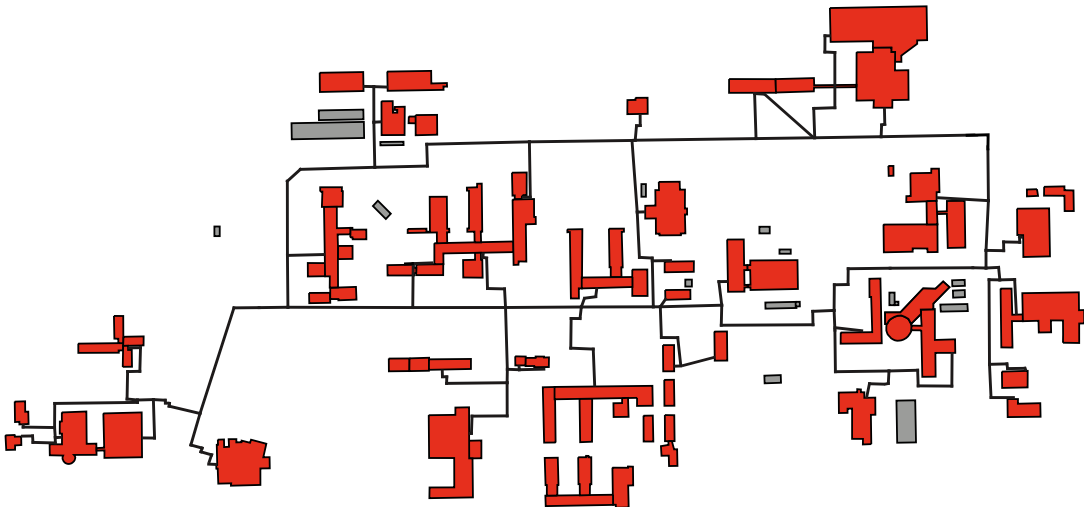


Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfs- rechnungen von Stadtquartieren

Moritz Lauster

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate



Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren

Parameter-Based Building Models for
Dynamic Energy Demand Calculations on the Urban Scale

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Moritz Lauster

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2018

Die Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb-nb.de> abrufbar.

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker
Direktor E.ON Energy Research Center

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)
E.ON Energy Research Center
Mathieustraße 10
52074 Aachen

E.ON Energy Research Center I 60. Ausgabe der Serie
EBC I Energy Efficient Buildings and Indoor Climate

Copyright Moritz Lauster

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN: 978-3-942789-59-2
1. Auflage 2018

Verlag:

E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
Mathieustraße 10
52074 Aachen
Internet: www.eonerc.rwth-aachen.de
E-Mail: post_erc@eonerc.rwth-aachen.de

Herstellung:

Druckservice Zillekens
Rainweg 19
52224 Stolberg

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik des E.ON Energieforschungszentrums an der RWTH Aachen. Die Aufgabenstellung ergab sich aus verschiedenen Forschungsprojekten, die teilweise als Anwendungsfälle in die Arbeit eingeflossen sind. Ich möchte mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller für die Unterstützung bei der Themenfindung und der Ausarbeitung der Arbeit sowie die Freiheiten im wissenschaftlichen Alltag bedanken. Mein besonderer Dank gilt des Weiteren Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen für die vielen angeregten Diskussionen im Rahmen des Koreferats meiner Arbeit sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke für den Prüfungsvorsitz im Rahmen der mündliche Prüfung.

Zusätzlich möchte ich mich bei meinen Kollegen bedanken, die mich während der Arbeit begleitet haben und die Zeit am Institut zu mehr als einer reinen wissenschaftlichen Beschäftigung gemacht haben. Besonders Ana Constantin, Hassan Harb, Gregor Hillebrand, Max Huber, Roozbeh Sangi und Henryk Wolisz haben viele unvergessliche Erlebnisse beigesteuert.

Mein weiterer Dank gilt meinen vielen studentischen Mitarbeitern, deren Abschlussarbeiten in die Arbeit mit eingeflossen sind. Im Besonderen möchte ich hierbei Henning Leppmann, Michael Mans, Philipp Mehrfeld, Peter Remmen, Stanley Risch und Simon Steiner erwähnen.

