf Blockebene aggregierte Daten verfügbar, da der Datenschutz gebäudebezogene Informationen behindert. Eine projektbezogene Zusammenarbeit mit einer Stadt wie es etwa im Projekt „Stadtlabor Nürnberger Weststadt“ [191] der Fall war, erleichtert den möglichen Datenbezug. Auch Kooperationen mit Stadtwerken und anderen lokalen Energieversorgern können hierzu hilfreich sein.

Im Fall der Stadt Nürnberg wurden auf Blockebene statistische Daten zu Baualtersklasse, Typ und Anzahl der Gebäude sowie Wohnfläche und Wohnungen darin zur Verfügung gestellt, diese werden in Abschnitt 12.4.2 dargestellt. Hierbei sind keine Informationen zur Art der Beheizung und den Energieträgern vorhanden. In [191, Abbildung 17] wird die Struktur der Energieträger für die Beheizung der Gebäude angegeben, etwa 30 % der Gebäude im gesamten Quartier sind an Fernwärme angeschlossen. Die Struktur der restlichen Energieträger orientiert sich an den für ganz Nürnberg vorhandenen Daten aus [10]. Ebenso wenig waren blockaggregierte Daten zu den Einwohnern verfügbar, hierzu gibt es nur Daten aus den Stadtteilen [229]. Daher ist eine Ableitung möglicher Nutzerverhalten ausgehend von der Einwohnerstruktur kaum möglich.

Öffentliche aggregierte Daten der Stadt Nürnberg zum Thema Gebäude und Wohnen sind über deren Internetseite [2] verfügbar.

Alle bisher in diesem Abschnitt beschriebenen Daten beziehen sich direkt auf Gebäude innerhalb eines örtlich eingegrenzten Bereichs. Es gibt aber auch Daten, die unabhängig von Gebäuden erfasst werden. Hierzu zählen beispielsweise Statistiken zur Bevölkerungsentwicklung [244] oder Pro-Kopf-Wohnflächenentwicklung [241] sowie die sogenannten Raumordnungsprognosen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung [228]. Diese liefern Vorhersagen zur Entwicklung der sogenannten Raumordnungsregionen. Dies kann wie in [188] genutzt werden, um Prognosen zur zukünftig erwarteten Bautätigkeit in den Regionen zu erstellen.

Auch bei diesen gebäudeunabhängigen Datenquellen besteht das Problem, Daten von größeren Maßstabsebenen auf das jeweilige betrachtete Quartier herunterzuskalieren. Verteilen der Daten auf die betrachteten Gebäude gemäß den in der Statistik vorhandenen Wahrscheinlichkeiten ist hierfür das Beste, was zu erreichen ist, sofern keine weiteren Informationen auf kleinerer Maßstabsebene zur Verfügung stehen. In Hinblick auf die Berechnung von Sensitivitäten führt dieses Vorgehen zu Abweichungen. Wenn jedoch die durch Statistikdaten ermittelten Parameter selbst Gegenstand der Sensitivitätsanalyse sind, so kann dieser Einfluss ermittelt werden und daher falls nötig zusätzlicher Aufwand für die Erfassung der entsprechenden Daten für zukünftige Untersuchungen betrieben werden.

### A.3. Gebäudetypologiedaten

Zur Bauart von Gebäuden gibt es in Deutschland und anderen Ländern Gebäudetypologien (Übersicht in [125]), die zumeist ausgehend vom Gebäudetyp und der Baualtersklasse die

typische Bauweise durch Typgebäude darstellen. Hierzu werden Angaben wie U-Werte bzw. Konstruktionsaufbauten der Bauteile Wand, Fenster, unterer und oberer Gebäudeabschluss und ggf. anderen Bauteilen hinterlegt. Auch werden typische Flächen dieser Bauteile für das jeweilige Typgebäude aufgeführt.

Beim Vergleich von den in Gebäudetypologien bereitgestellten Daten existieren Unterschiede, die durch die Art der Stichprobenermittlung, den regionalen Umfang und die Art der Auswertung auftreten. Daher können die Werte der Gebäudetypologie nur bedingt als verlässlich gelten. Aus der Tatsache, dass real jedes Gebäude eine Einzelanfertigung ist, kommt es bei der Verwendung der Gebäudetypologiedaten ebenfalls zu Abweichungen. All diese Abweichungen können mittels Sensitivitätsanalyse untersucht werden indem die Daten der Typologie als Ausgangspunkt verwendet werden und dann Variationen untersucht werden, um den Einfluss der unterschiedlichen Datenparameter zu erfassen.

Die seit 1989 vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt gepflegte und fortgeführte IWU Gebäudetypologie [164] enthält Daten zu Typgebäuden in ganz Deutschland. Diese sind unterteilt nach den Gebäudetypen Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), großes Mehrfamilienhaus (GMH) und Hochhaus (HH) sowie den Baualtersklassen vor 1918, 1919 bis 1948, 1949 bis 1957, 1968 bis 1968, 1969 bis 1978, 1979 bis 1983, 1984 bis 1994, 1995 bis 2001, ab 2002. Für die neuen Bundesländer gibt es einige Sonderfälle. Diese Baualtersklassen repräsentieren Zeitabschnitte in denen hauptsächlich die dafür aufgeführten Konstruktionsarten verwendet wurden. Die IWU Gebäudetypologie enthält Daten zur beheizten Wohnfläche, mittleren lichten Raumhöhe, beheiztem Gebäudevolumen, Anzahl Vollgeschosse, Anzahl Wohneinheiten, Fensterflächen, U-Werte und Flächen für opake Bauteile, U-Wert, g-Wert, Fläche und Einstrahlungsreduktionsfaktor für Fenster mit unterschiedlichen Orientierungen, Grundrisstyp, Anbausituation, Keller- und Dachgeschosstyp und Vorhandensein von Dachgauben.

Eng mit der IWU Gebäudetypologie verbunden sind das Flächenschätzverfahren sowie Verfahren zur pauschalen U-Wert-Ermittlung und zur Ermittlung von Pauschalwerten für die Anlagentechnik [165]. Diese Verfahren wurden für eine vereinfachte Anwendung von Energiebedarfsrechnungsmethoden nach DIN 4108-6 und DIN 4701-10/12 entwickelt, um damit durch möglichst wenige vom Nutzer zu tätige Eingaben die Generierung eines vollständigen Gebäudedatensatzes zur Energiebedarfsberechnung zu ermöglichen. Das Flächenschätzverfahren wurde mit den Daten der Gebäude, die für die Erstellung der Gebäudetypologie verwendet wurden, validiert. Das Verfahren zur pauschalen U-Wert-Ermittlung erlaubt die Berücksichtigung von nachträglichen Wärmedämmmaßnahmen.

Inzwischen ist die IWU Gebäudetypologie im Projekt TABULA bzw. EPISCOPE [245] aufgegangen. In diesem Projekt werden europaweit Gebäudetypologien erstellt, welche ebenfalls nach Gebäudetypen und Baualtersklassen aufgeschlüsselte Typgebäude enthalten. Diese Gebäudetypologien sind als Grundlage für Berechnungen mittels quasi-stationärer Energiebedarfsrechnungsmethoden gedacht. Die Grundversion der TABULA Gebäudetypologie wurde 2012 in [125] veröffentlicht und in [246] um zusätzliche Gebäude erweitert. In [126]

## A. Datengrundlage

wurden die Daten für Deutschland aktualisiert zusammengefasst. Die in der TABULA Typologie enthaltenen Daten entsprechen denen der IWU Gebäudetypologie, darüber hinaus sind aber auch noch Informationen zu Anlagentechniksystemen der Gebäude und möglichen Modernisierungsvarianten hierfür enthalten. Die Informationen zur Gebäudehülle sind detaillierter und es findet eine Bewertung der Eigenstromerzeugung durch PV und KWK statt. Weiterhin sind Angaben zur relativen Häufigkeit der jeweiligen Gebäudetypen, Baualtersklassen, Versorgungssysteme und Konstruktionstypen für ganz Deutschland angegeben.

Ein Problem bei der Verwendung der Gebäudetypologiedaten ist die dort vorzufindende Definition der Bauteilkonstruktionen über ihren U-Wert. In Gebäudesimulationen werden häufig Informationen zum genauen Schichtaufbau benötigt, die dann abgeleitet werden müssen. Mehr zum hierzu verwenden Verfahren wird in Abschnitt B.3 beschrieben.

Es gibt über die nationalen Typologien hinaus auch regionale Gebäudetypologien, teilweise für einzelne Bundesländer oder für Städte und Landkreise [164]. Diese können hilfreich sein, wenn die Struktur der Gebäude im zu untersuchenden Bereich ähnlich den Gebäuden der regionalen Typologie ist.

Eine weitere Art von Gebäudetypologie ist die vom Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. erstellte „Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen“ [276], welche Informationen zu verwendeten Materialien für die unterschiedlichen Bauteile und Baualtersklassen bis 1994 regional aufgeschlüsselt enthält. Hierbei sind insbesondere auch Schichtdicken der Konstruktionen angegeben. Allerdings ist diese Datenbank nicht vollständig.

## A.4. Klimadaten

In EmMi-transient lassen sich alle im von EnergyPlus verwendeten epw-Format vorliegenden Klimadaten zur Simulation verwenden. Dieses Format enthält u.a. Angaben zu Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Diffus- und Direktstrahlung sowie Niederschlag.

Diese Klimadaten können beispielsweise aus dem Programm Meteororm heraus erzeugt werden. Mit Meteororm lassen sich für beliebige Standorte weltweit Klimadaten erzeugen, die auf verschiedensten Datenbanken und Klimamodellen basieren. Dabei werden, sofern für einen angeforderten Standort keine Daten vorhanden sind, interpolierte Datensätze erzeugt. Die Klimadatenerzeugung kann auf Daten aus verschiedenen Zeiträumen basieren. [180]

Alternativ können auch gemessene Klimadatsätze oder die Testreferenzjahrdaten des DWD [56] verwendet werden. Gemessene Klimadaten sind insbesondere für die Validierung mit Messdaten zum Energieverbrauch notwendig, um die Randbedingungen der Messung nachvollziehen zu können.

## B. Modellierung der Gebäudehülle

Die Gebäudehülle oder auch thermische Hülle, bestehend aus Außenwänden, Fenstern sowie unterem und oberem Gebäudeabschluss, grenzt die thermisch zu regulierenden Räume von der Außenumgebung ab. Sie spielt für die im Gebäude auftretenden Wärmeströme eine entscheidende Rolle und muss daher auch in einem Gebäudemodell abgebildet werden. Die einzelnen Bauteile werden dabei über Materialschichten mit Eigenschaften wie Dicke, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit zu Konstruktionen zusammengefasst, für die die entsprechenden Kennwerte aus Gebäudetypologiedaten verwendet werden. Die Geometrie der Gebäudehülle wird aus GIS-Daten ermittelt.

Der Innenraum des Gebäudes wird in bis zu drei thermische Zonen unterteilt, in denen jeweils homogene Bedingungen herrschen: Vollgeschosszone, Dachzone und Kellerzone. Die Bauteile zwischen den Zonen, also die Böden und Decken, werden ebenfalls als Konstruktionen aus Materialschichten aufgebaut, da hier ein Wärmestrom zwischen den Zonen auftreten kann, falls die Temperaturen in den Zonen unterschiedlich sind.

Die Bauteile innerhalb einer Zone, also Decken bzw. Fußböden und Innenwände, sind für die Wärmespeicherung von Bedeutung und werden daher ebenfalls abgebildet. Allerdings ist hierbei die Geometrie irrelevant.

Durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle sowie durch Türen und Fenster findet ein Luftaustausch zwischen Innen- und Außenraum statt, dieser führt zu einem Energietransport. Daher müssen auch Werte für die Luftwechselrate definiert werden.

In den folgenden Abschnitten wird detailliert auf die Zonierung des Gebäudes, die Geometrie und Konstruktionen der Bauteile sowie die Luftwechselrate eingegangen und die Parametrisierung der für die Modellierung verwendeten EnergyPlus-Modelle beschrieben.

Zur Abbildung von Sanierungen an der Gebäudehülle ist die Möglichkeit gegeben, Schichten zu den Bauteilkonstruktionen innen oder außen hinzuzufügen oder auszutauschen bzw. die bei Fenstern U- und g-Wert anzupassen. Zum allgemeinen Vorgehen zu Sanierungen siehe Kapitel F.

### B.1. Zonierung

Jedes Gebäude wird in ein bis drei thermische Zonen unterteilt: Vollgeschosszone, Dachzone und Kellerzone, siehe Abb. B.1.

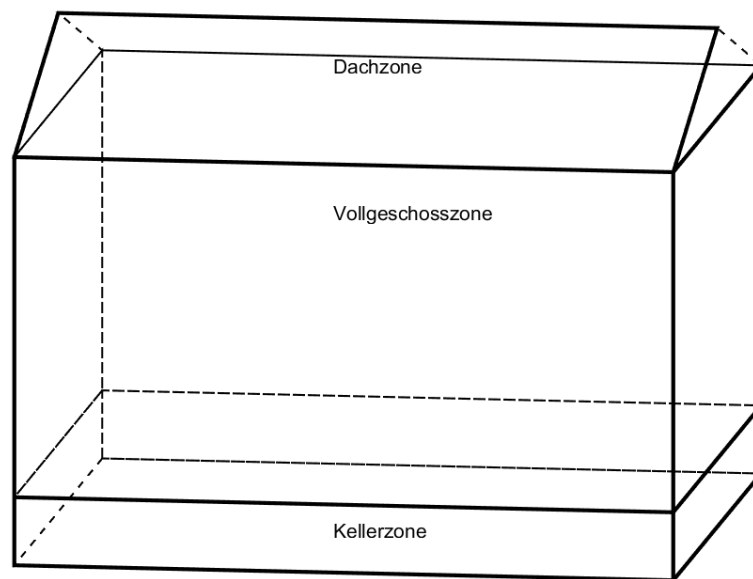


Abbildung B.1.: Zonierung der Gebäude

Die Kellerzone wird nur erzeugt wenn in den Gebäudedaten hinterlegt ist, dass ein Keller vorhanden ist. D.h. falls in dem Feld *bm\_exist* der Shapedatei für das Gebäude der Wert 1 hinterlegt ist. Dann wird das Shapedatenfeld *bm\_depth* ausgelesen, in dem die Tiefe des Kellers in Metern definiert ist. Zusätzlich wird im Feld *bm\_heated* der Shapedatei angegeben ob die Kellerzone beheizt ist oder nicht.

Die Dachzone wird immer dann erzeugt wenn kein Flachdach vorhanden ist und daher ein Steildach modelliert wird. Es kann über das Shapedateifeld *rf\_heated* angegeben werden ob die Dachzone beheizt ist oder nicht. Die Form des Daches wird aus dem Feld *DACHFORM* der Shapedatei ausgelesen.

Die Vollgeschosszone besteht aus den restlichen Geschossen, also Erdgeschoss bis oberstes Vollgeschoss. Da es bei den Berechnungen in dieser Arbeit vor allem um die Energiemengen für das gesamte Gebäude geht und nicht um thermischen Komfort in einzelnen Räumen oder Verteilung der Energiemengen auf einzelne Teile eines Gebäudes ist solch eine grobe Zonierung gerechtfertigt [212]. Ansonsten müsste eine Zonierung entweder nach Stockwerken, evtl. mit Rand- und Kernzonen, erfolgen, oder gar raumweise um detaillierte Ergebnisse für einzelne Räume zu erhalten. Allerdings wären hierfür detaillierte geometrische und baukonstruktive Daten notwendig, um eine realitätsnahe Modellierung zu ermöglichen. Insbesondere zur Modellierung von Innenräumen wären LoD4 Daten notwendig, die auf absehbare Zeit nicht verfügbar sein werden.

In EnergyPlus werden die thermischen Zonen des Gebäudes mittels der Klasse *Zone* repräsentiert.

## B.2. Geometrie

Die Geometrie der einzelnen Gebäude wird aus den LoD1 GIS-Daten ausgelesen und in die MATLAB-Struktur *BLDG.geometry* importiert.

Es sind folgende Bauteilgeometrien vorgesehen:

- Außenwand (luftberührend oder adiabatisch)
- Geschossdecke (Boden des Dachgeschosses oder Flachdach)
- Geschossboden (Kellerdecke oder Boden gegen Erdreich)
- Kellerwand (an Erdreich grenzend)
- Kellerboden (an Erdreich grenzend)
- Steildach
- Giebelaußenwand
- Fenster

Weiterhin kann die Geometrie für Verschattungselemente in der MATLAB-Struktur *shading\_site.geometry* definiert werden. Diese entsteht durch die anderen Gebäude des betrachteten Quartiers und Gebäude im Umfeld des Quartiers.

Auf die Erzeugung der Geometrie dieser Bauteile und der zu berücksichtigenden Parameter hierfür wird im Folgenden genauer eingegangen.

In EnergyPlus kommen für die Abbildung der mit Außenluft bzw. Erdreich in Kontakt stehenden Bauteile die Modelle *Wall:Detailed*, *RoofCeiling:Detailed*, *Floor:Detailed* und *Window* zum Einsatz. Für die internen Bauteile wie Innenwände und Decken innerhalb einer Zone wird das Modell *InternalMass* verwendet.

In [161] wurde für die Erzeugung der Gebäudegeometrie ein Verfahren eingeführt, welches das Flächenschätzverfahren zusammen mit aus GIS-Daten errechneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Anbausituation, Dachform und Orientierung nutzt. Hierbei wurde die Gebäudegrundfläche als quadratisch angenommen, die gegenseitige Verschattung von Gebäuden konnte nicht berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wird in EmMi-transient daher nicht mehr verwendet.

Eine Übersicht der Bauteile bei Gebäuden mit Steildach findet sich in Abb. B.2, bei Gebäuden mit Flachdach in Abb. B.3.

## B. Modellierung der Gebäudehülle

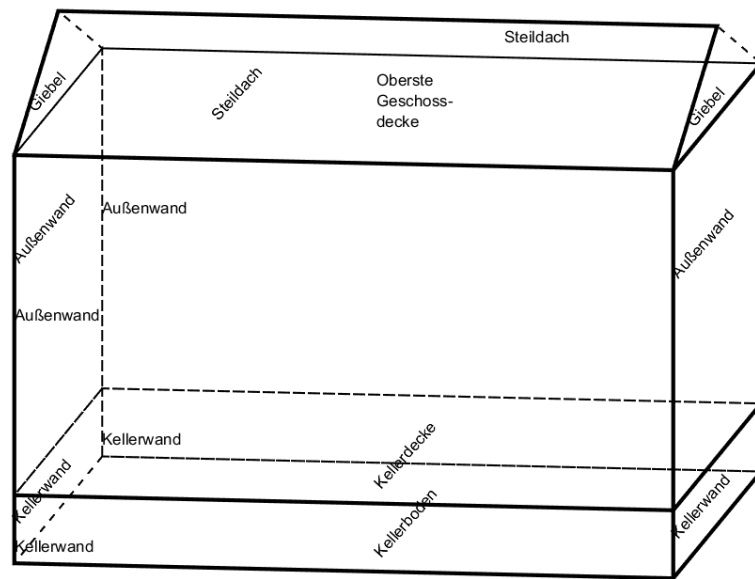


Abbildung B.2.: Übersicht der Bauteile bei Gebäuden mit Steildach

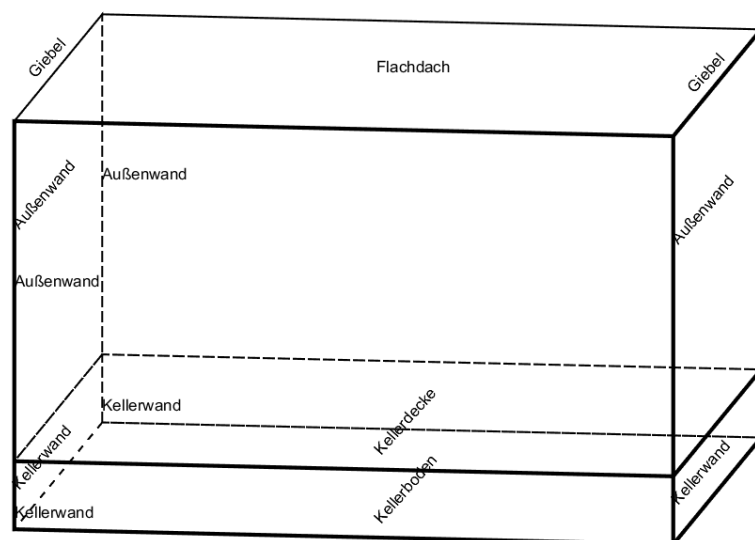


Abbildung B.3.: Übersicht der Bauteile bei Gebäuden mit Flachdach

### B.2.1. Höhe des Gebäudes

Sowohl die Höhe eines Gebäudes über Normalnull als auch die Höhe des Gebäudes selbst sind relevant. Die Höhe über Normalnull wird in EmMi-transient nur durch die Wetterdaten berücksichtigt, innerhalb des Quartiers sind alle Gebäude auf einer Ebene lokalisiert.

Zur Bestimmung der Höhe des Gebäudes wird der im Feld HOHEGEB der GIS-Daten hinterlegte Wert ausgelesen. Dieser ist in den verwendeten LoD1-Daten ein Medianwert, der aus Laserscanningdaten des Gebäudes ermittelt wurde [149]. Bei einem Flachdach ohne weitere Dachaufbauten entspricht dies also der realen Höhe des Gebäudes. Bei Gebäuden mit Steildach lässt sich nur ungefähr auf die reale Trauf- und Giebelhöhe eines Gebäudes schließen. Hierzu wird in Abhängigkeit von der in der Typgebäudebeschreibung hinterlegten Dachneigung, welche standardmäßig auf  $35^\circ$  gesetzt ist, die Höhe des Dachstuhls ermittelt. Die Traufhöhe wird durch Subtraktion der Hälfte diesen Werts von der GIS-Höhe ermittelt. Für eine genauere Bestimmung der Gebäudehöhe ist die Datengrundlage nicht ausreichend, v.a. da laut [150] die Dachhöhe in den GIS-Daten Abweichungen von bis zu 5 m, bei komplexen Dachgeometrien auch mehr, haben kann. Dies gilt für per Laserscanning ermittelte Dachhöhen. Falls solche Daten für die Erstellung des LoD1 Modells nicht vorhanden waren, wird die Höhe der Gebäude aus der Anzahl der Stockwerke und einer geschätzten Geschösshöhe von 3,5 m berechnet, falls auch die Anzahl der Geschosse nicht bekannt ist wird für Gebäude mit einer Grundfläche von weniger als  $25 \text{ m}^2$  eine Höhe von 3 m, ansonsten von 9 m angenommen. Abhilfe könnte hier zukünftig die Verwendung von LoD2 Daten schaffen, wobei auch hier die Unsicherheiten bei der Erstellung des GIS-Modells beachtet werden müssen.

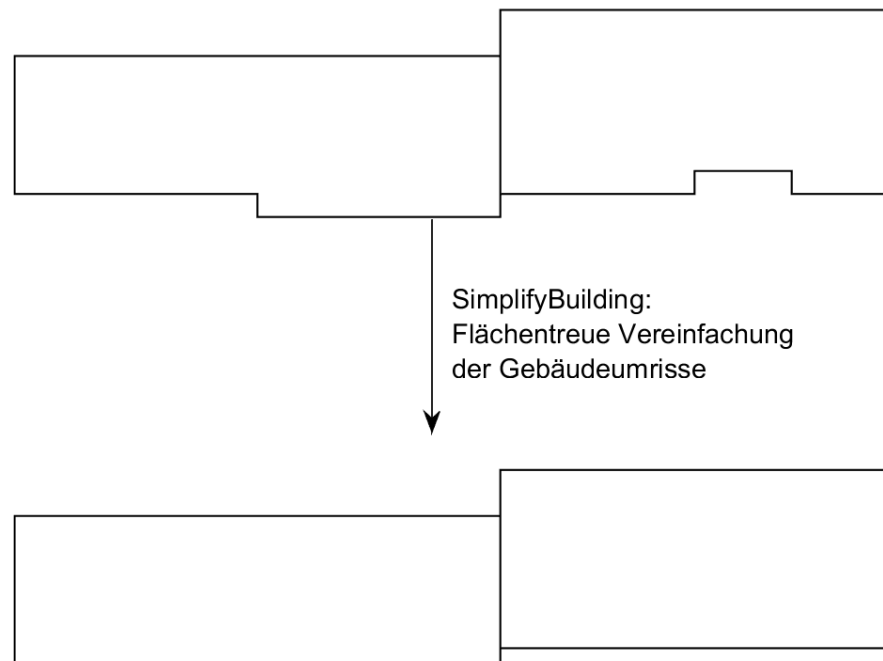
### B.2.2. Außenwand

Für die Erzeugung der Außenwandgeometrie wird das Umrisspolygon eines Gebäudes aus der Shapedatei geladen sowie die einzelnen Linien, die das Polygon formen. Für jede dieser Linien ist in der Shapedatei hinterlegt, ob sie adiabatisch ist (vgl. Abschnitt B.2.2.2). Für jede Außenwand wird der nach außen gerichtete Normalenvektor berechnet, mittels dessen die Orientierung der Wandfläche bestimmt wird.

Die oberirdischen Außenwände eines Gebäudes werden erzeugt, indem für jede der Umrisslinien die Eckpunkte eines Polygons erzeugt werden. Diese entsprechen unten den Endpunkten der Umrisslinie und werden nach oben hin gemäß der Höhe des Gebäudes verschoben. Dabei ist zu beachten, dass die Polygoneckpunkte in der von EnergyPlus vorgesehene Reihenfolge angelegt werden damit der Normalenvektor der resultierenden Wandfläche nach außen zeigt.

Die unterirdischen Außenwände der Kellerzone, sofern diese vorhanden ist, werden analog erzeugt, allerdings mit den oberen Eckpunkten auf Oberflächenniveau und den unteren





**Abbildung B.4.:** Schematische Darstellung der flächentreuen Vereinfachung der Gebäudeumrisse durch *SimplifyBuilding*

Eckpunkten in der Tiefe, die für den Keller definiert ist. Die Kellerwände sind nicht mit der Außenluft in Wärmeaustausch sondern mit dem Erdreich. Die Erdreichtemperatur ist konstant für alle Monate des Jahres mit  $10\text{ °C}$  über das EnergyPlus Modell *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* definiert. Hier könnte zukünftig auch das in DIN EN ISO 13370 [74] definierte Verfahren verwendet werden und die monatlichen Erdreichtemperaturen entsprechend angepasst werden.

### B.2.2.1. Geometrievereinfachungen

Die Gebäudeumrisspolygone der GIS-Daten sind zum Teil sehr detailliert, es werden Vor- und Rücksprünge am Gebäude abgebildet. Um die Anzahl der Bauteile für ein Gebäude nicht zu groß werden zu lassen, wurden die GIS Daten vor der weiteren Verarbeitung in EmMi-transient mittels des Moduls *SimplifyBuilding* [85] in ArcGIS vereinfacht, siehe Abb. B.4. Dieses Modul vereinfacht komplexe Gebäudeumrisse zu rechteckigen Polygonen mit möglichst wenigen Ecken, die Gesamtfläche wird dabei erhalten. Dadurch lässt sich auch die Erzeugung von Dachflächen wesentlich vereinfachen, das Vorgehen hierfür wird in Abschnitt B.2.5 beschrieben.

Das *SimplifyBuilding*-Modul entfernt Gebäudeumrisse, die eine Grundfläche haben, die kleiner als ein vorgegebener Wert ist. Hierfür wurden  $25\text{ m}^2$  angegeben. Der Toleranzwert des

Moduls wurde auf 1 m festgesetzt. Dieser besagt, dass Polygonseiten mit einer Länge kleiner dem Toleranzwert vereinfacht werden.

Das *SimplifyBuilding*-Modul wird auch zur Vereinfachung der Geometrie der Nachbarsgebäude eingesetzt, die nur als Verschattungsflächen berücksichtigt werden. Hierfür wurden ebenfalls Gebäude mit einer Grundfläche kleiner als 25 m<sup>2</sup> entfernt, der Toleranzwert des Moduls wurde auf 15 m festgesetzt. Dieser hohe Toleranzwert ist für eine Berücksichtigung der Verschattungsflächen ausreichend und hilft, die Anzahl der Verschattungsflächen klein zu halten.

Die Geometrievereinfachungen haben nicht nur Auswirkungen auf die Anzahl der Wände eines Gebäudes sondern auch auf die Geometrie der Geschossdecken, des Daches und des Kellers. Der Einfluss dieser Vereinfachung kann mittels Sensitivitätsanalyse untersucht werden, hierbei wäre ein diskreter Parameter zu definieren, der entweder eine Anwendung der Vereinfachung repräsentiert oder die detaillierte Geometrie verwenden lässt.

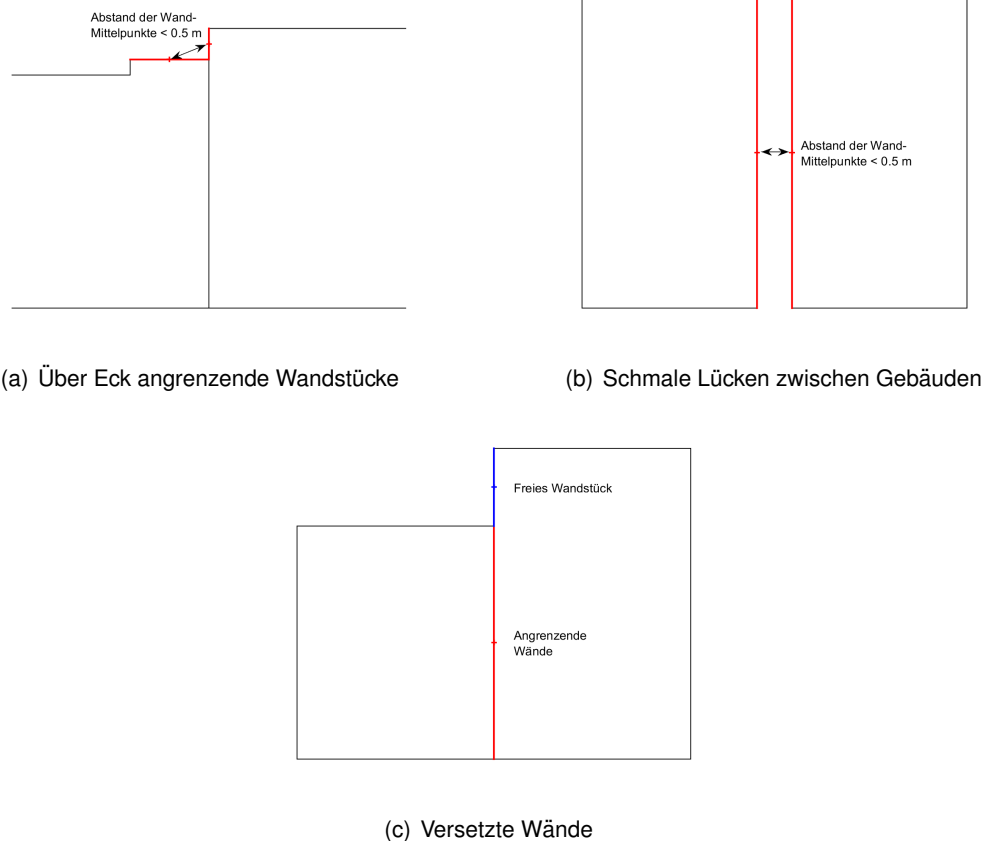
### B.2.2.2. Erkennung angrenzender Wände

Einen großen Einfluss auf den Heizenergiebedarf eines Gebäudes hat seine Anbausituation, d.h. ob das Gebäude freistehend ist oder an einer oder mehreren Wänden an andere Gebäude angrenzt. Die GIS-Daten können genutzt werden, um die Anbausituation von Gebäuden zu ermitteln. Hierfür wurde für ArcGIS das Python-Modul *neighboring\_lines* erstellt, welches für jede Außenwand prüft, ob diese an andere Gebäude angrenzt. Dabei wird zuerst der Mittelpunkt der die Außenwand repräsentierenden Linie ermittelt. Anschließend wird die Distanz diesen Mittelpunkts zu den Mittelpunkte aller anderen Gebäudeumrisslinien ermittelt. Ist der Abstand kleiner als 0,5 m, so wird die Wand als adiabatisch eingestuft. Der Wert von 0,5 m wurde gewählt, da es durch die oben beschriebene flächentreue Geometrievereinfachung passieren kann, dass Lücken zwischen Gebäuden entstehen.

Prinzipiell könnte es zwar sein, dass zwei sehr kurze, über Eck angrenzende Wandlinien wie die rot markierten Wandstücke in Abbildung B.5(a) dadurch als adiabatisch eingestuft werden, aber in diesem Fall ist die Auswirkung auf Grund der geringen Wandfläche vernachlässigbar. Außerdem könnte dies durch Überprüfung der Richtungen, in den die Wandlinien zeigen, verhindert werden. Weiterhin könnte eine schmale Lücke zwischen zwei Gebäuden wie bei den rot markierten Wandstücken in Abbildung B.5(b) hierdurch ignoriert werden, allerdings sind in der Praxis solch schmale Lücken sehr selten. Das Nichterkennen zweier unterschiedlich langer, versetzter Wände wie in Abbildung B.5(c) als angrenzend wird dadurch verhindert, dass die Wände im Zuge der Erstellung der Linien aus den Polygonen auch an Berührungspunkten zweier Gebäude unterbrochen werden.

Ist eine Wand als angrenzend und damit adiabatisch eingestuft, so wird diese für die Transmissionswärmeverluste nicht berücksichtigt. Dies erfolgt im EnergyPlus-Modell *Wall:Detailed* durch setzen des Parameters *Outside Boundary Condition* auf den Wert *Adiabatic*. Auf solch

## B. Modellierung der Gebäudehülle



**Abbildung B.5.: Mögliche Problemfälle bei der Erkennung angrenzender Wände**

einer Wand werden auch keine Fenster modelliert. Für die Wärmespeicherung wird die Wand normal berücksichtigt.

### B.2.3. Kellerboden und -decke

Der Kellerboden wird gemäß den vorhandenen Gebäudeumrissen in der in den GIS-Daten angegebenen Tiefe unterhalb der Erdoberfläche erzeugt und ist wie die Kellerwände mit Erdreich in Wärmeaustausch. Die Kellerdecke, welche zugleich der Boden der Vollgeschosszone ist, wird auf Höhe 0 m erzeugt.

### B.2.4. Geschossboden und -decke

Hiermit sind die Decke und der Boden der Vollgeschosszone gemeint.

Der Boden der Vollgeschosse wird gemäß des vorhandenen Grundrisses auf Höhe 0 m erzeugt. Falls ein Keller vorhanden ist, so entspricht dies auch gleichzeitig der Kellerdecke. Ansonsten ist der Boden als erdberührendes Bauteil modelliert.

Im Fall eines Flachdachs ist die oberste Geschossdecke der obere Gebäudeabschluss und wird durch Anheben des Gebäudeumrisses auf die in der Shapedatei definierte Höhe des Gebäudes definiert.

Im Fall eines Steildachs ist die oberste Geschossdecke das verbindende Bauteil zwischen Dachgeschoss und den darunter liegenden Vollgeschossen. Die Geometrie der obersten Geschossdecken wird analog wie beim Flachdach erzeugt, es wird aber eine andere Konstruktion hinterlegt. Das Steildach ist in diesem Fall der obere Gebäudeabschluss.

Für die Erzeugung der Steildachgeometrie müssen unterschiedliche Fälle unterschieden werden, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

### B.2.5. Steildach

Derzeit sind in EmMi-transient Algorithmen zur Erzeugung von Satteldach- und Pultdachgeometrien vorhanden, die aus [153] übernommen wurden.

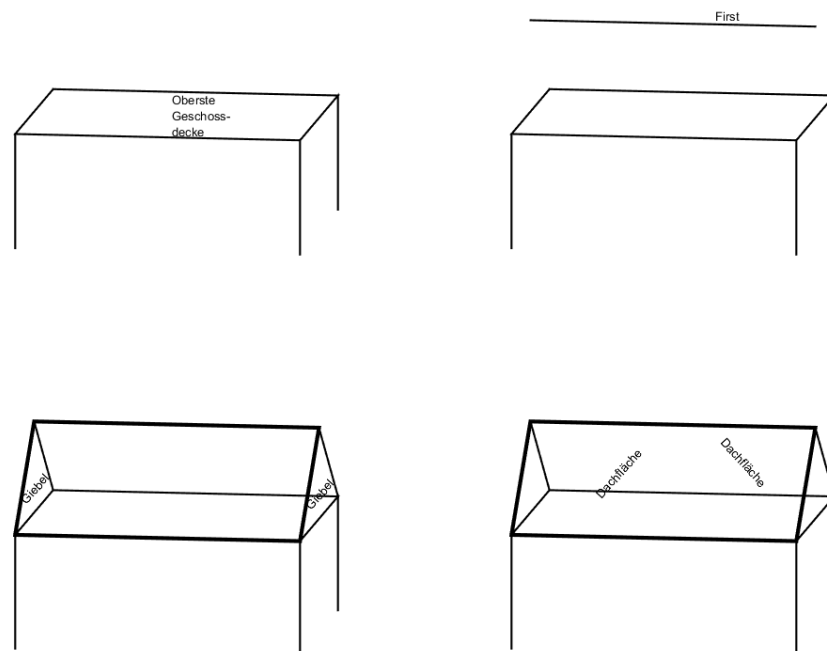
Bei einem rechteckigen Grundriss mit Satteldach wird der First parallel zur langen Seite des Gebäudes erzeugt, die Neigung des Dachs wird gemäß [162] mit  $35^\circ$  angenommen, kann aber für jeden Gebäudetyp individuell eingestellt werden, siehe Abbildung B.6. Bei rechteckigen Reihenendhäusern mit Satteldach wird das Dach so erzeugt, dass der First orthogonal von der angebauten Wand verläuft und dementsprechend die gegenüberliegende Wand einen Giebel besitzt. Der Giebel auf der angebauten Seite wird als adiabate Wandfläche angelegt.

Bei einem zweiseitig angebauten Gebäude mit sechs Ecken und entsprechend sechs Außenwandflächen wird ein Ecksatteldach wie in Abbildung B.7 erzeugt. Der Ablauf für solch ein Eckhaus mit zwei angebauten Seiten ist wie folgt:

1. Berechnung der Mittelpunkte der adiabaten Wände
2. Erzeugung der Giebeldreiecke an den beiden angebauten Seiten, dabei wird die Höhe standardmäßig für eine Neigung von  $35^\circ$  bestimmt, dies kann durch die Gebäudetypologie geändert werden.
3. Berechnung der Richtungsvektoren der beiden Giebel ausgehend von den Mittelpunkten der adiabaten Seiten
4. Berechnung des Schnittpunkts der beiden Giebelrichtungsvektoren
5. Erzeugung einer Liste der Umrisspunkte des Dachs, d.h. Eckpunkte und Giebelpunkte
6. Erzeugung der Dachflächen

Bei einem Gebäude mit Pultdach, vier Außenwandflächen und einer langen, adiabaten Wand wird davon ausgegangen, dass der First des Pultdachs an dieser angebauten Seite des Gebäudes verläuft. Daher werden an den beiden kurzen Seiten Giebeldreiecke hinzugefügt, an der langen, adiabaten Wand eine Wandfläche bis zum First hinauf eingefügt und dann die Dachfläche erzeugt, siehe Abbildung B.8.

## B. Modellierung der Gebäudehülle



**Abbildung B.6.: Erzeugung der Satteldachgeometrie bei rechteckigem Grundriss**

Bei anderen Konfigurationen, z.B. einem Reihendhaus mit sechs Gebäudeecken und Vorhandenseins eines nach außen ragenden Treppenhauses wie in Abb. B.9, wird derzeit davon ausgegangen, dass ein Flachdach vorhanden ist, da die Geometrieerzeugung hier sehr komplex werden kann. Es wird in solchen Fällen also ein in der Realität vorhandener Dachraum in der Modellierung nicht berücksichtigt. Aber da durch das Flachdach die GIS-Höhe des Gebäudes verwendet wird, ist das beheizte Gebäudevolumen des Modells größer als im realen Gebäude und damit der ermittelte Energiebedarf auch größer und somit auf der sicheren Seite.

Für jede Dachfläche wird der nach außen gerichtete, auf die horizontale Ebene projizierte Normalenvektor berechnet, mittels dessen die Orientierung der Dachfläche bestimmt wird.

Dachgauben, Schornsteine oder sonstige Aufbauten auf dem Dach werden nicht berücksichtigt. Hierfür wären detaillierte Geometriedaten wünschenswert, bei denen aber beispielsweise auch Informationen zu den entsprechenden Bauteilaufbauten der Gauben notwendig wären.

Aufgrund von Rundungsfehlern bzw. nicht für die soeben beschriebenen Algorithmen angepasste Daten in GIS kommt es vor, dass die Dachflächen nicht planar sind. Die Abweichungen sind allerdings in dem im Fallbeispiel untersuchten Quartier so gering, dass keine Änderungen am Algorithmus vorgenommen wurden.

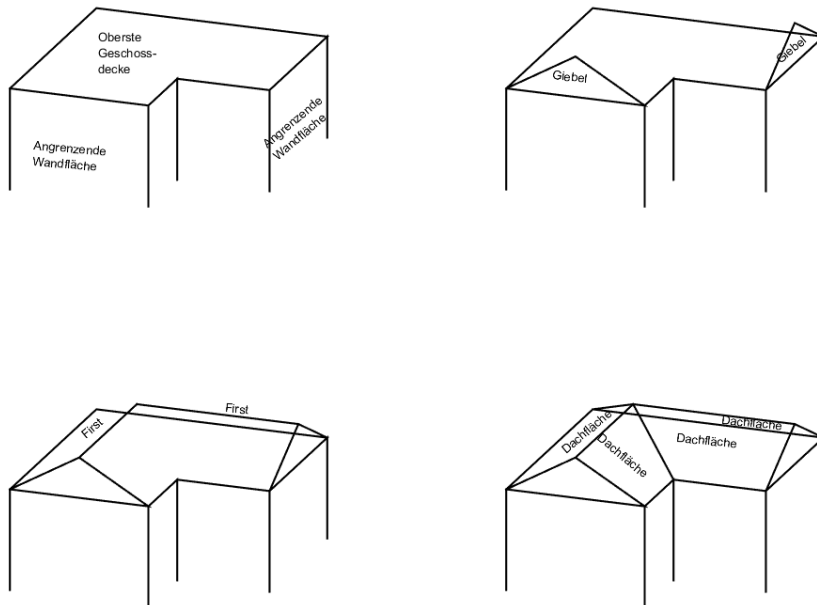


Abbildung B.7.: Erzeugung der Satteldachgeometrie bei Gebäude mit sechs Ecken und zwei angebauten Seiten

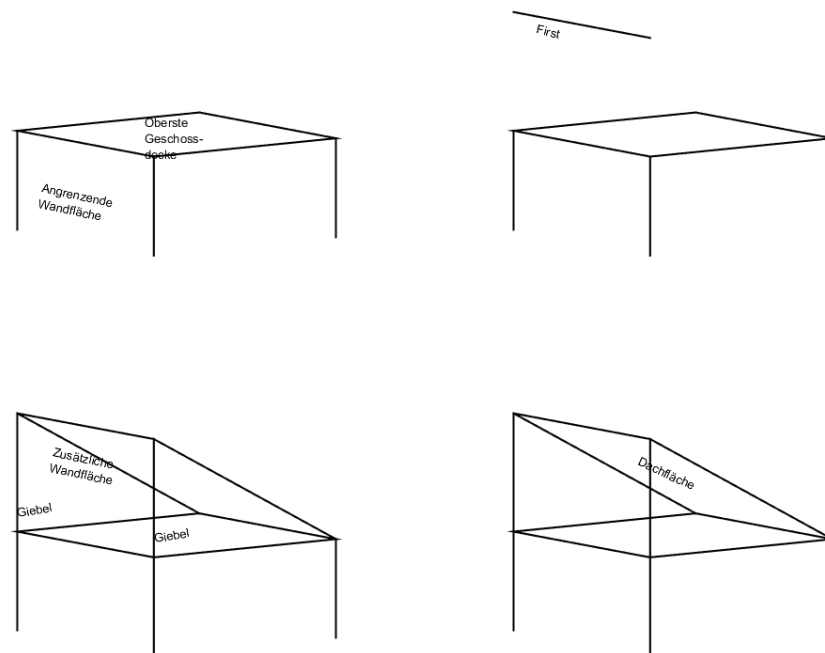
### B.2.6. Fenster

Auf Grund der in den LoD1 Daten nicht vorhandenen Informationen über die Position und Größe von Fenstern werden die Fensterflächen vereinfacht durch Verwendung eines Fensterflächenanteils erzeugt. Dieser Fensterflächenanteil kann für jeden Gebäudetyp einzeln angepasst werden, standardmäßig ist er auf 20 % eingestellt. Für jede nicht-adiabate Wand wird dieser Anteil der Wandfläche als Fensterfläche definiert. Die Fensterfläche wird als ein großes Fenster, welches über alle Vollgeschosse des Gebäudes geht, modelliert, siehe Abb. B.10. Hierzu wird die Höhe des Fensters auf 90 % der Wandhöhe festgelegt. Die Breite ergibt sich durch den vorgegebenen Fensterflächenanteil automatisch.