Ein sehr persönlicher Dank ist meinen Eltern und meinem Bruder gewidmet, ohne sie wäre ich nie bis zum Abschluss dieser Arbeit gekommen und könnte nun nicht diese Zeilen schreiben. Dies gilt ebenfalls für meine Freundin Beate Würz, die immer mit unterstützenden Worten und sehr viel Geduld, besonders in den schwierigen Phasen der Arbeit, zur Hilfe war und einen Großteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Zum Abschluss danke ich meinen beiden Töchtern Nora und Nele, die großzügig über meine Abwesenheiten hinweg gesehen haben und immer das Gegengewicht zum Arbeitsalltag gebildet haben.

Aachen im Juni 2018

Moritz Lauster

Kurzfassung

Diese Arbeit stellt eine Methodik und ein Software-Framework vor, welche eine dynamische Energiebedarfsrechnung von großen Gebäudebeständen auf Basis weniger Eingangsdaten erlauben. Solche zeitaufgelösten Bedarfsrechnungen bilden die Grundlage für Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz wie innovative Regelungskonzepte und optimale Auslegungsstrategien von Wärmeversorgungssystemen. Die Methodik umfasst dabei vereinfachte und dennoch dynamische Gebäudemodelle, die den Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und Modellkomplexität auf Stadtebene gerecht werden. Zusätzlich beinhaltet die Methodik ein Verfahren, das es ermöglicht, die Gebäudemodelle auf Basis weniger und einfach erfassbarer Eingangsdaten vollständig zu parametrieren. Beide Teilbereiche, Parametrierung und Modellierung, sind in einen übergreifenden Prozess zur Automation der Werkzeugkette eingebunden. Für die Umsetzung der Methodik kommen die Programmiersprache Python und die Modellierungssprache Modelica zum Einsatz.

Die Parametrierung beruht auf Archetypen für Wohn-, Büro- und Institutsgebäude, welche eine Anreicherung der erfassten Daten mittels statistischer Aussagen zum jeweiligen Gebäudetyp erlauben. Der Archetyp für Institutsgebäude basiert auf statistischen Analysen des Gebäudebestandes von zwei Forschungsliegenschaften. Die Gebäudemodelle basieren auf einem thermischen Netzwerkmodell reduzierter Ordnung mit zwei Zustandsvariablen, dessen Grundlagen in der Richtlinie VDI 6007-1 (2015) beschrieben werden. Im Rahmen einer Charakterisierung verschiedener Modellvarianten zeigt sich, dass ein Modell zweiter Ordnung die beste Wahl hinsichtlich Rechenzeit und Komplexität darstellt. Die entsprechende Variante verwendet jeweils eine Zustandsvariable für Innen- und Außenbauteile plus einen separaten thermischen Widerstand für die Abbildung der Fenster.

Die Untersuchungen von drei Anwendungsfällen zeigen, dass sich das Software-Framework zur Simulation großer Liegenschaften bei geringer Datenlage eignet. Am Anwendungsfall einer der analysierten Forschungsliegenschaften ergeben sich für Simulation und Messung des zeitaufgelösten Wärmebedarfs aller Gebäude Abweichungen von unter 3 % für den Jahreswärmebedarf. Auch der zeitliche Verlauf wird mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,894 gut wiedergegeben. Alle Teile der Methodik erfüllen die Kriterien der Verifizierbarkeit, Genauigkeit, Transparenz, Stabilität und Flexibilität. Sie können einen Beitrag im Bereich der urbanen Energiesystemmodellierung leisten, wenn die Zielstellung des Anwendungsfalls die Nutzung einer archetypischen Parametrierung und von vereinfachten Gebäudemodellen zulässt. Die Parametrierung ist im Rahmen des Software-Frameworks in der Python-Bibliothek TEASER umgesetzt. Die reduzierten Gebäudemodelle sind Teil der Modelica-Bibliothek AixLib. Beide Bibliotheken stehen offen und frei unter <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER> und <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib> zur Verfügung.