Dies ist auf Grund der Modellierung der Vollgeschosse als eine Zone ausreichend, da somit die solaren Gewinne immer in dieser Zone bilanziert werden. Bei Unterteilung der Vollgeschoszone in mehrere Zonen wäre zu untersuchen, wie groß der Einfluss solch über die ganze Wandhöhe verteilter Fenster im Vergleich zu einzelnen Fenstern in jedem Stockwerk ist. Eine nicht weiter betrachtete Unsicherheit ist die Position des Fensters auf der Fassade, dies könnte aufgrund der unterschiedlichen Verschattung durch Nachbargebäude einen Einfluss haben.

Auf eine Anpassung des Fensterflächenanteils je nach Wandorientierung wird derzeit verzichtet. Dies könnte aber mittels der in TABULA vorhandenen Fensterflächen für die unter-

## B. Modellierung der Gebäudehülle



**Abbildung B.8.: Erzeugung der Pultdachgeometrie bei rechteckigem, an langer Seite angebautem Gebäude**

schiedlich orientierten Wände hinzugefügt werden.

### B.2.7. Verschattung

Die gegenseitige Verschattung von Gebäuden spielt sowohl für die solaren Gewinne als auch die Energiegewinnung durch Solarthermie oder PV eine Rolle. Daher kann die Verschattung sowohl der Gebäude im simulierten Quartier als auch durch Gebäude in der Umgebung berücksichtigt werden. Prinzipiell könnte auch Verschattung durch Bäume oder sonstige Objekte berücksichtigt werden, sofern diese in den entsprechenden Shapedateien definiert sind oder manuell definiert werden.

Für die Verschattung eines Gebäudes durch die anderen Gebäude im Quartier werden deren Außenwände als Verschattungselemente im jeweiligen EnergyPlus-Gebäudemodell über Modelle vom Typ *Shading:Site:Detailed* hinterlegt. Die geometrischen Informationen sind im GIS bereits vorhanden, da für diese Gebäude auch Modelle erstellt werden.

Für die Gebäude in der Umgebung des Quartiers müssen zwei Shapedateien mit den Gebäudeumrissen (*Nachbargebaeude SimplifyBuilding.shp*) und den Umrisslinien (*Nachbargebaeude SimplifyBuilding Lines.shp*) der benachbarten Gebäude zur Verfügung gestellt

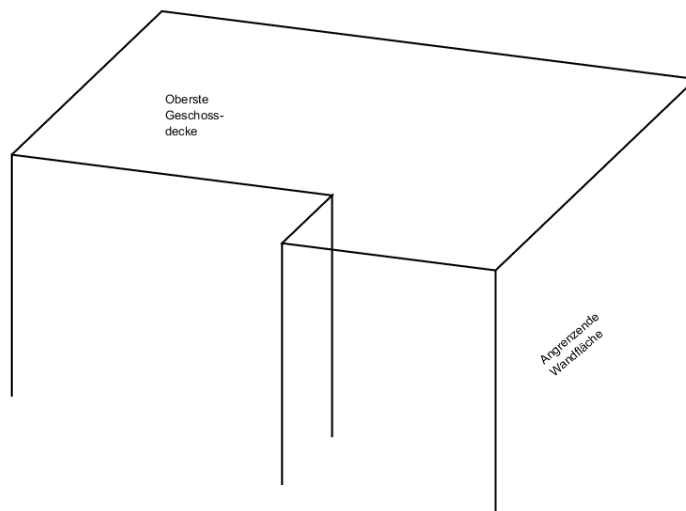


Abbildung B.9.: Reihenendhaus mit einer angrenzenden Wand und nach außen ragendem Treppenhaus

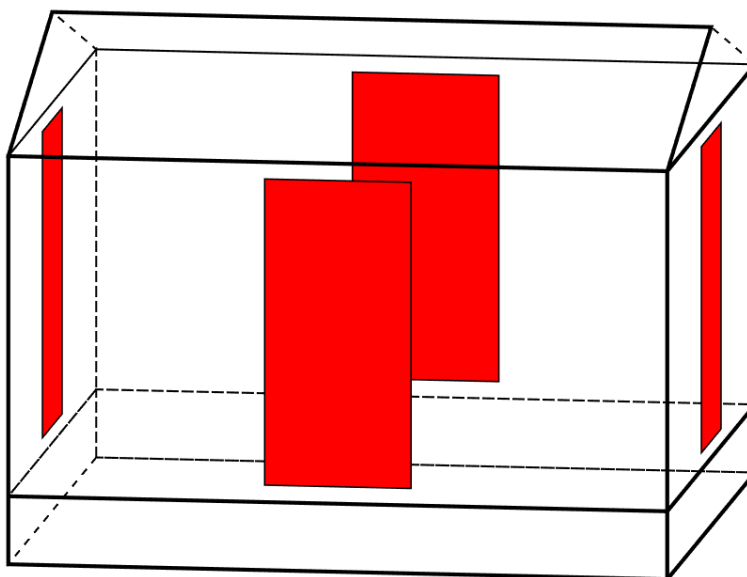


Abbildung B.10.: Fensterflächen bei freistehendem Gebäude mit 20 % Fensterflächenanteil



## B. Modellierung der Gebäudehülle

werden. Diese werden berücksichtigt, falls der Parameter *SHADING.BY\_NEIGHORBUILDINGS* den Wert 1 hat. Dabei werden Außenwände mit einer Fläche von weniger als 1 m<sup>2</sup> ignoriert, da ansonsten Probleme im EnergyPlus Modell entstehen und sich die Rechenzeit verlängert. Meistens sind dies Flächen, die durch die Zerlegung der Polygone in GIS mittels Feature to Line entstehen. Die entsprechenden Linien sind extrem kurz, meist nur wenige Zentimeter, und spielen dementsprechend für die Verschattung kaum eine Rolle.

### B.3. Konstruktionen

Die opaken Bauteile, also Wand, Boden, Decke und Dach, sind aus Materialschichten aufgebaut, welche jeweils die Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmespeicherfähigkeit, Dichte und Dicke benötigen. In EnergyPlus werden die Materialien durch Klassen vom Typ *Material* repräsentiert, die Bauteile werden durch Klassen vom Typ *Construction* repräsentiert. Eine Herausforderung für die Konstruktionserstellung besteht, wenn nur U-Werte eines Bauteils bekannt sind, aber nicht der Schichtaufbau, so wie es in der verwendeten TABULA Gebäudetypologie der Fall ist. Dann müssen zusätzliche Annahmen an Dicke oder  $\lambda$ -Wert getroffen werden, um einen sinnvollen Schichtaufbau modellieren zu können.

Fenster werden durch das EnergyPlus-Fenstermodell *Window* mit vereinfachtem Materialmodell *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*, welches nur den U- und g-Wert benötigt, abgebildet.

Auf die Details der Parametrisierung der Konstruktionen wird im Folgenden genauer eingegangen.

#### B.3.1. Außenwand

In EmMi-transient wird jede Außenwand aus Materialschichten erstellt, die über die oben bereits beschriebenen, für den Wärmetransport wichtigen Eigenschaften hinaus noch die Informationen benötigen, ob die Schicht zum Tragwerk gehört und daher bei Sanierungen nicht verändert wird, oder ob es sich dabei um Dämmung handelt, die ausgetauscht werden kann. All diese Informationen werden in der Gebäudetypologiedatei definiert und können daher vom Benutzer verändert werden. EmMi-transient ist auf Verwendung der Werte aus der TABULA Gebäudetypologie hin ausgelegt, aber wenn andere Datenquellen die benötigten Parameter liefern lassen sich diese ebenso verwenden.

Für die Tragwerksmaterialien wie Mauerwerk oder Beton ist die Dicke festzulegen, hier werden standardmäßig 30 cm vorgegeben. Bei nur einer Schicht im Falle ungedämmter Gebäude kann der  $\lambda$ -Wert gemäß der U-Wert-Formel

$$U = \frac{1}{\frac{1}{R_{si}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{R_{se}}} \quad (\text{B.1})$$

Tabelle B.1.: Spezifische Wärmespeicherfähigkeit und Dichte diverser Materialien

Material	spezifische Wärmespeicherfähigkeit in J/(kgK)	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
Beton	1000	1800 - 2400
Polyurethanschaum (PU)	1500	70
Polyethylenschaum	2300	70
Gipsputz	1000	1000
Putz (Kalk, Sand)	1000	1600
Kalkstein	1000	1600-2600
Dachziegelsteine (Ton)	800	2000
Dachziegelsteine (Beton)	1000	2100
Mineralwolle	1030	10-200
Vollziegel (gebrannter Ton)	1000	1000-2400
Kalksandstein	1000	900-2200
Holzfaserdämmplatten	2000	40-250

aus dem U-Wert, den Wärmeübergangswiderständen  $R_{si}$  und  $R_{se}$  und der Dicke  $d$  ermittelt werden.  $R_{si}$  und  $R_{se}$  sind einstellbar und standardmäßig auf 0,13 m<sup>2</sup>K/W und 0,04 m<sup>2</sup>K/W gemäß DIN EN ISO 6946 [75] gesetzt. Bei diesem Vorgehen werden normalerweise in der Realität vorhandene Putzschichten ignoriert.

Für gedämmte Außenwände ist die Vorgabe von  $\lambda$ -Werten und Dicken für alle Schichten in der Gebäudetypologiedatei notwendig. Im Falle der Sanierung einer Außenwand wird bei ungedämmten Außenwänden die Dämmung auf der Außenseite angebracht, prinzipiell wäre aber auch die Anbringung einer Innendämmung abbildbar. Bei gedämmten Außenwänden kann entweder die Dämmung ausgetauscht werden, beispielsweise durch Material mit geringerem  $\lambda$ -Wert, oder es kann eine zusätzliche Dämmschicht aufgebracht werden. Kriterien, ob und wann solch eine mehrfache Dämmschicht sinnvoll ist, müssen zukünftig definiert werden.

Die spezifische Wärmespeicherfähigkeit muss zusammen mit der Dichte angegeben werden. In Tabelle B.1 sind entsprechende Daten aus [63, Tabelle 3 und 4] aufgeführt. Da die spezifische Wärmespeicherfähigkeit für die meisten Baustoffe bei 1000 J/(kg K), für Dämmstoffe zwischen 1300 und 2000 J/(kg K) liegt, wird vereinfachend für alle Nichtdämmmaterialien ein Wert von 1000 J/(kg K) angenommen und für Dämmstoffe 1500 J/(kg K). Die Dichte wird standardmäßig für Dämmmaterialien auf 70 kg/m<sup>3</sup>, für Betonkonstruktionen auf 2000 kg/m<sup>3</sup> und für Mauerwerkswandkonstruktionen ebenfalls auf 2000 kg/m<sup>3</sup> gesetzt. Dies kann für alle Gebäudetypen individuell angepasst werden.

Zur Berücksichtigung von Wärmebrückeneffekten kann bei stationären Berechnungen ein Zuschlag auf den U-Wert aller Bauteile der Gebäudehülle verwendet werden [59]. Dieses Verfahren ist auch in EmMi-transient verwendbar, allerdings muss auf Grund der Notwendigkeit der Angabe von Dicke und Wärmeleitfähigkeit anstelle des U-Werts eine Umrechnung erfolgen. Für Bauteile, die nur aus einer Schicht bestehen, lässt sich die entsprechend angepasste Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei fester Dicke der Schicht mittels Formel B.1 berechnen. Bei mehrschichtigen Bauteilen wäre ein Algorithmus denkbar, der den U-Wert der aus Schichten aufgebauten Konstruktion als Eingabe bekommt und diesen um den pauschalen Zuschlag

## B. Modellierung der Gebäudehülle

erhöht um dann mittels U-Wert-Formel modifizierte Dicken oder Wärmeleitfähigkeiten der Schichten zu berechnen. Hierbei muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, welche Parameter konstant gehalten werden und welcher Parameter verändert wird. Also ob beispielsweise nur der  $\lambda$ -Wert der Dämmung entsprechend angepasst wird und die anderen Größen konstant bleiben. Auf Grund der nicht vorhandenen Entscheidungsgrundlage hierfür wird die Berücksichtigung der U-Wert-Zuschläge derzeit dem Nutzer überlassen, dieser muss die Werte in der Gebäudetypologiedatei entsprechend eintragen.

### B.3.2. Unterer Gebäudeabschluss

Die Böden der thermischen Zonen werden wie Außenwände aus Schichten aufgebaut, allerdings gibt es hierbei Besonderheiten bzgl. den Möglichkeiten bei Sanierungen. So kann der Kellerboden eines beheizten Kellers nachträglich nur oberseitig gedämmt werden, genauso die Bodenplatte bei einem Gebäude ohne Keller. Bei Gebäuden mit unbeheiztem Keller ist auch eine nachträgliche Dämmung der Kellerdeckenunterseite möglich. Je nachdem sind die Böden als erdberührende Bauteile bzw. als Bauteil zwischen Kellerzone und Vollgeschosszone definiert.

Standardmäßig wird der untere Gebäudeabschluss als Stahlbetonkonstruktion mit einer Dicke von 20 cm, Dichte von  $2300 \text{ kg/m}^3$ , spezifischer Wärmespeicherfähigkeit von  $1000 \text{ J/(kg K)}$  und einer aus dem für den Gebäudetyp vorgegebenen U-Wert ermittelten Wärmeleitfähigkeit verwendet, wobei  $R_{si}$  und  $R_{se}$  auf  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  gemäß DIN EN ISO 6946 [75] gesetzt sind.

### B.3.3. Oberer Gebäudeabschluss

Die thermische Hülle wird nach oben entweder von einem Flach- oder Steildach begrenzt. Bei einem Steildach wird die Vollgeschosszone durch die oberste Geschossdecke zum angrenzenden Dachraum begrenzt. Die Konstruktionen werden wie oben aus Schichten aufgebaut. Hinsichtlich der nachträglichen Sanierung wird davon ausgegangen, dass bei Flach- und Steildach Dämmung nur innenseitig angebracht wird. Bei der obersten Geschossdecke kann nur oberseitig Dämmung angebracht werden.

Eine Herausforderung ist die Abbildung von inhomogenen Bauteilen in EnergyPlus wie sie insbesondere bei Dachkonstruktionen durch Sparren, Sparrendämmung, Latten und Konterlatten vorkommen. Hierbei tritt in der Realität ein mehrdimensionaler Wärmestrom auf, der jedoch in EnergyPlus nur stark vereinfacht modelliert wird. Zur Abbildung solcher Bauteile ist das Modell *Composite Wall Construction* geeignet. Dort werden äquivalente Materialien definiert, die im Vorfeld aus dem Aufbau der Konstruktion bestimmt werden müssen. Daher werden in EmMi-transient inhomogene Bauteile derzeit nicht modelliert.

Ungedämmte Steildächer, Flachdächer und oberste Geschossdecke werden standardmäßig als Konstruktion aus einer Schicht mit Dichte  $2000 \text{ kg/m}^3$ , spez. Wärmespeicherfähigkeit

1000 J/(kg K) und Dicke 20 cm erstellt.  $R_{si}$  und  $R_{se}$  werden auf 0,10 m<sup>2</sup>K/W und 0,04 m<sup>2</sup>K/W gemäß DIN EN ISO 6946 [75] gesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit wird wie bei Außenwänden aus dem in der Gebäudetypologie vorgegebenen U-Wert berechnet. Dies ist eine vereinfachte Modellierung, die zukünftig detaillierter erfolgen sollte.

#### B.3.4. Innenwände und Geschossdecken

Innenwände und Zwischengeschossdecken der Vollgeschosszone werden als zusätzliche thermische Speichermasse über das EnergyPlus-Modell *InternalMass* berücksichtigt. Die Geometrie ist dabei irrelevant, da alle diese Bauteile in der gleichen Zone sind. Die Konstruktion der Innenwände muss vorgegeben werden, daher wird eine Mauerwerkskonstruktion mit einer Dicke von 15 cm und Dichte von 2000 kg/m<sup>3</sup> für Innenwände angenommen, Putzschichten werden nicht modelliert. Für die Zwischengeschossdecken wird eine Stahlbetonkonstruktion aus 1 % stahllarmiertem Beton [63, Tabelle 3] mit einer Dicke von 20 cm, Dichte von 2300 kg/m<sup>3</sup> und spezifischer Wärmespeichermasse von 1000 J/(kg K) angenommen. Dabei wird kein Estrich modelliert. Die Wärmeleitfähigkeit wird standardmäßig mit 2,0 W/(m K) angenommen. All diese Werte können für jeden Gebäudetyp verändert werden, sofern entsprechende Daten vorliegen. Die Fläche der Innenbauteilkonstruktionen muss, falls die Innenwände und Zwischengeschossdecken wie im vorliegenden Fall beidseitig in die thermische Zone fallen, verdoppelt werden, da im Modell *InternalMass* ein Wärmeaustausch zwischen Zonenluft und Innenwand nur über die Innenoberfläche der Bauteile erfolgt.

In [210] wurde der Einfluss der Modellierung der Möblierung als thermische Masse auf die maximale Kühllast ermittelt. Dieser hat eine Reduktion der maximalen Kühllast zwischen 0,67 % und 5,45 % bei einem Median von 2,28 % zur Folge. Im Vergleich zu den Innenwandmassen ist dieser Einfluss vermutlich gering. Und da keine Daten über die Möblierung vorliegen wird diese nicht berücksichtigt.

Die gesamte Fläche der innenliegenden Geschossdecken wird wie folgt ermittelt:

$$A_{Zwischengeschossdecken} = (n_{VG} - 1) * A_G * 2 \quad (B.2)$$

wobei  $n_{VG}$  die Anzahl der Vollgeschosse und  $A_G$  die Gebäudegrundfläche ist.

Die gesamte Fläche der Innenwände wird durch einen Faktor  $f_{KGF/BGF}$  ermittelt, der den Anteil der KGF an der BGF beschreibt. Die Werte für  $f_{KGF/BGF}$  werden aus [134, Abb. 4, Abb. 8] übernommen und sind für EFH und ZFH auf 0,17 festgelegt, für DH, RH und MFH auf 0,15. Zur Konstruktionsgrundfläche gehören neben der Grundfläche der Innenwände auch die Grundflächen der Außenwände, diese müssen daher subtrahiert werden. Daher erfolgt die Berechnung durch folgende Formel:

$$A_{G,IW} = A_{BGF} * f_{KGF/BGF} - A_{G,AW} \quad (B.3)$$

## B. Modellierung der Gebäudehülle

wobei  $A_{G,IW}$  die zu berechnende Grundfläche der Innenwände ist,  $A_{BGF}$  die Bruttogrundfläche und  $A_{G,AW}$  die Grundfläche der Außenwände.  $A_{G,AW}$  wird durch Summation der Produkte aus Außenwandlänge und Summe der Außenwandschichtdicken berechnet:

$$A_{G,AW} = \sum_{AW} l_{AW} * \sum_{tragendeWandschichten} d_{AW,Schicht} \quad (B.4)$$

Hierbei werden nur Tragwerksschichten der Außenwand berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass in den Bestandsgebäuden bei Errichtung noch keine Dämmung vorhanden war und daher die Dämmung außen angebracht wird. Für den Fall von Innendämmung müsste dies angepasst werden. Die Länge der Außenwände  $l_{AW}$  ergibt sich bei der Erzeugung dieser Wände aus den GIS-Daten.

Die Länge aller Innenwände berechnet sich dann mittels

$$l_{IW} = A_{G,IW} / d_{IW} * n_{VG} \quad (B.5)$$

wobei  $d_{IW}$  die Dicke der Innenwand ist,  $n_{VG}$  die Anzahl der Vollgeschosse.

Die Berechnung der im Wärmeaustausch stehenden Innenwandfläche für das Modell *InternalMass* erfolgt mittels

$$A_{IW} = l_{IW} * h_{VG} * 2 \quad (B.6)$$

wobei  $h_{VG}$  die mittlere Höhe eines Vollgeschosses ist. Der Faktor 2 wird hinzugefügt, da beide Oberflächen der Innenwände mit der Zone in Wärmeaustausch sind.

Alternativ wäre auch denkbar, mittels der Bauweise eines Gebäudes und der damit verbundenen spezifischen Wärmespeicherfähigkeit wie in [108] auf die thermische Speichermasse der Innenwände zu schließen. Für die Verwendung innerhalb von EnergyPlus müsste dies jedoch auch wieder auf Innenwandkonstruktionen umgerechnet werden. Interessant wäre hier ein Vergleich der beiden Berechnungsarten. ‘

### B.3.5. Fenster

Die Fensterkonstruktionen werden über das vereinfachte EnergyPlus-Modell *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* abgebildet, welches den U- und g-Wert benötigt. Es sind auch detailliertere Modelle in EnergyPlus verfügbar, hierfür fehlen allerdings Daten zur Parametrisierung.

Tabelle B.2.: U- und g-Wert unterschiedlicher Fenstertypen im Bestand gemäß TABULA [126]

Fenstertyp	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	g-Wert [-]
1-Scheiben-Verglasung	4,3 ... 5,8	0,80
unsanierte 2-Scheiben-Verglasung	2,8 ... 4,0	0,7

Die U- und g-Werte sind in den Gebäudetypologiedaten vorhanden und können direkt verwendet werden. Typische Werte für Bestandsgebäude aus TABULA sind in Tabelle B.2 aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass alle Fenster eines Gebäudes derzeit als gleich angenommen werden.

Im Sanierungsfall wird davon ausgegangen, dass alle Fenster ausgetauscht werden und sich daher U- und g-Wert ändern, vgl. Abschnitt F.1.

## B.4. Luftwechselrate

Die Luftwechselrate ist die maßgebliche Größe, die die Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes bestimmt. In Wohngebäuden wird hauptsächlich freie Lüftung verwendet, welche durch das Öffnen von Fenstern sowie Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bestimmt ist. Zur Modellierung in EmMi-transient kommt das EnergyPlus-Modell ZoneInfiltration:DesignFlowRate zum Einsatz, bei dem der Wert der Luftwechselrate  $n$  mit Einheit  $\text{h}^{-1}$  angegeben wird. Die Werte orientieren sich dabei an Anhang D der DIN 4108-6 [59], hier ist für nicht mittels Blower-Door-Test luftdichtheitsgeprüfte Gebäude ein Wert von  $n=0,7 \text{ h}^{-1}$ , für luftdichtheitsgeprüfte Gebäude ein Wert von  $n=0,6 \text{ h}^{-1}$  definiert. Allerdings kommen in realen Gebäuden wesentliche Abweichungen von diesen Werten vor [98].

Eine Erweiterung um mechanische Lüftung wäre möglich. Da diese Systeme in Bestandswohngebäuden in Deutschland bisher jedoch kaum im Einsatz sind [126] wird dies derzeit nicht unterstützt.

Die Abbildung von manueller Fensteröffnung erfolgt vereinfacht durch eine Erhöhung der dadurch auftretenden Luftwechselrate. Da keine Informationen über die Art der Öffnung, d.h. ob Kippstellung oder Schwenköffnung vorliegt, können als Anhaltswerte für den dadurch auftretenden erhöhten Luftwechsel die Werte aus [217] verwendet werden. Dort sind für Stoßlüftung je nach Art der Öffnung Werte zwischen  $0,7 \text{ h}^{-1}$  und  $13,1 \text{ h}^{-1}$  angegeben. Für dauerhafte Fensterlüftung wurden Werte zwischen  $0,6 \text{ h}^{-1}$  und  $9,2 \text{ h}^{-1}$  ermittelt.



## C. Modellierung des Heizungssystems

Praktisch jedes Gebäude und insbesondere seine Heizungsanlage ist eine Einzelanfertigung. Daher kann für die Modellerstellung eines Quartiers nicht im Detail auf die Ausführung jeder Anlage eingegangen werden. Es können aber unterschiedliche Typen von Anlagen, wie Öl-, Gas- oder Fernwärmeheizungen abgebildet werden, welche sich an den verwendeten Gebäudetypologiedaten orientieren. Für EmMi-transient wurden daher verschiedene Anlagentypen in EnergyPlus modelliert, u.a. in [216]. Diese Anlagen wurden so erstellt, dass sie gute Übereinstimmung mit den in der TABULA Gebäudetypologie hinterlegten Energiebedarfswerten zeigen, sofern eine Vergleichbarkeit überhaupt gegeben sein kann auf Grund des unterschiedlichen Detaillierungsgrads der Modellierung. Für die Bestimmung der Parameterwerte der EnergyPlus-Heizungsanlagenmodelle wird über die Gebäudetypologie hinaus auf eine Vielzahl unterschiedlicher Datenquellen zurückgegriffen, welche bei den einzelnen Systemen erläutert werden. Auf die Parameter, die mittels Sensitivitätsanalysen näher untersucht werden, wird in Abschnitt 12.6 eingegangen.

Die Schemata der modellierten Heizkessel-, Luft-Wasser-Wärmepumpen- und Fernwärmeanlagen sind in den Abbildungen C.1 bis C.4 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Teile der Heizungsanlage beschrieben und ihre Modellierung in EmMi-transient dargestellt. Gebäudemodelle mit Gaskessel und Fernwärmeübergabestation als Wärmeerzeuger wurden bereits in der Vorveröffentlichung [161] verwendet.



### C. Modellierung des Heizungssystems



Abbildung C.1.: Heizungsschema mit Heizkessel oder Fernwärmeübergabestation, ohne Solarthermieunterstützung

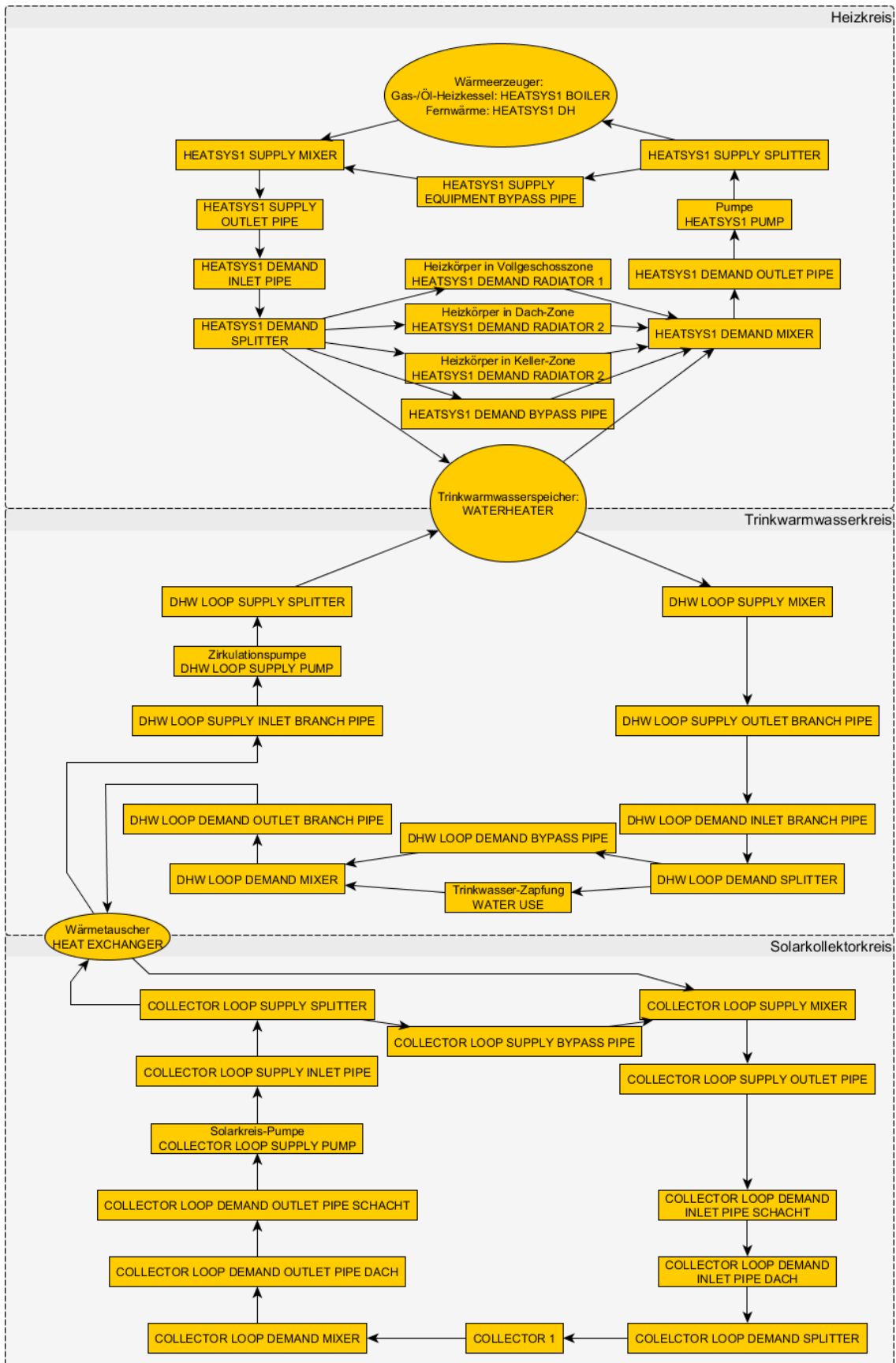


Abbildung C.2.: Heizungsschema mit Heizkessel oder Fernwärmeübergabestation, mit Solarthermieunterstützung

### C. Modellierung des Heizungssystems

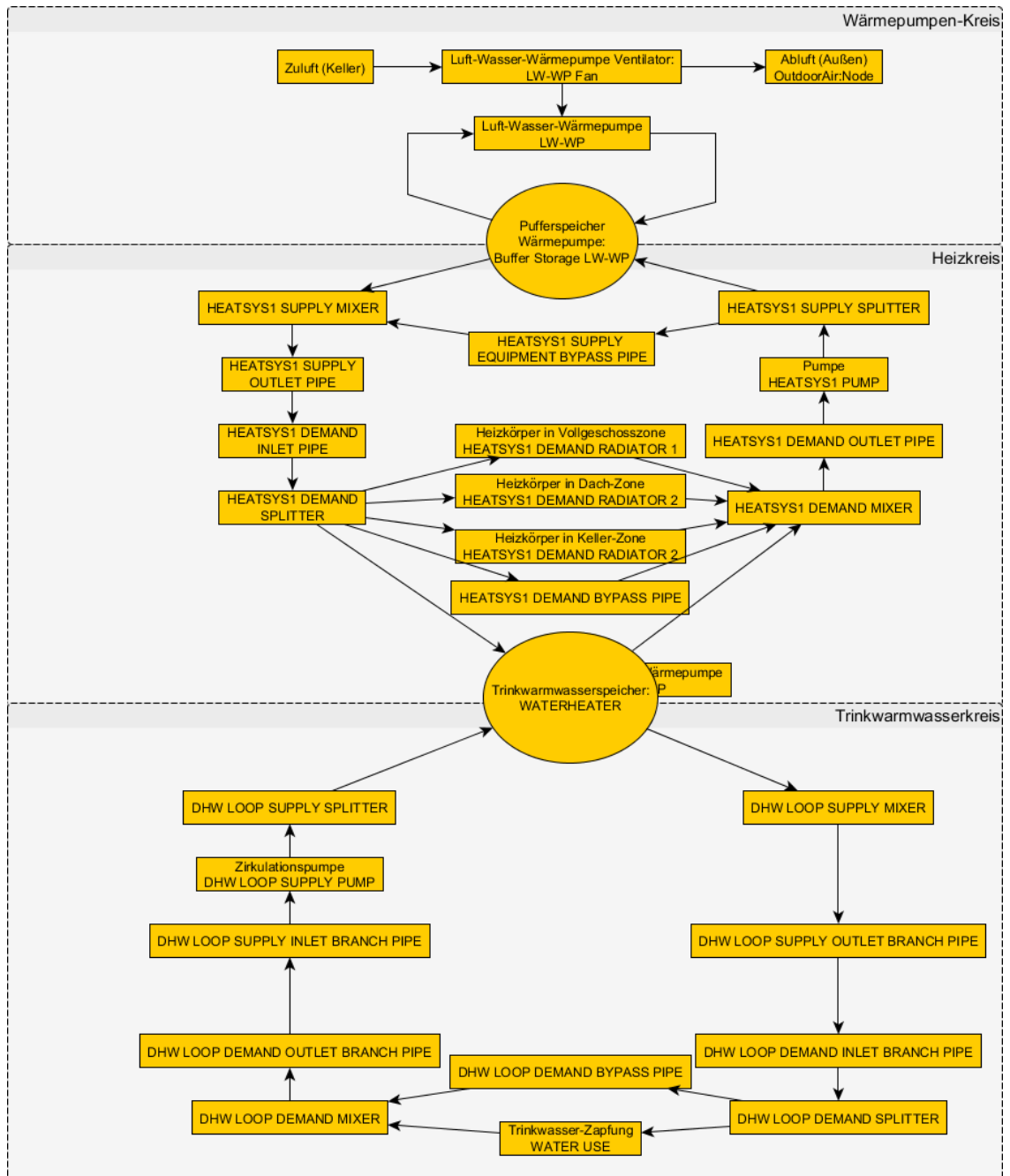


Abbildung C.3.: Heizungsschema mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, ohne Solarthermieunterstützung

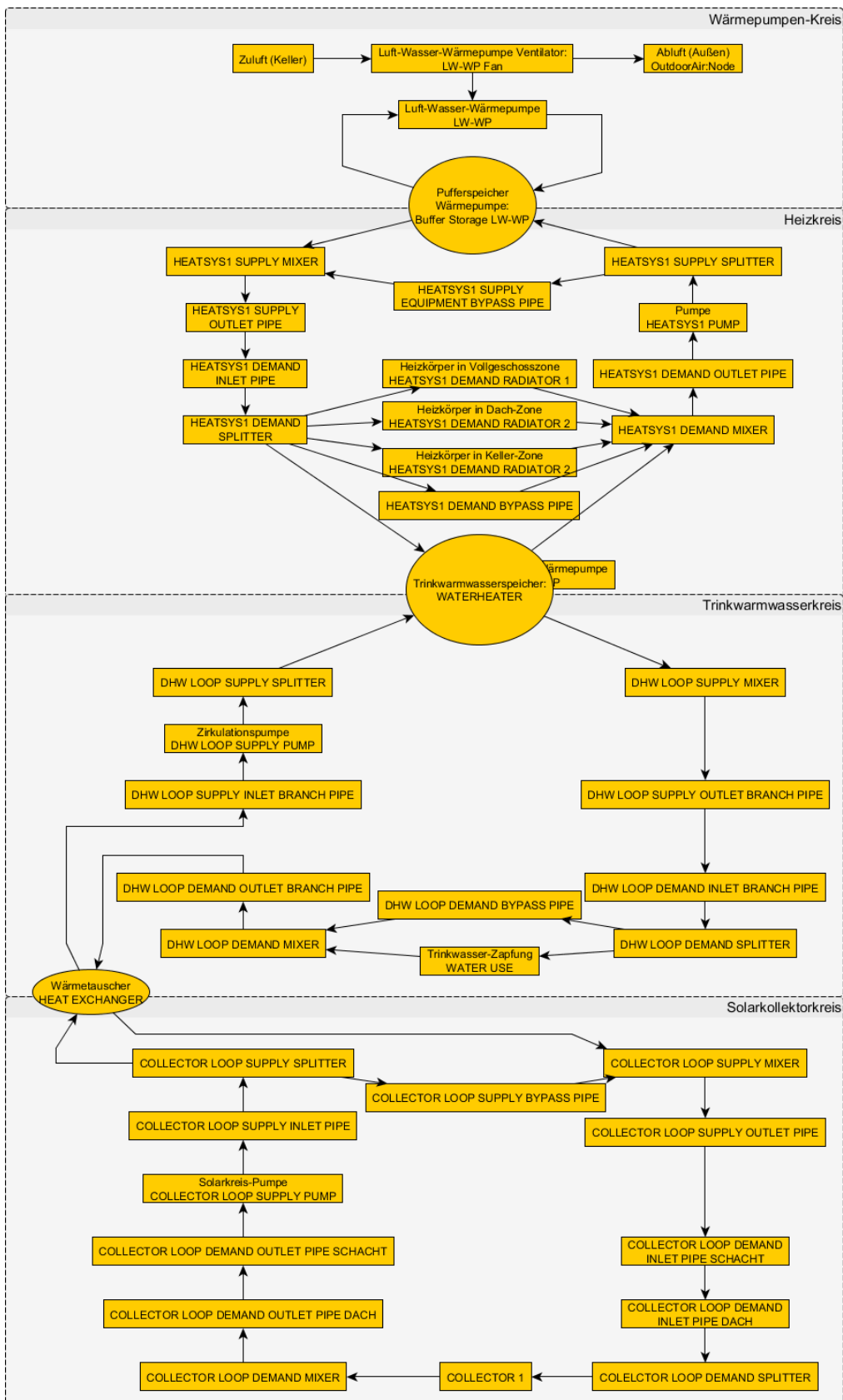


Abbildung C.4.: Heizungsschema mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, mit Solarthermieunterstützung

## C.1. Wärmeerzeuger

Zur Erzeugung der für die Beheizung eines Gebäudes notwendigen Wärme gibt es die unterschiedlichsten Systeme. Angefangen bei verbrennungsbasierten Anlagen wie den unterschiedlichen Arten von Öl- und Gaskesseln und Blockheizkraftwerken, die neben Wärme auch Strom erzeugen, über strom- oder gasbetriebene Wärmepumpensysteme zu Solarthermieanlagen und Nah- und Fernwärmenetzen.

In diesem Abschnitt der Arbeit wird auf die modellierten Wärmeerzeuger eingegangen. Die Auswahl für die zu modellierenden Wärmeerzeuger wurde anhand der Daten, die zu dem betrachteten Quartier vorliegen, sowie den in der TABULA Gebäudetypologie definierten Systemen getroffen.

Über die hier beschriebenen Wärmeerzeuger hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer zentraler Systeme wie pellet- oder hackschnitzelbefeuerte Anlagen, elektrische Nachtspeicherheizungen, Brennstoffzellen oder dezentrale Systeme wie Kachelöfen und andere Einzelraumheizungen. Deren Verteilung ist aber relativ gering [126, Tabelle 8]. Daher wurde vorerst auf eine Modellierung dieser Systeme verzichtet. Insbesondere können auch beliebige Kombinationen von Wärmeerzeugern zum Einsatz kommen. Hierzu sind aber in den vorhandenen Daten kaum Informationen enthalten (vgl. A.2), daher wird in dieser Arbeit bis auf ergänzende Solarthermie immer nur von einem einzelnen Wärmeerzeuger ausgegangen.

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften der einzelnen Wärmeerzeuger beschrieben und deren Modellierung in EnergyPlus dargestellt.

### C.1.1. Heizkessel

In Heizkesseln wird durch die Verbrennung fossiler oder biogener Brennstoffe Wärme erzeugt. Es gibt eine Unterscheidung hinsichtlich der Betriebsweise in Konstanttemperaturheizkessel, Niedertemperaturheizkessel und Brennwertkessel, wobei heutzutage Konstanttemperaturheizkessel nicht mehr zum Einsatz kommen. Niedertemperaturheizkessel haben einen Jahresnutzungsgrad von 91 % bis 96 %, Brennwertkessel erreichen einen Jahresnutzungsgrad von 100 % bis 109 %. Dieser ist bei Gas auf Grund des höheren Wasserstoffgehalts höher als bei Öl. Der Jahresnutzungsgrad ist jeweils bezogen auf den Heizwert des Brennstoffs und hängt auch von den Systemtemperaturen ab. Zwischen Systemen mit 70/60 °C und 40/30 °C ergibt sich eine Nutzungsgraddifferenz von rund 3 %. Gesetzlich ist die Wirkungsgradanforderung an Öl- und Gaskessel in der Heizkesselwirkungsgradrichtlinie (92/42/EWG) festgelegt. In dieser Richtlinie ist eine Formel für die Wirkungsgradanforderungen an einen Heizkessel in Abhängigkeit von der Betriebsweise und der Nennleistung zwischen 4 und 400 kW definiert. [1, S. 945ff]

In EmMi-transient werden für Heizkessel nur Gas und Öl als Brennstoffe betrachtet da diese in Deutschland für den größten Teil der Heizkessel verwendet werden. Die Modellierung

in EnergyPlus erfolgt über das Modell *Boiler:HotWater*. Dieses Modell benötigt die Parameter Nennleistung, thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert des Brennstoffs bei Vollastbetrieb und die vorgegebene Vorlauftemperatur. Wirkungsgradänderungen bei Teillastbetrieb können in dem Modell über eine Kurve definiert werden, dies wird aber mangels entsprechenden Daten hier nicht angewandt. Der thermische Wirkungsgrad wird also als konstant angenommen. Die unterschiedlichen Brennstoffe Öl und Gas schlagen sich nur im Wirkungsgrad nieder, ansonsten sind die Systeme hierfür gleich aufgebaut.

Die Nennleistung des Kessels wird in EnergyPlus automatisch anhand von Typtagen ermittelt, die Betriebsweise wird über den thermischen Wirkungsgrad der Anlage abgebildet. Für den Wirkungsgrad werden Werte aus [165, Teil III, Tab. 20, S. 29] übernommen. Für Niedertemperaturkessel im MFH wird ein Wert von 0,89 verwendet, dies entspricht dem Mittelwert für gas- oder ölbefeuerte Niedertemperaturkessel aus der Zeit 1987 bis 1994. Für Ölbrennwertkessel wird ein Wert von 0,95 verwendet, für Gasbrennwertkessel der Wert 0,97.

Brennstoffbefeuerte Heizkessel sind für elektrische Lastverschiebungsmaßnahmen prinzipbedingt nicht geeignet da sie bis auf einen geringen Hilfsenergiebedarf keine elektrische Energie zum Betrieb benötigen.

### C.1.2. KWK-Anlagen

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) erzeugen in festem Verhältnis zeitgleich elektrische Energie und Wärme, die meist lokal genutzt wird. Sie werden auch als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet. Es gibt sie in unterschiedlichen Größen, angefangen bei Anlagen für Einfamilienhäuser mit einer elektrischen Leistung von unter einem Kilowatt bis zu Systemen für Gebäudequartiere, Industrie und Gewerbebetriebe mit mehreren Megawatt Leistung. Durch die Nutzung der Motorabwärme erreichen diese Anlagen Gesamtnutzungsgrade von bis zu 90 % bezogen auf die notwendige Primärenergie. Der elektrische Wirkungsgrad liegt im Bereich zwischen 25 % und 50 %. KWK-Anlagen stehen meist nahe des Orts, an dem der Strom und die Wärme verwendet werden, daher sind die Leitungsverluste geringer als bei zentraler Stromerzeugung. Es sind hauptsächlich zwei Betriebsweisen für KWK-Anlagen üblich, um eine hohe Vollaststundenzahl zu erreichen. Entweder wärmegeführt, d.h. die Anlage ist nach dem benötigten Wärmebedarf ausgelegt und wird anhand der jeweils aktuellen Heizlast geregelt, bei hohen Heizlasten wird ggf. ein Spitzenlastkessel zugeschaltet. Der produzierte Strom wird lokal verbraucht oder ins Netz eingespeist. Oder die Anlage läuft stromgeführt und zielt auf die möglichst vollständige Deckung des Strombedarfs. Die erzeugte Wärme wird dann meist in Wärmenetze eingespeist oder muss, falls dies nicht möglich ist, über Kühler abgeführt werden. [1, S. 725ff]

Die Einbindung eines BHKW in die Heizungsanlage eines einzelnen Gebäudes erfolgt ähnlich wie bei einem normalen Heizkessel, ggf. ist zusätzlich ein Spitzenlastkessel vorzusehen und ein größerer Wärmespeicher zur Abfederung von Spitzenlasten. In EnergyPlus ist momentan

### C. Modellierung des Heizungssystems

nur das Modell Generator:MicroCHP vorhanden, welches ein stromgeführtes BHKW abbildet. Daher wird in EmMi-transient darauf verzichtet, ein wärmegeführtes BHKW, wie es für Einzelgebäude üblich wäre, zu modellieren. Zukünftig kann dies durch Verwendung eines herkömmlichen Heizkesselmodells in Verbindung mit einer externen Berechnung zur erzeugten elektrischen Energie ergänzt werden.