Abstract

This thesis presents a methodology and a software framework for dynamic modeling and heat demand calculations of building stocks using basic input data. Such heat demands build the foundation for the investigation of innovative efficiency measures, such as advanced control concepts and optimal design of heat supply systems. The methodology includes simplified dynamic building performance models that fulfill the requirements regarding computational effort and model complexity on urban scale. An accompanying model parameterization routine on the basis of accessible input data allows the efficient simulation of entire building stocks. Both parts, parameterization and modelling, are embedded in a workflow automation process and implemented using the programming language Python and the modelling language Modelica, respectively.

The parameterization makes use of archetypes for residential buildings, offices and institute buildings, which allows for statistical enrichment of individual datasets for the given building types. The archetype for institute buildings is developed based on statistical analyses of two research centers. The simplified building performance models are based on a reduced thermal network model, which is described in the German Guideline VDI 6007-1 (2015). As part of a characterization of different model types, the use of a second order model including two state variables proves to be the best choice concerning efficiency and complexity. This model uses of one state variable each for interior and exterior building elements in addition to one separate resistance for windows.

The investigations of three use cases show the framework's ability to simulate entire building stocks using only basic input data. The use case of one of the studied research centers results in differences between simulation and measurement of less than 3 % in the annual heat demand of all buildings. The simulation can in addition capture the dynamic behavior of the heat demand, what is highlighted by a coefficient of determination of 0,894. All parts of the methodology comply with the requirements regarding verification, accuracy, transparency, stability and flexibility. They can contribute to the field of urban energy modelling, if the individual application allows the use of archetypes and reduced order models. The parameterization is implemented in the Python library TEASER, the reduced order building models are integrated into the Modelica library AixLib. Both libraries are available open source at <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER> and <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xvii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Ansätze zur Modellierung und Parametrierung	5
2.2 Beschreibung des bauphysikalischen Verhaltens von Gebäuden	9
2.2.1 Analytische Ansätze	10
2.2.2 Numerische Ansätze	16
3 Stand der Forschung	19
3.1 Typologisierung von Gebäuden	19
3.2 Reduzierte Gebäudemodelle	22
3.2.1 Parameterbestimmung	23
3.2.2 Topologie	26
3.2.3 Normierte Modelle und Berechnungsverfahren	30
3.3 Energiebedarfsrechnungen für Stadtquartiere	32
4 Aufbau parametrierbarer Gebäudemodelle	39
4.1 Parametrierung - TEASER	40
4.1.1 Archetypen	40
4.1.1.1 Wohngebäude und energetische Stadtraumtypen	41
4.1.1.2 Bürogebäude	45
4.1.1.3 Institutsgebäude	47
4.1.2 Datenflussskette	54
4.2 Modellierung - AixLib	56
4.2.1 Reduziertes Gebäudemodell	57
4.2.1.1 Topologie	57
4.2.1.2 Linearisierungen	60
4.2.1.3 Äquivalente Außentemperatur	62
4.2.1.4 Implementierung	64
4.2.2 Charakterisierung	65
4.2.3 Verifizierung	73
4.2.4 Zentrale Lüftungstechnik	80

4.3	Automation - CampFlow	84
4.3.1	Simulationsautomation	84
4.3.2	Zeitreihenanalyse und Auswertung	85
5	Anwendung	91
5.1	Lastverschiebung im Wohnquartier	91
5.2	Liegenschaft mit Forschungsgebäuden	94
5.3	Stadtteil mit Mischnutzung	103
6	Diskussion der Ergebnisse	109
7	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis	117
A	Herleitung der Parameterberechnung	141
B	Parametrierung	143
C	Modelltopologien	145
D	Charakterisierung	149
E	Verifizierung	151
F	Datenflusskette	157

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

A	Wärmetransfermatrix	[W/K]
<i>A</i>	Fläche	[m ²]
<i>a</i>	charakteristische Wärmeeaufnahme	[W/(m ² K)]
<i>b</i>	Anzahl	[-]
<i>Bi</i>	Biot-Zahl	[-]
C	Matrix aus Wärmekapazitäten	[J/K]
<i>C</i>	thermische Kapazität	[J/K]
<i>c</i>	spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]
<i>D</i>	dimensionslose Eindringtiefe	[-]
<i>d</i>	Dicke	[m]
<i>d_{eff}</i>	periodische Eindringtiefe	[m]
<i>e</i>	Eulersche Zahl= 2,718	[-]
E_v	Vektor aus Strahlungsintensitäten verschiedener Orientierungen	[W/m ²]
f_{exp}	Explizite Form von f_{imp}	[-]
f_{imp}	Vektorielle implizite Funktion einer beliebigen Form	[-]
<i>Fo</i>	Fourier-Zahl	[-]
<i>f_P</i>	Primärenergiefaktor	[-]
g	Vektorielle Funktion einer beliebigen Form	[-]
<i>g</i>	g-Wert	[-]
<i>Ḣ</i>	Enthalpiestrom	[W]
<i>H</i>	Strahlungsintensität	[W/m ²]
<i>h</i>	spezifische Enthalpie	[J/kg]
<i>i</i>	Laufvariable	[-]
<i>j</i>	imaginäre Einheit = $\sqrt{-1}$	[-]
<i>k</i>	Laufvariable	[-]
<i>kor_g</i>	Korrekturwert für schrägen Strahlungseinfall	[-]
<i>l</i>	Höhe	[m]
<i>N</i>	Infiltrationsrate	[h ⁻¹]
<i>n</i>	Laufvariable	[-]

p	linearer Korrelationsfaktor	[–]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
$\dot{q}$	spezifischer Wärmestrom	[W/m ²]
$\tilde{q}$	komplexer spezifischer Wärmestrom	[W/m ²]
q	konstanter Korrelationsfaktor	[–]
R	thermischer Widerstand	[K/W]
R^2	Bestimmtheitsmaß	[–]
S	Übertragungsfunktion eines Vierpols	[–]
s	Standardabweichung	[–]
t	zeitliche Laufvariable	[s]
U	U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m ² K)]
u	zeitlich veränderliche Spannung	[V]
$\mathbf{u}$	Anregungsvektor	[W]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m ³ /s]
V	Volumen	[m ³]
$\mathbf{w}_v$	Vektor von Gewichtsfaktoren nach Orientierungen	[–]
X	absolute Feuchte	[kg/kg]
x	räumliche Laufvariable	[m]
y	algebraische Variable	[–]
z	Zustandsvariable	[–]
$\mathbf{z}$	Vektor von Zustandsvariablen	[–]

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² K)]
β	Anteil	[–]
Δ	Differenz	[–]
ϵ	Emissionsgrad	[–]
η	Wirkungsgrad	[–]
γ	Neigungswinkel der Außenfläche gegen die Horizontale	[°]
κ	Zugänglichkeitsfaktor	[–]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]
μ	Absorptionskoeffizient	[–]
ν	Deckungsbeitrag	[–]
ω	Kreisfrequenz	[s ^{–1}]
Π	Wurzel der Verweilzeit	[s ^{1/2}]
π	Kreiszahl = 3,14	[–]

ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$	[W/(m ² K ⁴)]
τ	Zeitkonstante	[s]
θ	Temperatur	[K]
$\boldsymbol{\theta}$	Vektor von Temperaturen	[K]
v	Orientierung	[°]
ξ	Einflussfaktor	[–]
ζ	Einfallswinkel der solaren Strahlung	[°]

Operatoren

$\dot{}$	zeitliche Ableitung
$\overline{}$	Realteil
$\ddot{}$	komplexe Zahl

Subskripte

Ab	Abschnitt
ABL	Abluft
AbIV	Abluftventilator
Abs	Absorption
Allg	Allgemein
Anr	Anregung
Atm	Atmosphäre
aus	außen
AUL	Außenluft
B	Befeuchter
Dach	Dachelemente
dom	dominant
eff	effektiv
el	elektrisch
Eq	äquivalente Außentemperatur
Ext	opake Außenbauteile
Fen	transparente Außenbauteile, Fenster
Flur	bodenberührende Außenbauteile
FOL	Fortluft
ges	gesamt
Geschoss	Geschoss
heizen	heizen