#### C.1.3. Wärmepumpe

Elektrisch betriebene Wärmepumpen nehmen Wärme durch Verdampfung bei relativ niedrigen Temperaturen auf und geben diese auf einem höherem Temperaturniveau durch Kondensation wieder ab. Primäre Wärmequelle können die Außenluft, das Erdreich oder Grundwasser sein. Um den Wirkungsgrad hoch zu halten, ist eine geringe Heizmitteltemperatur notwendig. Als Übergabesystem kommt daher im Idealfall eine Flächenheizung zum Einsatz. Bei niedrigen Temperaturen der primären Wärmequelle wird eine zusätzliche Heizquelle, oft eine in die Wärmepumpe integrierte Heizpatrone, benötigt. Es sind monovalente, monoenergetische und bivalente Betriebsweise möglich. [1, S. 1034ff].

In EmMi-transient ist derzeit nur eine elektrisch betriebene monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe abgebildet. Durch den elektrischen Betrieb ist die Umsetzung von Lastverschiebungsmöglichkeiten zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchsanteils bei lokaler Stromerzeugung möglich. Dies wird in G.2 beschrieben. Brennstoffbetriebene Wärmepumpen sind für Lastverschiebungsmaßnahmen uninteressant und werden daher nicht näher betrachtet.

Die Modellierung der Luft-Wasser-Wärmepumpe in EnergyPlus erfolgt über das Modell *WaterHeater:HeatPump:CondenserPumped*, welches ein zusammengesetztes Modell aus einem Wasserspeicher, einem Lüfter sowie einem Modell, welches den Wärmepumpenkreislauf aus Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger und Expansion repräsentiert. Der Lüfter sorgt für die Luftzufuhr an den Kreislauf und ist als einfaches Ein-Aus-Modell vom Typ *Fan:OnOff* abgebildet. Der Wasserspeicher ist vom Typ *WaterHeater:Mixed*, d.h. ein perfekt durchmischter Wasserspeicher, siehe Abschnitt C.2. Dieser erlaubt es auch, eine zusätzliche Energiezufuhr durch eine elektrische Heizpatrone oder einen Öl- oder Gasbrenner abzubilden, was derzeit nicht genutzt wird. Der Wärmepumpenkreislauf wird durch ein Modell vom Typ *Coil:WaterHeating:AirToWaterHeatPump:Pumped* realisiert.

Das Luft-Wasser-Wärmepumpenmodell in EnergyPlus besitzt eine massive Einschränkung. So stellt es seine Arbeit bei einer Temperatur der Zuluft von unter 5 °C zur Verhinderung von Vereisung ein. Dann würde also nur noch eine ggf. modellierte Heizpatrone im zur Wärmepumpe gehörigen Wasserspeicher Wärme erzeugen. Da die Wärmepumpe aber als monovalentes Gerät ausgelegt ist, ist dann keine Heizquelle mehr vorhanden. Diese Grenztemperatur könnte durch Anpassung des Quellcodes des Wärmepumpenmodells geändert werden, allerdings müsste dann auch ein Mechanismus zur Verhinderung von Vereisung hinzugefügt werden. Alternativ müsste einer Vorerwärmung der Luft durch ein Heizregister o.ä.

realisiert werden. Dies erfolgt beides nicht im Rahmen dieser Arbeit. Daher wird in EmMi-transient eine Aufstellung der Wärmepumpe im Keller eines Gebäudes realisiert, so dass auch die Lufttemperatur des Kellers als Zuluft der Wärmepumpe fungiert. Dies könnte beispielsweise durch Nutzung der Luft aus einer Tiefgarage so auch in der Realität vorkommen. Aber es wird somit nicht das Verhalten einer außenluftgespeisten Wärmepumpe widerspiegelt, was sich beim geringeren Energiebedarf insbesondere bei kalten Außenluftbedingungen zeigt. Aber nichtsdestotrotz wurde dies als derzeit bester Weg zur Abbildung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, die auch zur Untersuchung von Lastverschiebungsmaßnahmen eingesetzt werden kann, identifiziert.

Für den „Coefficient of Performance“ (COP) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wird standardmäßig ein Wert von 3,2 bei 19,7 °C Außenlufttemperatur und 57,5 °C Vorlauftemperatur verwendet. Dies orientiert sich an dem schlechteren Wert aus [61, Abschnitt 5.2.3] sowie den für Wärmepumpen messtechnisch ermittelten Werten aus [100]. In [165, Teil III, Tab. 21, S. 31] sind Werte von 2,6 bis 3,1 angegeben, die für Außenluftwärmepumpen bzw. Grundwasser- und Erdreichwärmepumpen mit zusätzlichem Heizstab, der 5 % des Wärmebedarfs abdeckt, angegeben.

Die maximale Heizleistung der Wärmepumpe bei diesen Bedingungen wird über die Gebäudetypologiedatei für jeden Gebäudetyp einzeln eingestellt. In dem EnergyPlus-Wärmepumpenmodell kann eine elektrische Zusatzheizung definiert werden, deren Leistung wird aufgrund der monovalenten Betriebsweise auf 0 W gesetzt. Der elektrische Hilfsenergiebedarf für die Steuerungseinheit der Wärmepumpe wird vernachlässigt.

In EnergyPlus stehen für Wärmepumpen mit anderen Energiequellen als Luft die Modelle *HeatPump:WaterToWater* sowie für größere Anlagen das Wärmepumpensystem *CentralHeatPumpSystem* zur Verfügung. Diese werden in dieser Arbeit nicht verwendet.

### C.1.4. Nah-/Fernwärme

Eine Fernwärmeversorgung besteht aus einem oder mehreren Wärmeerzeugern, einem Rohrnetz, Übergabestation in den an das Rohrnetz angeschlossenen Gebäuden und dem Rohrnetz im Gebäude. Fernwärmeanlagen werden in Heißwassersysteme mit Temperaturen bis 110 °C oder mit Temperaturen über 110 °C und dampfbetriebene Anlagen unterteilt. Nahwärme oder auch Blockheizungen sind Heizungen für ein oder mehrere benachbarte Wohnblöcke, die mit Temperaturen bis maximal 110 °C arbeiten. Stadtheizungen oder auch Fernheizungen versorgen größere Gebiete mit Temperaturen meist über 110 °C. Dampfnetze werden heutzutage nicht mehr gebaut. [1, S. 695ff]

In EmMi-transient ist es möglich, per Nah- oder Fernwärmeübergabestation beheizte Gebäude zu modellieren. Die Übergabestation ist dabei idealisiert über das EnergyPlus-Modell *DistrictHeating* abgebildet. In diesem Modell ist nur die maximale Leistung der Übergabestation zu definieren. Diese kann auch automatisch ermittelt werden. Bis zu dieser Leistung kann das



### C. Modellierung des Heizungssystems

Modell beliebig erwärmtes Wasser für das Heizungssystem zur Verfügung stellen. Nach außen hin wird die dafür notwendige Energie ausgegeben, d.h. es ist in diesem Modell nicht möglich, die Vor- und Rücklauftemperaturen oder Volumenströme an der Übergabestation abzubilden. Prinzipiell wäre aber auch solch eine detaillierte Übergabestation in EnergyPlus durch Wärmetauschermodelle abzubilden.

Für die per Fernwärme versorgten Gebäude eines untersuchten Quartiers wird die gesamte durch das Fernwärmenetz bereitzustellende Energie summiert. Dies kann mit einem Fernwärmenetzmodell gekoppelt werden, in dem die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Volumenströme berechnet werden. Dort können auch die Leitungen und damit verbundene Verluste sowie die Wärmeerzeuger für das Netz berücksichtigt werden, wie es beispielsweise in [119] erfolgt.

Für die Nahwärmeversorgung eines Quartiers können zukünftig per FMI angekoppelte Modelle zu EmMi-transient hinzugefügt werden, welche beispielsweise die Wärme- und Stromversorgung mittels BHKW in Verbindung mit thermischen Speichern und Freiflächensolarthermieanlagen abbilden, vgl. Abschnitt 15.1.

Die Wärmeverluste in Nah- oder Fernwärmenetzen werden derzeit nicht berücksichtigt, diese können zukünftig über die in [78, Tabelle 4.1] angegebenen Werte näherungsweise abgebildet werden. Größenordnungsmäßig sind die Verluste für eine Zeilenbebauung mit mittlerer Dichte gemäß [270, Tabelle 5] bei 5 bis 15 kWh/m<sup>2</sup>a bezogen auf die beheizte Fläche der Gebäude.

#### C.1.5. Solarthermie

Solarthermische Kollektoren werden vorwiegend im Ein- und Zweifamilienhaus zur Trinkwassererwärmung und zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Hierfür kommen in Deutschland zumeist Flachkollektoren zum Einsatz, Vakuumröhrenkollektoren eher selten. In Mehrfamilienhäusern ist der Anteil der Beheizung durch Solarthermieanlagen gering. Durch einen Wandel von Einzelheizungen zu netzgebundener Versorgung könnte dies geändert werden. Z.B. durch Einbindung von Solarthermieanlagen in Nahwärmenetze mit oder ohne saisonale Speicher. Ein wichtiger Aspekt für Solarthermieanlagen ist die Orientierung und Neigung der Kollektoren. Typischerweise lassen sich Systemerträge von 350 bis 500 kWh/m<sup>2</sup>a in Deutschland erzielen.[1, S. 1071ff]

Bei Solarthermiesystemen zur Trinkwassererwärmung reichen ca. 1-1,5 m<sup>2</sup> Flachkollektorfläche pro Person aus, um einen jährlichen Deckungsgrad von 60 % zu erreichen. Die Speichergröße liegt bei einem 4 Personenhaushalt bei 300 Litern, für 6 Personen werden 500 Liter empfohlen. [1, S. 1078f]

Heizungsunterstützende Systeme können auf Grund der halbjährigen Phasenverschiebung zwischen Kollektorertragsmaximum und dem Maximum des Heizwärmebedarfs meist nicht mehr als 15 bis 30 % Deckungsgrad ohne Ertragsminderung durch sommerliche Überhitzung

o.ä. erreichen. Dafür sind 10 bis 20 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Wohneinheit ausreichend. Dabei ist die Trinkwassererwärmung dann auch durch die Solarthermieanlage abgedeckt. Zur Nachheizung werden zusätzliche Wärmeerzeuger benötigt. Zur Speicherung der Wärme kommen Kombispeicher oder Frischwasserstationen zum Einsatz. [1, S. 1080f]

Solare Großanlagen mit Kollektorflächen von mehr als 100 m<sup>2</sup> und Speicherinhalten von mehr als 5 m<sup>3</sup> bieten deutliche Kostenreduktionsmöglichkeiten, sind allerdings eher für Gebäude mit hohem Warmwasserbedarf oder für Nahwärmeversorgung gedacht. [1, S. 1082ff]

In EmMi-transient werden derzeit nur solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung modelliert. Diese nutzen die Modelle *SolarCollector:FlatPlate:Water* und *SolarCollectorPerformance:FlatPlate* für den Kollektor, das Modell *Pump:VariableSpeed* für die Pumpe des Solarkreises, *Pipe:Outdoor* und *Pipe:Adiabatic* für die Leitungen zwischen Kollektor und Warmwasserspeicher sowie das Modell *HeatExchanger:FluidToFluid* zur Übertragung der Energie vom Solarkreislauf in den Speicher.

Für das Solarkollektormodell muss eine Fläche angegeben werden, auf der sich dieser befindet. Dies wird in Abhängigkeit der Dachform und der Orientierung der Dachflächen ermittelt. Es wird jeweils die komplette angegebene Fläche als Kollektorfläche verwendet.

Bei einem Flachdach wird dieses als den Kollektor beinhaltende Fläche angegeben. Bei einem Steildach werden die verschiedenen Dachflächen der Reihe nach durchgegangen und bevorzugt wird eine nach Süden orientierte Dachfläche für den Kollektor ausgewählt, falls eine solche nicht vorhanden ist werden west-, ost- und nordorientierte Flächen in dieser Reihenfolge gewählt. In der Realität wären nordorientierte Flächen in Deutschland nicht sinnvoll für Solarthermie verwendbar. Wenn jedoch in EmMi-transient einem Gebäude in der Gebäudetypologiedatei eine Solarthermieanlage zugewiesen ist und dieses beispielsweise aufgrund einer Pultdachgeometrie nur eine Nordfläche hat, so wird diese ausgewählt. Dies kann vermieden werden, in dem man den entsprechenden Gebäuden einen Gebäudetyp zuweist, der keine Solarthermieanlage beinhaltet.

Derzeit ist es nicht möglich, einen Anteil des Daches mit Solarthermiekollektoren und den Rest mit PV-Kollektoren zu belegen. Hierfür müsste zukünftig ein Faktor eingeführt werden, der die Verteilung der beiden Kollektortypen darstellt und in Abhängigkeit dieses Faktors EnergyPlus-Teilflächen mittels des Modells *Shading:Zone:Detailed* erzeugt, denen dann die beiden Kollektoren zugewiesen werden.

Die Leistungsdaten der hier verwendeten Solarthermiekollektoren orientieren sich an den Daten eines Viessmann Vitosol 200F Kollektors [216, S. 155].

Die Pumpe des Kollektorkreislaufs wird, wie die Heizkreispumpe, durch das Modell *Pump:VariableSpeed* abgebildet. Dabei wird ein konstanter Pumpenwirkungsgrad von 20 % [81, S. 66] angenommen, der über die Gebäudetypologiedatei variiert werden kann.

Die Anschlussleitungen, die außen liegen und damit in Wärmeaustausch mit der Außenluft stehen werden mittels des Modells *Pipe:Outdoor* modelliert und ihre Länge wird mit dem

### C. Modellierung des Heizungssystems

1,5-fachen der Wurzel aus der Fläche der obersten Geschossdecke abgeschätzt. Die Steigleitungen zwischen Dach und Keller, die meist in einem Schacht im Innenraum verlaufen werden mittels des Modells *Pipe:Adiabatic* modelliert und die Wärmeverluste werden daher vernachlässigt. Dies ist jedoch auf Grund der energetischen Betrachtung und der Modellierung mit maximal drei Zonen akzeptabel.

Zukünftig können die inneren Leitungen über Modelle des Typs *Pipe:Indoor* abgebildet und ihre Länge mit der Summe der Höhe des Gebäudes, des Dachs und des Kellers abgeschätzt werden. Die Wärmegewinne werden dann den Zonen, durch die die Leitungen verlaufen, zugeordnet. Die Verteilleitungen im Keller können ebenfalls über das Modell *Pipe:Indoor* abgebildet und ihre Länge mit der Summe aus Breite und Länge des Gebäudes abgeschätzt werden.

Alle Leitungen für die Wärmeverluste berücksichtigt werden sind dabei als Kupferrohr mit 3 cm Innendurchmesser, 3 mm Wandstärke und 3 cm Dämmung der Wärmeleitfähigkeit 0,040 W/mK modelliert.

Die Anbindung des Solarthermiekreislaufes an die Heizungsanlage erfolgt auf Grund des Nichtvorhandenseins eines Modells für einen bivalenten Warmwasserspeicher in EnergyPlus über einen Wärmetauscher des Typs *HeatExchanger:FluidToFluid*, der im Rücklauf des im Zirkulationsbetriebs befindlichen Trinkwarmwassers angeordnet ist und als idealer Wärmeübertrager konfiguriert ist. Dieser Rücklauf setzt sich aus zwei Teilen zusammen: einem Anteil des vom Speicher kommenden Trinkwarmwassers sowie einem Anteil Frischwasser, der der zum jeweiligen Zeitpunkt entnommenen Trinkwassermenge entspricht. Dies ermöglicht eine Übergabe der im Solarthermiekreislauf erzeugten Wärme an den Warmwasserspeicher, wobei die Regelung so eingestellt ist, dass es beispielsweise Nachts nicht zu einer Abkühlung des Warmwasserspeichers durch den Wärmetauscher kommen kann. Dies ist eine vereinfachte Abbildung der Solarthermieanlage. Durch die Modellierung eines Schichtenspeichers könnte der Wärmeeintrag durch Solarthermie genauer modelliert werden, allerdings wären hierfür weitergehende Parametrisierungsinformationen notwendig. [216]

## C.2. Wärmespeicher

Wärmespeicher dienen vor allem zwei Zwecken: zum einen der Entkopplung von Wärmeerzeugung und -verbrauch und zum anderen zur Maximierung der Gesamteffizienz einer Heizungsanlage. Dies wird durch möglichst hohe Brennerlaufzeiten, geringe Stillstandszeiten und damit verbundenen geringen Bereitstellungsverlusten sowie Betrieb der Anlage im optimalen Lastbereich erreicht. Es gibt Kurz- und Langzeitspeicher sowie saisonale Speicher, die mit unterschiedlichen Wärmespeichermedien versehen und für unterschiedliche Anwendungen ausgelegt sein können und sich je nach Einsatzziel in ihrer Konstruktion unterscheiden. [1, S. 925]

In EmMi-transient wird ein vollkommen durchmischter Speicher mittels des EnergyPlus-Modells *WaterHeater:Mixed* abgebildet. Der Verzicht auf Abbildung eines Schichtenspeichers mittels des Modells *WaterHeater:Stratified* erfolgt auf Grund des Ziels der Energiebedarfsberechnung und weil für geschichtete Speicher mehr Parametrisierungsinformationen notwendig wären, die nicht vorliegen. Für die Ermittlung optimaler Betriebsweisen eines Heizungssystems wäre es notwendig auch die Schichtung im Wärmespeicher korrekt abzubilden.

Zur Vermeidung von Legionellenbildung ist gemäß DVGW Arbeitsblatt W 551 [79] eine Aufheizung des Trinkwarmwassers auf 60 °C vorzusehen, daher wird diese Temperatur im Trinkwasserkreis vorgesehen.

In EmMi-transient wird immer ein Wärmespeicher für Trinkwarmwasser vorgesehen, an den auch die Wärme der Solarthermieanlage übergeben wird, sofern solch eine vorhanden ist. Die Größe des Wärmespeichers kann für jeden Gebäudetyp in der Gebäudetypologiedatei festgelegt werden. Bei Solarthermieanlagen zur Trinkwassererwärmung wird in [1, S. 1079f] ein Warmwasserverbrauch von 40 l pro Person und Tag angegeben und das Speichervolumen so bestimmt, dass es für zwei Tage ausreichend ist. Bei konventionellen Heizungsanlagen kann der Speicher sehr klein modelliert werden, hier ist er vor allem aus Modellierungstechnischen Gründen notwendig. Bei Wärmepumpenheizung wurden früher Speicher zur Verminderung der Schalzhäufigkeit und zur Überbrückung von Hochtarifzeiten verwendet, heutzutage sind Wiedereinschaltsperrungen oder Sperrzeiten üblich, auf die das Speichervolumen hin ausgelegt werden kann. In [165] wird für Elektrowärmepumpen ein Volumen von 200 l angegeben.

Da es keine exakten Angaben über die Speichergröße gibt wird dieser Parameter in die Sensitivitätsanalyse mit aufgenommen und die Auswirkung unterschiedlicher Werte ermittelt.

## C.3. Verteilung

Bei Zentralheizungssystemen ist eine Verteilung der vom Wärmeerzeuger produzierten Wärme an die jeweiligen Übergabesysteme notwendig. Der Wasserumlauf wird durch Pumpen, meist elektrische Kreiselpumpen, angetrieben. Es kommen Einrohr- oder häufiger Zweirohrsysteme zum Einsatz. Bei letzteren wird zwischen unterer und oberer Verteilung unterschieden, wobei untere Verteilung bedeutet, dass die Vor- und Rücklaufleitungen horizontal an der Kellerdecke verlegt sind und die Heizkörper durch vertikale Steigleitungen versorgt werden. Die Wärmeverluste der Leitungen fallen bei unterer Verlegung hauptsächlich im Keller, bei oberer Verlegung hauptsächlich im Dach an. [1, S. 751ff]

In EmMi-transient werden die innerhalb des Gebäudes verlaufenden Rohre des Heizungssystems als adiabat angenommen, da die thermischen Verluste dieser Leitungen innerhalb der jeweiligen Zone auftreten und daher für die energetische Bewertung vernachlässigt werden können. Die Rohre werden über EnergyPlus-Modelle vom Typ *Pipe:Adiabatic* abgebildet.

### C. Modellierung des Heizungssystems

Eine zukünftige mögliche Erweiterung bestände darin, für unbeheizte Zonen wie den Keller Rohrleitungen mit Verlusten durch EnergyPlus-Modelle vom Typ *Pipe:Indoor* abzubilden. Dabei muss die Rohrlänge angegeben werden, diese könnte durch die Gebäudegeometrie abgeschätzt werden. So können horizontale Leitungen durch Länge und Breite des Gebäudes abgeschätzt werden, vertikale Leitungen durch die Höhe des Gebäudes. Allerdings kommen je nach Art der Verlegung mehrere Rohre für jede Wohneinheit vor, die entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Für Rohrleitungen, die im Wärmeaustausch mit der Außenluft stehen wie etwa bei einer Solarthermieanlage, werden die Wärmeverluste durch Abbildung mittels des EnergyPlus-Modells *Pipe:Outdoor* berücksichtigt. Der Rohrrinnendurchmesser wird für alle Leitungen, bei denen Wärmeverluste berücksichtigt werden, mit 3 cm angegeben, als Konstruktion wird ein Schichtaufbau aus 3 mm Kupfer und 3 cm Dämmmaterial mit  $\lambda$ -Wert 0,040 W/mK verwendet. Die real vorkommenden Rohrdurchmesser könnten zukünftig gemäß [1, Tafel 2.2.1-1] anhand des Massenstroms abgeschätzt werden.

Die Pumpe im Heizkreislauf wird über das EnergyPlus-Modell *Pump:VariableSpeed* abgebildet. Dabei wird von einer linearen Wirkungsgradkurve ausgegangen. Der Wirkungsgrad bewegt sich gemäß [209] je nach Ausführung im Bereich zwischen 5 % und 50 % und wird standardmäßig auf 30 % gesetzt, dies kann in der Gebäudetypologiedatei geändert werden. Die notwendige Leistung wird automatisch ermittelt.

Die Pumpe für einen ggf. vorhandenen Solarthermiekreislauf wird ebenso mit linearer Wirkungsgradkurve und dem Modell *Pump:VariableSpeed* abgebildet. Hierbei ist der Wirkungsgrad gemäß [81, S. 66] auf Grund der kleineren Volumenströme im Bereich zwischen 7 % bis maximal 20 %. Die Leistung solch einer Pumpe ist im Bereich 25 W bis 80 W. In EmMi-transient wird von einem Wirkungsgrad von 20 % und einer Leistung von 25 W ausgegangen, der Wirkungsgrad kann variiert werden. Zukünftig kann die Pumpenleistung beispielsweise mittels Werten aus [1, Tabelle 2.8.6-1] dynamisch bestimmt werden.

Die Zirkulationspumpe für den Trinkwasserkreis wird mittels des EnergyPlus-Modells *Pump:ConstantSpeed* abgebildet, da sie konstant mit der gleichen Geschwindigkeit läuft. Die benötigte Leistung der Pumpe wird automatisch ermittelt, der Wirkungsgrad wird mit 30 % parametrisiert.

Die Verlustleistung der Pumpen wird nicht an die Flüssigkeit übertragen sondern geht verloren.

## C.4. Übergabesysteme

Die Wärmeübergabesysteme von zentralen Heizungsanlagen lassen sich in freie Heizflächen wie Heizkörper sowie in eine Bauteiltemperierung, bei der in den Baukörper integrierte Heizflächen wie Fußbodenheizungen verwendet werden, unterscheiden. Bei heutzutage eingesetzten Heizflächen wird die Wärme zumeist sowohl per Konvektion als auch per Strahlung

an den Raum abgegeben, das Verhältnis schwankt je nach verwendetem System. Eine wichtige Kenngröße hierfür ist der Heizkörperexponent  $n$ , der ein Maß für die Abhängigkeit der Wärmeabgabe einer Heizfläche von der Übertemperatur darstellt. [1, S. 794ff]

In EmMi-transient werden die Heizflächen über das Modell *ZoneHVAC:Baseboard:RadiantConvective:Water*, welches eine freie Heizfläche an einer Wand darstellt, modelliert. Die Heizfläche wird der ersten angelegten Wand eines Gebäudes zugewiesen und repräsentiert alle im realen Gebäude existierenden Heizflächen in einem Modell. Da die gesamten Vollgeschosse sowie Keller und Dach je eine Zone bilden und keine Untersuchungen zum thermischen Komfort in einzelnen Räumen vorgenommen werden ist diese grobe Modellierung ausreichend, um die Wärmeabgabe an die Zone darzustellen. Die Normleistung der Heizfläche wird über Typtage bestimmt. Die Wärmeabgabe erfolgt rein konvektiv, zukünftig könnte für Komfortbetrachtungen eine gleichmäßige radiative Wärmeabgabe an alle vorhandenen Wände modelliert werden.

In den Baukörper integrierte Heizflächen mit niedrigen Temperaturen lassen sich in EnergyPlus über die Modelle *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow* und *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:ConstantFlow* abbilden. Diese Modelle werden einer Oberfläche wie einer Wand oder dem Fußboden zugewiesen und die abgegebene Energie der Heizfläche wird dieser Oberfläche zugeschlagen. In EmMi-transient ist derzeit keine Bauteiltemperierung abgebildet, da bei der Sanierung von Bestandsgebäuden, insbesondere den Gebäuden der Baualtersklasse des Fallbeispiels, eine solche auf Grund der notwendigen baulichen Veränderungen kaum zum Einsatz kommt. Zukünftig ist eine Implementierung für die Untersuchung von Neubauquartieren möglich.

Die Regelung des Heizungssystems erfolgt durch die EnergyPlus-Modelle des Types *ZoneControlThermostat*, welche die durch den Wärmeerzeuger bereitgestellte Temperatur und den Volumenstrom so regulieren, dass die Sollraumtemperatur in den mit den Thermostaten ausgestatteten thermischen Zonen erreicht wird, sofern die Leistung der beteiligten Komponenten ausreichend ist.

## C.5. Hilfsenergiebedarf

Der Hilfsenergiebedarf des Heizungssystem wird derzeit nur für die Pumpen berücksichtigt, wie in Abschnitt C.3 beschrieben.

Der elektrische Energiebedarf für die Steuerelektronik der Wärmeerzeuger, Ventile und sonstige Geräte wird nicht abgebildet. Hier können zukünftig Werte wie in [165, Teil III, S. 35, Tab. 23] entsprechend umgerechnet und als elektrische Verbraucher hinzugefügt werden, wobei dann nach den einzelnen Geräten unterschieden werden muss.

## C.6. Lüftungssystem

Lüftungsanlagen werden derzeit in EmMi-transient nicht abgebildet, da sie für Bestandsgebäude kaum vorkommen. Für Sanierungen kann zukünftig eine Abbildung gemäß [126] mittels der entsprechenden EnergyPlus-Modelle erfolgen. Dann müssen allerdings auch entsprechende Daten zur Parametrisierung bekannt sein. Generell sind dabei vor allem Anlagen mit Wärmerückgewinnung von Interesse, reine Zu- oder Abluftanlagen sind nicht ange-dacht.

## C.7. Auslegung der Systeme

Viele Parameter in EnergyPlus können automatisch ermittelt werden, dies geschieht mittels der Modelle *Sizing:Zone* und *Sizing:Plant*. Hierfür sind sommerliche und winterliche Typtage zu definieren, in EnergyPlus *SummerDesignDay* und *WinterDesignDay* genannt. Diese werden sowohl für die Heiz- und Kühllastberechnung der thermischen Zone als auch die Bestimmung der auf den Wert *autosize* gestellten Parameter der Heizungsanlage verwendet. Falls mechanische Lüftung modelliert ist, werden diese Typtage auch zur Ermittlung der notwendigen Heiz- und Kühlluftvolumenströme der Lüftungsanlage verwendet.

Der Typtag für die Berechnung der Heizlast und der Heizungsparameter geht von einer konstanten Trocken- und Feuchtkugeltemperatur aus, deren Wert beispielsweise aus den meteorologischen Daten in [64] der Norm DIN EN 12831, welche die gesetzliche Grundlage für die Heizlastberechnung bildet, bezogen werden kann. Hier wird ein Wert von  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  verwendet, dies entspricht dem Wert der tiefstmöglichen durchschnittlichen Temperatur über 48 Stunden im Winter für die Stadt Nürnberg aus obiger Norm. Weiterhin wird einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s und das Modell ASHRAEClearSky zur Berechnung der solaren Einstrahlung bei der Typtagermittlung verwendet.

Die Werte der in Tabelle C.1 aufgeführten Parameter werden in den jeweiligen Teilmodellen automatisch anhand des Typtags ermittelt.

Für die Bestimmung der Parameter der Heizungsanlage mittels des EnergyPlus-Modells *Sizing:Plant* müssen die Vorlauftemperatur und die Abweichung der Rücklauftemperatur davon festgelegt werden. Die hierfür verwendeten Werte für die unterschiedlichen Kreisläufe des Systems sind in Tabelle C.2 dargestellt.

Tabelle C.1.: Automatisch ermittelte Parameterwerte anhand der Typtage

ModellTyp	Modellname	Parameter
Boiler:HotWater	HeatSys1 Boiler	Nominal Capacity
Boiler:HotWater	HeatSys1 Boiler	Design Water Flow Rate
DistrictHeating	HeatSys1 DH	Nominal Capacity
Plantloop	HeatSys1	Maximum Loop Flow Rate
WaterHeater:Mixed	Water Heater, Buffer Storage LW-WP	Use Side Design Flow Rate
WaterHeater:Mixed	Water Heater, Buffer Storage LW-WP	Source Side Design Flow Rate
Branch	alle	Maximum Flow Rate
Pump:VariableSpeed	HeatSys1 Pump, Collector Loop Supply Pump	Rated Flow Rate
Pump:VariableSpeed	HeatSys1 Pump, Collector Loop Supply Pump	Rated Power Consumption
Pump:ConstantSpeed	DHW Loop Supply Pump	Rated Power Consumption
HeatExchanger:FluidToFluid	Heat Exchanger	Loop Supply Side Design Flow Rate
ZoneHVAC:Baseboard:RadiantConvective:Water	HeatSys1 Demand Radiator	Heating Design Capacity
ZoneHVAC:Baseboard:RadiantConvective:Water	HeatSys1 Demand Radiator	Maximum Water Flow Rate

Tabelle C.2.: Auslegungstemperatur der Wasserkreisläufe

Kreis	Vorlauftemperatur	Abweichung Rücklauftemperatur
Heizkreis	60 °C	15K
Trinkwarmwasserkreis	50 °C	25K
Solarthermiekreis	82 °C	11K





## **D. Modellierung der Stromerzeugung und des Strombedarfs**

Die Stromerzeugung und der Strombedarf werden in EmMi-transient nur für die Gebäude des untersuchten Quartiers ermittelt. Insbesondere werden also nicht die Übertragungsnetze und zentralen Stromerzeugungssysteme wie Kraftwerke und deren Verhalten berücksichtigt. Dies ist großräumigeren Energiesystemsimulationen vorbehalten. Für die Untersuchungen am Quartier sind vor allem dezentrale Lösungen, die lokal Strom erzeugen und möglichst auch verbrauchen, von Interesse. Solche Systeme ermöglichen eine gewisse Entkopplung eines Quartiers vom allgemeinen Stromnetze durch eine geringere Netzbelastung.

Ziel ist dabei nicht ein autarkes Quartier zu schaffen, sondern die elektrische Energie möglichst effizient zu nutzen. Dazu gehört, Transportverluste durch kurze Leitungen zu minimieren. Dies wird in EmMi-transient so umgesetzt, dass für quartiersweise Maßnahmen wie etwa Lastverschiebungen für elektrische Verbraucher eine Kopplung der Einzelsimulationen (vgl. Kapitel G) möglich ist und dadurch in einem Gebäude produzierter Strom auch in anderen Gebäuden zum Einsatz kommen kann. Dies kann zukünftig genutzt werden, um den Zusammenschluss der Gebäude eines Quartiers zu einem virtuellen Kraftwerk zu untersuchen.

Der Strombedarf in Wohngebäuden wird großteils durch die Haushaltsgeräte verursacht, bei elektrischer Warmwasserzeugung auch der dafür eingesetzten Geräte. Im Zuge des Einsatzes von elektrischen Wärmepumpen muss aber auch deren Strombedarf berücksichtigt werden. Dieser lässt sich in Verbindung mit thermischen Speichern gut für Lastverschiebungen nutzen. In Abschnitt D.1 wird auf die Modelle, die für die Abbildung des Strombedarfs der Haushaltsgeräte verwendet werden, eingegangen. In Abschnitt D.2 wird auf die in EmMi-transient verwendeten und zukünftig hinzuzufügende Modelle zur Abbildung von lokalen Stromerzeugungssystemen und Speichersystemen eingegangen. In Abschnitt D.3 wird auf Möglichkeiten eingegangen die mittels elektrischer Lastverschiebung des Strombedarfs zur besseren Ausnutzung schwankender regenerativer Stromerzeugung genutzt werden können.

### **D.1. Haushaltsstrombedarf**

Der Haushaltsstrombedarf wird in EnergyPlus über die Vorgabe von Lastprofilen abgebildet. Für die Erstellung von Lastprofilen werden in EmMi-transient Daten aus dem Standardlastprofil des BDEW [14] verwendet. Dies sind geglättete Profile, die das Verhalten mehrerer hundert

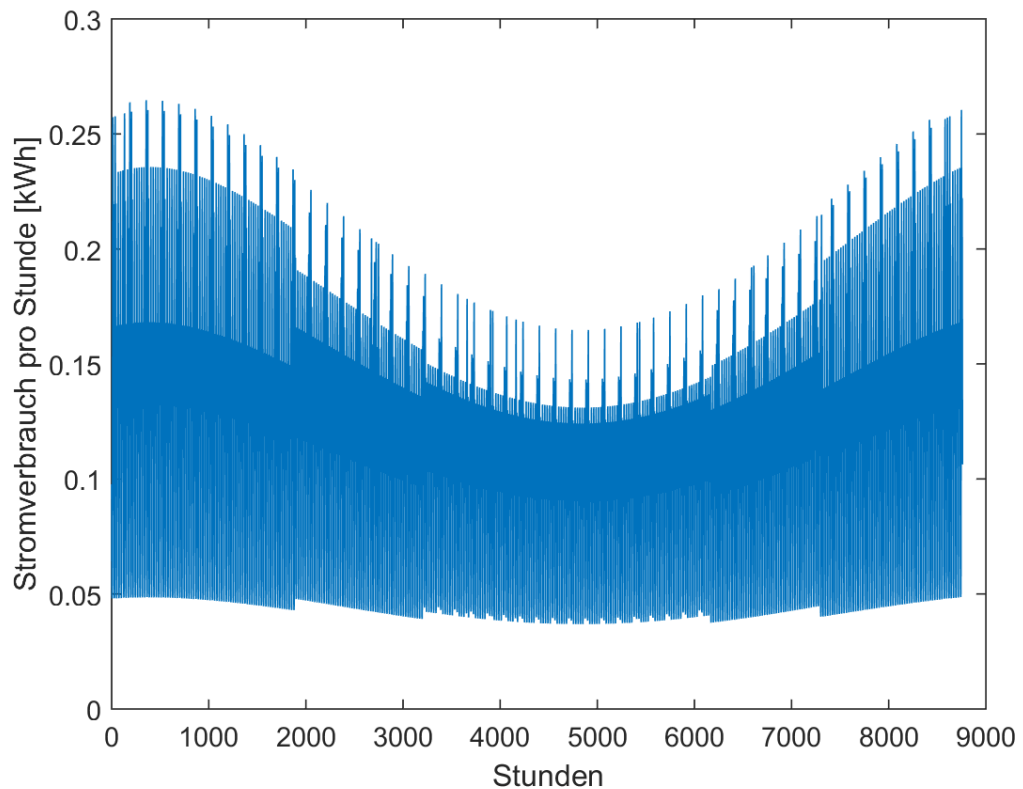


Abbildung D.1.: Standardlastprofil H0 mit Jahresstromverbrauch von 1000 kWh

Haushalte abbilden. Das verwendete Standardlastprofil ist normiert auf einen Jahresstromverbrauch von 1000 kWh in Abbildung D.1 abgebildet. Dieses wird mit in den Gebäudedaten vorgegebenen jährlichen Stromverbräuchen für Haushaltsgeräte skaliert im jeweiligen EnergyPlus-Gebäudemodell hinterlegt. Werte unterschiedlicher Quellen für den jährlichen Stromverbrauch werden in [80, 4.5.5] verglichen. Im Vergleich zu konstanten Lastprofilen, bei denen in jeder Stunde des Jahres der gleiche Haushaltsstrombedarf vorhanden ist, ist dies vor allem für die Untersuchung der Stromeigendeckung eine wesentlich bessere Annäherung an reale Lastprofile [161].

Allerdings werden auf Grund der Glättung im Standardlastprofil keine Lastspitzen betrachtet. Diese können aber für Untersuchungen zur Netzbelastung eine große Rolle spielen. Daher existiert in EmMi-transient auch die Möglichkeit für jedes Gebäude individuelle Lastprofile zu hinterlegen. Diese können beispielsweise mittels des in [128] vorgestellten Modells erzeugt werden. Bei diesem Modell wird ausgehend von Angaben zu Bewohnern, Zeitbudgetdaten und Statistiken über das Vorhandensein bestimmter Geräte ein Lastprofil für jedes Gebäude eines Quartiers erstellt, welches auch Lastspitzen beinhaltet. Dies ist so modelliert, dass die Summe aller Gebäudelastprofile wieder das vorgegebene Standardlastprofil ergibt. Durch eine manuelle Kopplung dieses Modells und EmMi-transient können somit diese die Lastspitzen beinhaltenden Daten verwendet werden. Für zukünftige Anwendungen ist eine direkte Kopplung beispielsweise mittels FMI möglich, mehr hierzu in Kapitel 15.1.

In EmMi-transient wird der Strombedarf der elektrischen Haushaltsgeräte über das EnergyPlus-Modell *ElectricEquipment* und einen zugehörigen Schedule abgebildet. Dieses Modell bildet außer der Bilanzierung des elektrischen Energiebedarfs auch die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme, also in interne Gewinne, ab. Hierbei kann der Anteil der konvektiven, latenten und radiativen Wärmeabgabe angegeben werden sowie der Energieanteil, der beispielsweise bei Verwendung elektrischer Warmwassererhitzung durch das Abwasser nicht dem Gebäude zuzurechnen ist. Aufgrund der vor allem energetischen Sichtweise wird die Aufteilung mit 80 % konvektiver Wärmeabgabe und 20 % Verlustanteil angesetzt. Die Beleuchtung ist dabei ebenfalls enthalten, da diese für das Standardlastprofil nicht extra erfasst wird.

## D.2. Lokale Stromerzeugung

Zur lokalen Stromproduktion in Gebäuden stehen diverse Techniken zur Verfügung. Neben Photovoltaikanlagen können auch Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme (KWK), Brennstoffzellen oder Windkraftanlagen sowie weitere Systeme zum Einsatz kommen. In EmMi-transient ist derzeit nur die Stromerzeugung durch PV-Anlagen modelliert. Im Folgenden wird aber auch auf die anderen Systeme und deren Modellierungsmöglichkeiten in EmMi-transient eingegangen.

Für die PV-Anlagenmodellierung muss ein PV-Kollektor einer Dachflächen zugewiesen werden. Hierbei wird wie bei Solarthermieanlagen die Orientierung berücksichtigt, primär süd-, dann west-, ost- und nordorientierte Dachflächen. Generell sind 80 % der jeweiligen Fläche als aktive PV-Fläche definiert. In diesem Reduktionsfaktor enthalten sind Abminderungen durch Dachaufbauten wie Kamine, die Rahmen der PV-Module und Abstände zwischen ihnen. Eine PV-Nutzung auf Fassaden wird derzeit nicht abgebildet, kann aber analog erfolgen. Hierbei muss allerdings auf Verschattung und Hemnisse wie denkmalgeschützte oder Schmuckfassaden geachtet werden. Eine Kombination mit Solarthermiekollektoren ist derzeit nicht möglich (vgl. Abschnitt C.1.5).

Die durch die PV-Fläche zur Verfügung stehende maximale Leistung wird mit  $100 \text{ W}_{\text{el}}/\text{m}^2$  sehr konservativ abgeschätzt (vgl. [162]). Der Wirkungsgrad wird mit 15 % in Anlehnung an die Daten zur PV-Anlage DE.Gen.01 aus TABULA [126] angesetzt. Die PV-Module werden mittels der EnergyPlus-Modelle *Generator:Photovoltaic* und *PhotovoltaicPerformance:Simple* abgebildet. Die maximale Leistung der gesamten PV-Fläche wird aus der spezifischen Leistung der PV-Fläche multipliziert mit 80 % der Fläche der obersten Geschossdecke abgeschätzt. Dies wird für die Parametrisierung des Modells *ElectricLoadCenter:Generators*, welches die Gesamtheit aller PV-Module repräsentiert, benötigt. Falls zukünftig andere lokale Stromerzeugungssysteme hinzugefügt werden, wird über diese Leistungsangabe ermittelt aus welcher Quelle der gerade benötigte elektrische Energiebedarf gedeckt wird.

#### D. Modellierung der Stromerzeugung und des Strombedarfs

Der bei einer PV-Anlage notwendige Wechselrichter wird mittels des Modells *ElectricLoadCenter:Inverter:Simple* abgebildet, welcher mit einer Effizienz von 90 %, angelehnt an die Werte aus [262, S. 134], parametrisiert ist.

Auch für die anderen oben erwähnten Techniken zur lokalen Stromerzeugung stehen in EnergyPlus verwendbare Modelle zur Verfügung. So lassen sich KWK-Anlagen über das Modell *Generator:MicroCHP* abbilden, allerdings nur als stromgeführtes System, nicht als wärmegeführtes System, wie es in Einzelgebäuden meistens verwendet wird [1, S. 731f].

Für Windkraftanlagen steht in EnergyPlus das Modell *Generator:WindTurbine* zur Verfügung. Dieses bildet sowohl Anlagen mit horizontaler als auch vertikaler Rotationsachse ab. Die Windgeschwindigkeit und Luftdichte werden aus den Wetterdaten des Modells und zusätzlichen Parametern ermittelt. Die Verluste der Teilsysteme werden über einen Gesamtwirkungsgrad abgedeckt.

Für Brennstoffzellen steht das Modell *Generator:FuelCell* mit diversen Submodellen zur Verfügung. Dieses ist geeignet, um SOFC und PEMFC Brennstoffzellen abzubilden. Das zugehörige Modell wurde im Rahmen des Annex 42 entwickelt. Es benötigt sehr umfangreiche und schwer zu erhaltende Parametrisierungsdaten da es vorrangig für Forschungszwecke eingesetzt wird.

Für die Verwendung der lokal erzeugten elektrische Energie zur Deckung des Bedarfs ist die Nutzung des EnergyPlus-Modells *ElectricLoadCenter:Distribution* notwendig, mittels dessen die Erzeuger entsprechend dem vorgegebenen Betriebsmodus an- oder abgeschaltet werden. In EmMi-transient wird der Betriebsmodus *Baseload* verwendet, der allen Erzeugern erlaubt bei voller Leistung zu produzieren. Alternativ dazu gäbe es andere Modi die sich am Bedarf orientieren (*TrackDemand*, *TrackElectrical*, *TrackMeter*) bzw. die Leistung begrenzen (*DemandLimit*). Zwei weitere Modi (*FollowThermal*, *FollowThermalLimitElectrical*) erlauben die Steuerung zur Deckung eines thermischen Bedarfs bei KWK-Anlagen. Dies könnte zukünftig für die Anpassung der in Abschnitt C.1.2 beschriebenen KWK-Anlagen für wärmegeführten Betrieb verwendet werden. Falls zu einem Zeitpunkt nicht genug Strom durch lokale Erzeugung verfügbar ist wird automatisch Strom vom Netz bezogen.

Stationäre Batteriespeicher sind in EmMi-transient derzeit nicht abgebildet. Da diese aber vor allem auf Grund der geringer werdenden Einspeisevergütung für lokal erzeugten Strom immer attraktiver werden, ist dies ein zukünftig mittels der EnergyPlus-Modelle *ElectricLoadCenter:Storage:Simple* oder *ElectricLoadCenter:Storage:Battery* hinzuzufügendes System. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um durch intelligente Ladung eines Speichers die Einspeisespitzen von PV-Anlagen in der Mittagszeit zu reduzieren. Im Verbund mehrerer Gebäude sind hier weitere Potentiale vorhanden die zukünftig mittels EmMi-transient untersucht werden könnten.

### D.3. Elektrische Lastverschiebung

Die herkömmliche, zentrale Stromerzeugung in Großkraftwerken wird immer mehr durch dezentrale Stromerzeuger wie PV- oder Windkraftanlagen ergänzt. Diese haben zeitlich wesentlich stärker schwankende Erzeugungskurven und wenn deren elektrische Energie in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird muss dieses mit den dadurch entstehenden Erzeugungsspitzen umgehen können. Weiterhin orientiert sich der Strombedarf bisher nicht daran, wann hohe Überschüsse vorhanden sind, daher müssen große Reserven eingeplant werden. [250, S. 4419f]

Es wäre somit wünschenswert, dass lokal regenerativ erzeugter Strom auch größtenteils lokal verbraucht wird. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, dass sich der Strombedarf an die schwankende regenerative Stromerzeugung anpasst. Dies kann mittels elektrischer Lastverschiebung geschehen. Bei dieser werden elektrische Verbraucher wie Haushaltsgeräte oder eben Wärmepumpen so angesteuert, dass sie zu dem Zeitpunkt laufen wenn Stromüberschuss vorhanden ist.

Dies würde eine Nutzung flexibler Stromtarife ermöglichen und zu insgesamt höherer Effizienz der Stromerzeugung und -verteilung führen. Allerdings würde auch zusätzliche technische und wirtschaftliche Komplexität in das System eingebracht. [250, S. 4425f]

Da in EmMi-transient der Haushaltsstrombedarf derzeit über Standardlastprofile und nicht über ein angekoppeltes detailliertes Strommodell wie etwa [128] oder [102] ermittelt wird, ist elektrische Lastverschiebung nur bei Komponenten der Heizungsanlage sinnvoll abzubilden. Hier ist eine Lastverschiebung nur bei elektrisch betriebenen Wärmepumpen sinnvoll, da diese in Verbindung mit einem thermischen Speicher zeitlich flexibel sind. In EmMi-transient ist es daher möglich, bei lokalem Stromüberschuss durch die installierten PV-Anlagen im simulierten Quartier die Solltemperatur in Gebäuden mit Wärmepumpen hochzusetzen, um den Strom direkt wieder zu verbrauchen. Diese beispielhafte Lastverschiebemaßnahme wird in G.2 genauer beschrieben. Dabei werden Leitungsverluste nicht berücksichtigt, da die Leitungen innerhalb eines Quartiers kurz sind. Auch technische und rechtliche Probleme [19] sowie wirtschaftliche Herausforderungen [18] die bei Quartiersstromnetzen auftreten können werden vernachlässigt.

Zukünftig sind über die zugrundeliegende FMI-Implementierung auch andere Maßnahmen sowohl im Einzelgebäude als auch im Quartiersverbund abbildbar. Dies könnte die Aktivierung einer Einzelgebäude-KWK-Anlage bei Strommangel sein oder die Abbildung eines stromgeführten BHKW mittels eines per FMI angekoppelten Modells. Auch elektrische Speicher, die vom Quartier gemeinsam genutzt werden, oder Ladestationen für Elektrofahrzeuge könnten untersucht werden.



## E. Modellierung des Nutzerverhaltens

In diesem Kapitel werden die abbildbaren und die Simulation beeinflussenden Nutzerverhaltensweisen dargestellt. Da eine Datengrundlage für die Einschätzung der konkreten Verhaltensweise der Einwohner in einem Quartier nicht existent ist wird das Nutzerverhalten in EmMi-transient stark vereinfacht abgebildet. Es orientiert sich teilweise an standardisierten Nutzerverhaltensprofilen, welche wie bei stationären Vergleichsrechnungen mittels über längere Zeiträume gemittelte Nutzerrandbedingungen abgebildet werden [80, S. 11]. Teilweise, wie in Abschnitt D.1 für den Haushaltsstrom beschrieben, werden zeitlich höher aufgelöste Profile verwendet.

Generell wird das Nutzerverhalten in EmMi-transient über Schedules in den EnergyPlus-Modellen abgebildet. Dabei kann solch ein Schedule immer nur als beispielhaft angesehen werden, da das Verhalten jedes einzelnen Bewohners eines Gebäudes zeitlich stark variieren kann, jeder Bewohner unterschiedliche Verhaltensweisen hat und es zudem auch noch zu Wechselwirkungen zwischen Bewohnern kommen kann. So ist beispielsweise bei einer Wohneinheit mit einer Dusche nur ein Duschvorgang gleichzeitig möglich. Daher müsste ein detailliertes Nutzermodell Überlagerungen der einzelnen Verhaltensweisen für alle Bewohner eines Gebäudes erstellen. Ansätze für solche Modelle existieren [21] [96], allerdings stellt sich hier die Frage nach Möglichkeiten zur Validierung noch stärker als bei Gebäudemodellen.

Die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch wurden in vielen Studien wie etwa [48] und [238] untersucht. Dort wurden Variationen des Jahreswärmeverbrauchs um den Faktor 3 bis 9 beschrieben, die größtenteils auf das unterschiedliche Nutzerverhalten zurückgeführt werden können. Insbesondere durch den inzwischen bei vielen Gebäuden hohen baulichen Wärmeschutz erlangen die Lüftungswärmeverluste sowie die Energie für Trinkwassererwärmung, die beide vor allem durch den Nutzer beeinflusst werden, immer größeren Einfluss. Wie in Abschnitt 3.4 bereits beschrieben, ist generell für den Vergleich von berechnetem Energiebedarf und realem Energieverbrauch die Abbildung des Nutzerverhaltens essentiell.

Die hier beschriebene Abbildung des Nutzerverhaltens orientiert sich an den Erkenntnissen der Masterarbeiten [80], [268], [141], wobei nur die Aspekte Fensteröffnung, Innenraumtemperatur, Nachtabenkung, Warmwasserbedarf und Anwesenheit berücksichtigt werden.

Für die Abbildung von natürlicher Lüftung durch Fensteröffnung kann eine Erhöhung der definierten Luftwechselrate zu vorgegebenen Uhrzeiten erfolgen. Standardmäßig ist in den



## E. Modellierung des Nutzerverhaltens

EnergyPlus-Gebäudemodellen die Luftwechselrate pro Stunde über das Modell *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, welches auf den Schedule *AirChange1* zugreift, für alle Zeitschritte abgebildet. Die entsprechende Luftwechselrate ist in der Gebäudetypologiedatei für jeden Gebäudetyp festgelegt, der Standardwert ist 0,7 1/h und orientiert sich an dem Wert aus DIN 4108-6 [59, Anhang D]. Soll die Luftwechselrate zeitlich variabel betrachtet werden, so wird zusätzlich ein per FMI beeinflussbarer Schedule erzeugt sowie ein zweites Modell vom Typ *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, welches diesen Schedule nutzt. Auf die technische Umsetzung wird in Kapitel G genauer eingegangen.

Die Innenraumsolltemperatur wird für jeden Gebäudetyp in der Gebäudetypologiedatei festgelegt, hierbei wird zwischen der tagsüber zu erreichenden Temperatur und der für die Nachtabsenkung zu verwendenden Temperatur unterschieden. Die Innenraumsolltemperatur wird über den Schedule *Setpointtemperature* festgelegt. Dieser Schedule wird im Modell *ThermostatSetpoint2* vom Typ *ThermostatSetpoint:DualSetpoint* zum Setzen der Innenraumsolltemperaturen in den beheizten thermischen Zonen verwendet.

Für die Werte der zu verwendenden Innenraumsolltemperatur werden für EmMi-transient die in [231] angestellten Untersuchungen zur Innenraumtemperatur in Gebäuden, die vor der Wärmeschutzverordnung von 1995 errichtet wurden, und modernen Gebäuden, die danach errichtet wurden, verwendet. Diese besagen, dass in den alten Gebäuden der Mittelwert und der Median der Innenraumtemperatur zwischen 18 °C und 18,5 °C mit einer Standardabweichung von 4 K liegt, bei modernen Gebäuden bei 20 °C mit Standardabweichung von 2,5 K. Daher wird standardmäßig für alle Gebäude, die vor 1995 errichtet wurden, eine tagsüber zu erreichende Solltemperatur der beheizten Räume von 18,25 °C verwendet, für neuere Gebäude werden 20 °C verwendet. Dies deckt sich zumindest näherungsweise auch mit den Vorgaben von 19 °C aus DIN V 4108-6 bzw. 20 °C aus DIN 18599-10 für Wohngebäude.

Für die Temperatur bei aktiver Nachtabsenkungswerte werden standardmäßig 17 °C wie in [199] verwendet. Die Nachtabsenkung ist zwischen 22:00 Uhr und 05:00 Uhr aktiv. Diese Dauer von 7 Stunden orientiert sich an der Vorgabe für eine Nachtabschaltung aus DIN V 4108-6 [59, Tabelle D.3].

Zur Abbildung des Warmwasserbedarfs wurde mittels der Software DHWcalc für jedes Gebäude ein Zapfprofil erzeugt, welches in EmMi-transient über einen Schedule mittels des Modells *WaterUse:Equipment* eingebunden wird. Dieses Profil basiert auf den folgenden Einstellungen in der Software: Mehrfamilienhausprofil mit Anzahl der Haushalte wie in der GIS-Datei hinterlegt, dabei wird von 80 l Warmwasser bei 60 °C pro Haushalt und Tag ausgegangen gemäß dem mittlerem Verbrauchsverhalten für Familien aus [173, S.98]. Weiterhin werden vier Kategorien für Zapfungen verwendet, Zeitschritte von 60 Minuten, Starttag für die Profilerzeugung ist Montag, Sommerzeit ist aktiviert, Urlaubszeit deaktiviert und es werden die Standardverteilungen der Software für Wahrscheinlichkeiten und Volumenströme verwendet. Diese Annahmen ergeben relative hohe Zapfmengen, da in den Gebäuden nicht immer Familien in allen Haushalten sind, aber wegen des Nichtvorhandenseins genauerer Daten

wird dies akzeptiert. Eine Mischung mit Kaltwasser wird nicht modelliert, d.h. die gezapfte Warmwassertemperatur ist immer 60 °C.

Technisch wird dies umgesetzt, indem die per DHWcalc erzeugten Profile, welche die Zapfmenge in l/h enthalten, eingelesen werden und das Maximum ermittelt wird. Dann wird das Profil umgewandelt, so dass der in EnergyPlus einzulesende Schedule den Anteil am maximalen Volumenstrom angibt. Die entsprechenden Dateien liegen im Verzeichnis *data/DHWcalc* von EmMi-transient.

Alternativ zu diesen Profilen und den damit verbundenen Annahmen wäre entweder eine dauerhafte, konstante Warmwasserzapfmenge, oder wie beim Standardlastprofil für elektrische Verbraucher ein Profil für alle Gebäude, wobei dann regelmäßig gleichzeitige Zapfungen vorkommen würden.

Alle bisher beschriebenen, durch das Nutzerverhalten beeinflussten Vorgänge, hängen maßgeblich von der Anwesenheit von Personen im Gebäude ab. Diese zu beschreiben und in Zusammenhang mit Vorgängen wie Fensterlüftung oder Verwendung von elektrischen Haushaltsgeräten abzubilden wäre also für eine detaillierte Modellierung notwendig. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, daher wird hier die Anwesenheit von Personen als unabhängiger Vorgang in der Simulation betrachtet und die Personen werden nur als interne Wärmegevinne berücksichtigt.

Dafür wird die maximale Anzahl von Personen, die im Gebäude anwesend sein kann, aus der Anzahl der Haushalte mit der Anzahl durchschnittlicher Personen pro Haushalt, die in der GIS-Datei hinterlegt ist, multipliziert und im EnergyPlus-Modell *People* hinterlegt. Der Schedule *People Number* wird in dem Modell verwendet, um abzubilden, dass tagsüber zwischen 8 und 19 Uhr 20 % der Personen anwesend sind und in der restlichen Zeit 90 %. Mittels des Schedules *People Activity* wird definiert, dass jede Person eine Wärmeabgabe von 108 W hat. Dieser Wert ist konstant hinterlegt und entspricht einer sitzenden, ruhigen Tätigkeit bei einer Stoffwechselrate von 1 met.

Diese vereinfachten Annahmen wurden getroffen, da keine entsprechenden Informationen für detaillierte Nutzerverhaltensweisen vorhanden sind. Für die Berücksichtigung bei Zukunftsprognosen des Energiebedarfs sollten mögliche Änderungen im Nutzerverhalten, beispielsweise durch vermehrte Homeoffice-tätigkeit, in den Szenarien untersucht werden. Dies erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht, kann aber durch Anpassung der oben genannten Schedules erfolgen.

Zukünftig wäre die Kopplung mit detaillierten physikalischen oder statistischen Modellen zur Abbildung des Nutzerverhaltens, beispielsweise mittels des in Kapitel G beschriebenen FMI, wünschenswert, da hierdurch vielfältige zusätzliche Untersuchungsmöglichkeiten entstehen würden. Die für die Parametrisierung solcher Nutzerverhaltensmodelle notwendige Datenmenge ist allerdings vermutlich sehr groß und schwer zu erhalten, insbesondere wenn eine physikalische Modellierung verwendet wird. Mittels statistischer Modellierung lässt sich die

### *E. Modellierung des Nutzerverhaltens*

notwendige Datenmenge ggf. in Grenzen halten, da hierbei das Nutzerverhalten in den für die Modellierung zu Grunde liegenden Daten implizit enthalten ist [135] [252].

## F. Abbildung des Sanierungsverhaltens

Ein zentrales Problem bei der Abbildung von Gebäudebeständen ist die Datenlage zum Sanierungsbestand der Gebäude (vgl. Abschnitt A.2). Für große Gebäudebestände mit mehreren Tausend Gebäuden lassen sich statistische Verfahren wie in [187] nutzen, um den allgemeinen Sanierungsstand des gesamten untersuchten Bestandes angenähert abzubilden. Wenn es jedoch wie in der vorliegenden Arbeit darum geht, ein Quartier mit nur wenigen Gebäuden abzubilden, so werden die durch Nutzung von statistischen Verteilungen ermittelten Sanierungsmaßnahmen zum Problem, da nicht bekannt ist, ob ein konkretes Gebäude wirklich so saniert ist, wie es die aus der Statistik ermittelte Stichprobe vorgibt. Oder anders gesagt: es kommt für eine realistische Abbildung von wenigen Gebäuden darauf an, an welchem Gebäude welche Maßnahme durchgeführt wurde. Ob Dämmung an einem kleinen Einfamilienhaus oder einem großen Mehrfamilienhaus mit vielleicht 30 Wohneinheiten angebracht wurde kann bei einem Quartier mit einigen Dutzend Gebäuden den Energiebedarf maßgeblich beeinflussen.

Daher wird für diese Arbeit ein anderes Vorgehen zur Abbildung des Sanierungsstands der Gebäude gewählt. Der jeweils abgebildete Sanierungsstand wird in der den Gebäudebestand beschreibenden Gebäudetypologiedatei vorgegeben. Dies wird ein Sanierungsszenario genannt. Es findet also im Gegensatz zu den Berechnungen mit der stationären Variante von EmMi keine Lebensdauerberechnung im Modell statt, diese muss extern erfolgen.

Dies hat den Vorteil, dass alle bekannten Informationen über den Sanierungsstand einzelner Gebäude korrekt abgebildet werden können. Sofern keine Informationen gegeben sind, kann eine Orientierung an den aus TABULA oder ähnlichen Typologien gegebenen Daten erfolgen. Weiterhin ist es somit möglich, mehrere zukünftige Sanierungsmaßnahmen vorzugeben und die Auswirkungen davon sowie den Einfluss der weiterhin unsicheren Parameter mittels Sensitivitätsanalyse zu bewerten.

Bei der Definition der Sanierungsszenarien muss zwischen den Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle und Maßnahmen, die die Anlagentechnik betreffen, unterschieden werden.

Für Gebäudehüllensanierungen können in der Gebäudetypologiedatei die Bauteile entsprechend der jeweiligen Sanierung angelegt werden. Hierfür kann entweder eine Orientierung an den Anforderungen der für das Jahr der abgebildeten Sanierung gültigen Verordnung wie Wärmeschutzverordnung oder EnEV erfolgen. Dann wird zum aus dem für den Gebäudetyp im Erstellungszustand bekannten Bauteilaufbau eine Dämmschicht in der Art hinzugefügt, dass der geforderte U-Wert des entsprechenden Referenzgebäudes erreicht wird. Alternativ

## *F. Abbildung des Sanierungsverhaltens*

können Maßnahmen, wie sie beispielsweise in [126, Kapitel 4] aufgeführt sind, hinterlegt werden oder komplett frei Sanierungsvarianten hinzugefügt werden. Somit können auch Sanierungen, die über die Anforderungen der Referenzgebäude hinaus gehen, abgebildet werden, wie beispielsweise ein zu erreichendes Passivhausniveau. Genauere Informationen zu den derzeit abgebildeten Maßnahmen für einzelne Bauteile sind in Abschnitt F.1 beschrieben.

Die Maßnahmen für die Anlagentechnik können im Sanierungsszenario entweder eine Wirkungsgradverbesserung gegenüber dem Erstellungszustand bei gleichbleibendem Energieträger sein, oder es wird der Energieträger und somit die Art des Heizungssystems geändert. Zusätzlich können hierbei Systeme zur lokalen Stromerzeugung vorgesehen werden. Die abgebildeten Maßnahmen werden in Abschnitt F.2 beschrieben.

Da die Sanierungen nur über die Gebäudetypologiedatei festgelegt werden kann sehr detailliert auf einzelne Sanierungsmaßnahmen eingegangen werden. Falls notwendig kann jedes Gebäude eines Quartiers als einzelner Gebäudetyp definiert werden und entsprechende Sanierungsmaßnahmen definiert werden. Da im Gegensatz zu dem Vorgehen in [187] zufällig ermittelte Sanierungszeitpunkte keine Rolle spielen, ist das Problem, dass einzelne Maßnahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt einen großen Einfluss auf das Ergebnis für ein Quartier haben können, gelöst. Falls zukünftig jedoch größere Gebäudebestände mit EmMi-transient simuliert werden sollen, so dass eine manuelle Eingabe der Sanierungen nicht sinnvoll möglich ist, könnte wieder auf dieses zufallsbasierte Verfahren zurückgegriffen werden.

Die Festlegung des Sanierungsszenarios und die Ermittlung der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen erfolgt in EmMi-transient vor einem für die Sensitivitätsanalyse durchzuführenden Parametersampling. D.h. die ein Sanierungsszenario festlegenden Parameter sind nicht Bestandteil der Sensitivitätsanalyse außer durch nachträgliche Veränderung der entsprechenden Parameter wie im Falle der Variation von Dicke oder Wärmeleitfähigkeit von Konstruktionen. Dies bedeutet, dass die Sensitivitäten in Abhängigkeit vom jeweiligen Sanierungsszenario unterschiedlich ausfallen können und daher auch unterschiedliche Empfehlungen für zukünftig genauer zu erfassende Daten abgeleitet werden können, um die möglichen Verbesserungen am Gebäudebestand realistischer im Modell abbilden zu können. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass unterschiedliche Sanierungsszenarien festgelegt und dafür Sensitivitäten bestimmt werden sollten, um die Empfehlungen für zukünftig zu erfassende Daten auf eine breitere Basis zu stellen.

### **F.1. Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle**

Für die opaken Bauteile der Gebäudehülle kann in EmMi-transient als Sanierungsmaßnahme innen- oder außenseitig eine Dämmschicht vorgesehen werden, die in der Gebäudetypologiedatei als zusätzliche Schicht des jeweiligen Bauteils eingegeben wird. Für Außenwände und Dach können dabei entweder Konstruktionen, wie sie in der TABULA Typologie in [126,

Kapitel 4] hinterlegt sind, modelliert werden. Alternativ kann eine Dämmschicht mit vorgegebener Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise 0,035 W/(mK), hinzugefügt werden, deren Dicke sich aus dem Anforderungswert an den U-Wert des entsprechenden Bauteils aus dem Referenzgebäude der EnEV ermitteln lässt. Hierbei kann zusätzlich Rücksicht auf real verbaute Dämmschichtdicken genommen werden. Die U-Wert-Anforderungen an das Referenzgebäude aus der aktuell gültigen EnEV 2014 [31] sind in Tabelle F.1 für die in EmMi-transient verwendeten Bauteile aufgeführt.

**Tabelle F.1.: U-Werte des EnEV 2014 Referenzgebäudes [31, Anlage 3, Tabelle 1]**

Bauteil	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Außenwände	0,24
Fenster	1,3
Dach	0,24
oberste Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum	0,24
Wände gegen Erdreich	0,30
Fußbodenaufbauten	0,50

Die Giebelwandflächen werden im Zuge der Erzeugung der Dachform als eigenständige Bauteile definiert, sie erhalten jedoch automatisch die Kontruktion, die auch der darunter befindlichen Wand zugeordnet ist, daher werden für die Giebelflächen keine gesonderten Sanierungsmaßnahmen definiert.

Für die oberste Geschossdecke zu einem unbeheizten Dachraum hin wird meistens nur eine oberseitige Dämmung sinnvoll sein, diese kann analog hinzugefügt werden. Die Kellerdecke eines unbeheizten Kellers wird meistens nur unterseitig sinnvoll zu dämmen sein.

**Tabelle F.2.: U- und g-Wert unterschiedlicher Fenstertypen bei Sanierung gemäß TABULA [126, Tab. 10]**

Fenstertyp	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	g-Wert [-]
sanierte Fenster gemäß Effizienzniveau 1 (2-Scheiben-Verglasung)	1,1 ... 1,3	0,6 ... 0,7
sanierte Fenster gemäß Effizienzniveau 2 (3-Scheiben-Verglasung)	0,7 ... 0,95	0,55 ... 0,6

Für unterschiedliche Fenstertypen sind in Tabelle F.2 Werte für U- und g-Werte angegeben, die bei Sanierung entsprechend gewählt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass auch bei einer Sanierung alle Fenster eines Gebäudes derzeit mit den jeweils gleichen U- und g-Werten versehen werden.

## F.2. Sanierungsmaßnahmen der Anlagentechnik

Die Sanierungsmaßnahmen der Anlagentechnik sind prinzipiell in zwei Arten zu unterteilen.

Zum einen kann der verwendete Energieträger gleich bleiben und sich nur der Wirkungsgrad der Anlage ändern. Dies ist z.B. der Fall, wenn bei einer Gasheizung von einem Konstanttemperaturkessel auf einen Brennwertkessel umgerüstet wird. In diesem Fall ist nur der Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers in der Gebäudetypologiedatei anzupassen.

## F. Abbildung des Sanierungsverhaltens

Oder es findet ein Wechsel des Energieträgers statt, weil beispielsweise bei einer Sanierung von einem Gaskessel zu einer Fernwärmeversorgung gewechselt wird. In diesem Fall muss das Feld, welches die Heizungsanlage in der Gebäudetypologiedatei für den Gebäudetyp definiert, auf den entsprechenden Wert gemäß Tabelle F.3 gesetzt werden.

**Tabelle F.3.: IDs der Heizungssysteme**

ID	Heizungssystem
1	Gaskessel
2	Ölkessel
3	Fernwärme
4	Luft-Wasser-Wärmepumpe

Zusätzlich kann über die Felder *pv* bzw. *solarthermal* in der Gebäudetypologiedatei eingestellt werden, ob eine PV- oder Solarthermieanlage modelliert werden soll. Die Umsetzung erfolgt dann wie in Abschnitt D.2 für PV-Anlagen bzw. in Abschnitt C.1.5 für Solarthermieanlagen beschrieben. Ebenso können die Wirkungsgrade der Pumpen für Heizkreis und Solarthermiekreis bei Bedarf angepasst werden, um einen Tausch dieser Geräte bei einer Sanierung der Heizungsanlage abzubilden.

## G. Kopplung von Einzelgebäudesimulationen

Bis zu dieser Stelle der Modelldokumentation ist EmMi-transient ein Werkzeug welches aus einer Vielzahl von parametrisierbaren Teilmodellen für jedes Gebäude ein eigenständiges EnergyPlus-Simulationsmodell erstellt. Die Nachbargebäude werden zwar als Verschattungselemente (vgl. Abschnitt B.2.7) und zur Bestimmung, ob eine Außenwand an eine andere Wand angrenzend ist oder nicht (vgl. Abschnitt B.2.2.2), genutzt, ansonsten besteht aber kein Zusammenhang zwischen den Gebäudemodellen. Um dies zu ändern und somit Interaktionen zwischen den einzelnen Gebäudemodellen zu ermöglichen, wird eine Kopplungsmöglichkeit mittels des Functional Mockup Interfaces (FMI) geschaffen. Dies erlaubt es auch Energiesysteme abzubilden die mehr als ein Gebäude betreffen, wie etwa ein stromgeführtes Blockheizkraftwerk in Verbindung mit einem Nahwärmenetz, bei dem sowohl Strom als auch Wärme lokal verbraucht werden. Somit können ggf. im Quartiersverbund aufgrund der Reduktion von Gleichzeitigkeitseffekten Effizienzsteigerungen durch bestimmte Maßnahmen erreicht werden [250, Fig. 1], die an einem Einzelgebäude nicht sinnvoll umsetzbar wären.

Im Folgenden wird die technische Umsetzung der Kopplung per FMI detailliert dargelegt und eine Maßnahme zur elektrischen Lastverschiebung, die hierdurch auf Quartiersebene betrachtet werden kann, beispielhaft beschrieben. Die Beschreibung der FMI-Kopplung in diesem Kapitel wurde bereits in Verbindung mit einer Modellierung der in Abschnitt G.2 beschriebenen DSM Maßnahme in [157] vorveröffentlicht.

In der verwendeten Version 8.4.0 von EnergyPlus sind zwei Möglichkeiten zur Anbindung an externe Programme vorgesehen. Zum einen ist eine Einbindung von EnergyPlus-Modellen in die Software BCVTB möglich, welche die Kopplung verschiedener Simulationsprogramme zur verteilten Berechnung oder zur Simulation mit Daten aus einer realen Umgebung als sog. Hardware-in-the-loop ermöglicht. Zum anderen ist der Export eines EnergyPlus-Gebäudemodells als Functional Mockup Unit (FMU) für Co-Simulation möglich, welche in beliebige andere Programme, die FMI unterstützen, importiert werden kann. [259]

Da die gesamte Programmlogik zur Erzeugung der Gebäudemodelle bereits in MATLAB existiert kommt eine Umstellung auf BCVTB nicht in Betracht. Daher wird die FMI-Funktionalität von EnergyPlus genutzt, um aus den mittels MATLAB erzeugten Gebäudemodellen FMUs zu erzeugen, welche von MATLAB aus während der Simulation kontrolliert werden. Dies hat den Vorteil, dass auch Modelle, die in anderen Simulationsprogrammen erstellt und als



## G. Kopplung von Einzelgebäudesimulationen

FMU exportiert wurden, eingebunden werden können. Dies erlaubt die zukünftige Erweiterung von EmMi-transient für die Nutzung anderer Simulationsprogramme, die zusätzliche Möglichkeiten gegenüber EnergyPlus bieten.

In EmMi-transient wird FMI für Co-Simulation in Version 1.0 [183] zur Toolkopplung verwendet. Der Lösungsalgorithmus für das in der FMU exportierte Modell ist also nicht in der FMU enthalten. Daher muss EnergyPlus auf dem System, das die FMU einbindet, installiert und lauffähig sein.

Für die Verwendung von FMI ist es notwendig, das EnergyPlus-Modell *ExternalInterface* mit Parameter *FunctionalMockupUnitExport* in der .idf-Datei hinzuzufügen. Für die zu modifizierenden Schedules wird jeweils ein EnergyPlus-Modell *ExternalInterface:FunctionalMockupUnitExport:To:Schedule* verwendet, welches den Namen des zu modifizierenden Schedules, die Art des Schedules, den FMU Variablennamen und den Startwert für den Schedule benötigt. Die per FMI auszulesenden Variablen werden mittels des EnergyPlus-Modells *ExternalInterface:FunctionalMockupUnitExport:From:Variable* definiert, Details zu den Parametern dieses Modells sind in Tabelle H.6 angegeben.

Die Erstellung der FMU aus der jeweiligen .idf-Datei erfolgt über das frei verfügbare Tool EnergyPlusToFMU [194] in Version 1.0.5. Dieses verwendet einen externen C/C++-Compiler, um die vorgefertigten Quellcodes für die FMU-Funktionen zu kompilieren und die .idf-Datei sowie die verwendete Wetterdatendatei in die entsprechende Struktur zu konvertieren. Hierfür sind die Batchdateien, welche das Kompilieren und Linken starten, im Unterverzeichnis für das jeweilige Betriebssystem unterhalb des Ordners *Scripts* des Tools entsprechend den lokalen Gegebenheiten anzupassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die bei Microsoft Visual Studio 2012 Professional mitgelieferten Compiler verwendet.

Für die Einbindung der FMUs in MATLAB wird die kommerzielle Modelon FMI Toolbox [184] verwendet. Diese stellt MATLAB-Befehle bereit, mit denen auf die FMU-Funktionen zugegriffen werden kann.

Das Vorgehen zur gekoppelten Simulation umfasst das Laden der FMUs aller Gebäude und jeweils eine Instantiierung und Initialisierung derselben. Bei der Simulation werden zunächst die zu ändernden FMU-Variablen geschrieben, anschließend die Simulationen einen Zeitschritt, der standardmäßig 10 Minuten beträgt, laufen gelassen und dann die Werte der auszulesenden FMU-Variablen ermittelt. Bei Ende der Simulation werden alle FMUs terminiert und der dafür verwendete Speicher freigegeben. Details hierzu werden in Abschnitt H.5 aufgeführt.

Durch den Einsatz von FMI steigt die für die Simulation notwendige Rechenzeit um etwa den Faktor 3 im Vergleich zur herkömmlichen Berechnung (vgl. Abschnitt H.5) an. Dies liegt zum einen am erhöhten Rechenaufwand in MATLAB, da in jedem Zeitschritt Werte gelesen und ggf. geschrieben werden und der nächste Simulationszeitschritt angestoßen wird. Weiterhin laufen alle Gebäudesimulationen parallel, d.h. normalerweise mehr als eine Simulation

pro Prozessorkern. Daher ist die Verwendung von FMI in EmMi-transient nur zu empfehlen, wenn Quartiersmaßnahmen untersucht werden oder Sensitivitätsanalysen für Ereignisse durchgeführt werden.

Ein prinzipielles Problem bei Co-Simulation sind auftretende Konsistenzprobleme [257], wenn Werte aus dem vorherigen Zeitschritt verwendet werden, um Sollwerte für den aktuellen Zeitschritt zu erzeugen. Beispielsweise wenn im vergangenen Zeitschritt PV-Stromüberschuss vorhanden war und daher zusätzliche elektrische Verbraucher im Rahmen von Demand Side Management Maßnahmen aktiviert werden, die PV-Stromproduktion im aktuellen Zeitschritt aber wieder zurückgeht. Eine Möglichkeit zur Reduktion der hierdurch auftretenden Probleme kann in der Verkleinerung der Zeitschritte bestehen. Eine andere Möglichkeit wäre der Aufbau eines alle Teile umfassenden Simulationsmodells, in dem die einzelnen Subsysteme nicht nur zu diskreten Zeitschritten kommunizieren sondern die entstehenden Gleichungssysteme simultan gelöst werden. Dies wird hier nicht weiter ausgeführt.

FMI wird in EmMi-transient eingesetzt, um die in Abschnitt 10.4 definierten, von Ereignissen beeinflussten Parameter dynamisch während der Simulation zu verändern. Details hierzu sind in Abschnitt G.1 dargestellt.

Weiterhin wird im Rahmen dieser Arbeit eine Interaktion mittels FMI modelliert, welche die Innenraumsolltemperatur für per elektrischer Wärmepumpe beheizte Gebäude erhöht sobald PV-Stromüberschuss im Quartier vorhanden ist. Diese Maßnahme wird in Abschnitt G.2 dargestellt. Darüber hinaus sind viele weitere Szenarien denkbar, die sich durch die Nutzung von FMI ergeben. Einige davon sind im Ausblick in Abschnitt 15.1 aufgeführt.

### G.1. FMI für Ereignisse

Falls Sensitivitätsanalysen für Ereignisparameter durchgeführt werden, so werden die Ereignisse mittels FMI angestoßen. Hierzu ist im MATLAB-Script `simulate_buildinglist_energyplus_fmum` die entsprechende Logik hinterlegt, um zur entsprechenden Ereignisstartzeit  $\tau$  den zu verändernden Parameter auf den Wert  $P_0 + \Delta P$  setzen und zum Ereignisendzeitpunkt  $\tau + \Delta t$  wieder auf den Ausgangswert  $P_0$  zurückzusetzen.

Prinzipiell sind auch Ereignisse, die durch Ergebniswerte mehrere Gebäude beeinflusst werden und nicht nur durch vorher festgelegte Start- und Endzeiten wie in Abschnitt 10.4, abbildbar. Wenn also Maßnahmen und deren beeinflussende Faktoren wie die im folgenden Abschnitt vorgestellte elektrische Lastverschiebung von Wärmepumpen, die Ereignisse zu vorher nicht bekannten Zeitpunkten auslöst, untersucht werden sollen.

## G.2. Elektrische Lastverschiebung durch Wärmepumpen

Eine mögliche auf Abschnitt D.3 bezugnehmende Lastverschiebemaßnahme besteht darin, dass bei lokalem Stromüberschuss elektrisch betriebene Wärmepumpen so angesteuert werden, dass sie vermehrt Strom verbrauchen. Dies bedeutet, dass zusätzliche Wärme erzeugt wird, die entweder in einem Pufferspeicher oder in der thermischen Masse des Gebäudes gespeichert wird und somit später, wenn kein Stromüberschuss mehr vorhanden ist, nicht mehr erzeugt werden muss.

Um diese Maßnahme in der Simulation abzubilden, wird für jedes Gebäude der lokal erzeugte, nicht im Gebäude benötigte Strom mittels der EnergyPlus-Variable *Facility Total Surplus Electric Energy* per FMI ausgegeben. Die ausgegebenen Werte aller Gebäude werden zur quartiersweit überschüssigen und daher ohne weitere Maßnahmen ins allgemeine Stromnetz eingespeisten Strommenge addiert. Die Summation erfolgt in jedem Zeitschritt, also für jeweils 10 Minuten.

Um nun den Strombedarf im Quartier zu erhöhen falls Stromüberschuss vorhanden ist, wird die Innenraumsolltemperatur der mit elektrischen Wärmepumpen beheizten Gebäude schrittweise angehoben. Hierzu werden die beiden Grenzwerte für die überschüssige Strommenge  $Q_{\text{Überschuss,Erhöhung}}$  in kWh für eine Anhebung und  $Q_{\text{Überschuss,Reduktion}}$  in kWh für eine Reduktion der Innenraumsolltemperatur festgelegt. Falls  $Q_{\text{Überschuss,Erhöhung}}$  überschritten wird, so wird die Innenraumsolltemperatur um  $T_{\text{Set,Überschuss}}$  K erhöht. Der Grenzwert  $Q_{\text{Überschuss,Erhöhung}}$  muss in Abhängigkeit der Gebäude des Quartiers aus Testsimulationen ermittelt werden, da hier sowohl die Anzahl der mit Wärmepumpen beheizten Gebäude als auch deren Wärmebedarf eine Rolle spielen.  $T_{\text{Set,Überschuss}}$  wird in dieser Arbeit auf 1 K gesetzt. Wird in irgendeinem auf eine Temperaturerhöhung folgenden Zeitschritt der Grenzwert  $Q_{\text{Überschuss,Reduktion}}$  unterschritten, so wird in Temperaturschritten von ebenfalls  $T_{\text{Set,Überschuss}}$  die Solltemperatur reduziert, bis sie minimal wieder ihren für den Gebäudetyp vorgegeben Wert erreicht. Als Maximum für die Solltemperaturerhöhung wird ein Wert  $T_{\text{Max,Überschuss}}$  in K festgesetzt. Eine Erhöhung um bis zu 2 K ist gemäß [218] und [8] kaum spürbar. Zukünftig könnten auch thermische Komfortindizes zur Festlegung des Maximums verwendet werden.

Diese Maßnahme ist ein Beispiel dafür, welche zusätzlichen Maßnahmen durch die Kopplung der Einzelgebäudesimulationen prinzipiell abgebildet werden können. Die Summation der überschüssigen lokal erzeugten Strommenge kann auch als Stellsignal für andere Maßnahmen, beispielsweise Haushaltsgeräte oder Elektromobilität betreffend, verwendet werden.

Ein Problem bei der Umsetzung ist, dass aus Werten des vergangenen Zeitschritts eine Parameteränderung für den nächsten Zeitschritt abgeleitet wird. Dies kann zu Konvergenzproblemen bei der Simulation führen und dadurch ggf. Oszillationen hervorrufen, die vermieden werden müssen. Dies ist ein prinzipielles Problem bei der Kopplung von Simulationen, da diese nur zu vordefinierten Zeitpunkten kommunizieren. Genauere Überlegungen und mögliche Lösungsansätze zur Ermittlung optimaler Zeitschritte für die Kommunikation der gekoppelten Modelle sind in [41] dargestellt.

## **H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung**

In diesem Kapitel wird detailliert auf den Ablauf einer Simulation in EmMi-transient eingegangen. Hierzu werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Schritte erklärt, die im Ablaufplan in Abbildung H.1 dargestellt sind. Weiterhin wird die Umsetzung der Sensitivitätsanalysemethoden im Programmablauf beschrieben sowie die Darstellung der Simulations- und Sensitivitätsergebnisse behandelt.

## H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung

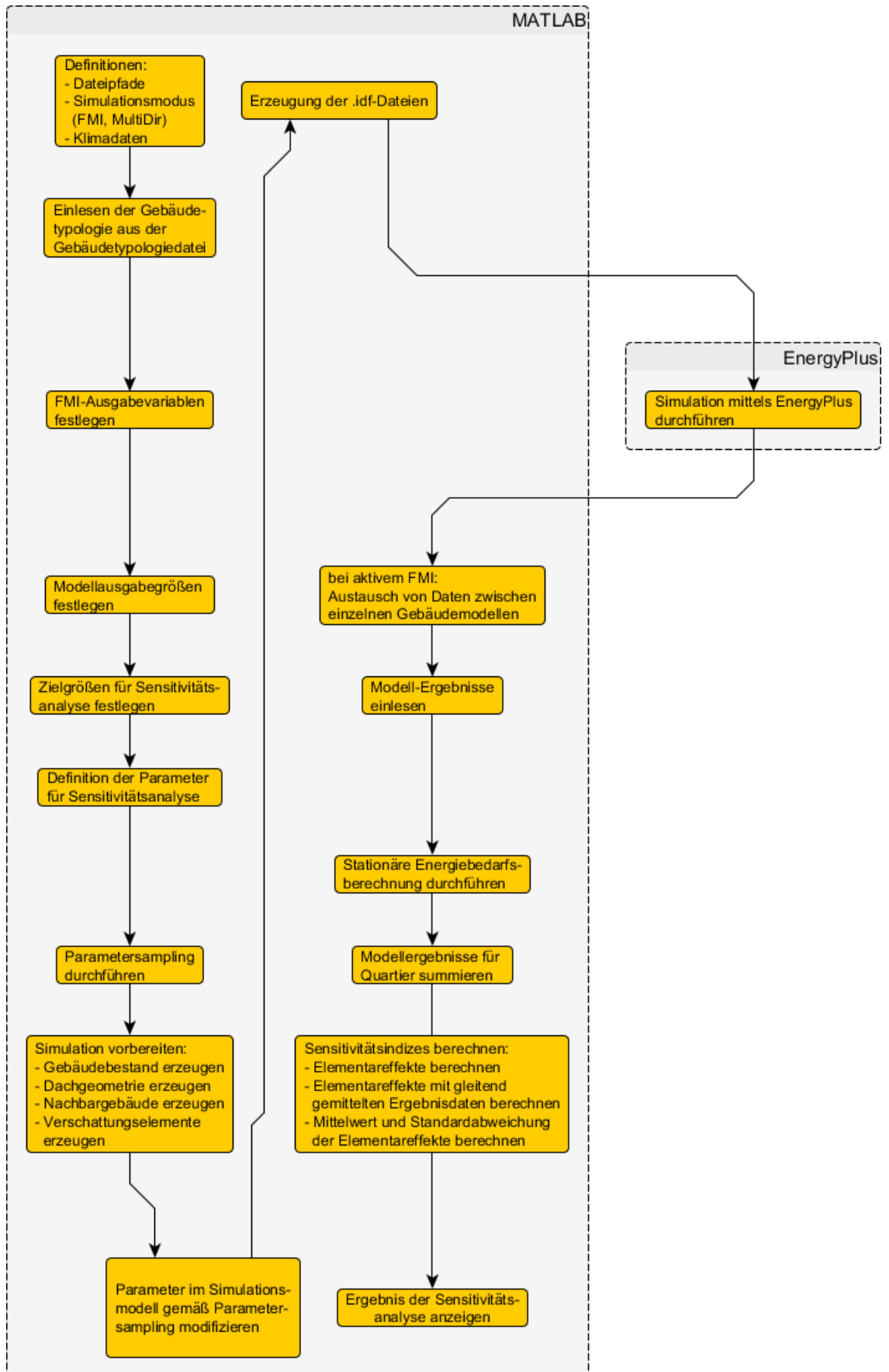


Abbildung H.1.: Ablaufplan von EmMi-transient

## H.1. Aufbereitung der Eingabedaten

Vor dem Start einer Simulation müssen die Eingabedaten in der entsprechenden Form vorliegen. Die GIS-Daten für die zu untersuchenden Gebäude sowie die Nachbargebäude müssen, wie in Abschnitt A.1 beschrieben, vorhanden sein. Hierfür muss eine LoD1-Shapedatei *data/GIS/Block.shp* mittels des ArcGIS-Werkzeugs *Simplify Building* zur Shapedatei *data/GIS/Block\_SimplifyBuilding.shp* vereinfacht werden und daraus eine Shapedatei *Block\_SimplifyBuilding\_Lines.shp* mit den Linien der Gebäudeumrisse mittels der ArcGIS-Tools *Feature to Line* und *Split Line At Vertices* erzeugt werden. Dabei muss die Spalte *GEBID* der originalen Shapedatei beibehalten werden, um die Zuordnung der Linien zum Gebäude zu erhalten. Darauf aufbauend müssen die Koordinaten der Mittelpunkte ermittelt werden und dann ermittelt werden, ob eine Wand adiabat ist und dies in der Datei *Block\_SimplifyBuilding\_Lines.shp* eingetragen werden. Die zusätzlichen Felder für semantische Informationen aus Tabelle A.1 müssen vollständig ausgefüllt sein.

Zusätzlich müssen zwei Shapedateien *Nachbargebaeude\_SimplifyBuilding.shp* und *Nachbargebaeude\_SimplifyBuilding\_Lines.shp* vorhanden sein falls die Verschattung durch Nachbargebäude berücksichtigt werden soll. Diese entstehen wie die obigen Dateien mittels der ArcGIS-Werkzeuge *Simplify Building*, *Feature to Line* und *Split Line At Vertices*.

Weiterhin muss die verwendete Gebäudetypologie, welche das Sanierungsszenario definiert, als Excel-Datei vorliegen. Diese Datei besteht aus diversen Arbeitsblättern, die in den Tabellen H.1 und H.2 beschrieben werden. Die Gebäudetypologiedatei hat normalerweise einen Namen nach dem Schema *buildingtypology\_Szenarioname.xls* und liegt im Verzeichnis *data*.