IG	interne Gewinne bzw. Lasten
Inf	Infiltration und Ventilation
in	innen
Inst	Institut
Int	interne Bauteile, Innenwände
kühlen	kühlen
K	Kühler
kon	konvektiv
Luft	Luft
m	mit thermischer Masse
maximal	maximal
Mess	Messung
mittel	mittel
Nachb	Nachbar
NH	Nachheizer
o	ohne thermische Masse
OG	Oberer Grenzwert
rad	strahlend
Ref	Referenz
Rest	nicht effektiver Teil eines Außenbauteils
Schichten	Schichten
Sim	Simulation
Sol	solare Strahlung
th	thermisch
UG	Unterer Grenzwert
V	Verdampfung
Verw	Verweil
VH	Vorheizer
Wand	Wand
Wasser	Wasser
Zone	Thermische Zone
ZUL	Zuluft
ZulV	Zuluftventilator

Abkürzungen

ACF	Autocorrelation Function
-----	--------------------------

ADF	Augmented Dickey-Fuller Test
API	Application Programming Interface
BAK	Baualtersklasse
BF	bebaute Fläche nach DIN 277-1 (2016)
BGF	Bruttogrundfläche nach DIN 277-1 (2016)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BPS	Building Performance Simulation
BWZK	Bauwerkszuordnungskatalog, Bauministerkonferenz (2010)
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Coefficient of Performance
CV(RMSD)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Deviation
DAE	Differential Algebraic Equations
EE	Erneuerbare Energien
EST	Energetische Stadtraumtypen
FEM	Finite-Elemente-Methode
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
KGF	Konstruktionsgrundfläche nach DIN 277-1 (2016)
KPSS	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin Test
MAD	Mean Absolute Deviation
MAPD	Mean Absolute Percentage Deviation
NGF	Nettogrundfläche nach DIN 277-1 (2016)
NRF	Nettoraumfläche, novellierte Bezeichnung der NGF nach DIN 277-1 (2016)
NRMSD	Normalized Root Mean Square Deviation
OOMS	Object-Oriented Modeling and Simulation
OSM	OpenStreetMap
PE	Primärenergie
PRD	Prediction Realization Diagram
RMSD	Root Mean Square Deviation
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
UBEM	Urban Building Energy Model
UML	Unified Modeling Language
WRG	Wärmerückgewinnung

Abbildungsverzeichnis

1.1 Einsatz von Werkzeugketten zur Untersuchung verschiedener Fragestellungen im Rahmen von Zukunftsszenarien.	2
2.1 Wärmeübertragung an einer Wandschicht nach Leppmann (2014).	7
2.2 Vierpol mit einer zweifachen T-Schaltung für eine Wand.	7
2.3 Zusammenhang von effektiver Dicke, den bauphysikalischen Eigenschaften und der Anregung.	15
4.1 Zonenzuweisung der Hüllflächen nach Schlosser (2012).	47
4.2 Mittlerer Laborflächenanteil pro BWZK-Nummer der Gebäude des Forschungszentrums Jülich bezogen auf die NGF (Mehrfeld 2014).	50
4.3 Nettogrundfläche zu Außenwandfläche Institutsgebäude Allgemein.	52
4.4 Nettogrundfläche zu Außenwandfläche Institutsgebäude 4 und 8.	52
4.5 Schematischer Programmablauf der TEASER Module (Remmen u. a. 2017).	54
4.6 Thermisches Netzwerk des Zwei-Elemente-Modells der AixLib.	58
4.7 Definition der äquivalenten Außentemperatur als Kombination aus Außentemperatur, langwelliger und kurzwelliger Einstrahlung auf die Außenbauteile.	63
4.8 Hierarchisches UML Klassendiagramm mit Aggregationsbeziehungen und Vererbung der AixLib Modelle im Kontext reduzierter Gebäudemodelle.	64
4.9 Bode-Diagramm bei externer Anregung der vier Modelle für einen schweren Testraum nach EnEV 2009 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.	67
4.10 Bode-Diagramm bei interner Anregung der vier Modelle für einen schweren Testraum nach EnEV 2009 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.	68
4.11 Bode-Diagramm bei externer Anregung der vier Modelle für einen leichten Testraum nach WSchV 1984 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.	69
4.12 Bode-Diagramm bei interner Anregung der vier Modelle für einen leichten Testraum nach WSchV 1984 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.	70
4.13 Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen mittelschweren Testraum.	71
4.14 Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen durchschnittlich schweren Testraum mit doppelter Außenwandfläche.	72
4.15 Aufbau des ASHRAE 140 (2007) Testraums.	75
4.16 Vergleich des Jahreswärmebedarfs des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	75