**Tabelle H.1.: Beschreibung der allgemeinen Informationen in der Gebäudetypologiedatei**

Arbeitsblatt	Beschreibung
buildingtype	Gebäudetyp bestehend aus IDs für buildingsize, buildingageclass, building_miscdata, buildingenvelope, buildinggeometry
buildingageclass	Start- und Endjahr einer Baualtersklasse
building_miscdata	Verschiedene Informationen wie Infiltrationsrate, interne Gewinne, Solltemperatur Tag und Nacht, Wirkungsgrad Heizkessel, jährlicher Haushaltsstrombedarf, Art der Heizungsanlage, PV ja/nein, Solarthermie ja/nein, COP einer evtl. vorhandenen Wärmepumpe, Leistung einer evtl. vorhandenen Wärmepumpe, Effizienz der Heizungs-pumpen, Speichervolumen Wärmepumpe und Trinkwarmwasserspeicher
buildingenvelope	IDs der Bauteile, aus der die Gebäudehülle besteht
buildinggeometry	Informationen zur Gebäudegeometrie wie Raumhöhe, Geschosshöhe, Anzahl Geschosse, Fensterflächenanteil, Dachneigung, KGF/BGF-Faktor

## H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung

**Tabelle H.2.: Beschreibung der Bauteilinformationen in der Gebäudetypologiedatei**

Arbeitsblatt	Beschreibung
wall	IDs der Schichten, aus denen eine Wand aufgebaut ist
wall.layer	Eigenschaften der Wandschichten wie Dicke; Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Wert); U-Wert; Wärmespeicherfähigkeit; Dichte; Sanierbarkeit: bleibt bei Sanierung erhalten (static), wird bei Sanierung ausgetauscht (replace)); Typ: zum Tragwerk gehörend (structure), Dämmung (insulation). Die Eigenschaften sind bei allen unten folgenden Schichten für andere Bauteile analog
wall.refurbishment	IDs der bei Wandsanierung hinzuzufügenden Schichten und deren Position (innen/außen)
internalwall	IDs der Schichten, aus denen eine Innenwand aufgebaut ist
internalwall.layer	Eigenschaften der Innenwandschichten
ceiling	IDs der Schichten, aus denen die oberste Geschossdecke aufgebaut ist
ceiling.layer	Eigenschaften der Schichten der obersten Geschossdecke
ceiling.refurbishment	IDs der bei Sanierung der obersten Geschossdecke hinzuzufügenden Schichten und deren Position (innen/außen)
internalceiling	IDs der Schichten, aus denen eine Zwischengeschossdecke aufgebaut ist
internalceiling.layer	Eigenschaften der Zwischengeschossdeckenschichten
groundfloor	IDs der Schichten, aus denen die Bodenplatte aufgebaut ist
groundfloor.layer	Eigenschaften der Bodenplattenschichten
window	U- und g-Werte der Fenster
basement.wall	IDs der Schichten, aus denen eine Kellerwand aufgebaut ist
basement.wall.layer	Eigenschaften der Kellerwandschichten
basement.wall.refurbishment	IDs der bei Kellerwandsanierung hinzuzufügenden Schichten und deren Position (innen/außen)
roof	IDs der Schichten, aus denen das Dach aufgebaut ist
roof.layer	Eigenschaften der Dachschichten
roof.refurbishment	IDs der bei Dachsanierung hinzuzufügenden Schichten und deren Position (innen/außen)

## H.2. Vorbereitung der Simulation

Für die in der MATLAB-Datei *main\_scenarios.m* festgelegten Szenarien wird jeweils ein kompletter Simulationslauf durchgeführt. Hierbei wird zur Vorbereitung der Simulation durch Aufruf des Scripts *prepare\_scenarios.m* das Script *definitions\_scenarios.m* gestartet, welches das Objekt *sim\_parameter* initialisiert und darin die Pfade zu den verwendeten Eingabedateien wie Klimadatendatei, Aufrufdateien für EnergyPlus und Pfade für temporäre Dateien definiert. Der Name der Gebäudetypologiedatei wird entsprechend dem Szenario festgelegt. Die in Tabelle H.3 aufgeführten Simulationseinstellungen, die in *sim\_parameter* gespeichert werden, müssen festgelegt werden.

Anschließend wird die Gebäudetypologiedatei mittels des Scripts *buildingtypology\_def.m* eingelesen und dem Objekt *sim\_parameter.buildingtypology* zugeordnet.

Falls eine Elementareffekt-Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, werden als nächstes mittels des Scripts *ee\_input\_def.m* für die zu untersuchenden Parameter die in H.4 aufgeführten Variablen für konstante Parameter definiert, welche die Verteilung und weitere Informationen festlegen. Anschließend werden die Verteilungen für absolut variierte Parameter dem Objekt *sim\_parameter.input\_def.distribution* für den jeweiligen Parameter zugewiesen. Für dynami-

**Tabelle H.3.: Simulationseinstellungen in der MATLAB-Struktur *sim\_parameter***

Simulationsparameter	Beschreibung
WEATHERFILE	Name der von EnergyPlus zu verwendenden Wetterdatendatei (ohne Pfad und ohne Endung .epw)
BUILDINGTYPOLOGY_FILE	Relativer Pfad zur Gebäudetypologiedatei
ENERGYPLUS_PATH	Absoluter Pfad zur Datei RunEPlus.bat von EnergyPlus
ENERGYPLUS_RUNMODE	„MultiDir“, um EnergyPlus mittels RunDirMulti.bat aufzurufen, „FMI“ um EnergyPlus mittels FMI zu starten
SIM_YEAR	Jahr, für das die Simulation durchgeführt wird, relevant für Sanierungsstand
SHADING_BY_NEIGHBORBUILDINGS	1 oder 0, je Nachbargebäude für Verschattung aus GIS-Datei eingelesen sollen oder nicht
INTERACTION.SETPOINT_HEAT-PUMP.ACTIVE	Falls ENERGYPLUS_RUNMODE auf „FMI“ steht, so kann hiermit die in G.2 beschriebene Interaktion zwischen Gebäuden aktiviert werden

**Tabelle H.4.: MATLAB-Variablendefinition für mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchende konstante Parameter**

Variablenname	Werte	Beschreibung
change_type	function normaldist, function uniformdist, direct parameter change	
functionname	String	Aufzurufende Funktion, falls change_type auf „function normaldist“ oder „function uniformdist“ gesetzt ist
parametername	Variablenname	MATLAB-Variable, die geändert wird, wenn change_type auf „direct parameter change“ steht
dist_type	uniform, normal	Gleich- oder Normalverteilung
reference	absolut, relative	absolut oder relativ variierter Parameter
abs_min	REAL	reelle Zahl, die das Minimum des Werts angibt. Dieses wird ggf. verwendet, um die erzeugte Verteilung abzuschneiden
abs_max	REAL	reelle Zahl, die das Maximum des Werts angibt. Dieses wird ggf. verwendet, um die erzeugte Verteilung abzuschneiden
rel_min		
rel_max		
sd	REAL	Für Normalverteilung zu verwendende Standardabweichung
mean	REAL	Für Normalverteilung zu verwendender Mittelwert

sche Parameter, d.h. per FMI angesteuerte Ereignisse, müssen zusätzlich die in Tabelle H.5 aufgeführten Variablen definiert werden.

Anschließend werden die per FMI auszulesenden EnergyPlus-Variablen in dem Objekt *sim\_parameter.FMI\_OUTPUT* definiert, dabei sind die in Tabelle H.6 aufgeführten Variablen zu füllen.

Dann werden die für die Sensitivitätsanalyse zu verwendenden Zielgrößen mit Namen und Einheiten im Script *ee\_modelresult\_def.m* definiert und mit den Ergebnis-Indexnummern versehen.



## H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung

**Tabelle H.5.: MATLAB-Variablendefinition für mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchende Ereignisse**

Variablenname	Werte	Beschreibung
duration	REAL	Dauer eines Ereignisses ( $\Delta t$ )
impulse_value	REAL	Wert eines Parameters während eines Ereignisses, entspricht $P_0 + \Delta P$
default_value	REAL	Wert eines Parameters außerhalb der Ereigniszeit, entspricht also $P_0$
periodic	no, daily	Periodizität eines Ereignisses, entweder einmaliges oder tägliches Ereignis
fmiParamChangeNr	INTEGER	Fortlaufende Nummer über alle per FMI zu beeinflussenden Parameter für interne Verwendung
impulse_startinterval	[REAL, REAL]	Intervall, aus dem der Startzeitpunkt $\tau$ eines Ereignisses ermittelt wird

**Tabelle H.6.: MATLAB-Variablendefinition für per FMI auszulesende EnergyPlus-Variablen**

Variable	Beschreibung
fmuvarname	In EnergyPlus definierter Name für die FMU Variable
keyvalue	Schlüsselname der auszugebenden EnergyPlus Output Variable
varname	Variablenname der auszugebenden EnergyPlus Output Variable

Die Elementareffekt-Trajektorien werden dann, wie in Abschnitt 5.3.6.1 und Kapitel 11 beschrieben, mittels des Scripts *ee\_trajectories.m* erzeugt. Dort werden auch die Einstellungen zur Anzahl an Diskretisierungsstufen und Trajektorienzahl festgelegt.

Damit sind die Vorbereitungen der Simulation abgeschlossen.

### H.3. Erzeugung des Gebäudebestands

Für das Einlesen und Erzeugen des zu untersuchenden Gebäudebestands in MATLAB werden im Script *create\_buildinglist\_GIS.m* die Shapedateien eingelesen und daraus die Geometrie der Gebäude, wie in Abschnitt B.2 beschrieben, angelegt und den Objekten *sim\_parameter.BLDG.geometry* zugewiesen. Weiterhin werden die Daten aus der Gebäudetypologiedatei für den jeweiligen Gebäudetyp den Variablen im Objekt *sim\_parameter.BLDG* zugeordnet. Das Erstellungsjahr des Gebäudes wird dabei zufällig mittels Gleichverteilung aus Start- und Endjahr der zugeordneten Baualtersklasse ermittelt. Hier wird auch bereits die Höhe des Gebäudes in Abhängigkeit von der Dachform modifiziert, wie in Abschnitt B.2.1 beschrieben.

Der Zustand jedes Gebäudes gemäß dem festgelegten Sanierungsszenario wird in *sim\_parameter.BLDG.refurbishment\_state* abgelegt.

### H.4. Erzeugung der EnergyPlus-Modelle

Die das jeweilige EnergyPlus-Gebäudemodell definierende .idf-Datei wird mittels der Funktion *create\_idf\_file* erzeugt. Diese liegt im Verzeichnis *subfunctions/idf* und ruft weitere dort

hinterlegte Funktionen auf, welche die einzelnen Bausteine des Gebäudemodells gemäß den vorhandenen Daten als Text erzeugen sowie teilweise statische Inhalte aus den Dateien im Verzeichnis *energyplustemplates* einliest. Die jeweilige .idf-Datei wird im Verzeichnis *energyplus* nach dem Schema *b\_Szenarioname\_Trajektorie\_Trajektorienpunkt\_Gebäudenummer.idf* abgelegt.

Je nach Art der Simulation wird die Funktion *create\_idf\_file* an unterschiedlicher Stelle aufgerufen. Beim Aufruf im Modus *RunDirMulti* wird sie aus dem Script *simulate\_buildinglist.-energyplus\_runmultidir.m* heraus aufgerufen, bei Aufruf mittels FMI wird sie aus dem Script *create\_energyplus\_idf.m* heraus aufgerufen. Es werden jeweils alle für das Szenario notwendigen .idf-Dateien erzeugt.

## H.5. Simulation

Die eigentliche Simulation wird bei einer einzelnen Simulation ohne Sensitivitätsanalyse mittels des Scripts *model\_evaluation\_singlesimulation.m* gestartet. Bei Elementareffekt-Sensitivitätsanalyse von Szenarien wird sie mittels der Funktion *simulate*, die im Script *ee\_model\_evaluation\_at\_once.m* aufgerufen wird, gestartet.

Zum Start der Simulation ohne FMI werden die .idf-Dateien wie oben beschrieben erzeugt und anschließend mittels des MATLAB-Befehls *dos* bzw. *system* das in *sim\_parameter.ENERGYPLUS\_RUNDIRMULTI\_PATH* hinterlegte Script aufgerufen. Dies ist unter Windows die Batchdatei *energyplustemplates/RunDirMulti.bat*, welche bei EnergyPlus mitgeliefert ist und alle .idf-Dateien auf eine Anzahl *numProc* von Prozessen verteilt, in denen die Gebäudesimulationen dann nacheinander abgearbeitet werden. Unter Linux wird das selbst erstellte Perl-Script *energyplustemplates/rundirmulti.pl* aufgerufen, welches die gleiche Funktionalität wie obige Batchdatei enthält.

Ist FMI aktiv so werden dabei mittels *create\_fmi\_interactions.m* die möglichen FMI-Interaktionen bei jedem daran beteiligten Gebäude hinzugefügt, anschließend die .idf-Dateien erzeugt (siehe Abschnitt H.4) und daraus FMUs mittels des Scripts *create\_energyplus\_fmu.m* erzeugt, welche mittels *simulate\_buildinglist\_energyplus\_fmu.m* gestartet werden.

Zum Start der Simulationen per FMI werden zuerst die einzelnen FMUs mittels der FMI-Toolbox-Befehle *FMUModelCS1* geladen, mit *fmiInstantiateSlave* instantiiert und durch Initialisierung mit *fmiInitializeSlave* auf eine Start- und Endzeit der Simulation festgelegt. Anschließend müssen zu den verwendeten FMU-Ein- und -Ausgabevervariablenamen mittels *getVariableValueref* die zugehörigen Referenznummern ausgelesen werden, da der Zugriff über die Referenzen wesentlich schneller erfolgt als über den Variablenamen. Dann werden in jedem Zeitschritt die FMU Eingabevervariablen mittels *fmiSetReal* geschrieben, sofern Änderungen der Werte vorgegeben sind. Insbesondere wenn FMI zur Ansteuerung von Ereignissen genutzt wird, muss hier überprüft werden, ob ein Ereignis eingetreten ist und dann der Parameterwert entsprechend auf  $P_0 + \Delta P$  geändert werden, oder falls ein Ereignis beendet wurde muss der

## H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung

Ausgangswert  $P_0$  wiederhergestellt werden. Anschließend wird für alle FMUs ein Zeitschritt mittels *fmiDoStep* simuliert und danach werden die FMU Ausgabevariablen mittels *fmiGetReal* ausgelesen. Diese Variablen werden quartiersweit addiert oder gemittelt, um ggf. Daten für ein Modell, welches eine Quartiersmaßnahme repräsentiert, wie sie in Abschnitt G.2 beispielhaft dargestellt wird, zur Verfügung zu haben und dieses entsprechend auch einen Zeitschritt weiter laufen zu lassen. Dies wird fortgesetzt, bis die Endzeit der Simulation erreicht ist. Zuletzt werden die FMUs mittels *fmiTerminateSlave* beendet, die verwendeten Ressourcen mit *fmiFreeSlaveInstance* freigegeben und die zugehörige Variable mit *delete* gelöscht.

Bei Simulation ohne FMI ergibt sich auf einem System mit Intel Core i7-3930K Prozessor, 64 GB RAM und Windows 7 als Betriebssystem eine Simulationszeit von ca. 30 Sekunden pro Gebäudemodell. Durch die Verteilung auf 10 Prozesse dauert eine Simulation aller im 25 exemplarischen Block untersuchten Gebäude also ca. 90 Sekunden. Auf dem Cloud Computing System des LRZ [171] mit 8 virtuellen CPUs, 64 GB RAM und Debian Linux als Betriebssystem, welches für die Simulationen in dieser Arbeit verwendet wurden, beträgt die Simulationsdauer pro Gebäudemodell ca. 25 Sekunden.

Bei den Simulationen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, mussten für jedes Szenario 10 Trajektorien mit jeweils 22 Trajektorienpunkten für 25 Gebäude, also insgesamt 5500 Gebäudemodelle simuliert werden. Dies dauerte inklusive dem Einlesen der Daten, Simulation der Gebäudemodelle, einlesen der Ergebnisdaten und aggregieren der Daten auf dem Cloud Computing System je nach Szenario zwischen 10 und 16 Stunden. Die Solerthermieszenarien benötigten dabei aufgrund der zusätzlichen Anlagentechnik am längsten.

## H.6. Heizperioden- und Monatsbilanzverfahren

Die stationären Energiebedarfsberechnungen mittels Heizperiodenbilanzverfahren (vgl. Abschnitt 3.1.1) und Monatsbilanzverfahren (vgl. Abschnitt 3.1.2) werden bei Bedarfs entweder aus *simulate.m* oder aus *model\_evaluation\_singlesimulation.m* heraus mittels der Scripte *simulate\_buildinglist\_heatperiodbalance.m* bzw. *simulate\_buildinglist\_monthlyheatbalance.m* aufgerufen. Für das Heizperiodenbilanzverfahren ermittelt das Script die zu verwendende Gradtagszahl aus den vordefinierten Wetterdaten und ruft dann für jedes Gebäude die Funktion *simulate\_heatperiodbalance* auf, welche die Bilanzierung des Gebäudes durchführt.

Für die Berechnung des Monatsbilanzverfahrens müssen monatliche Klimadaten, beispielsweise die in [59, Tabelle A.1] definierten Werte, im Script *simulate\_monthlyheatbalance.m* eingetragen werden. Das implementierte Monatsbilanzverfahren nutzt nicht die für die Simulation verwendeten stündlichen Daten, da die monatsweise Mittelung hierfür aufgrund der komplexen Umrechnung der Strahlungswerte für die verschiedenen Orientierungen bisher nicht implementiert wurde. Daher ist ein direkter Vergleich zwischen Simulation, Heizperiodenbilanzergebnissen und Monatsbilanzergebnissen nicht sinnvoll durchführbar.

Bei beiden stationären Verfahren müssen die Fenster hinsichtlich ihrer Orientierung gruppiert werden, um die solaren Gewinne gemäß dem jeweiligen Verfahren korrekt berücksichtigen zu können. Für die Einstrahlungen werden entgegen dem in der Norm definierten Verfahren die solaren Gewinne für West/Ost, Süd-West/Süd-Ost, Nord-West/Nord-Ost jeweils zusammengefasst, daher müssen auch die Strahlungswerte der Klimadaten für diese Orientierungen jeweils gemittelt werden.

Ergebnisse der stationären Berechnungen werden im Objekt *sim\_res\_bldg* für jedes Gebäude gespeichert. Bei der Berechnung mehrerer Szenarien werden die stationären Verfahren derzeit nicht verwendet.

## H.7. Summierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aller durchgeführten Einzelgebäudesimulationen werden mittels des Scripts *collect\_results\_at\_once.m* aus den entsprechenden .csv-Dateien eingelesen und in der temporären Tabelle *result\_table* zwischengespeichert und dann dem Objekt *sim\_res\_bldg* zugewiesen.

Die Einzelgebäudesimulationsergebnisse und ggf. Vergleichsergebnisse des Heizperioden- bzw. Monatsbilanzverfahrens werden im Script *result\_calculation\_district\_at\_once.m* für alle Gebäude zeitschrittweise summiert bei energiebezogenen Werten bzw. die Temperaturwerte gemittelt und im Objekt *sim\_res\_dist* gespeichert.

Die quartiersweiten Ergebnisse aus der Struktur *sim\_res\_dist* werden, zusammen mit der Struktur *sim\_parameter*, aus MATLAB heraus als .mat-Datei gespeichert, so dass für die Auswertung diese Variablen wieder eingelesen werden können.

## H.8. Berechnung der Sensitivitäten

Für die Berechnung der Sensitivitäten werden die Modellergebnisse aus der jeweiligen .mat-Datei ausgelesen und in der Variable *model\_result* mit den Indizes Simulationsjahr, Trajektorie, Trajektorienpunkt, Ergebnisindex und Zeitreihenindex abgespeichert. Simulationsjahr wird dabei nur benötigt, falls mehr als ein Jahr in der Simulation untersucht wird. Ergebnisindex ist die Zahl, die im Script *ee\_modelresult\_def.m* für die Zielgrößen definiert wurde (vgl. Abschnitt H.2). Zeitreihenindex ist der Zeitpunkt des Simulationsergebnisses, also normalerweise ein Wert entsprechend einer der 8760 Stunden des Jahres.

Im Script *ee\_sequential\_scenarios.m* werden für jede Parameteränderung bzw. Gruppenparameteränderung in jeder Trajektorie die Elementareffekte berechnet und in der Variablen *S.EE* innerhalb der Struktur *S*, welche einen Eintrag für jedes Szenario enthält, abgespeichert. Indizes hier sind Simulationsjahr, Parameterindex, Trajektorie, Ergebnisindex, Zeitreihe. Anschließend werden die aus den Elementareffekten abgeleiteten Sensitivitätsindizes  $\mu$ ,  $\sigma$  und

## H. Simulationsablauf und Ergebnisdarstellung

$\mu^*$  berechnet und in den Variablen *S.mu*, *S.sigma*, *S.mu.star* abgespeichert, Indizes sind Simulationsjahr, Parameterindex, Ergebnisindex und Zeitreihenindex. Dies erfolgt für jedes Szenario.

Im Script *ee\_sequential\_scenarios.m* werden weiterhin die gleitenden Mittelwerte der Ergebnisdaten berechnet und in der Variablen *model\_result.mm* abgelegt. Indizes hier sind Simulationsjahr, Trajektorie, Trajektorienpunkt, Ergebnisindex, Zeitreihenindex und ein Index für die unterschiedlichen Längen des gleitenden Mittelwerts, welche in der Variable *mmWindow* hinterlegt sind. Für jede der möglichen Intervalllängen werden die Elementareffekte und Sensitivitätsindizes berechnet und in den Variablen *S.EE.mm*, *S.mu.mm*, *S.mu.star.mm*, *S.sigma.mm* abgespeichert. Die Abweichungen zwischen originalen Ergebnisdaten und den Daten, die durch die Glättung entstehen, werden im Script *sequential\_RMSE.m* berechnet.

Um Ergebnisdaten mittels funktionaler Transformation auszuwerten und die Sensitivitäten bzgl. der Koeffizienten der funktionalen Transformation zu berechnen, werden zuerst im Script *ee\_FT\_PCA\_scenarios.m* die Ergebnisdaten aus *model\_result* der Reihe nach in der Variable *data* abgelegt, dabei entspricht *data(1, ...)* dem Ergebnis des ersten Trajektorienpunkts aus der ersten Trajektorie, *data(2,...)* dem zweitem Trajektorienpunkt usw. Indizes von *data* sind der Datenreihenindex, Ergebnisindex und Zeitreihenindex. Anschließend wird die Mittelwertzeitreihe über alle Zeitreihen berechnet und in *data\_mean* abgespeichert. Dies wird verwendet, um eine normalisierte Zeitreihe *data - data\_mean* zu erzeugen und in *data\_normalized* abzuspeichern.

Im Script *ee\_FT\_PCA\_scenarios.m* wird anschließend die funktionale Transformation mittels Hauptkomponentenzerlegung durchgeführt. Hierbei wird der Befehl *pca* auf jede Ergebnismatrix *X*, die gemäß Gleichung 5.20 aus den Einträgen der Variablen *data* erzeugt wird, angewendet. Die Funktionsbasiswerte der Hauptkomponentenzerlegung werden in *pca\_coeff* abgespeichert, die Hauptkomponentengewichtungen bzw. Scores jeder Zeitreihe werden in *pca\_score* abgelegt. Der automatisch berechnete Anteil der durch die jeweilige Hauptkomponente repräsentierten Effekte wird in *pca\_explained* gespeichert. Anschließend werden die Elementareffekte der Hauptkomponentengewichtungen sowie die abgeleiteten Sensitivitätsindizes  $\mu_{PCA}$ ,  $\sigma_{PCA}$ ,  $\mu_{PCA}^*$  berechnet und in *PCA\_EE* bzw. *mu\_PCA*, *sigma\_PCA*, *mu\_star\_PCA* gespeichert.

Die Abweichungen, welche durch die funktionale Transformation der Ergebnisdaten entstehen, werden im Script *FT\_PCA\_RMSE.m* berechnet. In der Variablen *RMSE\_FT\_PCA* werden für die jeweiligen Szenarien und Zielgrößen die minimalen, mittleren und maximalen Abweichungen von RMSE im Verhältnis zum Mittelwert der jeweiligen Zielgröße über alle Trajektorien, Trajektorienpunkte und Zeitpunkte abgelegt.

Im Script *ee\_FT\_Fourier\_scenarios.m* wird bei Bedarf die funktionale Transformation mittels Fourier-Basis durchgeführt. Hierfür wird zuerst die Anzahl an Basisfunktionen auf standardmäßig  $8760 / 8 = 1095$  und die Basisfrequenz auf  $2\pi / 8760$  festgelegt. Die Werte aller Basisfunktionen werden dann berechnet und in *phi\_fourier* abgelegt. Anschließend werden für jede Ergebniszeitreihe die Koeffizienten der funktionalen Transformation bzgl. der Fourier-Basis

ermittelt und in *coeff\_fourier* abgespeichert. Für die normalisierten Zeitreihen werden die Koeffizienten ebenfalls berechnet und in *coeff\_fourier\_normalized* abgelegt. Es werden hier auch die Abweichungen zwischen Originalzeitreihen und den transformierten Daten berechnet und in *deviation\_fourier* zur späteren Auswertung abgespeichert. Schlussendlich werden die Elementareffekte der funktionalen Transformation  $EE_f$  und die daraus abgeleiteten Sensitivitätsindizes  $\mu_f$ ,  $\mu_f^*$  und  $\sigma_f$  berechnet und in *mu\_f*, *mu\_star\_f*, *sigma\_f* abgespeichert. Indizes dabei sind Simulationsjahr, Parameterindex, Ergebnisindex, Funktionsbasisindex, letzterer ergibt sich aus der Aufzählung der Basisfunktionen. Die Elementareffekte werden dabei aus der Differenz der Koeffizienten der funktionalen Transformation bzgl. der jeweiligen Parameteränderung berechnet.

## H.9. Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Einzelgebäudesimulationen sind in der Struktur *sim\_res\_bldg*, die quartiersweit aggregierten Werte sind in *sim\_res\_bldg* gespeichert und können dort ausgelesen werden und daraus Graphen erstellt werden. Die Skripte zur Auswertung liegen im Verzeichnis *evaluation/Diss*. Mittels des Skripts *plot\_model\_result\_min\_max\_mean.m* werden die Minimal-, Mittel- und Maximalwertgraphen jedes Szenarios erzeugt, hierbei werden zu jedem Zeitschritt Minimum, Mittelwert und Maximum über alle Simulationsläufe ermittelt. Der dadurch erzeugte Graph zeigt also die Spannweite des Ergebnisraums auf. Im Skript *aggregate\_hourly\_values.m* werden jahresweise aggregierte Werte aus den stündlichen Werten erzeugt und die Ergebnisse in der Struktur *R* abgelegt. Im Skript *boxplot\_scenarios.m* werden die jahresweise aggregierten Daten aller Simulationsläufe eines Szenarios mittels Boxplot dargestellt.

Die Ergebnisse der sequentiellen Sensitivitätsanalyse werden im Skript *plot\_ee\_sequential\_scenarios.m* als Graphen dargestellt und als .png-Datei zur weiteren Verwendung gespeichert. Die Ergebnisse der Auswertung mittels Hauptkomponentenanalyse werden in *plot\_ee\_FT\_PCA\_scenarios.m* erzeugt. Dies umfasst zum einen die Darstellung des jeweiligen Effekts einer Hauptkomponente sowie anschließend die Ausgabe des Sensitivitätsindex  $\mu^*$  für alle Parametergruppen mit der Hauptkomponentengewichtung als Zielgröße.



## **Teil VIII.**

# **Appendix: Vorveröffentlichungen**





In diesem Teil des Anhangs sind die im Laufe der Promotion vorveröffentlichten Konferenzbeiträge in folgender Reihenfolge abgedruckt:

- BauSIM 2014: Instationäre Energiebedarfs- und angebotssimulation eines Stadtquartiers mit Einbeziehung des Nutzerverhaltens [161]
- SBE 2016: Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters [160]
- CESB 2016: Global Impulse Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters [159]
- BauSIM 2016: FMI-Kopplung von EnergyPlus mit MATLAB zur Abbildung von Interaktionen im Distrikt-Modell EmMi-transient [157]
- CESBP 2016: Global Dynamic Sensitivity Analysis using Functional Transformation for Energy Simulation of Residential Quarters [158]



## INSTATIONÄRE ENERGIEBEDARFS- UND ANGEBOTSSIMULATION EINES STADTQUARTIERS MIT EINBEZIEHUNG DES NUTZERVERHALTENS

M. Lindauer<sup>1</sup>, I. Nemeth<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zentrum für nachhaltiges Bauen, TU München, München, Germany

### KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschreibt die Erweiterungen eines bestehenden Berechnungsmodells, mit dem die Abbildung des heutigen und zukünftigen Energiebedarfs von Gebäudegruppen nun instationär vorgenommen werden kann. Durch die Erweiterung des Modells soll das instationäre Verhalten von Gebäuden und deren Anlagentechnik sowie das Nutzerverhalten detaillierter abbildbar werden. Damit können Auswirkungen von Sanierungen in der Zukunft standort-bezogen quantifiziert und das Zusammenspiel von mehreren Gebäuden detailliert untersucht werden.

Beispielhaft wird das erweiterte Berechnungsmodell auf einen Gebäudebestand von 24 Gebäuden angewandt. Es werden 3 Szenarien untersucht, die den Einfluss des Nutzerverhaltens auf die instationäre Simulation dieses Gebäudebestandes darstellen. Das Ergebnis verdeutlicht die gravierenden Auswirkungen variablen Nutzerverhaltens, das insbesondere beim Einsatz von erneuerbaren Energieerzeugern wie Photovoltaik berücksichtigt werden muss.

### ABSTRACT

This paper describes the extension of an existing calculation model, which allows instationary quantification of the effects of the present and future energy demand of building groups. With the extension it will be possible to calculate the instationary behavior of buildings, their technical systems and the user behavior in detail. Thereby local effects of refurbishments can be quantified and the interdependencies of multiple buildings can be evaluated.

As an example this model is applied to a building stock which consists of 24 buildings. 3 scenarios are simulated to demonstrate the influence of the user behavior on the instationary simulation of this building stock. The result points out the tremendous effect of the user behavior which has to be considered thoroughly with the use of renewable energy sources like photovoltaics.

### Einleitung

Die Umgestaltung unseres Energiesystems hin zu emissionsarmen und leistungsfähigen Strukturen erfordert ein zielgerichtetes Vorgehen. Eine wesentliche Grundlage für den Entwurf von Umgestaltungsstrategien bilden Szenarien über die Entwicklung von Energienachfrage und Energieangebot, deren Detaillierungsgrad in der Modellierung durch die zu betrachtende Maßstabebene bestimmt wird. Während in [Nemeth 2011] und [Nemeth et al, 2012] mithilfe jährlicher Bilanzierung die Energieeffizienzpotenziale der energetischen Gebäudesanierung von 3,5 Mio Gebäude dargestellt werden konnten, bietet die darin angewandte Berechnungsmethodik des Heizperiodenbilanzverfahrens keine ausreichende Berücksichtigung spezifischer Einflüsse in der Betrachtung einzelner Systemausschnitte mit deutlich kleineren Gebäudegruppen. Um die standortspezifischen Einflussfaktoren auf Gewinne und Verluste der Bilanzierung detaillierter berücksichtigen zu können, wird in [Nemeth et al, 2013] die Bilanzierung des Energiebedarfs eines städtischen Quartiers mit ca. 1.000 Wohn- und Nichtwohngebäuden auf Basis des Monatsbilanzverfahrens durchgeführt. Als Motor für die Stadtentwicklung gedacht, wurden Grenzen und Möglichkeiten der Entwicklung von Energienachfrage und Angebot untersucht und die Auswirkungen der spezifischen Gegebenheiten darin weiter quantifiziert [ZNB, 2012].

Die Beurteilung des Zusammenspiels zwischen Gebäudehülle, Gebäudetechnik, Nutzer und Energieangebot als Grundlage für die Ableitung standortspezifischer Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz erfordert in der zuvor geschilderten Modellierung jedoch einen weiteren Detaillierungsschritt. Bedingt durch das Ziel, mit der Abstimmung der Einflussgrößen die Energieeffizienz und die Einbindung der erneuerbaren Energien zu untersuchen und zu optimieren, umfasst dieser einer höhere zeitliche Auflösung sowie die Einbindung instationärer Berechnungsverfahren. Hierfür muss eine sorgfältige Abwägung zwischen den für die Simulation zu berücksichtigenden Daten und

Parametern und den zu erzielenden Genauigkeiten in der Modellierung gefunden werden. Durch die nur begrenzt zur Verfügung stehenden Daten über die zu beurteilenden Gebäudebestände wird durch eine erhöhte Genauigkeit nicht notwendigerweise eine bessere Aussagekraft der Modellierung erreicht, sofern diese sich nicht auf die wesentlichen Parameter beschränkt und um eine sinnvolle Vorannahme der Nebenparameter angereichert wird. Das vorliegende Paper beschreibt die Implementierung weiterer Detaillierungen in das Berechnungsmodell EMmi (EnergieModellierung multiskalar), die einerseits den Einsatz von Solarthermie, PV und Wärmepumpen zur Deckung des Energiebedarfs berücksichtigen und andererseits das durch veränderte Lebens- und Arbeitsweisen veränderte Nutzerverhalten abbildbar machen.

## METHODIK

Das Berechnungsmodell zur Abbildung des langfristigen energetischen Verhaltens von Gebäuden ist in MATLAB implementiert und nutzt EnergyPlus als Simulationsprogramm im Hintergrund, um das instationäre Verhalten der Gebäude zu berechnen.

### **Abbildung der Gebäudehülle**

Die Abbildung der Gebäude in EnergyPlus erfolgt auf der Grundlage allgemeiner und spezifischer Charakteristika. Als allgemeine Charakteristika werden Informationen zu den verschiedenen Baualtersklassen z.B. aus der deutschen Gebäudetypologie [Loga et al 2005] und der TABULA-Gebäudetypologie [Loga et al 2012] entnommen. Die spezifischen Charakteristika hingegen werden über parametrisierte Informationen zu den konkreten Gegebenheiten der betrachteten Gebäudegruppe abgebildet

Als zentrale Parameter dienen statistische Daten und Geo-Informations-Daten (GIS):

- Baualtersklasse
- Wohnfläche
- Anzahl der Wohneinheiten
- Gebäudeorientierung
- Dachform
- Anbausituation der Gebäude

Aus den GIS-Daten werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen berechnet, welche den Anteil unterschiedlicher Orientierungen, Dachformen und Anbausituationen in der betrachteten Gebäudegruppe repräsentieren. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden anschließend mit den statistischen Daten zu Baualtersklasse, Wohnfläche und Wohneinheiten zusammengeführt.

Die Parametrisierung besteht in Anpassungen an den Bauteilflächen gemäß dem Flächenschätzverfahren [Loga et al 2005]. Das Flächenschätzverfahren berechnet in Abhängigkeit von beheizter Fläche, Anbausituation, Beheizung des Dach- und Kellergeschosses, Anzahl der Geschosse und weiteren Parametern Bauteilflächen für Außenwand-, Fenster-, Dach- und Bodenflächen. Hieraus wird eine für EnergyPlus nutzbare Gebäudegeometrie erzeugt. Eine Herausforderung hierbei ist die Erzeugung sinnvoller Gebäudegeometrien aus den Ergebnissen des Flächenschätzverfahrens, derzeit wird von einer quadratischen Grundfläche der Gebäude ausgegangen. Komplexere Geometrien sollen zukünftig über die Nutzung der Gebäudegrundrisse aus GIS ermittelt werden.

Über die Information der Baualtersklasse werden aus der TABULA-Gebäudetypologie typische Bauteilaufbauten ausgewählt, welche die thermische Qualität der Gebäudehülle definieren.

Die Gebäudemodelle sind als 1-Zonen-Modelle ausgeführt, da keine genaueren Informationen über die Nutzung der einzelnen Räume vorliegen und eine weitere Detaillierung im Wohngebäudebereich keinen Zugewinn an Informationen liefert.

### **Abbildung der Anlagentechnik**

Für die im Gebäude eingesetzte Anlagentechnik können unterschiedliche Varianten definiert werden. Derzeit sind die beiden folgenden Anlagentypen vordefiniert:

- Gas-Boiler mit Brennwerttechnik
- Fernwärmeübergabestation

Diese Anlagen sind vereinfacht abgebildet, die Wirkungsgrade der Anlagen wurden an [Loga et al 2002] angelehnt. Leitungsverluste werden bisher nicht berücksichtigt. Im weiteren Verlauf sollen sie über die in [Loga et al 2002] beschriebene Methodik, mit der eine Abschätzung der Leitungslängen erfolgen kann, detaillierter abgebildet werden.

In jedem Gebäude kann eine PV-Anlage, deren Größe und damit Leistung abhängig von der Dachfläche ist, eingebracht werden. Die Orientierung der PV-Anlage wird aus der Orientierung des Gebäudes übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass von der PV-Anlage erzeugter Strom lokal verwendet wird, bevor er ins Netz eingespeist wird.

### **Sanierungen im Lebenszyklus der Gebäude**

Die Methodik für die Bestimmung von Sanierungen an den Gebäudehüllen orientiert sich an [Nemeth 2011]. Für die Anforderungen an die Verbesserung des Wärmeschutzes bei Sanierungen sind zwei prinzipiell unterschiedliche Vorgehensweisen möglich:

a) Angaben aus den vergangenen Energieeinspar- und Wärmeschutzverordnungen und Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Vorgaben an die Qualität (U-Wert) des sanierten Bauteils. Hieraus werden entsprechende zusätzliche Schichten für die Bauteile erzeugt.

b) Verwendung von Sanierungsvarianten aus der TABULA-Gebäudetypologie [Loga et al 2012]. Diese Varianten definieren für jedes vorhandene Bauteil, welches energetisch verbesserungsfähig ist, mögliche Verbesserungen, beispielsweise durch Aufbringung einer Innen- oder Außendämmung oder durch Austausch der vorhandenen Fenster gegen neue Fenster. Die Maßnahmen werden im Vorfeld analog zu den Angaben in TABULA im Programm hinterlegt.

Mit der Abbildung der Gebäudehüllen-Sanierungen in der Lebensdauer eines Gebäudes ergeben sich zu verschiedenen Zeitpunkten (Versagenszeitpunkte von Bauteilen) unterschiedliche Wärmeschutzqualitäten für ein Gebäude. Diese individuell für jedes Gebäude ermittelten Veränderungen erfordern jeweils einen Simulationslauf in EnergyPlus. Das Vorgehen hierfür wird im Abschnitt „Berechnungsmethodik“ beschrieben.

Analog zu den Versagenszeitpunkten für Bauteile werden auch für die Anlagentechnik Versagenszeitpunkte ermittelt. Versagt eine Anlage, so kann entweder eine Anlage mit dem gleichen Energieträger, aber ggf. erhöhter Effizienz, zum Einsatz kommen. Alternativ kann ein Wechsel zu einem anderen Energieträger erfolgen. Die Wahrscheinlichkeiten für solche Wechsel können als Parameter festgelegt werden.

### Abbildung der Stromnachfrage

Der akkumulierte jährliche Strombedarf der Haushalte wird über die beheizte Fläche berechnet, indem eine durchschnittliche elektrische Leistung von 5 W/m<sup>2</sup> genutzt wird. Damit soll der Vergleich mit den in stationären Rechenverfahren vorgegebenen konstanten Werten für die interne Last zu ermöglicht werden.

Um hieraus einen stündlich aufgelösten Strombedarf abzuleiten, wurde das Haushalts-Standardlastprofil H0 des BDEW verwendet. Dieses wird um den Strombedarf für die Heizungsanlagentechnik bereinigt, um bei einem Wechsel der Anlagentechnik die Veränderungen am Stromlastprofil berechnen zu können.

### Nutzerverhalten

Für die Berücksichtigung des Nutzerverhaltens werden die entsprechenden Zeitpläne angepasst, die beispielsweise die Raumsolltemperatur und die durch Anwesenheit gegebenen internen Gewinne bestimmen, oder die Luftwechselrate bei

Fensterlüftung. Im Kapitel „Simulationsergebnisse“ werden hierfür beispielhafte Szenarien dargestellt.

Der Trinkwarmwasserbedarf wird aktuell nicht mit berücksichtigt, dies wird in der nächsten Entwicklungsstufe durch den Einsatz von Zapfprofilen implementiert.

### Berechnungsmethodik

Das Schema der Berechnungsmethodik ist in Abbildung 1 dargestellt. Für jeden Sanierungsstand jedes Gebäudes muss ein Simulationslauf in EnergyPlus durchgeführt werden, um den stündlich aufgelösten Heiz- und Endenergiebedarf ermitteln zu können. Hierfür wird, ausgehend vom jeweiligen Gebäudetyp und den Parametern über die vorhandenen Bauteilflächen und die Anlagentechnik, ein Input Definition File (IDF) für EnergyPlus erzeugt, welches anschließend per Kommandozeilenbefehl mit EnergyPlus unter Einbeziehung der Klimarandbedingungen berechnet wird. Die Ausgaben der Simulation werden in einer Textdatei gespeichert und werden daraus wieder in das MATLAB-Programm eingelesen und in die Datenbank gespeichert.

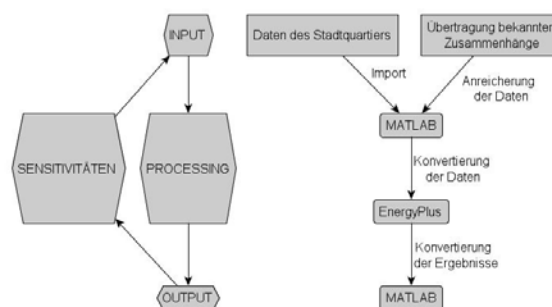


Abbildung 1: Berechnungsmethodik

Ein Simulationslauf in EnergyPlus benötigt ca. 12 Sekunden Rechenzeit (auf einem Kern eines Intel® Xeon® X5650 @ 2,67 GHz).

Um die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe und damit die Rechenzeit insgesamt zu reduzieren wurde eine Anbindung an eine MySQL-Datenbank implementiert. In der Datenbank werden zu jedem Gebäude die Ergebnisse des stündlichen Energiebedarf-Verlaufs und ggf. des lokalen Energieerzeugungs-Verlaufs abgespeichert. Für alle Gebäude mit gleicher Wohnfläche, gleichem Sanierungsstand und gleicher Anlagentechnik steht dann ein Ergebnis-Datensatz zur Verfügung. Werden die Ergebnisse für ein einmal berechnetes Gebäude erneut benötigt, so können diese aus der Datenbank abgefragt werden. Eine solche Abfrage benötigt etwa 0,15 Sekunden, damit ergibt sich eine Beschleunigung der Rechenzeit um den Faktor 80 gegenüber einer erneuten Berechnung in EnergyPlus.

## SIMULATIONSERGEBNISSE

### Datenbasis

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse einer Beispielrechnung zu einem Stadtquartier vorgestellt. Die Eingangsdaten beinhalten Informationen über die Baualtersklasse, die Wohnfläche und die Anzahl der vorhandenen Wohneinheiten in einem Gebäudeblock. Die Gebäudeblöcke umfassen dabei zwischen 1 und 37 Wohngebäude und zwischen 4 und 388 Wohneinheiten. Außerdem stehen die Aufstandsflächen und Höhen der Gebäude in einem GIS-Format zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Daten werden, wie in [Nemeth et al 2013] beschrieben, die Anbausituationen und Orientierungen der Gebäude ermittelt.

Über die eingesetzten Heizungsanlagen in dem Stadtquartier liegen keine detaillierten Informationen vor. Es wurden daher statistische Daten zum gesamten Stadtgebiet verwendet und aufgrund der hohen Durchdringung des Gebietes mit Fernwärmeleitungen eine im Vergleich zum gesamten Stadtquartier erhöhte Fernwärmenutzung angenommen.

Zusätzliche Informationen über die Haushaltsgrößenverteilung wurden für die 5 Teilgebiete des Stadtquartiers zur Verfügung gestellt.

Für die klimatischen Randbedingungen wurde ein in Meteonorm 6.1 erzeugter Klimadatensatz für Nürnberg verwendet.

### Szenario 0 (Ausgangslage)

Im Folgenden wird eine Simulation für einen Gebäudeblock des Quartiers mit 24 Wohngebäuden, 183 Wohneinheiten und einer Wohnfläche von 10.160 m<sup>2</sup> durchgeführt.

Die energetische Qualität der Gebäudehülle wird ausgehend von der TABULA Gebäudetypologie bestimmt.

Die Sanierungszeitpunkte der Gebäudehülle werden durch die Parameter in Tabelle 1 für die Normalverteilung festgelegt.

Tabelle 1: Parameter für Normalverteilung der Sanierungszeitpunkte

	WAND	DACH	FENSTER
Mittelwert	40 Jahre	50 Jahre	25 Jahre
Std.Abw.	10 Jahre	10 Jahre	5 Jahre

Tabelle 2: U-Wert-Anforderungen der Sanierungsmaßnahmen

	WAND	DACH	FENSTER
2013 bis 2015	0,24 W/(m <sup>2</sup> K)	0,24 W/(m <sup>2</sup> K)	1,3 W/(m <sup>2</sup> K)
Ab 2016	0,18 W/(m <sup>2</sup> K)	0,18 W/(m <sup>2</sup> K)	1,0 W/(m <sup>2</sup> K)

Die Anforderungen an die U-Werte bei Sanierungsmaßnahmen orientieren sich an der EnEV 2014 und werden in Tabelle 2 dargestellt.

Aus den genannten Parametern wird ein Sanierungsszenario errechnet, welches für die weiteren Untersuchungen des Nutzerverhaltens verwendet wird.

Für die Modellierung der Ausgangslage kommen die folgenden Heizungsanlagentechniken zum Einsatz:

- Gas-Brennwertkessel
- Fernwärmeübergabestation

Die Eingrenzung auf diese beiden Systeme ist durch die laut statistischen Daten hauptsächlich eingesetzten Heizungsanlagen in Nürnberg gegeben. Andere Heizungssysteme werden auf Grund unzureichender Datengrundlage derzeit nicht für das Gebiet modelliert.