4.17 Vergleich der maximalen Heizlasten des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	76
4.18 Verläufe der Heizlasten des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	78
4.19 Aufbau eines Einfamilienhauses für Vergleichsrechnungen nach Jahangiri (2017).	78
4.20 Exemplarischer Verlauf des Wärmebedarfs des Zwei-Kapazitäten-Modells im Vergleich zu IDA ICE für ein Einfamilienhaus für 150 h nach Leppmann (2014).	79
4.22 Bilanzraum für den Zustand Nur Heizen aus Mehrfeld (2014).	81
4.21 Schematischer Aufbau einer zentralen raumluftechnischen Anlage nach DIN V 18599-3 (2016) aus Mehrfeld (2014).	81
4.23 Bilanzraum für den Zustand Nur Kühlen aus Mehrfeld (2014).	82
4.24 Bilanzraum für den Zustand Entfeuchten aus Mehrfeld (2014).	82
4.25 Bilanzraum für den Zustand Befeuchten und Heizen aus Mehrfeld (2014).	83
4.26 Bilanzraum für den Zustand Befeuchten und Kühlen aus Mehrfeld (2014).	83
4.27 Schematischer Programmablauf von CampFlow und Schnittstelle zu TEASER.	85
5.1 Übersicht über den im Annex 60 (Wetter u. van Treeck 2017) entwickelten DESTEST Vergleichsfall mit 24 Gebäuden, Wärmenetz und Wärmeerzeugerkreis.	92
5.2 Verlauf der Speichertemperatur über einen Zeitraum von 750 Stunden für einen Deckungsbeitrag erneuerbarer Energien von $\nu = 100\%$	93
5.3 Übersicht des Forschungszentrums Jülich.	94
5.4 Anteil an Nettogrundfläche pro Baualterklasse der Gebäude des Forschungszentrums Jülich (Remmen u. a. 2017).	95
5.5 Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Jahres 2013 für das Forschungszentrum Jülich in täglicher Auflösung.	96
5.6 Prognose-Realisations-Diagramm mit gemessenem Wärmeverbrauch und simuliertem Wärmebedarf für das Forschungszentrum Jülich.	97
5.7 ACF-Diagramm der Residuen von Messung und Simulation des Wärmebedarfs für das Forschungszentrum Jülich mit 200 Stützpunkten.	98
5.8 Kumulatives Periodogramm der Residuen von Messung und Simulation des Wärmebedarfs für das Forschungszentrum Jülich.	99
5.9 Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Gebäudes 0710, Gebäudeteil V.	100
5.10 Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Gebäudes 1080.	101
5.11 Jahresdauerlinien des Wärmebedarfs des Forschungszentrums Jülich für 5 Referenzjahre bei einer jährlichen Sanierungsrate von 1,7%.	102
5.12 Kartografische Ansicht mit markiertem Ausschnitt von Bad Godesberg.	103
5.13 Ausschnitt der 3D-Ansicht einer exemplarischen Wärmelastkarte für Bad Godesberg.	105
5.14 Ausschnitt aus Bad Godesberg mit Straßennetz- und Wärmenetztopologie.	106

5.15 Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis der Verwendung von Gas.	106
5.16 Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis der Verwendung von Strom.	107
5.17 Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis einer diversifizierten Energieversorgung.	108
B.1 Anteil der einzelnen für die Typologisierung relevanten BWZK-Klassen an der NGF aller relevanten BWZK-Klassen für den Campus Melaten der RWTH Aachen.	143
B.2 Anteil der einzelnen für die Typologisierung relevanten BWZK-Klassen an der NGF aller relevanten BWZK-Klassen für das Forschungszentrum Jülich.	143
C.1 Thermisches Netzwerk des Ein-Element-Modells der AixLib.	145
C.2 Thermisches Netzwerk des Drei-Elemente-Modells der AixLib.	146
C.3 Thermisches Netzwerk des Vier-Elemente-Modells der AixLib.	147
D.1 Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen schweren Testraum.	149
D.2 Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen leichten Testraum.	149
E.1 Vergleich des Jahreskältebedarfs des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	151
E.2 Vergleich der maximalen Kühllasten des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	151
E.3 Vergleich der Verläufe der Heizlasten eines Referenztages mit leichtem Testfall des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	152
E.4 Vergleich der maximalen Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	152
E.5 Vergleich der gemittelten Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	153
E.6 Vergleich der minimalen Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	153
E.7 Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit leichtem Testfall 600 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	154