Die Deckungsanteile der beiden Energieträger verteilen sich wie folgt auf die Gebäude:

- Gas: 4601 m<sup>2</sup> der Wohnfläche in 12 Gebäuden mit zusammen 91 Wohneinheiten
- Fernwärme: 5559 m<sup>2</sup> der Wohnfläche in 12 Gebäuden mit zusammen 92 Wohneinheiten

Im Ausgangsszenario wird das Nutzerverhalten als konstant angenommen, d.h. es wird von einer konstanten Soll-Innenraumtemperatur von 21 °C ausgegangen, die Infiltrationsrate ist auf 0,6 l/h festgesetzt, die internen Gewinne sind konstant mit 5 W/m<sup>2</sup> angesetzt.

Der hieraus resultierende Heiz- und Endenergiebedarf im Verlauf des berechneten Zeitraums von 1980 bis 2020 ist unter Berücksichtigung der Sanierungen in Abbildung 1 dargestellt. Der stündlich aufgelöste Heizwärmebedarf ist in Abbildung 2 dargestellt.

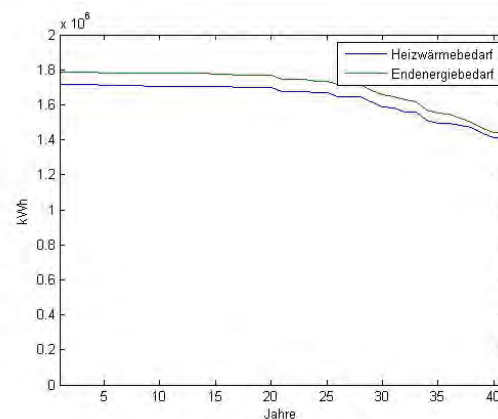


Abbildung 2: Heiz- und Endenergiebedarf zwischen 1980 und 2020 (Szenario 0)

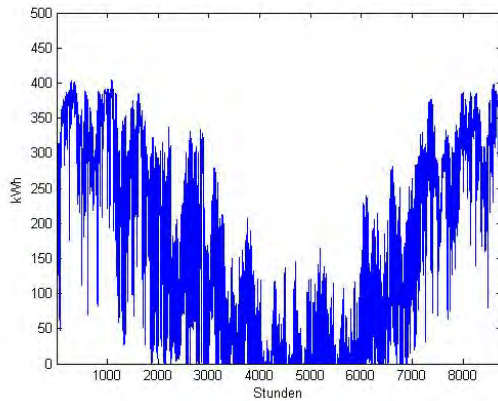


Abbildung 3: stündlich aufgelöster Heizenergiebedarf in 2020 (Szenario 0)

### Szenario 1

In diesem Szenario wird eine Nachtabsenkung der Soll-Innenraumtemperatur auf 18 °C in der Zeit von 22 Uhr bis 5 Uhr untersucht. Der sich ergebende Heizwärmebedarf in diesem Szenario ist in Abbildung 3 dargestellt.

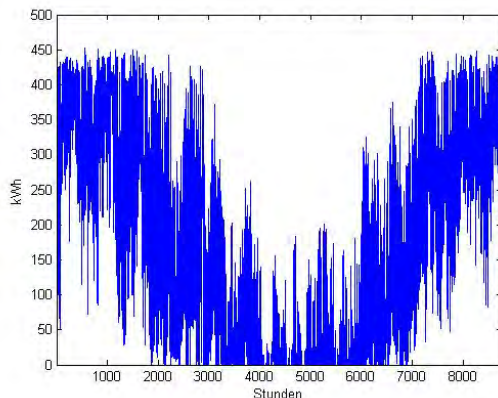


Abbildung 4: stündlich aufgelöster Heizenergiebedarf in 2020 (Szenario 1)

Im Ergebnis reduziert sich der Heizwärmebedarf für das Jahr 2020 von 1,41 GWh in Szenario 0 auf 1,30 GWh in Szenario 1 (Reduktion um 8 %), dabei erhöht sich aber die maximal benötigte Leistung auf Grund der Aufheizspitzen um 10 % (summiert für alle Gebäude maximal 452 kW statt 404 kW ohne Nachtabsenkung).

### Szenario 2

In diesem Szenario wird neben der Nachtabsenkung zusätzlich die interne Last variiert. Hierfür wird das Standardlastprofil für Haushalte verwendet. Dieses wird so skaliert, dass in Summe über das Jahr gerechnet  $5 \text{ W/m}^2 \cdot 8760 \text{ h} = 43,8 \text{ kWh/m}^2$  interne Last simuliert werden. Am Heizenergiebedarf ergeben sich durch das detailliertere Lastprofil nur minimale Veränderungen, da sich die Zeitpunkte der

internen Gewinne verändern, sie aber in der Summe gleich bleiben.

Beim Strombedarf ergeben sich zwei vollkommen unterschiedliche Verläufe für die Szenarien 1 und 2:

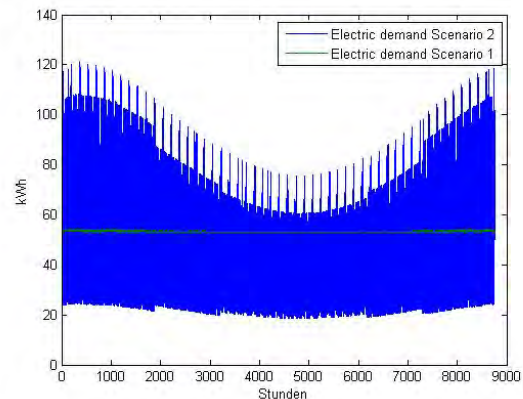


Abbildung 5: stündlich aufgelöster Strombedarf im Vergleich zwischen Szenario 1 und 2

Der Strombedarf für Szenario 1 ist annähernd konstant, die leichten Variationen ergeben sich aus der Berücksichtigung des Strombedarfs für die Heizungsanlage, ohne deren Berücksichtigung wäre die Kurve konstant. Im Gegensatz dazu stellt Szenario 2 einen eher der Realität entsprechenden Strombedarf dar, da hier auch Lastspitzen abgebildet sind, die insbesondere für die realitätsnahe Betrachtung des Einsatzes von PV-Stromerzeugung (siehe Szenario 3) eine wichtige Rolle spielen. Bei Einsatz beispielsweise einer Wärmepumpe würden sich massive Änderungen am Strombedarf ergeben, die zukünftig mit Hilfe des Modells bestimmt werden sollen.

### Szenario 3

In Szenario 3 wird aufbauend auf Szenario 1 und 2 das Potential zur Einbindung der erneuerbaren Energien durch Photovoltaik-Anlagen ermittelt. Hierfür wird davon ausgegangen, dass 40 % der Dachflächen aller Gebäude mit PV-Kollektoren belegt sind.

Wenn das konstante Stromnachfrageverhalten von Szenario 1 mit PV-Stromerzeugung kombiniert wird, so ergeben sich im Jahr 2020 62 MWh Stromeinspeisung. Verwendet man statt der detaillierten Nachfrage das Standardlastprofil H0 für Haushalte des BDEW, so ergibt sich eine Einspeisung von 54 MWh. Die Abweichung von 14 % ist alleine auf die unterschiedliche Berücksichtigung des Nutzerverhaltens zurückzuführen. Gleichzeitig ergibt sich als Summenwert für den Strombezug aus dem Netz in Szenario 1 ein um 2 % höherer Wert als in Szenario 2, d.h. die Eigenstromnutzung ist in Szenario 1 wesentlich geringer.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass das Nutzerverhalten einen massiven Einfluss darauf hat,



wie der durch PV erzeugte Strom im Gebäude genutzt wird. Für andere Techniken zur Einbindung regenerativer Energieerzeugung (Wärmepumpen, Solarthermie, BHKW/KWK, Windenergie) muss also die Detaillierung sowohl bei der Anlagentechnik selbst, als auch auf der Nutzerverhaltensseite massiv vorangetrieben werden.

## DISKUSSION

Mit der Erhöhung der zeitlichen Auflösung steigt die Kopplungsmöglichkeit an detailliert steuerbare Techniken und Modelle der Energiebereitstellung sowie die Anpassungsmöglichkeit der aufzuprägenden Lastgänge, die bisher durch stark verallgemeinerte Lastprofile abgebildet wurden. Dies ermöglicht die Einbindung der erneuerbaren Energien mit hoher zeitlicher Auflösung, die Abbildung der zukünftigen Veränderungen durch Sanierungen und die Berücksichtigung der weiter fortschreitenden Verknüpfungen des Wärme- und Strommarktes. In der Abbildung der Energienachfrage können die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf die Energienachfrage entsprechend den sich wandelnden Lebensmodellen berücksichtigt werden und hierdurch Einsparpotenziale aufgezeigt werden. In Verbindung mit unterschiedlichen Szenarien für das Sanierungsverhalten von Gebäuden können damit Varianten der zukünftigen Energiebedarfsentwicklung eines Stadtteils sowie Wege zu einer effizienten und emissionsarmen Energieerzeugung aufgezeigt werden.

## AUSBLICK

Für die zukünftige Weiterentwicklung des Modells ist vor allem die Verfügbarkeit von detaillierten Daten zur energetischen Qualität von entscheidender Bedeutung. Die derzeit vorhandenen statistischen Daten müssen mit GIS-Daten verschnitten werden, damit sich die Geometrie der Gebäude genauer abbilden lässt. Als Datenmodell bietet sich hierfür CityGML mit seinen Erweiterungen für energetische Betrachtungen an, wobei durch das Vorhandensein eines Datenmodells noch nicht das Vorhandensein entsprechender Daten gegeben ist. Weiter ist es wünschenswert, genauere Angaben zu den eingesetzten Heizungssystemen zu erhalten, hierfür könnte sich eine Kooperation mit dem Verband der Kaminkehrer als zielführend erweisen.

Eine zukünftig zu lösende Aufgabe für die Untersuchung von Sanierungsszenarien ist die Abbildung von Wärmepumpen in dem Modell. Derzeit gibt es hierfür in EnergyPlus kein Objekt, welches eine Luft-Wasser-Wärmepumpe realistisch abbilden kann. Wenn solch ein Wärmepumpenmodell vorhanden wäre, so könnten die Wechselwirkungen zwischen dem Strom- und Wärmebedarf unter

Berücksichtigung des Nutzerverhaltens genauer untersucht werden.

Das Nutzerverhalten, insbesondere den Warmwasser- und Strombedarf betreffend, soll zukünftig durch den Einsatz entsprechender Berechnungsmodelle und Lastprofile weiter verfeinert werden.

Dann wird es beispielsweise auch möglich sein, Auswirkungen von Energiemanagement-Systemen, welche automatisiert Lastverschiebungen von Haushaltsgeräten vornehmen, quantifizierbar zu machen und szenarische Untersuchungen für das Potential solcher Systeme durchzuführen.

Ein übergeordnetes Thema, welches zukünftig bei der Modellentwicklung verstärkt Berücksichtigung finden muss, ist die qualitative und quantitative Einschätzung der Fehler, die bei der Wahl der Parameter auftreten. Hierfür werden im weiteren Verlauf der Forschungstätigkeit Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Haupteinflussgrößen zu identifizieren und die sich daraus ergebenden Fehler abzuschätzen. Erkenntnisse, wie sie in [Burhenne 2013] und [Burhenne et al 2013] erarbeitet wurden, werden dabei auf Gebäudegruppen übertragen und ermöglichen es, die Unsicherheiten der Ergebnisse des Berechnungsmodell „EmMi“ angegeben zu können.

## ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem hier vorgestellten Berechnungsmodell „EmMi“ ist es möglich, die Wechselwirkungen zwischen Sanierungen der Gebäudehüllen, den Änderungen der Heizungsanlagentechniken und dem Einsatz von erneuerbaren Energieerzeugungssystemen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzerverhalten aufzuzeigen. Hierfür wurde ein vorhandenes Modell, welches den Energiebedarf stationär berechnet, um eine Schnittstelle zu EnergyPlus für instationäre Energiebedarfssimulation erweitert.

Die notwendigen Parameter für die Simulation orientieren sich an den zur Verfügung stehenden statistischen Daten einerseits, und andererseits an durch Studien ermittelte Werte.

Beispielhaft wurden vier Szenarien dargestellt, welche die Auswirkungen des Nutzerverhaltens und Wechselwirkungen zwischen Nutzerverhalten und Anlagentechnik beispielhaft abbilden.

Bei der weiteren Entwicklung des Modells „EmMi“ müssen die Unsicherheiten, die sich durch die Abschätzung für die Parameter bei der Simulationsrechnung ergeben, quantifiziert werden. Erst dann lässt sich die Aussagekraft der Ergebnisse stichhaltig darlegen.

## LITERATUR

- Burhenne S. 2013: Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation, Karlsruher Institut für Technologie, 2013
- Burhenne S., Tsvetkova O., Jacob D., Henze G., Wagner A. 2013: Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses, *Building and Environment* 62, pp. 143-154, 2013
- Diefenbach N., Loga T., Born R., Grosklos M., Herbert C. 2002: Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002
- Loga T., Diefenbach N., Knissel J., Born R. 2005.: Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2005
- Loga T., Diefenbach N. 2005: Deutsche Gebäudetypologie, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2005
- Loga T., Diefenbach N., Stein B. et al 2012: Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2012
- Nemeth I. 2011: Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor. Dissertation an der Technischen Universität München. München, 2011.
- Nemeth I., Lindauer M. 2012: Adaptation of a stochastic simulation model for long-term investigation of the development of the energy demand in larger building stocks. In: *Proceedings of the International Workshop: Intelligent Computing in Engineering 2012 TU München*. ISBN 978-3-00-038455-4
- Nemeth I., Lindauer M., Ahlhaus P. 2013: Geo-Referenced Modeling of an Urban Quarter for the Assessment of Refurbishment Potentials and Energy Supply Strategies. In: *Proceedings to the Sustainable Building Conference - SB13, Munich*, pp. 293-301, 2013
- ZNB, 2012: Stadtlabor Nürnberger Weststadt, Zentrum für nachhaltiges Bauen, TU München, 2012

# Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters



Manuel Lindauer  
Dipl.-Math.  
TU München  
Germany  
manuel.lindauer@tum.de

## Summary

In this paper a dynamic sensitivity analysis approach is presented, which uses the Elementary Effects method in connection with a moving mean smoothing function to get a ranking of the influence of parameters. This is demonstrated on a model of an urban quarter, which uses EnergyPlus to simulate 25 buildings of a block. The information for creating the building models stems from statistical, GIS and building typology data. For the majority of model parameters no data is available. Therefore assessing the influence of these parameters is crucial in order to give recommendations what data should be acquired in future projects to have the possibility to create reliable models for refurbishment scenarios of urban residential quarters.

**Keywords:** renewable energy supply, building energy simulation, sensitivity analysis

## 1. Introduction

Renewable decentralized energy supply of buildings will become more and more important and due to its fluctuation the focus of energy demand and supply calculations have to change from monthly or yearly cumulative examination to detailed hourly examination using transient simulation tools. Additionally existing buildings offer a huge range of possible refurbishment measures. Effects of these measures have to be considered in detailed examination to select the best option regarding all relevant target functions like peak power or self-sufficiency for electricity. Especially when looking at quarters consisting of multiple different buildings there is a huge range of possible measures which could be applied in the future.

Transient building energy calculations of residential quarters have many parameters (> 100 per building). Data about the building envelope (like geometry via GIS [7], constructions via building typology [5]), or annual energy demand [5] is available. But data about the used heating systems, local power generation or user behavior is insufficient. Therefore for modelling the buildings in detail, that means with hourly results, considering interactions between building technology and renewable energy sources and their fluctuations, recommendations for data to be collected in the future have to be derived by analyzing the influence of different parameters on the model using sequential sensitivity analysis.

## 2. Methodology

An approach for extending the global sensitivity analysis method of Elementary Effects (EE) to assess dynamic effects of building's energy behaviour in a simulation model of a residential quarter is presented. In this approach sensitivity indices for every single hour of the year are calculated. The result is a time series with 8760 values. To evaluate this time series it is useful to use smoothing methods like moving means to reduce short-term fluctuations. The size of the moving mean window is important here and has to be adapted to the model result data. The basic idea for this method was developed in [14]. This method can be applied to other sensitivity analysis methods in a corresponding way, EE was chosen due to its relative low calculation effort.

### 2.1. Sequential Sensitivity Analysis

Dynamic sensitivity analysis is, compared to conventional sensitivity analysis, considering time within a simulation model and the change of parameters and results over time. So the outcome of the model is a time-series (like the hourly energy demand of a building), and therefore the sensitivity index is a vector with one entry for every point in time, for which the index was calculated. [14] As this vector can be seen as a sequence over time and to distinguish the method presented in the following from other dynamic sensitivity methods considering time, it is called sequential sensitivity analysis.

A sequential sensitivity analysis of a dynamic building performance simulation consists of the following steps:

- Select target functions and parameters of interest
- Use sampling strategy to create input sets for the parameters
- Run model with varying input parameter sets and save output as time-series data
- Use smoothing functions to reduce shortterm fluctuations
- For every input set and the corresponding smoothed output time series calculate the sensitivity index time series
- Plot the sensitivity indices over time

### 2.2. Elementary Effects

The Elementary Effects Method was developed in 1991 by Morris [1]. The aim of this type of sensitivity analysis is to identify parameters which are a) negligible, b) linear and additive, or c) non-linear or involved in interactions with other factors. For a detailed definition and possible interpretations of the results see [2].

#### 2.2.1. Overview

EE is a sensitivity analysis method which uses as sampling strategy different trajectories of a discretized input space to vary every parameter. Every input can take  $p$  levels. The resulting sensitivity index  $\mu$  shows the overall influence of a parameter on the output, while  $\sigma$  assesses the ensemble effect (nonlinear and/or due to interactions). Usage of  $\mu^*$ , which is defined as the mean of the distribution of the absolute values of the elementary effects and therefore helps to minimize cancelling effects, is recommended. [2]

The computational cost of the calculation of the elementary effects sensitivity index is  $(k+1)*r$  runs of the model, where  $k$  is the number of parameters and  $r$  is the number of trajectories.

Recommendations to get valuable results are  $p=4$  and  $r=10$ . [3][4]. The results in chapter 3 were calculated with  $p=4$  and  $r=2$ , because  $r > 2$  does not change the method itself, but reliability of the results and computational effort increases. Reliability of results is not in the focus of this paper, but minimizing computational time was necessary.

Parameters can also be grouped to reduce necessary runs, for mathematical details see [2]. This means, that all parameters in one group are changed at the same time in the same direction. The computational cost therefore reduces to  $(g+1)*r$  runs of the model, where  $g$  is the number of groups and  $r$  is the number of trajectories. Groups have to be created carefully, because if there are unsuspected interactions between the parameters in one group, this interaction is neglected in the resulting sensitivity index. In the example below grouping is used for the set point temperature at day and night (see 2.5.4).

### 2.2.2. Justification for using elementary effects

The EE method was mainly chosen because of its low computational effort and the simple possibility to use grouping, which is helpful in the context of the residential building quarter to model, where a lot of independent parameters exist.

In addition, due to the definition of  $\mu_i$ ,  $\mu_i^*$  and  $\sigma_i$ , which are averaged over multiple local sensitivity measures to remove the dependence on the sample point, it is better than ordinary one-at-a-time sensitivity analysis methods regarding the exploration of the input space.

EE is quite robust regarding unstable models, i.e. if one model run for a chosen trajectory fails, this trajectory can be left out and another one can be chosen. This is especially helpful when analysing all parameters of a residential quarter which means a number of parameters in a magnitude of thousands, where not all combinations can be checked for stability before the sensitivity calculation. [2]

One downside of EE is that no quantitative analysis on the variance of the influence of a factor and the individual interactions between factors is possible. A variance based sensitivity analysis will be the next step when the number of factors can be reduced to the set of most important ones. Then also the individual interactions between factors can be assessed, what is not possible using EE. [4]

But for identifying the most important factors the EE method is a good compromise between calculation effort, interpretability and valuable results.

### 2.3. Moving Mean

Assume an odd window size  $w$ . Then the moving mean of the  $(w-1)/2$  elements before and behind a fixed element  $x_i$  ( $i > (w-1)/2$ ) are calculated by:

$$\text{mm}(x_i, w) = \frac{1}{w} \sum_{j=i-(w-1)/2}^{i+(w-1)/2} x_j \quad (1)$$

### 2.4. Model of residential quarter

#### 2.4.1. Description of the case study building block

The building block used as case study here consists of 25 buildings, which were constructed be-

tween 1918 and 1978. Therefore the building types DE.N.MFH.03.Gen to DE.N.MFH.06.Gen from the TABULA Building Typology [5] were taken as base information. The geometry of the buildings was taken from GIS LoD1 data available at [7]. The overall heated area of the 25 buildings in the quarter is 10426 m<sup>2</sup> with 183 residential units. Heating in the block is provided by district heating (30% of heated area), gas (30% of heated area), oil (15% of heated area) and others (coal, solar thermal). Only district heating, gas and oil systems are modelled here, solar thermal heating will be implemented into the model in the future.

Climate data generated by Meteonorm for the city of Nuremberg was used for all simulations.

#### 2.4.2. Energy simulation

The energy simulation is conducted using EnergyPlus models, which are parametrized using the data available in the building block. The models used here were created in [6] using information of the German part of the TABULA building typology [5].

#### 2.4.3. Refurbishment activities

The method for representing refurbishment activities in the buildings was developed in [16] and uses normal distributions of the lifetimes of walls, windows and the roof construction to model points in time, when refurbishment measures can be conducted. Probabilities are used to decide, whether an energy improvement by insulation for the walls and the roof or better U-values for the windows takes place at such a refurbishment point in time. The probabilities change over the years to incorporate for increased energy refurbishment activities.

In this paper no projections into the future are considered. Therefore only refurbishments which were performed in the past are used to approximate the state of the building stock in the year 2015.

### 2.5. Model Parameters for sensitivity analysis

For this paper not all parameters can be assessed by the sensitivity analysis, so a subset was chosen, which represents the different type of parameters: factors of the building envelope, the heating system and user behaviour. The exact values for the distributions have to be analysed and justified in the future.

#### 2.5.1. Conductivity of the insulation of wall constructions

A default conductivity of the insulation of 0.035 W/mK is assumed for all building age classes which have insulation applied. The thickness of the insulation is calculated inversely by using the given U value for the wall constructions. But for variations due to other materials used the conductivity parameter is changed by a normal distribution around the pre-given value of 0.035 W/mK as mean and standard deviation 0.05 W/mK.

#### 2.5.2. Heat capacity of walls

The parameter  $c_{p,wall}$  is used to model the heat storage capacity of the external walls of the buildings. This information is not given in the building typology, so its importance will be investigated. The heat capacity of the static part of the wall changes, the insulation's heat capacity does not change. The heat capacity is defined to vary by a normal distribution with mean 1000 J/kgK and standard deviation 100 J/kgK.

### 2.5.3. U-value of windows

From the building typology the U-value is given by values between 2.57 W/m<sup>2</sup>K and 4.3 W/m<sup>2</sup>K depending on the building age class. This value is varied for the sensitivity analysis by a normal distribution around that pre-given value from the building typology and a standard deviation of 0.1 W/m<sup>2</sup>K to represent different constructions.

### 2.5.4. Setpoint temperature at day and night

During day (defined to be the time between 6:00 and 21:00) the setpoint temperature varies between 19 and 22 °C. During night (21:00 to 6:00) it varies between 16 and 19 °C.

As these setpoint temperatures are used at different times of the simulation, the interaction between those two parameters is minimal when not looking at the load peak after the change from nightsetback to day operation. Therefore EE input factor grouping can be used here. If the day setpoint temperature is high, it is assumed that also the night setback temperature is high, and the same for low values. More temperature setpoint strategies and user behaviour related information will be implemented in the future and could use results like [13].

### 2.5.5. Fixed infiltration rate (constant over time)

This parameter defines how much air changes in the heated zone of the building due to infiltration. In the German standard [8], a value of 0.7/h is assumed. But older buildings tend to have much higher infiltration rates [9], so the influence of this parameter will be assessed for values between 0.2 and 2.0 1/h to address the wide variety of real buildings.

### 2.5.6. Increased airchange rate due to 1 hour window opening during the day

This parameter serves as one example for specific user behaviour. It models that every day for one hour between 7:00 and 19:00 windows are open and therefore an increased air change rate (here an additional 2/h to the constant infiltration rate) has to be used. In reality a much wider bandwidth of window opening times, length of window opening and different air change rates can and will occur. But this parameter and its effect on the energy demand shows, that it is necessary to have more data available on the user behaviour in the future.

### 2.5.7. Heating System Boiler efficiency

For gas and oil boilers the efficiency is defined by a coefficient [11]. This coefficient varies for the sensitivity analysis by a uniform distribution between 0.5 and 1. This represents the over dimensioning of some systems, which will then not run in their optimal full load range but in a part load range which is less efficient. To model the partload curve will be a next step. For condensing boilers the efficiency coefficient could be greater than 1, but this is not supported in the Energy Plus model.

## 2.6. Validation

Neither detailed information about parameters of heating and ventilation systems nor measured data for energy consumption with high temporal resolution is area-wide or for the case study block available. So a physical validation of the model is not possible. But EnergyPlus with its components is validated [10], so the model described in 2.4 can be used to identify the most important parameters for the building block. Then recommendations what data should be collected in future projects can be created.

For privacy and cost reasons never all parameters and measurement data will be assessed. So it is crucial for validation of city quarter models to gain knowledge about the most important parameters to gather using sensitivity analysis methods of models.

### 3. Results

#### 3.1 Final energy demand

In the following the simulation results and corresponding sensitivity indices of one winter week (January 9<sup>th</sup> till January 16<sup>th</sup> equal simulation hours 217 to 385) will be examined. This can be extended to a whole year analysis using the same methods described in 3.2, the moving mean window sizes have to be adapted.

For this paper the result we are most interested in is the final energy demand of the heating for all buildings, which is in average for all scenarios for the the whole week 196160 kWh.

Figure 1 shows the mean, minimum and maximum of the specific final energy demand in all the different trajectories of the sensitivity analysis. The ratio between max and min curve is almost

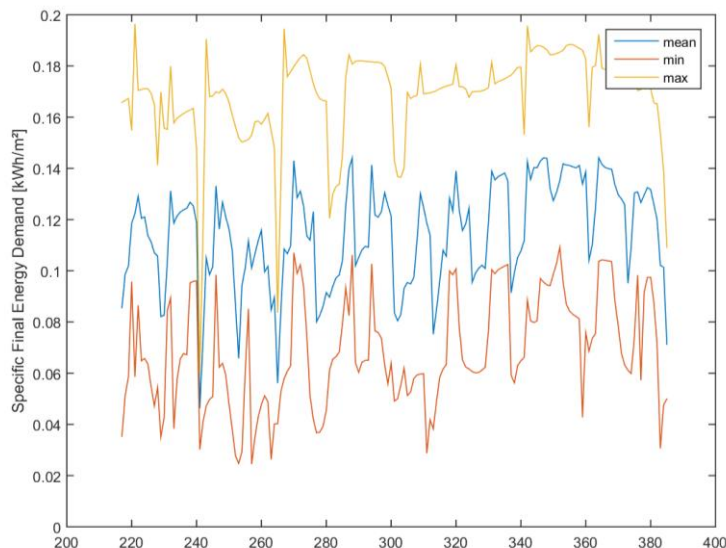


Figure 1: Mean, Min and Max of final energy demand

everywhere bigger than 2, so there is a quite high variation which will be explained by the sensitivity analysis in 3.2. Detailed examination of these results would extend the scope of this paper by far and is not necessary for demonstrating the sensitivity methods below.

#### 3.2 Sequential Sensitivity Analysis

The sequential sensitivities of the model parameters explained in 2.5 are calculated and shown in 3.2.1. The effects of combining it with the moving mean method are explained in 3.2.2. Main reason for using a smoothing method like the moving mean is to have a better understanding of the overall importance of a factor over time intervals longer than an hour and to reduce short-term fluctuations. The error of the data underlying the sensitivity analysis increases. So a tradeoff between interpretability and reliability is necessary.



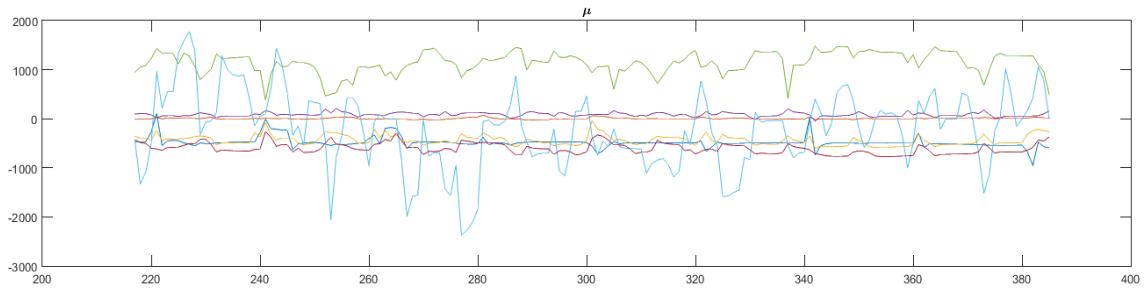


Figure 2:  $\mu$  for the input parameter groups

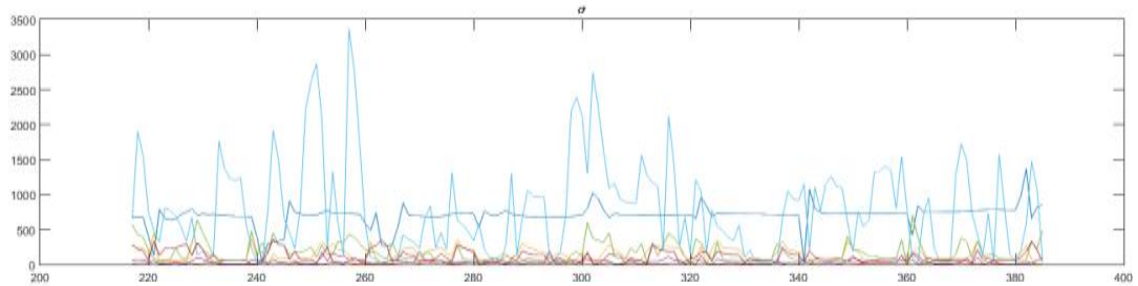


Figure 3:  $\sigma$  for the input parameter groups

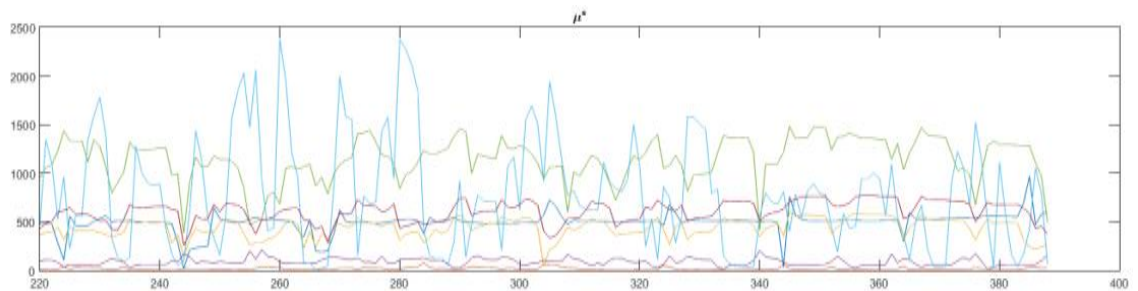


Figure 4:  $\mu^*$  for the input parameter groups



### 3.2.1 Interpretation without moving mean

In figures 2, 3 and 4 the sensitivity indices  $\mu_i$ ,  $\mu_i^*$  and  $\sigma_i$  are plotted for the input parameters described in 2.5.

It can be seen in figure 2 (and the same in figure 4 for  $\mu_i^*$ ), that in this time of the simulation the infiltration rate has the highest direct impact on the result, as  $\mu_i$  for that parameter is almost everywhere maximal. The interaction of the infiltration rate represented by  $\sigma_i$  is only at some points in time noticeable.

$\mu_i$  for the window opening varies a lot, both in positive and negative direction, so here it is hard to compare its importance to the other factors. When looking at  $\sigma_i$  and  $\mu_i^*$  of the window opening, at some points in time it is dominant over the other factors, so this parameter has strong interactions with other factors.

The conductivity of the insulation has a  $\mu_i$  value comparable to the  $\mu_i$  values of the U value of the windows and the efficiency factor of the boiler, but  $\sigma_i$  of the conductivity of the insulation is

almost all the time at about 700 kWh whereas  $\sigma_i$  of the U value of windows and  $\sigma_i$  of the efficiency factor of the boiler is below 250 kWh.

In conclusion, beside the obvious strong impact of the infiltration rate, it is hard to see an explicit trend for a parameter importance ranking.

### 3.2.2 Interpretation with moving mean

In figure 6 already a clearer stratification of the values can be seen. This is helpful to identify the infiltration rate as most influential factor. For the efficiency of the boiler, the conductivity of the

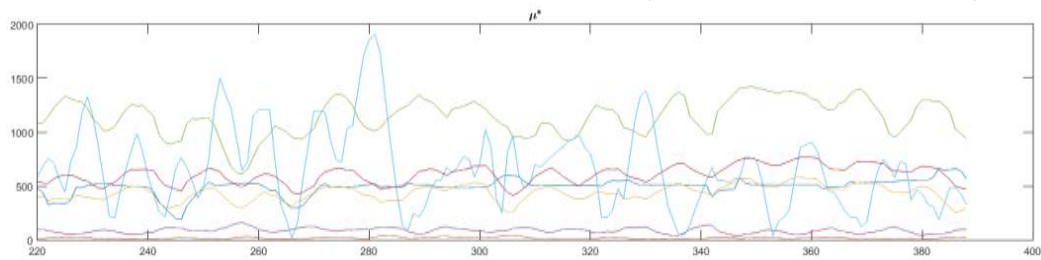


Figure 6: moving mean of  $\mu^*$  with window size of 5 hours (color legend in figure 5)

insulation and the U value the ranking is not yet clear, they are all in the same influence magnitude. The setpoint temperature has small influence, the heat capacity almost none. The influence of the window opening changes from almost none to maximum influence over this week, so here an importance ranking compared to the other factors is not possible.

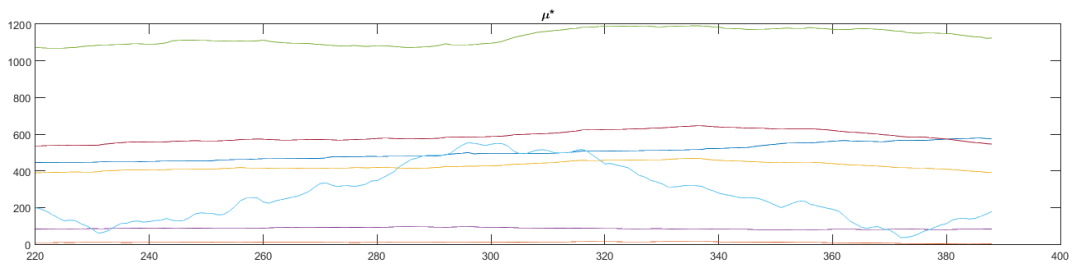


Figure 7: moving mean of  $\mu^*$  with window size of 95 hours (color legend in figure 5)

In figure 7 the stratification becomes obvious, so from that the influence ranking listed in table 1 can be created. Only the window opening parameter is still changing a lot over time, so for such kind of parameter the moving mean method is not helpful in creating an influence ranking.

Therefore usage of the moving mean method helps to get a parameter ranking when the sensitivity indices vary a lot in the hourly examination.

Table 1: influence ranking of parameters when using moving mean window size of 95

Parameter	Rank	Parameter	Rank
Infiltration rate	1	U value of windows	4
Boiler efficiency	2	Setpoint temperatures	5
Conductivity of insulation	3	Heat capacity of walls	6

When analyzing a whole year the moving mean window size of 95 hours is not suitable, the fluctuations are too big to get a parameter ranking. By extending the window size to 719 hours (appr. 30 days), the parameter ranking stratification becomes visible again for the time January to April

and October to December. In the summer months the sensitivities mix up because of the low heating demand.

## **4. Discussion**

### **4.1 Recommendations for data acquisition**

The main result from the sensitivity analysis is that the infiltration rate is the most important factor regarding final energy demand in this model. So in the future, projects dealing with district refurbishments should collect information about the real infiltration occurring in buildings. For new buildings mandatory blower door tests generate that information, which is documented in the energy pass for a building. But there is no central registry collecting the data, so this information is not area-wide available. For the efficiency coefficient of boilers it would be helpful to also have a central registry collecting data for example through the sweep association. Regarding the conductivity of the insulation and the U value of the windows the base information given by the building typology can be used to get uncertainties of model results, but ranges about the domain of these parameters have to be defined using studies about real constructions. For the setpoint temperature studies exist showing how users behave in different situations [13]. For window opening, which have, as we see in the sensitivity calculations, sometimes a high influence on the results, the behaviour is not easy to explain [17]. For other shortterm fluctuating influences like electric device models exist, which could be coupled with the model presented here [18].

### **4.2 Outlook**

This paper used just a small subset of parameters of the model for the sensitivity analysis. In the future more parameters will be added. Optimal would be an analysis of every uncertain factor, but this means thousands of parameters. Computational time is not a real problem nowadays and could be reduced by using parallel computing. But the effort for evaluating the results will increase, especially as more interacting parameters will occur, where the source for interaction has to be found. Additionally the timeframe, in which sensitivities are evaluated, has to be changed from a week to a year. The simulation model already calculates hourly values for the whole year, but the moving mean window size will have to be adapted to that. Other target functions for evaluating the sensitivities will be added, e.g. electricity purchased, electricity sold (due to local electricity generation), CO<sub>2</sub> emissions, costs for fuel and refurbishments, and the ranking considering different target can then be compared.

Therefore additional methods for calculating and evaluating sensitivity indices have to be analysed. One possibility could be to use functional transformation (like Fourier analysis or principal component analysis) to transform the result functions to new coordinates better suited to the given model and then calculating sensitivity indices of these new coordinates. Another idea concerns the window opening parameter defined in 2.5.6, where the point in time of an event has to be considered. For such dynamic effects the method of impulse parametric sensitivity analysis [15] could be useful, which was established in the field of computational systems biology.

## **5. Conclusion**

Using the moving mean method in connection with the Elementary Effects method gives a better understanding for the influence of parameters and its dynamics. Constant parameters like infiltra-

tion rate or U value of windows can be ranked easily. For parameters which define events like a one hour window opening at some time of the day the smoothing method is not very helpful, the dynamics of the overall influence and the interaction effects are still too variable. Here other methods have to be developed.

## 6. References

- [1] MORRIS M.D., "Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments", Technometrics, Vol. 33, No. 2, 1991, pp. 161-174
- [2] SALTELLI A., "Sensitivity Analysis of scientific models", Wiley, 2007, pp. 109-128
- [3] CAMPOLONGO F., SALTELLI A., "Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 57, No. 1, 1997, pp. 49-69
- [4] SALTELLI A., CHAN K., SCOTT E.M., "Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis", Wiley, 2000, pp. 68-72
- [5] LOGA T., STEIN B., DIEFENBACH N., BORN R., „Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden“, IWU, Darmstadt, 2015, ISBN 978-3-941140-47-9
- [6] RICHTER C., „Methodik zur Erstellung von Gebäudesimulationsmodellen aus der TABULA-Gebäudetypologie“, Masterthesis, TUM, 2014
- [7] Bayerische Vermessungsverwaltung, „3D-Gebäudemodell LoD1“, [http://vermessung.bayern.de/geobasis\\_lvq/3DGebaeude/lod1.html](http://vermessung.bayern.de/geobasis_lvq/3DGebaeude/lod1.html)
- [8] DIN V 4108-6:2003-06: „Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs“, 2003
- [9] GEISSLER A., HAUSER G., „Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden“, bau zeitung, Vol. 51, No. 3, 1997, pp. 79-83
- [10] GARD ANALYTICS, <http://www.gard.com/projects/energyplus-test-dev/>, accessed on 14.10.2015
- [11] LBNL, "Input Output Reference, EnergyPlus Version 8.3", 2015
- [12] NEMETH I., SCHINABECK J., GEBHARD V.-K., THIELEN, K., MICHAELIE M., LANG W., „Stadtlabor Nürnberger Weststadt“, TU München, 2013
- [13] PEFFER T., PRITONI M., MEIER A., ARAGON C., PERRY D., "How people use thermostats in homes: A review", Building and Environment, Vol. 46, No. 12, 2011, pp. 2529-2541
- [14] LOONEN R.C.G.M., HENSEN J.L.M., "Dynamic sensitivity analysis for performance-based building design and operation", Proceedings of BS2013, 2013, pp. 299-305
- [15] PERUMAL T.M., GUNAWAN R., "Impulse Parametric Sensitivity Analysis", Preprints of the 18th IFAC, 2011, pp. 9686-9690
- [16] NEMETH I., "Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor", Dissertation, TUM, 2011
- [17] FABI V., ANDERSON R.V., CORGNATI S., OLESEN B.W., "Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models", Building and Environment, Vol. 58, 2012, pp. 188-198
- [18] JAMBAGI A., KRAMER M., CHENG V., "Modelling residential electricity demand at high temporal and spatial resolution", MSE Colloquium 2014: Energy in Motion, Munich, 3rd July 2014

# GLOBAL IMPULSE SENSITIVITY ANALYSIS FOR BUILDING ENERGY SIMULATION OF RESIDENTIAL QUARTERS

Manuel Lindauer<sup>a</sup>

<sup>a</sup> TU München, Germany, manuel.lindauer@tum.de

---

## Abstract

This paper presents the transfer of a dynamic sensitivity analysis approach to evaluate the influence of parameters, which change at different points in time, e.g. time of set point changes of the heating system, to the field of building energy simulation. This approach is demonstrated on a model of an urban quarter, which uses EnergyPlus to simulate 25 residential buildings. The information for creating the building models stems from statistical, GIS and building typology data. For the majority of model parameters no data is available, especially for user behavior parameters like window opening. Therefore assessing the influence of these parameters is crucial in order to give recommendations, what data should be acquired in future projects to have the possibility to create reliable models for refurbishment scenarios of urban residential quarters.

**Keywords:** *renewable energy supply, building energy simulation, dynamic sensitivity analysis*

---

## 1 Introduction

Renewable decentralized energy supply of buildings will become more and more important and due to its fluctuation the focus of energy demand and supply calculations have to change from monthly or yearly cumulative examination to detailed hourly examination using transient simulation tools. Additionally existing buildings offer a huge range of possible refurbishment measures. Effects of these measures have to be considered in detailed examination to select the best option regarding all relevant target functions like peak power or self-sufficiency for electricity. Especially when looking at quarters consisting of multiple different buildings there is a huge range of possible measures which could be applied in the future.

Transient building energy simulation (BES) models of residential quarters have many parameters (> 100 per building). Data about the building envelope (like geometry via GIS [2], constructions via building typology [4]), or annual energy demand [4] is available. But data availability about the heating systems, local power generation or user behavior is insufficient. Therefore for modelling the buildings in detail, that means with hourly results, considering interactions between building technology and renewable energy sources and their fluctuations, recommendations for data to be collected in the future have to be derived by analyzing the influence of different parameters on the model using sensitivity analysis..

## 2 Methodology

A method for using the global sensitivity analysis method of Elementary Effects (EE) to assess dynamic effects of residential buildings' energy behavior in a simulation model of a residential quarter is presented. In this approach sensitivity indices for every single hour of the year are calculated. The distinction to classical sensitivity analysis is that the parameters under consideration can change over time, and this point of time is evaluated by the sensitivity analysis. The basic idea for this method was originally developed for the field of computational systems biology. This method can also be applied to other sensitivity analysis methods in a corresponding way, EE was chosen due to its relative low calculation effort.

### 2.1 Impulse Parametric Sensitivity Analysis

#### 2.1.1 Overview

The method of impulse parametric sensitivity analysis (iPSA) was first introduced in [5] and [6] for the field of computational systems biology. There it is used for identifying the dynamic influence of parameters, which are not assumed constant over time, but can change at some point in time. Especially the point in time can have a major influence on the resulting sensitivity of a parameter. iPSA is defined for a dynamic system given by an ordinary differential equation model:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t, p)}{dt} &= f(x, p) \\ x(t_0, p) &= x_0 \end{aligned} \quad (1)$$

In this case, the impulse sensitivity coefficient  $iS_{i,j}(t, \tau)$  can be explicitly defined and it reflects the change in the  $i$ th state at time  $t$  due to an impulse perturbation of the  $j$ th parameter at time  $\tau$ . [5]

#### 2.1.2 Transfer to building energy simulation

For a detailed BES it is impossible to give a differential equation model which could be used to calculate directly an impulse sensitivity coefficient  $iS$ . But the basic iPSA idea of changing a parameter at different simulation times and calculating the sensitivity index in dependence of the simulation time and the perturbation time of parameters can be transferred to BES. Such a type of parameter will be called impulse parameter.