E.8	Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit leichtem Testfall 650 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	154
E.9	Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit schwerem Testfall 900 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	155
E.10	Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit schwerem Testfall 950 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.	155
F.1	UML Klassendiagramm mit Vererbung der Archetypen im TEASER Modul Datenanreicherung.	157
F.2	UML Klassendiagramm mit Aggregationen und Vererbung des Moduls Datenverarbeitung in TEASER.	157
F.3	UML Klassendiagramm mit Aggregationen und Vererbung des Moduls Modellerstellung in TEASER.	157
F.4	Ablaufdiagramm der Prozesskette.	158

Tabellenverzeichnis

2.1 Typische Zeitkonstanten in der dynamischen Gebäudesimulation. 15

3.1 Relevante Arbeiten zur Erzeugung von Wärmebedarfsprofilen für Stadtquartiere. . . . 38

4.1 Korrelationsfaktoren nach Loga u. a. (2005) in vereinfachter Form ohne optionale Parameter. 43

4.2 Beschreibungen und Korrelationsfaktoren der energetischen Stadtraumtypen nach Hegger u. Dettmar (2014). 45

4.3 Zonen eines typischen Bürogebäudes nach Hillebrand u. a. (2012). 46

4.4 Relevante Gebäudeklassen für Institutsgebäude nach Bauwerkszuordnungskatalog. . 48

4.5 Anzahl und Aufteilung der erfassten Gebäude des Forschungszentrums Jülich und des Campus Melaten der RWTH Aachen nach BAK und Nutzungsart. 49

4.6 Anteil der Zonen an der NGF der archetypischen Institutsgebäude. 50

4.7 Funktionen der zentralen Lüftungstechnik nach den gebildeten Gruppen für Institutsgebäude. 53

4.8 Maximale und mittlere Abweichungen der Temperatur in K zwischen Zwei- und Vier-Elemente-Modell für verschiedene Testräume. 71

4.9 Übersicht ASHRAE 140 (2007) Testfälle. 74

4.10 Gesamte thermische Masse und effektive thermische Masse der Außenwandelemente für leichten und schweren Testfall in J/K. 74

4.11 Übersicht über die verwendeten Methoden der Zeitreihenanalyse. 89

5.1 Systembeschreibung des verwendeten Rechners und der installierten Programmversionen. 91

5.2 Vergleich der Regelungsstrategien ohne Signal der erneuerbaren Energien, mit Signal und einem Deckungsbeitrag ν von 60 %, 80 % und 100 %. 93

5.3 Ausprägungen und Ergebnisse des χ^2 -Richtungstests für Messung und Simulation für das Forschungszentrum Jülich. 98

1 Einleitung

Eingerahmt in internationale Vereinbarungen wie das Pariser Klimaabkommen (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2015) kommt anthropogenen Treibhausgasemissionen eine hervorgehobene Rolle in der derzeitigen Entwicklung von Technologien zu. Vor diesem Hintergrund nimmt die Energieeffizienz eine Schlüsselrolle bei der Neuausrichtung der Energieversorgung ein (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2011). Insbesondere die Wärmewende bietet zusätzliches Effizienzpotenzial und erfordert eine stärkere Vernetzung der Energieversorgungsnetze (Roland Berger GmbH 2017). In Kombination mit der zunehmenden Urbanisierung (The World Bank 2017) und den assoziierten Heizwärmebedarfen (Deutsche Energie-Agentur GmbH 2015) ergeben sich somit signifikante Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Betrachtung von Stadtquartieren und ganzen Städten.