Usually in BES schedules are used to model e.g. set points for the heating system or user behavior like tap water usage or the opening of windows. These schedules assign to every simulation time a value for some variable which is then used in the calculation. So it is assumed that these points in time, at which a change of such a variable takes place, are fixed and therefore can't be analyzed using classical sensitivity analysis methods. This is overcome by changing parameters (using FMI, see 2.3.3) at different points in time, calculating sensitivity indices for every time step of the simulation and then evaluating the sensitivity indices.

## 2.2 Elementary Effects

The Elementary Effects Method was developed in 1991 by Morris [1]. The aim of this type of sensitivity analysis is to identify parameters which are a) negligible, b) linear and additive, or

c) nonlinear or involved in interactions with other factors. For a detailed definition and possible interpretations of the results see [2].

### 2.2.1 Overview

EE is a sensitivity analysis method which uses as sampling strategy different trajectories of a discretized input space to vary every parameter. Every input can take  $p$  levels. The resulting sensitivity index  $\mu$  shows the overall influence of a parameter on the output, while  $\sigma$  assesses the ensemble effect (nonlinear and/or due to interactions). Usage of  $\mu^*$ , which is defined as the mean of the distribution of the absolute values of the elementary effects and therefore helps to minimize cancelling effects, is recommended. [2]

The computational cost of the calculation of the elementary effects sensitivity index is  $(k + 1) \cdot r$  runs of the model, where  $k$  is the number of parameters and  $r$  is the number of trajectories.

Recommendations to get valuable results are  $p = 4$  parameter levels and  $r = 10$  trajectories [7][8]. The results in chapter 3 were calculated with these values. When looking at parameters like the time of a window opening, which can start in reality at every minute, then the 4 levels for this parameter seem to be too small, because this results in only 4 window opening time slots realized in the simulation model. So the influence of the number of levels on event parameters has to be further investigated in the future.

### 2.2.2 Justification for using elementary effects

The EE method was chosen because of its low computational effort and the simple possibility to use grouping. Grouping is not used here, but it is helpful in the context of the residential building quarter to model, where a lot of independent parameters exist and will have to be evaluated in the sensitivity analysis.

In addition, due to the definition of  $\mu$ ,  $\sigma$  and  $\mu^*$ , which are averaged over multiple local sensitivity measures to remove the dependence on the sample point, it is better than ordinary one-at-a-time sensitivity analysis methods regarding the exploration of the input space.

EE is quite robust regarding unstable models, i.e. if one model run for a chosen trajectory fails, this trajectory can be left out and another one can be chosen. This is especially helpful when analyzing all parameters of a residential quarter which means a number of parameters in a magnitude of thousands, where not all combinations can be checked for stability before the sensitivity calculation. [2]

One downside of EE is that no quantitative analysis on the variance of the influence of a factor and the individual interactions between factors is possible. A variance based sensitivity analysis will be the next step when the number of factors can be reduced to the set of most important ones. Then also the individual interactions between factors can be assessed, what is not possible using EE. [8]

But for identifying the most important factors the EE method is a good compromise between calculation effort, interpretability and valuable results.

## 2.3 Model of residential quarter

### 2.3.1 Description of the case study building block

The building block used as case study here consists of 25 buildings, which were constructed between 1918 and 1978. Therefore the building types DE.N.MFH.03.Gen to DE.N.MFH.06.Gen from the TABULA Building Typology [4] were taken as base

information. The geometry of the buildings was taken from GIS LoD1 data available at [3]. The overall heated area of the 25 buildings in the quarter is 10426 m<sup>2</sup> with 183 residential units. Heating in the block is provided by district heating (30% of heated area), gas (30% of heated area), oil (15% of heated area) and others (coal, solarthermal). Only district heating, gas and oil systems are modelled here, solar thermal heating will be implemented into the model in the future. Climate data generated by Meteonorm for the city of Nuremberg was used for all simulations.

### **2.3.2 Energy simulation**

The energy simulation is conducted using EnergyPlus models, which are parametrized using the data available in the building block. The models used here were created in [9] using information of the German part of the TABULA building typology [4]

### **2.3.3 FMI integration in the model**

The Functional Mockup Interface (FMI) was integrated into the model to have the possibility to change schedules according to the parameter sampling of the sensitivity analysis. This is realized by the tool EnergyPlusToFMU [14] and the Modelon FMI Toolbox for Matlab® [15].

### **2.3.4 Refurbishment activities**

The method for representing refurbishment activities in the buildings was developed in [10] and uses normal distributions of the lifetimes of walls, windows, roof constructions and heating systems to model years in the building lifetime, when refurbishment measures can be conducted. Probabilities are used to decide whether an energy improvement by insulation for the walls and the roof, better U-value for the windows or change of the heating system takes place in such a refurbishment. The probabilities change over the years to incorporate for increased energy refurbishment activities.

In this paper no projections into the future are considered. Therefore only refurbishments which were performed in the past are used to approximate the state of the building stock in the year 2015.

## **2.4 Model parameters for sensitivity analysis**

For presenting the impulse sensitivity analysis method a subset of parameters was chosen. The overall number of parameters of the model is too big for covering the sensitivities of all of them in this paper.

These chosen parameters are changed for all buildings simultaneously. This is not a realistic behavior, but was necessary for reducing the calculation effort for the simulation runs. In the future, every single building should have its own sample of parameters.

### **2.4.1 Infiltration rate (constant)**

This parameter defines how much air changes in the heated zone of the building due to infiltration. In the German standard [11], a value of 0.7/h is assumed. But older buildings tend to have much higher infiltration rates [12], so the influence of this parameter will be assessed for values between 0.2 and 2.0 1/h.

This parameter is constant over time, so it does not define an event like the other two parameters defined in the following sections. But in [13] the infiltration rate was evaluated as



the most influential parameter using a pure sequential sensitivity analysis method, so it is considered here as a reference parameter.

#### 2.4.2 Time of window opening

This parameter defines a one hour opening of the windows in a building at a random time between 7 and 19 o'clock every day, resulting in an increase of infiltration rate by 2/h. This value is just an example for demonstration and should be changed to more realistic and better validated values in the future, e.g. with results of [16]. The time of the start of the opening changes for the sensitivity analysis and the influence of that point in time will be analyzed.

#### 2.4.3 Time of night setback

The set point temperature for the heating system is set to 20 °C during day and 16 °C during night. The time of the set point change varies between 5 and 7 in the morning resp. 19 and 21 in the evening and its influence will be analyzed.

### 3 Results

#### 3.1 Impact on annual and maximal peak final energy demand

In table 1 the values for  $\mu$ ,  $\sigma$  and  $\mu^*$  for the varied parameters are listed. This indicates that the infiltration rate is the most influential parameter, but the interaction influence indicated by  $\sigma$  of the window opening time and set point change time is in the same magnitude as for the infiltration rate. In table 2 the EE results were calculated for the maximal peak of the final energy demand as target function. Here the interaction influence is even higher for the impulse parameters compared to the infiltration rate. So when interested in peak power results the time parameters have to be known in order to get reliable results.

*Tab. 1 EE results with target function annual final energy demand*

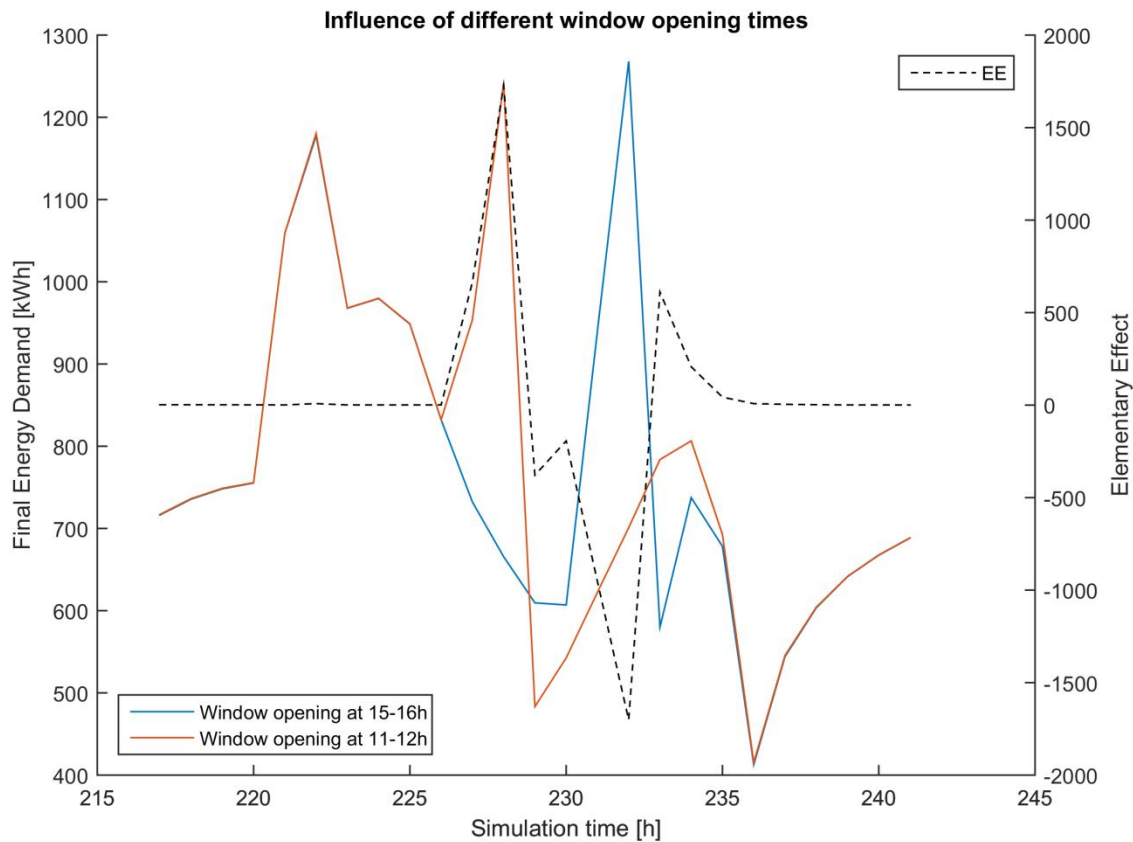
Parameter	$\mu$	$\sigma$	$\mu^*$
Infiltration rate	3029600	78918	3029600
Window opening time	-4683	52159	47886
Set point change time	-29412	30108	32864

*Tab. 2 EE results with target function max. peak final energy demand*

Parameter	$\mu$	$\sigma$	$\mu^*$
Infiltration rate	1308	47	1308
Window opening time	-96	153	98
Set point change time	37	215	162

#### 3.2 Dynamic EE sensitivity indices of hourly final energy demand

In figure 1 the final energy demand for the simulation day January 10<sup>th</sup> (corresponding to simulation time 217 h to 241h) is shown on the left axis for two different window opening times.

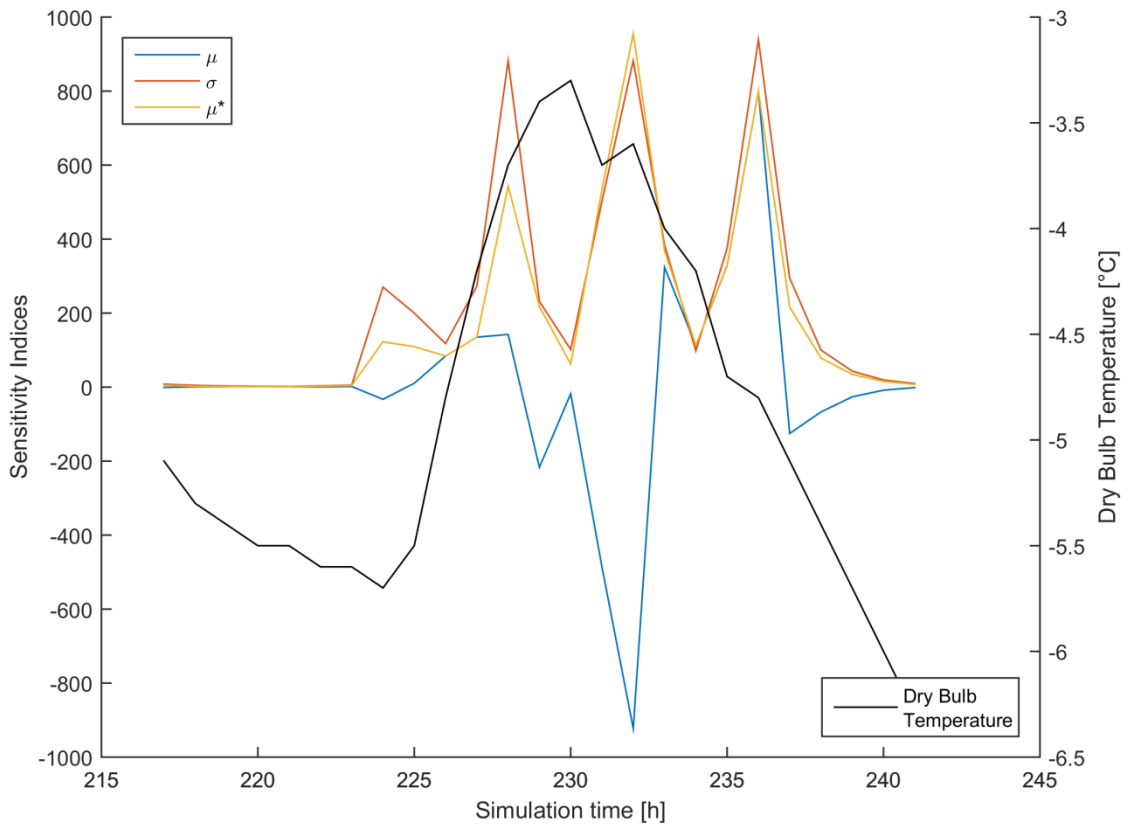


**Fig. 1** Influence of different window opening times on final energy demand (left axis) and resulting elementary effect (right axis)

The resulting elementary effect calculated for these two trajectory points is shown in figure 1 with respect to the right axis. Here the typical form of the elementary effect for such an impulse parameter can be seen, which is a positive peak followed by a negative peak (or vice versa, depending on the order of trajectory points).

The resulting sensitivity indices  $\mu$ ,  $\sigma$  and  $\mu^*$  calculated from all trajectories are shown in figure 2. Here the correlation of the temperature with the window opening time can be seen. When the temperature rises during the day (simulation hours 227 to 233 resp. 11 o'clock until 17 o'clock daytime), the value of  $\mu$  is negative, meaning that compared to the other opening times here an opening of windows results in less final energy demand than the other possible times.

For the influence of the set point change time the sensitivity indices have a positive peak followed by a negative peak (or vice versa) in the morning, and in the evening a negative peak followed by a positive peak (or vice versa). This is because compared to the window opening not only one hour of the simulation is influenced by the set point time change. It influences the behavior in the morning, when the set point temperature is set to its day value, and then 14 hours later again in the evening when the set point temperature changes to its setback night value. Thus it is necessary to compare the peaks in the morning and the evening in order to get insights on which time is preferable for the set point change time.



*Fig. 2 Sensitivity indices for window opening time*

#### 4 Discussion, Conclusion & Outlook

As shown in chapter 3 impulse parameters have an influence on the energy demand calculation. Compared to the influence of the constant infiltration rate, the influence is rather small regarding summed final energy demand, but regarding the peak final energy demand the influence increases.

The EE sensitivity indices have a typical form for both short impulse parameters (window opening time) and long impulse parameters (set point temperature time changes), which will be used in the future for defining a more specific sensitivity index like the value  $iS_{i,j}(t, \tau)$  in iPSA. The number of levels used for creating the point in time samples will have to be evaluated and probably increased, resulting in increased calculation effort.

Prospectively, when more impulse parameters will be considered and the boundary values for them will be validated, the influences can be ranked and recommendations for the acquisition of the most important information for modeling of the energy behavior of buildings in a quarter can be derived. For that it will be necessary to look at the distribution of the sensitivity indices over all days of a year, not only at a single day. This could be established using functional transformation methods like principal component analysis to reduce the dimension of result data to be evaluated.

## References

- [1] MORRIS M.D. *Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments*, Technometrics, Vol. 33, No. 2, 1991, pp. 161-174
- [2] SALTELLI A. *Sensitivity Analysis of scientific models*, Wiley, 2007, pp. 109-128
- [3] Bayerische Vermessungsverwaltung *3D-Gebäudemodell LoD1* [online], WWW: [http://vermessung.bayern.de/geobasis\\_lvg/3DGebaeude/lod1.html](http://vermessung.bayern.de/geobasis_lvg/3DGebaeude/lod1.html)
- [4] LOGA T., STEIN B., DIEFENBACH N., BORN R. *Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, IWU, Darmstadt, 2015, ISBN 978-3-941140-47-9
- [5] PERUMAL T.M., GUNAWAN R. *Impulse Parametric Sensitivity Analysis*, Preprints of the 18th IFAC, 2011, pp. 9686-9690
- [6] PERUMAL T.M., GUNAWAN R. *Understanding dynamics using sensitivity analysis: caveat and solution*, BMC systems biology, Vol. 5, 2011, pp. 41-50
- [7] CAMPOLONGO F., SALTELLI A. *Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods*, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 57, No. 1, 1997, pp. 49-69
- [8] SALTELLI A., CHAN K., SCOTT E.M. *Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis*, Wiley, 2000, pp. 68-72
- [9] RICHTER C. *Methodik zur Erstellung von Gebäudesimulationsmodellen aus der TABULA-Gebäudetypologie*, Masterthesis, TU München, 2014
- [10] NEMETH I. *Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor*, Dissertation, TU München, 2011
- [11] *DIN V 4108-6:2003-06 Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs*, 2003
- [12] GEISSLER A., HAUSER G. *Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden*, bau zeitung, Vol. 51, No. 3, 1997, pp. 79-83
- [13] LINDAUER M. *Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters*, SBE16, to be published
- [14] LBNL *EnergyPlus to FMU* [online]  
WWW: <http://simulationresearch.lbl.gov/fmu/EnergyPlus/export/index.html>
- [15] Modelon FMI Toolbox for MATLAB® [online]  
WWW: <http://www.modelon.com/products/fmi-toolbox-for-matlab/>
- [16] SHERMAN M. H. *Air change rate and airtightness in buildings*, STP, Vol. 1067, ASTM, Philadelphia, ISBN 0-8031-1451-6

# FMI-KOPPLUNG VON ENERGYPLUS MIT MATLAB ZUR ABBILDUNG VON INTERAKTIONEN IM DISTRIKT-MODELL EMMI-TRANSIENT

M. Lindauer<sup>1</sup>, K. Sedlbauer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Sustainable Building, TU München, München, Germany

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Bauphysik, TU München, München, Germany

## KURZFASSUNG

In dem Energiebedarfsberechnungs-Werkzeug EmMi-transient, welches den Energiebedarf in einem Quartier mittels transienten Gebäudesimulationen berechnet und dabei vergangene und zukünftige Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt, wurde zur Abbildung von Interaktionen zwischen Gebäuden eine FMI Schnittstelle implementiert.

Dies ermöglicht die Untersuchung der Nutzungsmöglichkeit von lokal erzeugtem PV-Strom innerhalb des Quartiers und damit verbundene Demand Side Management Maßnahmen wie Lastverschiebung durch Verwendung der Masse der Gebäude als thermische Speicher.

Konkret wird ein Szenario zur Erhöhung der Raum-Solltemperatur mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen bei einem Überschuss an PV-Strom untersucht. In diesem Szenario ergibt sich eine Erhöhung des Eigenstromnutzungsanteil des lokal erzeugten Stroms von 7% durch die Lastverschiebungen.

## ABSTRACT

In EmMi-transient, a tool for calculating energy demands in neighborhoods using transient building energy simulation and considering past and future refurbishment measures, FMI for modelling interactions between single buildings was implemented.

This enables the analysis of potential utilization of locally produced electricity in the neighborhood. It also enables the analysis of demand side management measures like load shift for using the building mass for thermal storage.

A scenario for increasing the indoor set point temperature of buildings heated by electrical heat pumps when there is a surplus of PV electricity in the neighborhood is defined and analysed. By using such a load shift, an increase of the share of self-used electricity in the neighborhood by 7% can be demonstrated.

## EINLEITUNG

Der Fokus für die Untersuchung zukunftsfähiger, effizienter Sanierungsmaßnahmen verschiebt sich langsam vom Einzelgebäude hin zu quartiersweiten

Betrachtungen, etwa im KfW Förderprogramm „Energetische Stadtsanierung“ (Programmnummer 432). Insbesondere bei der Verwendung dezentraler Energieversorgungssysteme können gebäudeübergreifende Lösungen zu höheren Ausnutzungsgraden und damit höherer Wirtschaftlichkeit führen und somit die Ziele der Energiewende leichter erreichbar machen.

Zur Ermittlung der Potentiale unterschiedlicher Maßnahmen ist die Verwendung von angepassten, dynamisch rechnenden Simulations-Werkzeugen unumgänglich, da durch die vielfältigen Wechselwirkungen und zeitlichen Fluktuationen jahres- oder monatsbasierte Berechnungsverfahren an ihre Grenzen stoßen.

Daher wird in dieser Arbeit eine Implementierung des Functional Mockup Interface (FMI) in das bestehende Tool EmMi-transient beschrieben, um die Kopplung detaillierter Gebäudemodelle untereinander und mit Modellen für Strom- und Wärmenetze innerhalb eines Quartiers zu ermöglichen.

## MODELL EMMI-TRANSIENT

Das Tool „EnergieModellierung Multiskalar“, kurz EmMi, entstand im Rahmen folgender Projekte: In (Nemeth et al. 2012a) wurde mittels des Heizperiodenbilanzverfahrens der Energiebedarf aller Wohngebäude in Bayern unter Berücksichtigung diverser Sanierungsszenarien untersucht. In (Nemeth et al. 2012b) wurden für einen Stadtteil mit ca. 1000 Wohngebäuden mittels des Monatsbilanzverfahren und unter Verwendung von GIS Daten (Nemeth et al. 2013) Vorhersagen über den Energiebedarf der Gebäude in diesem Stadtteil erarbeitet. Um genauere Aussagen zum zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs sowie zu den Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energieerzeugung im Gebäude zu untersuchen, wurde das Tool um die Möglichkeit erweitert, den Energiebedarf im Quartier mittels transienter Gebäudesimulation zu ermitteln (Lindauer & Nemeth 2014). Hierzu werden in MATLAB® gesammelte und aufbereitete Daten zur Erzeugung von EnergyPlus-Modellen für jedes Gebäude des Quartiers genutzt.

Jedes dieser Gebäudemodelle wird mit mehr als 80 Werten parametrisiert, entsprechend viele

Eingabeinformationen benötigt EmMi-transient zur Abbildung eines Quartiers. Daher wird EmMi-transient in (Lindauer 2016a, b in Druck) und weiteren Untersuchungen diversen Sensitivitätsanalysen unterzogen, um die Größenordnungen der Einflüsse der Parameter zu ermitteln. Dies soll es für zukünftige Anwendungen ermöglichen, Daten zu den hieraus ermittelten wichtigsten Parametern zu sammeln und damit valide Vorhersagen über mögliche Sanierungspotentiale zu ermöglichen.

### **Datenbasis**

Als Datenbasis für EmMi-transient werden Level of Detail 1 GIS-Daten zur Ermittlung der Gebäudegeometrien eingesetzt. Diese werden in Deutschland flächendeckend durch die Landesvermessungsämter zur Verfügung gestellt, z.B. für Bayern durch (Bayerische Vermessungsverwaltung 2016). Zusätzlich werden statistische Daten zu Baualter und Gebäudetyp, d.h. Ein-, Zwei- oder Mehrfamilienhaus, verwendet. Diese wurden im Falle der betrachteten Gebäude der Nürnberger Weststadt durch die Stadt Nürnberg aggregiert für das Quartier zur Verfügung gestellt. Mittels der Angaben zu Baualtersklasse und Gebäudetyp werden aus der TABULA Gebäudetypologie Informationen über die Gebäudehülle und verwendete Anlagentechnik ermittelt.

Zur Ermittlung der für die Beheizung verwendeten Energieträger stehen nur statistische Daten für die gesamte Stadt Nürnberg zur Verfügung (Statistisches Bundesamt, 1987), welche auf das betrachtete Quartier herunterskaliert werden müssen. Zusätzlich ist bekannt, dass das Gebiet an das Fernwärmenetz der Stadt angebunden ist.

Die Klimadaten für die Simulation wurden mittels Meteonorm für den Standort Nürnberg generiert.

### **Modellierung der Gebäudehülle**

Die Gebäude werden als 1 bis 3 Zonen Modell abgebildet, je nachdem ob Keller und Dachraum vorhanden sind. Die Vollgeschosszone wird immer beheizt, Keller- und Dachzone werden als unbeheizt angenommen. Die Geometrie für Außenwände, Decken und Böden werden aus GIS-Informationen automatisch erstellt, das Dach wird mittels des Algorithmus aus (Laycock & Day 2003) erstellt. Die Anbausituation des Gebäudes wird aus den GIS-Daten ermittelt und zur Erzeugung adiabater Wände sowie zur Verteilung der Fensterfläche auf die Wände berücksichtigt. Die Fenster der Vollgeschosszone werden anteilig auf jeder freien Wand modelliert. Die Konstruktionen der Bauteile werden entsprechend des Gebäudetyps und der Baualtersklasse aus (Loga et al 2015) ermittelt. Verschattung durch die anderen Gebäude des Quartiers und Nachbargebäude in unmittelbarer Umgebung des Quartiers wird durch Abbildung der Wände der Nachbargebäude als Verschattungsflächen berücksichtigt.

### **Modellierung der Anlagentechnik**

Die modellierte Anlagentechnik orientiert sich an den in TABULA abgebildeten Systemen. Es sind derzeit Öl- und Gaskessel, Fernwärmeübergabestation, Solarthermie und Luft-Wasser-Wärmepumpe als typische Systeme vorhanden. Die Vorlagen hierfür wurden in (Richter, 2014) erstellt. Die Raum-Solltemperatur ist standardmäßig auf 21 °C eingestellt.

Eine Solarthermieanlage wird zur Unterstützung der Trinkwarmwassererzeugung genutzt. Durch die Art der Abbildung der Solarthermie über einen Wärmetauscher im Trinkwasserrücklauf wird allerdings die vom Haupt-Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizenergie in geringem Maße reduziert.

Das Zapfprofil für den Trinkwarmwasserbedarf wird mittels des Programms DHWCalc (Vajen & Jordan, 2003) erzeugt.

Lüftungsanlagen werden nicht abgebildet, da diese in Bestands-Wohngebäuden in Deutschland keine relevante Verbreitung haben (Loga et al. 2015).

### **Modellierung Strombedarf und -erzeugung**

Der stündlich aufgelöste Haushaltsstrombedarf der Gebäude wird über das Standardlastprofil H0 des BDEW abgebildet. Dafür wurden Daten aus (Schlöbl et al. 2010) für die Annahmen an Haushaltsgrößen verwendet und daraus die jährlichen Strombedarfsdaten abgeleitet, mit denen das Lastprofil multipliziert wird.

Die PV-Anlagen werden auf allen Dachflächen, vorerst ohne Berücksichtigung der Orientierung, vorgesehen. Die aktive PV-Modul-Fläche ist auf 80% mit einem Modul-Wirkungsgrad von 15% festgelegt.

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Stromlast des Quartiers, sondern auf den Möglichkeiten, die sich durch Demand Side Management von Wärmepumpen in Verbindung mit PV-Anlagen ergeben, liegt, werden die verwendeten Werte als beispielhafte Annahmen gesehen, die zukünftig genauer ermittelt werden müssen.

### **Modellierung der Sanierungen**

Um den aktuellen und ggf. zukünftigen Sanierungsstand der Gebäude zu ermitteln wurde in (Nemeth 2011) eine Methodik zur Berechnung von möglichen Sanierungszeitpunkten und damit verbundenen Verbesserungen an den Bauteilen erarbeitet. Diese ist auf Grund ihrer stochastischen Vorgehensweise vor allem für eine große Anzahl von Gebäuden geeignet, wie es in den Projekten aus denen EmMi entstand der Fall ist. Bei der im folgenden gezeigten Untersuchung eines Quartiers spielt der konkrete Zeitpunkt einer Sanierung eines Gebäudes und die durchgeführte Maßnahme eine große Rolle, statistische Verteilungen können hier zu großen Abweichungen führen. Da keine Daten über die Sanierungsstände der Gebäude in dem Quartier

verfügbar sind, wurden die Gebäudehüllen als unsaniert angenommen. Die szenarischen Betrachtungen zum Einsatz von Wärmepumpen werden im Abschnitt der betrachteten Interaktionen beschrieben.

### Untersuchtes Quartier

Das als Fallbeispiel untersuchte Gebäudequartier besteht aus 25 Wohngebäuden mit bis zu fünf Stockwerken. In Abbildung 1 sind die Gebäude als Quader, welche aus den GIS-Daten erzeugt wurden, dargestellt. Es handelt sich um eine Blockrandbebauung der Baualtersklassen 1918 und 1948, mit neueren Gebäuden der Baualtersklasse 1968 im Innenhof. Die Gebäude haben Steildächer und besitzen eine beheizte Fläche von 10426 m<sup>2</sup>.

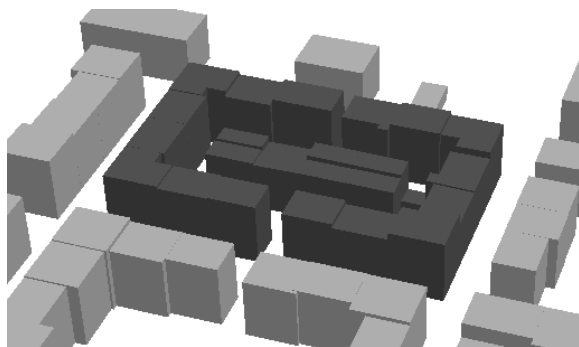


Abbildung 1: LoDI Daten des untersuchten Gebäudequartiers (dunkel) mit Nachbargebäuden (hell) für Verschattung

## FUNCTIONAL MOCKUP INTERFACE

### Grundlagen

Das Functional Mockup Interface (FMI) für Co-Simulation in der verwendeten Version 1.0 (Modelisar, 2010) ermöglicht die Kopplung von zwei oder mehr Simulationsmodellen mit Fokus auf instationären, d.h. zeit-abhängigen Fragestellungen. Der Austausch von Informationen zwischen den Modellen erfolgt dabei zu diskreten Kommunikationszeitpunkten, zwischen diesen Zeitpunkten laufen die Simulationen unabhängig voneinander. FMI für Co-Simulation unterscheidet zwischen Tool-Kopplung, bei dem nur das jeweilige Modell exportiert wird, und Kopplung von Subsystem Modellen, bei dem das Modell inklusive dem entsprechenden Lösungsalgorithmus als ausführbarer Code exportiert wird. Die exportierten Einheiten werden als Functional Mockup Unit, kurz FMU, bezeichnet.

### Implementierung in EmMi-transient

In EmMi-transient wird FMI zur Kopplung von MATLAB® mit EnergyPlus eingesetzt. Hierfür wird das Tool EnergyPlusToFMU in Version 1.0.5 (Nouidoui et al. 2015) genutzt, welches den Export eines entsprechend angepassten EnergyPlus-Modells in eine FMU gemäß FMI Co-Simulation Standard 1.0 ermöglicht. In MATLAB®, welches als Master

fungiert, erfolgt der Import über die Modelon FMI Toolbox für Matlab (Modelon 2015).

Dies ermöglicht eine Kommunikation zwischen MATLAB® und den EnergyPlus-Modellen in jedem der Simulationsschritte. Als Simulations-Schrittweite werden in EnergyPlus 10 Minuten verwendet. Die Ergebnisse der Modelle werden stundenweise summiert.

Die per FMI zu beeinflussenden Parameter werden in EnergyPlus mittels des Modells ExternalInterface:FunctionalMockupUnitExport:To:Schedule abgebildet und die per FMI auszulesenden Daten werden mittels des Modells ExternalInterface:FunctionalMockupUnitExport:From:Variable definiert.

## MODELLIERTE INTERAKTIONEN

Durch wechselseitige Beeinflussung und Symbiose von Gebäuden innerhalb eines Quartiers werden vielfältige Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz ermöglicht. In der Praxis sind bisher hauptsächlich Nahwärmenetze relevant, die einen gemeinsamen Wärmeerzeuger wie ein BHKW nutzen. Durch die Verbindung von Verbrauchern wird häufig erst eine Leistungsschwelle, die zum wirtschaftlichen Betrieb notwendig ist, überschritten (Böhnisch et al. 2001). Bei der Verwendung von lokal erzeugtem Strom innerhalb eines Quartiers müssen neben der technischen Umsetzbarkeit auch rechtliche und abrechnungstechnische Herausforderungen berücksichtigt werden (Bolay & Mayer 2015).

In EmMi-transient wird daher zur Potentialermittlung innerhalb eines Quartiers die Möglichkeit für elektrische und thermische Interaktionen zwischen den Gebäudemodellen mittels FMI geschaffen. Beispielhaft wird in dieser Arbeit ein mögliches Szenario abgebildet, welches in ähnlicher Form zukünftig vermehrt in der Realität zum Einsatz kommen kann. Das Szenario ist dabei als Proof-of-Concept für die Fähigkeiten von EmMi-transient zu verstehen, an den Parametern und der Umsetzung der Modellierung muss zukünftig weiter gearbeitet werden, um diese realitätsnäher zu gestalten.

### Kombination PV und Wärmepumpen

Bei dieser Demand Side Management (DSM) Maßnahme wird darauf abgezielt, den durch auf den Gebäuden installierten PV-Anlagen erzeugten Strom mittels der im Quartier installierten elektrisch betriebenen Luft-Wasser-Wärmepumpen zu verbrauchen und somit den übers Jahr summierten Eigenstromnutzungsanteil

$$ENA = \frac{Q_{Produziert} - Q_{Eingespeist}}{Q_{Produziert}} = 1 - \frac{Q_{Eingespeist}}{Q_{Produziert}} \quad (1)$$

des im Quartier erzeugten Stroms zu erhöhen. Anders ausgedrückt soll die überschüssige elektrische Energie, die ins allgemeine Stromnetz eingespeist würde, minimiert werden. Hierdurch kann die starke Beanspruchung des allgemeinen Stromnetzes,

insbesondere durch das bei PV-Anlagen mittags auftretende Einspeisemaximum, reduziert werden.

Um dies in EmMi-transient abzubilden wird die überschüssige, d.h. nicht im jeweiligen Einzelgebäude selbst verbrauchte elektrische Energie per FMI ausgelesen und quartiersweit in jedem Zeitschritt summiert. Ein Teil dieser überschüssigen Energie würde in der Realität für den Haushalts-Strombedarf anderer Gebäude verbraucht, dies wird derzeit nicht bilanziert.

Um die Eigenstromnutzung zu erhöhen wird bei Überschreitung des Werts der im gesamten Quartier eingespeisten elektrischen Energie in einem Zeitschritt um einen Wert von 5 kWh ein Signal per FMI an die per Wärmepumpen beheizten Gebäude gesendet, so dass im nächsten Simulations-Zeitschritt in diesen die Solltemperatur für die beheizte Zone um 1 K erhöht wird. Die Erhöhung ist bis maximal 25 °C möglich. Unterschreitet die eingespeiste elektrische Energie einen Wert von 3 kWh, so wird die Solltemperatur in 1 K Schritten pro Zeitschritt wieder bis auf 21 °C abgesenkt.

Aufgrund des Augenmerks auf das energetische Verhalten und Modellierung der Vollgeschosse als eine thermische Zone wird der thermische Komfort und dessen Veränderung bei der Solltemperaturerhöhung derzeit nicht berücksichtigt, da kleine Änderungen um bis zu 0,5 K gar nicht, bis 2 K durch den Nutzer kaum wahrnehmbar sind (Riediger et al. 2016).

## ERGEBNISSE

In Tabelle 1 sind die simulierten Szenarien beschrieben, deren Ergebnisse im Folgenden verglichen werden. Für die Jahres-Verläufe wird zur besseren Darstellung ein gleitender Mittelwert über 7 Tage verwendet.

Tabelle 1: Simulierte Szenarien

SZENARIO	BESCHREIBUNG
GAS	Beheizung aller Gebäude mit Gas-Kesseln
GAS+ST	Beheizung aller Gebäude mit Gas-Kesseln, Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitung durch Solarthermie
GAS+PV	Beheizung aller Gebäude mit Gas-Kesseln, Einsatz von PV auf allen Dachflächen
WP+PV	Beheizung aller Gebäude mit Luft-Wasser-Wärmepumpen, Einsatz von PV auf allen Dachflächen
WP+PV+DSM	Beheizung aller Gebäude mit Luft-Wasser-Wärmepumpen, Einsatz von PV auf allen Dachflächen, Einsatz von Demand Side Management zur Veränderung der Raum-Solltemperatur

Der in Abbildung 2 dargestellte Vergleich zwischen den Szenarien GAS, GAS+ST und WP+PV zeigt, dass durch die Solarthermie-Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitung bei gas-gefeuerter Beheizung des Quartiers eine Endenergieeinsparung von ca. 15% möglich ist. Durch Einsatz von Wärmepumpen mit ihrer hohen Jahresarbeitszahl lässt sich eine Endenergieeinsparung um 82% im Vergleich zum Szenario GAS erreichen.

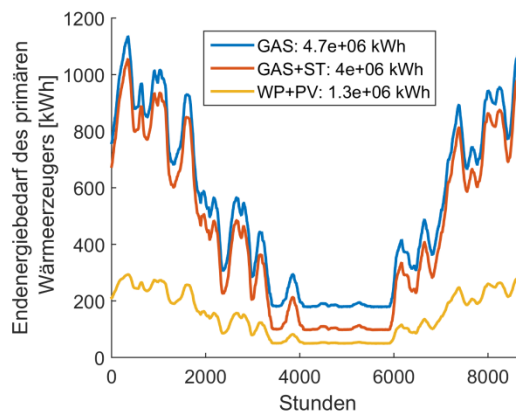


Abbildung 2: Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers ohne Betrachtung der DSM-Maßnahme

Der in den PV-Anlagen produzierte und im jeweiligen Szenario in den Gebäuden verbrauchte Strom wird in Abbildung 3 gezeigt. Hier zeigt sich, dass durch den Einsatz von elektrisch betriebenen Wärmepumpen bereits eine Steigerung der Eigenstromnutzung um 50% gegenüber GAS+PV ermöglicht wird. Im Vergleich zwischen WP+PV und WP+PV+DSM zeigt sich, dass die Eigenstromnutzung durch die Veränderung der Raum-Solltemperatur bei PV-Stromüberschuss weiter gesteigert werden kann. Dabei wird ignoriert, dass in der Realität im Sommer die Wärmepumpen-Heizung nur für Warmwasser-Bereitung benötigt wird, eine Beheizung der Räume findet hier normalerweise nicht mehr statt.

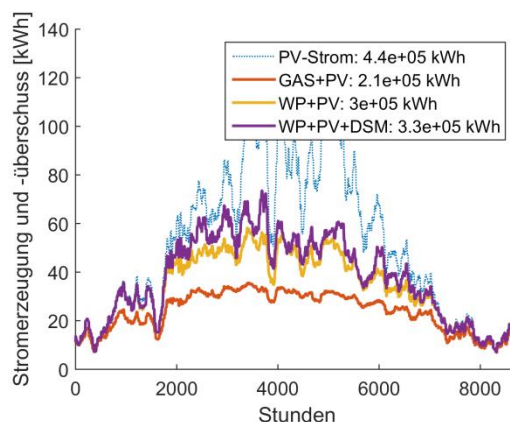


Abbildung 3: Stromproduktion und Eigenstromnutzung



In Abbildung 4 ist die Stromeinspeisung in jeder Stunde des Jahres als Boxplot dargestellt. Dies zeigt, dass die maximale Einspeiseleistung sich von GAS+PV über WP+PV zu WP+PV+DSM hin reduziert und somit eine Entlastung des allgemeinen Stromnetzes erfolgt.

In Tabelle 2 ist der über das gesamte Jahr ermittelte Eigenstromnutzungsanteil des im Quartier erzeugten Stroms dargestellt. Durch die DSM-Maßnahme lässt sich somit eine Steigerung des Eigenstromnutzungsanteils um 7 % erreichen.

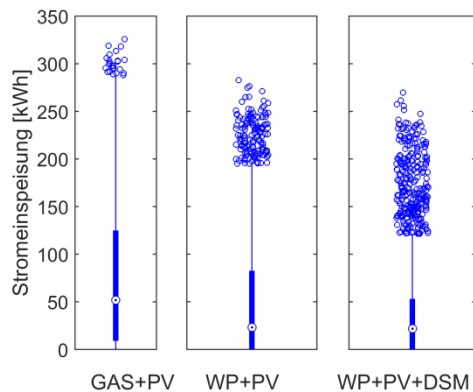


Abbildung 4: Einspeisung des im Quartier erzeugten Stroms in [kWh]

In Abbildung 5 ist beispielhaft der Tagesverlauf der PV-Erzeugung und des Überschusses elektrischer Energie im Quartier für die Szenarien WP+PV und WP+PV+DSM für den 21. April dargestellt. Dies zeigt die Reduktion der Einspeisung durch Erhöhung der Solltemperatur.

Tabelle 2: Eigenstromnutzungsanteil

SZENARIO	ENA
GAS+PV	47 %
WP+PV	67 %
WP+PV+DSM	74 %

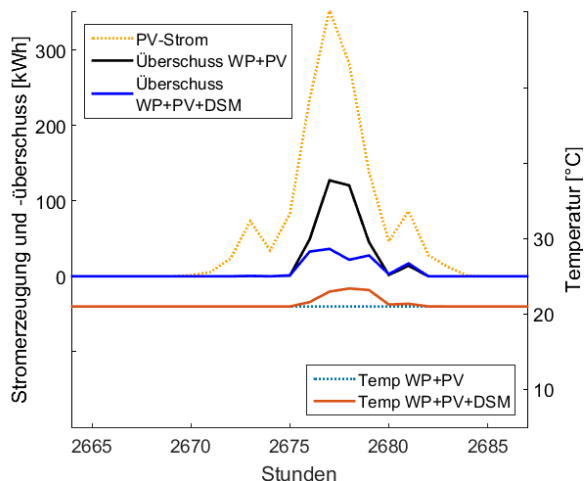


Abbildung 5: Tagesverlauf am 21. April

Durch die Verwendung von Strom aus dem Quartier kommt es innerhalb der Gebäudemodelle zu der Situation, dass mehr Strom über den Hausanschluss bezogen wird als ohne Veränderung der Solltemperatur. Dies erfolgt, da der Strom in diesem Fall innerhalb des Quartiers-Netzes umverteilt wird. Innerhalb des EnergyPlus-Modells ist jedoch nicht bekannt, ob der Strom aus dem allgemeinen oder dem Quartiers-Netz bezogen wird. Daher ist die Verwendung der EnergyPlus-Ausgabegröße „Cogeneration ElectricityPurchased“ in diesem Fall irreführend. Die Bilanzierung der vom allgemeinen Stromnetz zu beziehenden Energie muss daher außerhalb des Gebäudemodells erfolgen. Dies könnte in einem detaillierten Modell für das Quartiers-Netz erfolgen.

In Abbildung 6 ist die Auswirkung der DSM-Maßnahme über zwei Tage dargestellt. Während der Mittagsstunden mit hoher PV-Stromerzeugung ist der Strombedarf in WP+PV+DSM auf Grund der höheren Solltemperatur höher als in WP+PV. Aber durch die erhöhte Aufheizung der Gebäudemasse und die dadurch gespeicherte thermische Energie ist in den Zeiten ohne PV-Produktion der Strombedarf niedriger als in WP+PV.

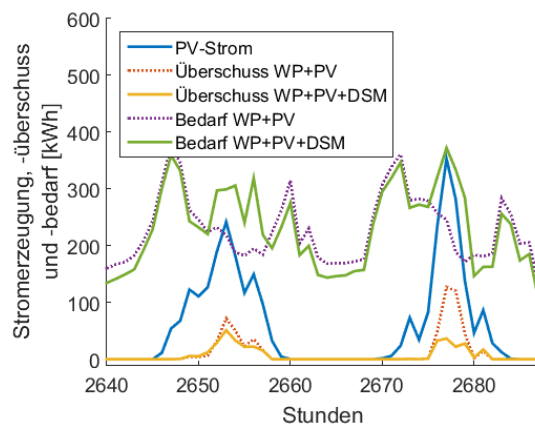


Abbildung 6: Tagesverlauf am 20. und 21. April

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die Implementierung der FMI-Kopplung von EnergyPlus und MATLAB® in dem energetischen Quartiers-Simulationsmodell EmMi-transient wurden vielfältige Möglichkeiten zur Untersuchung von zukünftigen Sanierungsszenarien geschaffen. Im Szenario WP+PV+DSM wurden Temperatur-Sollwertänderungen in den Gebäudemodellen per FMI realisiert, die darauf abzielen, die Gebäude als thermische Speicher zu nutzen. Dies führt zu einer Steigerung des Eigenstromnutzungsanteils von 67% auf 74%.

Für die weitere Entwicklung von EmMi-transient ist vorgesehen, die hier präsentierten Interaktionen zu verfeinern, mit realen Daten zu parametrisieren sowie weitere Möglichkeiten hinzuzufügen. So ist denkbar, dass die DSM-Maßnahmen mit Wärmepumpen und

PV-Anlagen zu einer Reduktion der Solltemperatur bei Strommangel oder zur gebäude-scharfen Ansteuerung genutzt werden können, um die Lastkurve an die PV-Erzeugungskurve schrittweise anzunähern. Hierfür wäre auch die Nutzung eines Koeffizienten, der die elektrische Leistung der Wärmepumpe für eine Erhöhung der Solltemperatur bei einer bestimmten Außenlufttemperatur beschreibt, sinnvoll, sowie die Berücksichtigung des thermischen Komforts. Dieser ist insbesondere auch für die Untersuchung zur Eigenstromnutzung im Sommer, wenn real keine Raumbeheizung stattfinden würde, wichtig, um Überhitzung zu vermeiden.

Zur Abbildung der Netzstruktur im Quartier ist eine vereinfachte Modellierung von lokalen Wärme- und Stromnetzen angedacht. Die Modellierung kann direkt in MATLAB® erfolgen, oder es können detaillierte Modelle via FMI angebunden werden.

Für die Abbildung von Quartiers-Stromnetzen können zentrale elektrische Speichersysteme oder Ladestation für Elektromobilität untersucht werden.

Mittels FMI ist eine Kopplung der Gebäudemodelle mit detaillierten Wärmenetzsimulationen möglich und lässt die Untersuchung der energetischen Auswirkungen solcher Quartierslösungen zu. Hier können beispielsweise die Effekte der Installation eines strom- oder wärmegeführten Blockheizkraftwerks in einem Quartier analysiert werden. Auch die Abbildung von quartiersweiten thermischen Kurzzeit- oder Saisonspeichern ist dann möglich, ggf. in Verbindung mit Freiflächen-Solarthermieanlagen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, Nutzerverhaltensmodelle wie in (Botzler et al. 2016, in Vorb.) oder Haushalts-Stromlastmodelle wie in (Jambagi et al. 2015) per FMI anzukoppeln.

FMI zwischen EnergyPlus und MATLAB® wird in all diesen angedachten Interaktions-Möglichkeiten für das Auslesen von Ergebnisdaten während der Simulationszeit genutzt. Daraus erhalten gebäudeübergreifende Modelle ihre Eingabedaten für den jeweiligen Zeitschritt, woraus die Energieflüsse zwischen den Gebäuden berechnet werden können. Deren Ergebnisse oder Signale für DSM-Maßnahmen werden wiederum per FMI von MATLAB® an EnergyPlus kommuniziert.

Ein prinzipielles Problem bei der Nutzung von FMI sind die fixen Kommunikationszeitschritte. Falls die verbundenen Modelle unterschiedliche interne zeitliche Auflösungen besitzen, kann dies zu unerwünschten Verhaltensweisen der Modelle führen. So werden Fluktuationen im Stromnetz ggf. zeitlich wesentlich höher aufgelöst als in Wärmenetzen. Sind Modelle zu Wärme- und Stromnetzen gekoppelt, kann dies auf beiden Seiten zu Problemen führen. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Für realistische Untersuchungen bestehender Quartiere müssen Kombinationen der vorgestellten

und geplanten Maßnahmen angedacht werden, um die Energieeffizienz zu steigern. Die sich hieraus ergebenden Wechselwirkungen und Effekte abzuschätzen ist eine der Hauptaufgaben von EmMi-transient. Für verlässliche Aussagen hierzu muss das Modell Validierungen durchlaufen, wofür Sensitivitätsanalysen im Rahmen der Dissertation des Erst-Autors durchgeführt werden, um die wichtigsten Parameter zu ermitteln und diese für zukünftige empirische Validierungen anhand realer Quartiere erfassen zu können.

## LITERATUR

- Bayerische Vermessungsverwaltung 2016. <http://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html>.
- Böhnisch H., Erbas K., Nast M., Schreitmüller K. 2001. Nahwärme im Gebäudebestand - Anlagenaspekte und Umsetzung, FVS Themen 2001, ForschungsVerbund Sonnenenergie, Berlin.
- Bolay S., Meyer M. 2015. Faktenpapier Eigenerzeugung und Stromdirektlieferung, DIHK & BSW Solar, Berlin.
- Botzler S., Nemeth I., Ziener T., Schneider S. 2016, in Vorbereitung. Quantifying occupant induced energy consumption through knowledge based behaviour modelling, BauSIM 2016, Dresden.
- Jambagi A., Kramer M., Cheng V. 2015, "Residential Electricity Demand Modelling", 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Morocco.
- Laycock R.G., Day A.M. 2003. Automatically Generating Roof Models from Building Footprints, WSCG 2003 Proceedings, Plzen.
- Haves P., Hong T., Nouidui T., Pang X., Wetter M. 2016. EnergyPlus 8-4-0. <http://energyplus.gov>, Abruf am 10.03.2016.
- Lindauer M., Nemeth I. 2014. Instationäre Energiebedarfs- und Angebotssimulation eines Stadtquartiers mit Einbeziehung des Nutzerverhaltens, BauSIM 2014 Conference, Aachen.
- Lindauer M. 2016a. Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters, Proceedings of SBE16, Hamburg.
- Lindauer M. 2016b in Druck. Global Impulse Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters, CESB16, Prag.
- Modelon 2015. FMI Toolbox 2.0.1b2, Modelon AB, Lund, Sweden.
- Loga T., Stein B., Diefenbach N., Born R., 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der

Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt.

- Modelisar, 2010. Functional Mock-up Interface for Co-Simulation 1.0. [https://svn.modelica.org/fmi/branches/public/specifications/v1.0/FMI\\_for\\_CoSimulation\\_v1.0.pdf](https://svn.modelica.org/fmi/branches/public/specifications/v1.0/FMI_for_CoSimulation_v1.0.pdf), Abruf am 15.03.2016.
- Nemeth I. 2011. Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor, Dissertation, TUM, München.
- Nemeth I., Elbel K., Hoppe M., Lindauer M., Schneider P., Windeknecht M., Hamacher T., Hauser G., Hausladen G., Lang W. 2012a. Energetische Gebäudesanierung in Bayern, VBW, TUM, München.
- Nemeth I., Schinabeck J., Gebhardt V.K., Thielen K., Michaeli M., Lang W. 2012b, Stadtlabor Nürnberger Weststadt, TUM, München.
- Nemeth I., Lindauer M., Ahlhaus P. 2013. Geo-Referenced Modeling of an Urban Quarter for the Assessment of Refurbishment Potentials and Energy Supply Strategies, Sustainable Building 2013 Conference, München.
- Noudoui T. S., Lorenzetti D.M., Wetter M. 2016, FMU Export to EnergyPlus, <http://simulationresearch.lbl.gov/fmu/EnergyPluses/export/index.html>, Abruf am 10.03.2016.
- Richter C. 2014. Methodik zur Erstellung von Gebäudesimulationsmodellen aus der TABULA-Gebäudetypologie, Masterarbeit, TUM, München.
- Riediger N., Sick F., Keiser J. 2016. Buildings as active components in smart grids, Proceedings of SBE16, Hamburg.
- Schlöbl H.-J., Riedl, Klaus; Hofmann, Martin; Nirschl, Thomas; Wismeth, Monika; Wiglenda, Herbert; Zaunmüller-Blau, Agathe; Thiemann, Joachim; Kampe, Karen., 2010, Vorbereitende Untersuchungen Weststadt, [https://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/planen/weststadt\\_vu.pdf](https://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/planen/weststadt_vu.pdf), Abruf am 04.03.2016.
- Statistisches Bundesamt, 1987. Bautätigkeit und Wohnungen. Gebäude- und Wohnungszählung vom 25. Mai 1987, Stuttgart.
- Vajen K., Jordan U. 2003. Tool for the Generation of Domestic Hot Water (DHW) Profiles on a Statistical Basis. <http://www.solar.uni-kassel.de>, Abruf am 05.03.2016

# GLOBAL DYNAMIC SENSITIVITY ANALYSIS USING FUNCTIONAL TRANSFORMATION FOR ENERGY SIMULATION OF RESIDENTIAL QUARTERS

M. Lindauer<sup>1</sup>, K. Sedlbauer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Sustainable Building, TU München, München, Germany

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Bauphysik, TU München, München, Germany

## ABSTRACT

Renewable decentralized energy supply of buildings will become more important and due to its fluctuation the focus of energy demand and supply calculations have to change from monthly or yearly cumulative energy demand to detailed hourly examination. For selecting the best option for future refurbishment measures out of the huge range of possible measures the effect of each measure on the detailed simulation has to be analyzed.

In this work an approach for using functional transformation to analyze the parameter influence on final energy demand and indoor air temperature calculated by the elementary effects sensitivity analysis method is presented. This is used to reduce the data dimension from 8760 values for each hour of the year to a smaller number resulting in easier interpretability of the elementary effect sensitivities.

A building quarter modelled in the district model EmMi-transient is used as case study and its results are analyzed using this sensitivity analysis method.

## INTRODUCTION

For the dynamic calculation of energy demand and local electricity generation in a district considering the effects of decentralized, renewable energy sources very detailed models can be created. But most of the time the data to parametrize such detailed models is insufficient. So sensitivity analysis methods can be used to identify the most important parameters. Then either more information on these parameters can be collected, or simplified models neglecting parameters with little influence can be derived.

To date mostly sensitivity analysis with single valued target functions, e.g. annual final energy demand or maximal peak power, are used. Using these methods the dynamic effects, which change over the year, can not be assessed. Therefore dynamic evaluation of the sensitivities can provide useful insights.

Such approaches were introduced e.g. in (Cukier 1973) or (Saltelli 1998) and were for example already used for the analysis of crop models (Lamboni 2009, 2011). In this work the application in the field of building energy simulation, especially for district models, is presented.

## METHODOLOGY

The method described in this work uses elementary effects sensitivity analysis in connection with functional transformation to assess the dynamic influence of parameters on the results of the model EmMi-transient. In previous works (Lindauer 2016a, 2016b in print) sensitivity analysis methods using sequential and impulse evaluation were demonstrated. The sequential approach is used here as comparison.

### **Elementary effects method**

The elementary effects (EE) method was developed in (Morris 1991) and aims to identify parameters which are a) negligible, b) linear and additive, or c) nonlinear or involved in interactions with other factors. For detailed definition and possible interpretations of the results see (Saltelli 2007).

EE is a sensitivity analysis (SA) method which uses different trajectories of a discretized input space as sampling strategy to vary every parameter. Every input can take  $p$  levels. The resulting sensitivity index  $\mu$  shows the overall influence of a parameter on the output, while  $\sigma$  assesses the ensemble effect (nonlinear and/or due to interactions). Usage of  $\mu^*$ , which is defined as the mean of the distribution of the absolute values of the elementary effects and therefore helps to minimize cancelling effects, is recommended. Comparing the values for  $\mu$  and  $\mu^*$  allows to identify the sign of an effect. (Saltelli 2007)

The results were calculated with  $p = 4$  discretization levels and  $r = 10$  trajectories.

The elementary effects method was chosen because of its low computational effort, the easy grouping of parameters, the fact that qualitative sensitivities are sufficient for a parameter ranking and its robustness to failed simulation runs.

### **Functional transformation in general**

Let  $x: I \rightarrow \mathbb{R}$  be a function from the interval  $I=[0,T]$  to the real numbers  $\mathbb{R}$ .

A functional transformation (FT) of  $x$  is given by

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k \Phi_k(t) \quad (1)$$

where  $c_k$  are the coefficients of the functional transformation, and the set  $\{\Phi_k | k \in \mathbb{N}\}$  is a basis of

the vector space of integrable functions  $I \rightarrow \mathbb{R}$ . This basis is in general infinite dimensional. To be able to numerically calculate the transformation,  $K < \infty$  has to be chosen. This has to be done in such a way that the cut-off error is acceptable.

The idea of functional transformation in connection with sensitivity analysis is that instead of having to look at every value of  $x$  at every time  $t \in I$ , the effect of parameter changes on the coefficients  $c_k$  can be evaluated. Therefore if the effect represented by  $\Phi_k$  over the whole time is known, then not every single function value has to be evaluated.

In the case of a building energy simulation the time interval is discretized into the hours of a year, so  $I = \{1, 2, \dots, 8760\}$ . And the function  $x$  can be thought of as e.g. final energy demand at time  $t$ .

### Fourier analysis

For  $F = \frac{1}{T}$ ,  $\omega_k = k(2\pi F)$  the Fourier series  $\widehat{x}_k$  of a continuous differentiable function  $x$  defined on the interval  $[0, T]$  is given by

$$\widehat{x}_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T x(t) e^{-i\omega_k t} dt \quad (2)$$

For  $k \geq 1$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{8760}$ ,  $t \in I$  the Fourier basis is given by

$$\Phi_k(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{k}{2}\omega t\right), & k \text{ even} \\ \cos\left(\frac{k-1}{2}\omega t\right), & k \text{ odd} \end{cases} \quad (3)$$

This basis represents the frequency distribution of  $x$  regarding its periods.

We have

$$\Phi_1(t) = 1 \text{ for all } t \in I \quad (4)$$

$$\Phi_2(t) = \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\Phi_3(t) = \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$\Phi_{730}(t) = \sin\left(\frac{730}{2} \cdot \frac{2\pi}{8760} \cdot t\right) = \sin\left(\frac{2\pi}{24} \cdot t\right) \quad (7)$$

$$\Phi_{731}(t) = \cos\left(\frac{731-1}{2} \cdot \frac{2\pi}{8760} \cdot t\right) = \cos\left(\frac{2\pi}{24} \cdot t\right) \quad (8)$$

Therefore  $\Phi_1(t)$  represents a constant offset of  $x$  over the year.  $\Phi_2(t)$  and  $\Phi_3(t)$  represent a sine respective cosine curve with a period length of one year,  $\Phi_{730}(t)$  and  $\Phi_{731}(t)$  represent a sine resp. cosine curve with period length of 24 hours. Therefore  $c_1$  represents a constant increase or decrease over the whole year,  $c_2$  and  $c_3$  shows the annual variation,  $c_{730}$  and  $c_{731}$  show the daily variation of  $x$ . These values are of special interest in the building energy case, as there are mainly annual and daily changes in the weatherdata influencing the building energy performance.

### Principal component analysis

Principal component analysis (PCA) is a FT with a basis adapted to the analyzed data. The basis

functions are called principal components (PC), the coefficients of the functional transformation are called principal component scores. This FT calculates the first PC such that it has a maximal share of the total variance of the data. The next PCs have smaller amounts of the total variance. They are defined to be orthogonal to the former PCs, therefore they identify a new effect in the data. The mathematical definition and calculation details can be found in (Ramsay 2005).

Due to the adaptation of the basis it is necessary to interpret the PCs before the meaning of the scores can be identified. This can be done by plotting the first few PC curves covering most of the variation and identifying the intervals which are influenced by this PC. This process can be quite complex as it is necessary to look at the progress of the PC over all hours of the year. But once this process is completed, the sensitivity calculation described in the next section is simple and easy to understand.

### FT in connection with SA

The idea of using FT in connection with SA is to calculate the sensitivity indices, in case of EE  $\mu$ ,  $\mu^*$  and  $\sigma$ , for every coefficient of the functional transformed data. Then  $\mu$  and  $\sigma$  show the overall influence respective the nonlinear/interactive influence of a parameter on the corresponding functional base.

So the sensitivity indices are calculated for the values of  $c_k$  instead of the values  $x(t)$ . If  $k$  is small compared to the length of the time interval then the analysis of the sensitivities is simplified.

In case of Fourier basis this means the influence on the arising frequencies, so for a parameter influencing the daily energy demand probably a high influence on the coefficients assigned to sine and cosine curves with a period of 24 hours will arise.

In case of PCA it has to be analyzed first what effect a principal components represents. This is dependant on the simulation result data and has to be done again for every evaluation. The sensitivities are afterwards calculated for the principal component scores defining the share of a principal component for a given data set.

## CASE STUDY: DISTRICT MODEL EMMI-TRANSIENT

### Model overview

The tool „EnergyModelling Multiscalar“, abbreviated by EmMi, was developed in the course of different projects (Nemeth 2011, Nemeth et al. 2012a, 2012b, 2013). In the beginning stationary energy demand calculation methods were used for approximating the effect of refurbishment measures of large building stocks. In (Lindauer & Nemeth 2014) the tool was extended to use transient building energy simulation, namely EnergyPlus, to model both the energy demand and the decentralized energy generation of

residential quarters. EmMi itself is a MATLAB® framework, which parametrizes EnergyPlus building simulation model templates, simulates these models, collects and sums or averages the results.

Detailed information on the building simulation models can be found in (Lindauer 2016a, b in print, c in preparation). In this work EmMi-transient is used for modelling the case study quarter to demonstrate the possibilities which arise by using functional transformation in connection with sensitivity analysis to identify the parameter influences. The case study quarter (figure 1) consists of 25 residential buildings of the building age classes 1918 to 1968 with a heated area of 10426 m².

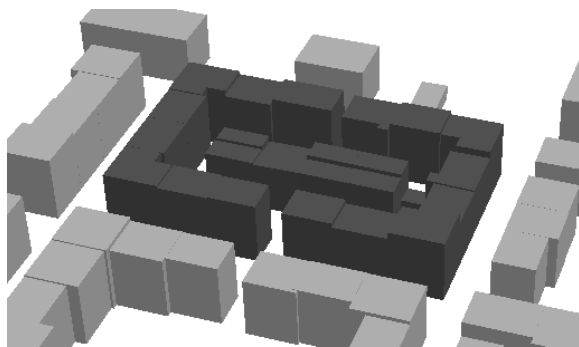


Figure 1: LoD1 data of the simulated district (dark gray) and the neighboring buildings (light gray) for shading

It is located in the city of Nuremberg, therefore climate data generated for this location by Meteornorm is used. The ambient dry bulb temperature of this climate data is shown in figure 2. The heating season is before hour 3000 around May 5<sup>th</sup> and after hour 6000 around September 7<sup>th</sup>, the interval in between is called warm season in the further work

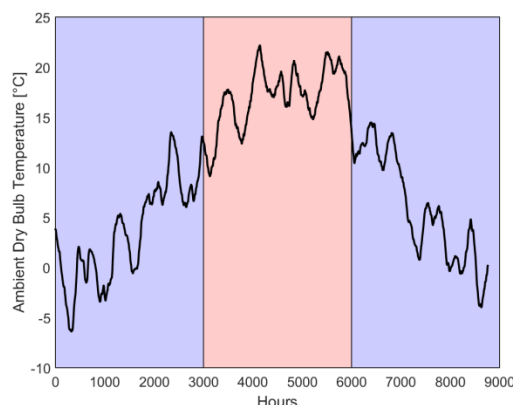


Figure 2: Ambient dry bulb temperature with indication of heating season (light blue) and warm season (light red)

### Parameters for sensitivity analysis

The following subset of parameters of the model are analyzed using sequential and functional transformed

sensitivity analysis. The parameters change simultaneously for all buildings independently of building age and occupancy.

The heat capacity  $c_p$  of the internal and external walls is not given in the building typology, so default values were taken for standard building materials and the influence of this parameter will be investigated. In the sensitivity analysis, only the heat capacity of the static part of the external and internal walls changes, the insulation's heat capacity does not change. The specific heat capacity is defined to vary by a uniform distribution with minimum 500 J/kgK and maximum 1500 J/kgK for both external and internal walls.

In the building typology the U-value of the windows  $U_{win}$  is given by values between 2.57 W/m²K and 4.3 W/m²K depending on the building age class. This value is varied for the sensitivity analysis by a normal distribution around the given value from the building typology and a standard deviation of 0.1 W/m²K to represent different constructions.

The infiltration rate parameter  $Inf$  defines how much air changes in the heated zone of the building due to infiltration. In the German standard DIN 4108-6:2003-06 a value of 0.7/h is assumed. But older buildings tend to have much higher infiltration rates (Geissler & Hauser 1997), so the influence of this parameter will be assessed for values between 0.2 and 2.0 1/h.

The parameter  $T_{setback}$  defining the setback temperature for the heated zone between 22 o'clock and 5 o'clock changes between 16 and 19 °C, while the set point temperature during the day stays constantly at 21 °C.

### Target functions for sensitivity analysis

First target function is the final energy demand  $Q_E$  in kWh for all heating systems in the district. Here also the domestic hot water demand is included, as it is assumed that the water is heated by the central heat generator of each building. No electricity for household appliances or auxiliary energy of heating system, e.g. for the pumps, is included.

The second target function is the average temperature  $T_{avg}$  of all the heated zones of the buildings. This is used to evaluate overheating issues and the effect of temperature set point changes.

## RESULTS OF SENSITIVITY ANALYSIS

All graphs with annual data are displayed using a moving mean over 168 hours. In this work only  $\mu$  and  $\mu^*$  are evaluated, the interaction effect represented by  $\sigma$  is not considered.

### Sequential evaluation

In figure 3 the chart for  $\mu^*$  of the final energy demand shows that for the whole year  $Inf$  is the most influential parameter followed by  $U_{win}$ . In the warm season between around hours 3000 to 6000 the

influence decreases as the overall final energy demand is lower due to higher ambient temperature.

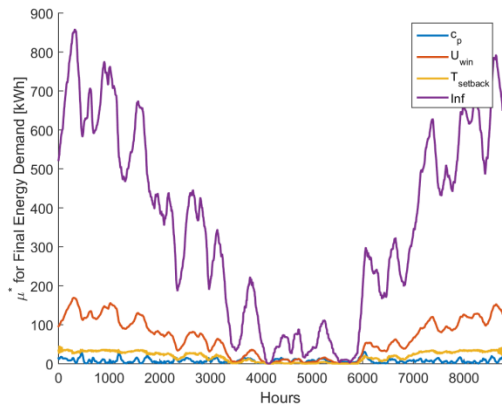


Figure 3:  $\mu^*$  for final energy demand

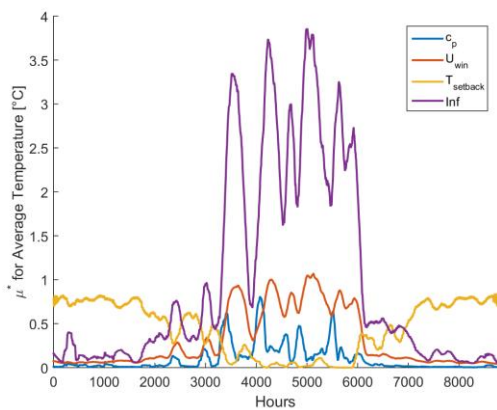


Figure 4:  $\mu^*$  for average temperature

In figure 4 the chart for  $\mu^*$  of the average temperature shows two different phases. In the cold season until around hour 3000 and after hour 6000 the setback temperature  $T_{setback}$  for the night operation of the heating system is the most influential parameter followed by the infiltration rate  $Inf$ . The other parameters have only minor influence. This is no surprise, as  $T_{setback}$  changes the temperature by 3 °C during seven hours of the day. In the warm season the average temperature  $T_{avg}$  is mostly influenced by the infiltration rate  $Inf$ , followed by the U-value of the windows  $U_{win}$  and the heat capacity  $c_p$  of the walls.

Using sequential sensitivity analysis the overall influence of parameters can be assessed and therefore a ranking can be created for different seasons. Because of the usage of moving mean the detailed effect caused by a parameter can not be seen. For assessing this an hourly evaluation is necessary resulting in high analysis effort.

### Fourier analysis

For sensitivity analysis in connection with a Fourier functional transformation a Fourier basis with  $K=1095$  functions was chosen. This reduces the

number of coefficients by a factor of almost 8 compared to sequential hourly evaluation and the sine and cosine basis functions with period length of one day (coefficients  $c_{730}, c_{731}$ ) are included in this basis.

When comparing the Fourier transformation of the data and the original simulation data the standard deviation differs by -15 % to -4 % for  $Q_E$  and -12 % to -3 % for  $T_{avg}$ . Mean and sum of original data and Fourier transformed data are equal. This means that the overall behaviour is well mapped by the Fourier series, but the peaks and dynamics of the heating system are not completely covered by the transformation.

In figures 5 and 6 the sensitivity indices  $\mu$  and  $\mu^*$  of coefficients  $c_1, c_2, c_3, c_{730}$  and  $c_{731}$  for target function  $Q_E$  are shown.

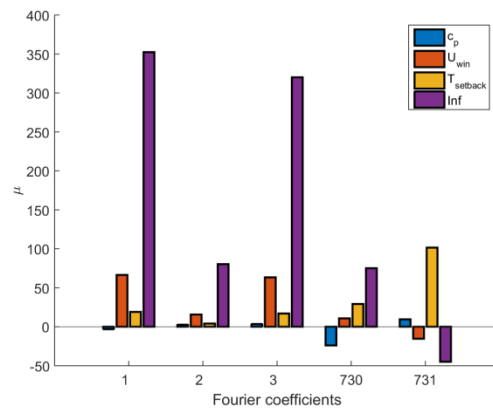


Figure 5:  $\mu$  for Fourier coefficients of final energy demand

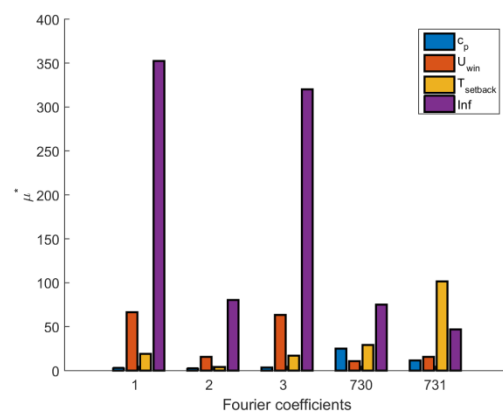


Figure 6:  $\mu^*$  for Fourier coefficients of final energy demand

Figure 6 shows, that for all coefficients but for  $c_{731}$   $Inf$  is the most influential parameter regarding  $\mu^*$ . Comparing the values for  $\mu$  in figure 5 the positive sign of the effect of  $Inf$  can be seen: the higher the infiltration rate, the higher the final energy demand. For the constant Fourier coefficient  $c_1$  the next most influential parameter is  $U_{win}$ , also with a positive effect sign. Next is  $T_{setback}$  with a positive effect

sign, and last  $c_p$  with a small negative effect sign, meaning a reduction of the offset by higher values for  $c_p$ , which seems reasonable as  $c_p$  defines the heat capacity of the walls. For the coefficient  $c_{730}$  representing the daily sine curve, meaning high energy demand in the morning, low energy demand in the evening,  $c_p$  has a negative effect sign meaning a damping of the oscillation. This can be explained by lower final energy demand in the morning, when the temperature setback changes to the normal day set point temperature. For coefficient  $c_{731}$ , which represents a daily cosine curve and therefore high demand at midnight and low demand at midday, the highest influence is given by  $T_{setback}$  followed by  $Inf$ .

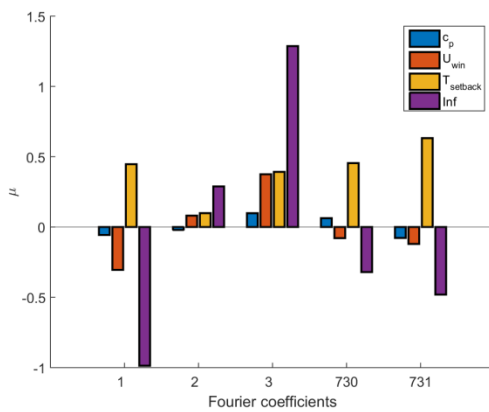


Figure 7:  $\mu$  for Fourier coefficients of average temperature

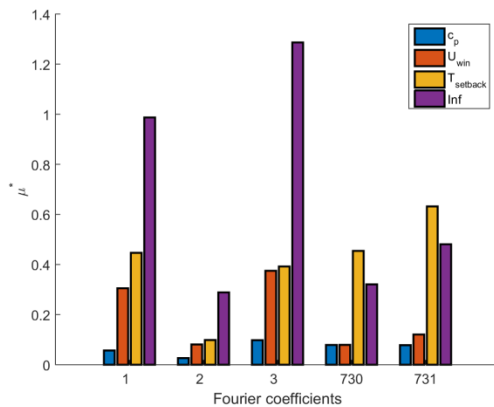


Figure 8:  $\mu^*$  for Fourier coefficients of average temperature

For average temperature in figures 7 and 8 the highest influence on the constant basis and the annual sine and cosine curve is also given by  $Inf$ . For coefficient  $c_1$  parameter  $Inf$  has a negative effect sign meaning a lower temperature when  $Inf$  is higher.  $T_{setback}$  is the next most influential parameter with a negative effect sign. For coefficient  $c_3$ , representing the annual cosine curve, the influence of  $Inf$  is followed by  $U_{win}$  and  $T_{setback}$  in the same magnitude. The daily oscillation represented by

coefficients  $c_{730}$  and  $c_{731}$  is mainly influenced by  $T_{setback}$  with a positive effect sign, meaning that a higher set back temperature results in higher average temperature, followed by  $Inf$  with a negative effect sign.

Using Fourier analysis the influence on the different frequencies of target functions arising in an annual simulation can be assessed. In the case of building simulation especially the daily and annual curves have to be evaluated.

### Principal component analysis

For the interpretation of the principal components (PCs) in figures 9 - 11 and 13 - 15 the mean value of all results is plotted beside the mean value plus and minus the particular PC. Therefore the effect represented by a PC becomes visible. In some cases the PCs have to be analyzed on an hourly basis without moving mean, then the hourly data of one exemplary day without moving mean is plotted.

When comparing the PCA transformation for final energy demand using only PCs 1 and 2, transformed data and the original simulation data differ in sum, mean and standard deviation by -1 % to +0.1 % each. For average temperature using PCs 1,2, and 3, sum and mean differ by -0.2 % to 0.1 %, standard deviation differs by -4 % to +5 %. So the overall behaviour is well mapped by the PCA transformed data, and also the peaks for final energy demand fit well. The temperature peaks don't fit that good, but using more PCs can improve this.

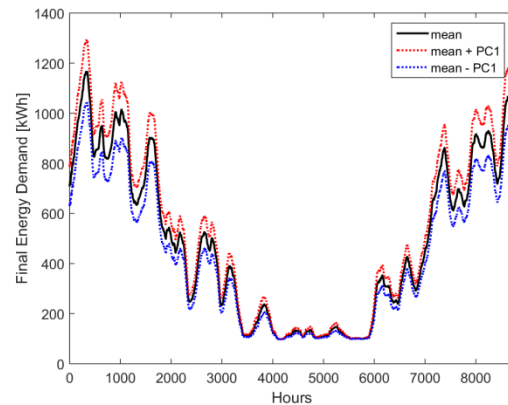


Figure 9: PC 1 for final energy demand

In figure 9 PC 1 for final energy demand is shown. PC 1 describes an increase of the final energy demand for all hours of the year. PC 1 explains 88 % of the total variance of the results.

In figure 10 there is almost no deviation for PC 2 from the mean curve visible. The reason is the usage of a moving mean for plotting the annual data.

In figure 11 PC 2 is shown for a single exemplary day (1<sup>st</sup> of April). Here a decrease of the daily oscillation by a lower energy demand during day and a higher energy demand during night can be seen, which is averaged when using the moving mean. This



is the same for all days in the cold season, in the warm season PC 2 shows mostly the same behaviour, some days show another variation when there is only energy demand for hot water, not for room heating. So overall PC 2 describes a decrease of energy demand during day and an increase of energy demand during night.

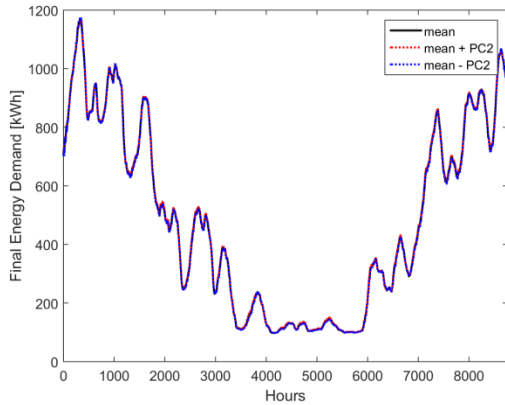


Figure 10: PC 2 for final energy demand

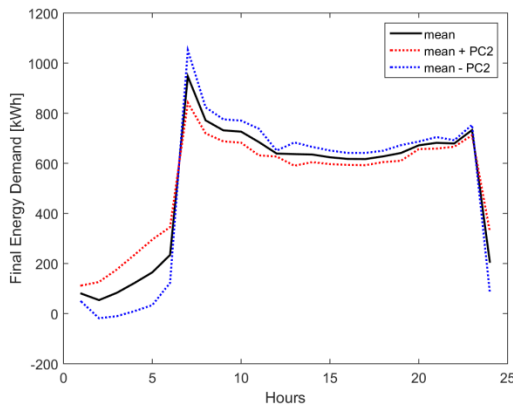


Figure 11: PC 2 for final energy demand, April 1<sup>st</sup>

The following PCs account for less than 2 % of the total variance and will be ignored here.

So for final energy demand we have two main effects caused by the parameter changes: an overall increase of energy demand described by PC 1 and a decrease of daily energy demand fluctuation described by PC 2.

In figure 12 the sensitivity index  $\mu^*$  is shown for these two PCs. It is obvious that *Inf* has the highest influence on PC 1, followed by  $U_{win}$ . So these parameters are the most important ones when interested about the in- or decrease of overall final energy demand.

Regarding PC 2 describing the de- resp. increase of final energy demand during day resp. night,  $T_{setback}$  is the most influential parameter, followed by *Inf*.

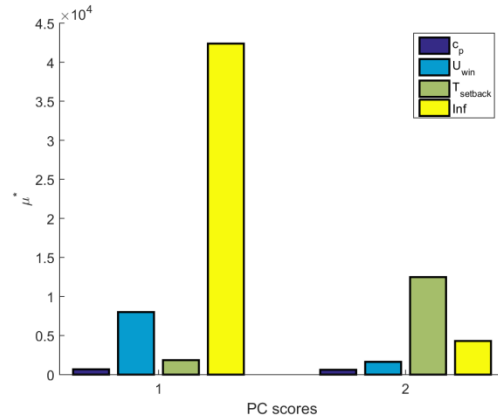


Figure 12:  $\mu^*$  for PCs 1 and 2 of final energy demand

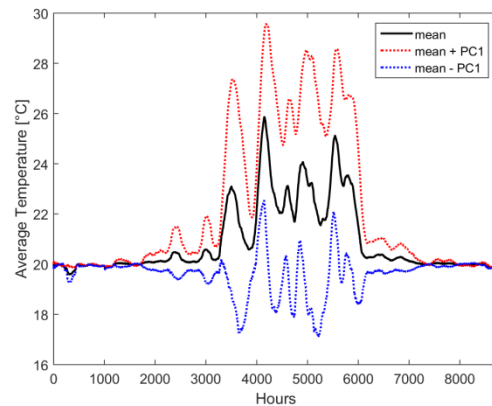


Figure 13: PC 1 for average temperature

In figure 13 PC 1 for average temperature is shown. PC 1 describes an increase of temperature over almost all hours of the year with a higher increase in the warm season.

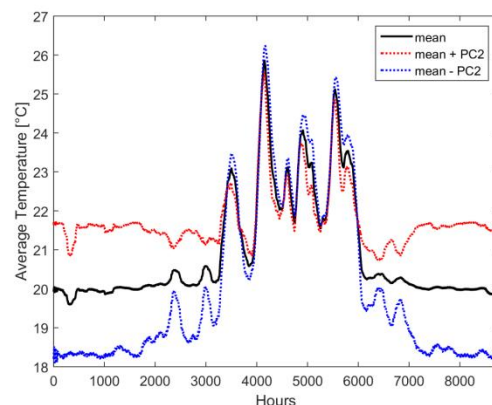


Figure 14: PC 2 for average temperature

PC 2 for average temperature (figure 14) describes overall higher temperatures during the heating season while describing a damping of the temperature oscillation in the warm season.

The effect described by PC 3 (figure 15) can not be explained so clearly, at some times a lower

temperature than the mean can be seen, but also higher temperatures. So here a detailed look in the different seasons would be necessary. Also a comparison with ambient temperature and radiation could provide useful insights. But this is beyond the scope of this work. PC 3 contributes 1.7 % to the total variance of the results, compared to 77 % for PC 1 and 19 % for PC 2.

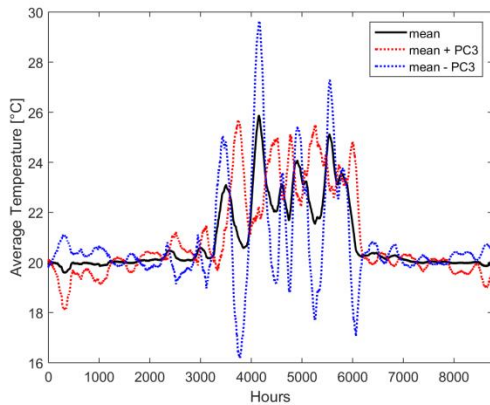


Figure 15: PC 3 for average temperature

The higher PCs for average temperature contribute by less than 2 % to the total variance and will therefore be ignored here.

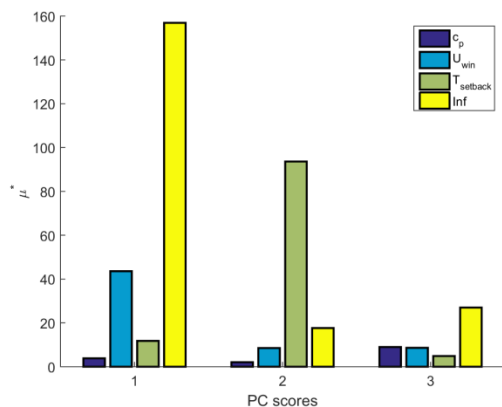


Figure 16:  $\mu^*$  for PCs 1, 2 and 3 of average temperature

In figure 16 the results for  $\mu^*$  show that *Inf* has the biggest influence on PC 1, followed by *U<sub>win</sub>*. For assessing the sign of the effects it is necessary to evaluate also the values of  $\mu$  in figure 17.

Here it is visible that the higher the infiltration rate and the U-value of the windows, the lower the temperature in the buildings. For PC 2 the highest influence can be accounted to *T<sub>setback</sub>* followed by *Inf*. As PC 2 describes the temperature increase during the cold season this seems reasonable. For PC 3 *Inf* has the highest influence, but then *U<sub>win</sub>* and *c<sub>p</sub>* follow in the same magnitude. The interpretation of these sensitivities is postponed because of the unclear effect of PC 3.

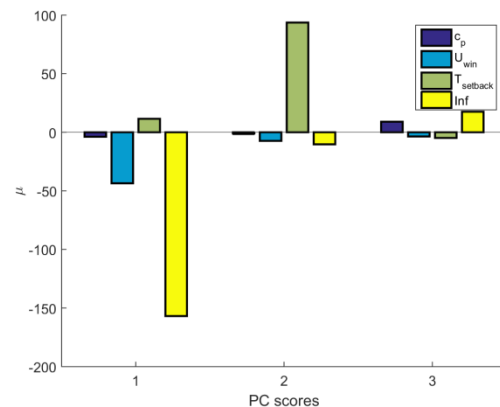


Figure 17:  $\mu$  for PCs 1, 2 and 3 of average temperature

## CONCLUSION

Comparing the results of sequential sensitivity analysis with Fourier transformed and PCA transformed sensitivity analyses it can be stated that more information on the parameter influence is available when using all sensitivity analysis methods.

Using sequential evaluation allows to create an overall ranking without knowing the exact effect of a changing parameter. Influences in the different seasons of the year can be identified.

Fourier analysis allows to create a ranking for annual and daily influences by looking at the respective frequencies and sensitivity of these frequencies. The Fourier basis is a fixed basis and therefore it has to be suitable to the data in order to be useful. As the sine and cosine curves don't fit perfectly to the seasonal and daily changes in the future some variations, e.g. phase shifts of the basis curves, could provide useful.

When using PCA to evaluate the sensitivity indices interpretation of the arising PCs is necessary. Having information on PCs it is possible to evaluate the effect of parameter changes on these PCs and therefore analyze the influence of the parameters on the different effects described by the PCs.

In summary it can be stated that the infiltration rate of the buildings is the most influential parameter regarding final energy demand in the annual process, followed by the U-value of windows. For the daily variation in the final energy demand, which can be assessed by the Fourier and the PCA sensitivity analysis, the setback temperature of the heating system is the most influential parameter followed by infiltration rate.

Regarding the average temperature, from the sequential sensitivity analysis it can be derived that in the cold season the setback temperature is most influential, followed by U-value of the windows. In the warm season, the infiltration rate becomes the most influential parameter followed by the U-value of the windows. By the Fourier sensitivity analysis it

can be stated that infiltration rate followed by setback temperature followed by U-value of the windows are the most influential parameters for annual average temperature variation. For daily average temperature variation, setback temperature followed by infiltration rate are the most influential parameters. By the PCA sensitivity analysis it can be stated that infiltration rate and U-value of windows are most influential for PC 1, representing temperature change in the warm season in compliance with the results of the sequential evaluation. For PC 2, representing higher temperatures in the cold season and a damping of the variation in the warm season, the setback temperature is most influential.

The partly compliant results and additional insights gained by using all of the sensitivity analysis methods helps to create a deeper understanding of the model. For future development special thoughtfulness can be put into the submodels using the most influential parameters.

The sensitivity analysis methodology described in this work can and should be used for any other model in order to provide confidence for its opportunities and awareness of the drawbacks.

## OUTLOOK

At the moment, each building in the district is parametrized using more than 80 values, so there is scope for extension of the parameter subset considered for the sensitivity analysis.

Other target functions, e.g. self used electricity or thermal comfort indices, can be introduced and the parameter sensitivities regarding these functions can be evaluated. Especially when analyzing district measures like local electricity generation in connection with demand side management measures or combined heat and power systems in connection with solarthermal systems and thermal storages this can be helpful.

Regarding the functional transformation other function basis like wavelets or polygonials can be used and evaluated regarding the sensitivities.

## REFERENCES

Cukier R. I. 1973. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 59, No. 8.

Geissler A., Hauser G. 1997. Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden, *bau zeitung*, Vol. 51, No. 3.

Lamboni M., Makowski D., Lehuger S., Gabrielle B., Monod H. 2009. Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models, *Field Crops Research* Vol. 113, No. 3.

Lamboni M., Monod H., Makowski D. 2011. Multivariate sensitivity analysis to measure global contribution of input factors in dynamic

models, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96, No. 4.

Lindauer M., Nemeth I. 2014. Instationäre Energiebedarfs- und Angebotssimulation eines Stadtquartiers mit Einbeziehung des Nutzerverhaltens, *BauSIM 2014 Conference*, Aachen.

Lindauer M. 2016a. Global Sequential Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters, *Proceedings of SBE16*, Hamburg.

Lindauer M. 2016b in print. Global Impulse Sensitivity Analysis for Building Energy Simulation of Residential Quarters, *CESB16*, Prag.

Lindauer M. 2016c in preparation. FMI-Kopplung von EnergyPlus mit Matlab zur Abbildung von Interaktionen im Distrikt-Modell EmMi-transient, *BauSIM 2016*, Dresden.

Morris M.D. 1991. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments, *Technometrics* 2, Vol. 33.

Nemeth I. 2011. Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor, *Dissertation*, TUM, München.

Nemeth I. et al. 2012a. Energetische Gebäudesanierung in Bayern, *VBW, TUM, München*.

Nemeth I. et al. 2012b, *Stadtlabor Nürnberger Weststadt*, TUM, München.

Nemeth I., Lindauer M., Ahlhaus P. 2013. Geo-Referenced Modeling of an Urban Quarter for the Assessment of Refurbishment Potentials and Energy Supply Strategies, *Sustainable Building 2013 Conference*, München.

Pfafferoth J., Herkel S., Wambsganß M. 2004. Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 36, No. 5.

Ramsay J. O., Silverman B. W. 2005. *Functional Data Analysis*, Springer, New York

Saltelli, A. 2007. *Sensitivity analysis of scientific models*, Wiley, Hoboken.

Saltelli A., Bolado R. 1998. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST), *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 26, No. 4.

Sumner T., Shephard E., Bogle I. D. L. 2012. A methodology for global-sensitivity analysis of time-dependent outputs in systems biology modelling, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 9, No. 74.