Auf urbaner Ebene stellen die Gebäude vorrangig Verbraucher dar, die als Wärmelastprofile dem Energiesystem aufgeprägt werden (Nielsen 2005; Kämpf u. Robinson 2007). Als Werkzeug zur Erstellung solcher Profile für zukünftige Bedarfe oder geplante Stadtquartiere eignen sich dynamische Gebäudesimulationen (Building Performance Simulation, BPS), die bereits für viele Fragestellungen eingesetzt werden (Hensen u. Lamberts 2011). Viele Konzepte zur Energieeffizienz wie die Einbindung von Wärmespeichern oder innovativen Regelungskonzepten erfordern eine zeitliche Auflösung der Wärmelastprofile auf Tages- oder Stundenbasis. Hierzu ist es notwendig, die Dynamik der Wärmespeicherung in der Gebäudemasse abzubilden. Als Herausforderungen stellen sich dabei die aufgrund der Größe und Komplexität von Stadtquartieren unvollständige Datenlage sowie der zeitliche Rahmen entsprechender Untersuchungen. Hierfür ist die Entwicklung integraler Werkzeugketten notwendig, die eine flexible Adaption auf die Aufgabenstellung und Datenlage erlauben. Sie ermöglichen eine umfassende Untersuchung verschiedenster Konzepte wie die Berücksichtigung unterschiedlicher Sanierungsvarianten der Gebäude auf die Auslegung und Betriebsführung der Wärmeerzeuger und die Verschiebung thermischer Lasten zwischen den Energieversorgungsnetzen. Die Kombination dieser Maßnahmen bildet wie in Abbildung 1.1 gezeigt die Grundlage, auf der verschiedene Pfade zur effizienten Energieversorgung der Stadt der Zukunft erarbeitet werden können. Konkretisieren lassen sich entsprechende Maßnahmen und Problemstellungen an drei Anwendungsfällen:

Der DESTEST Vergleichsfall entstand im Rahmen des Projektes Annex 60 (Wetter u. van Treeck 2017), welches die Entwicklung neuartiger Simulationswerkzeuge für Gebäude- und urbane Energiesysteme zum Ziel hatte. Dieser Vergleichsfall besteht aus 24 Gebäuden vornehmlicher Wohnnutzung, für die sowohl Zonierung als auch Gebäudephysik genau definiert werden. Die Gebäude

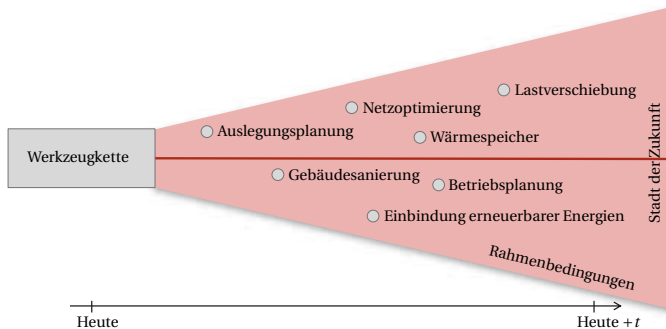


Abbildung 1.1: Einsatz von Werkzeugketten zur Untersuchung verschiedener Fragestellungen im Rahmen von Zukunftsszenarien.

sind über ein Wärmenetz miteinander verbunden. Anhand des DESTEST Stadtquartiers kann eine innovative zentrale Wärmeversorgung über eine Wärmepumpe in Kombination mit einem Wasserspeicher und einer Regelung unter Einbeziehung des zeitlich abhängigen Angebots an regenerativ erzeugtem Strom getestet und bewertet werden.

Das Forschungszentrum Jülich ist mit 120 Gebäuden eines der größten Forschungseinrichtungen in Deutschland (Steiner 2014). Die Betrachtung von Forschungsliegenschaften ist aufgrund des vielfachen Energiebedarfs von Institutsgebäuden verglichen zu Bürogebäuden von besonderem Interesse (David u. a. 2013). Dieser Energiebedarf wird vorrangig durch gesteigerte Anforderungen an die Klimatisierung von Labor- und Forschungsflächen bestimmt. Im Rahmen der städtebaulichen Masterplanung des Campus des Forschungszentrums, zu dem ein Wärmenetz und ein zentraler Fernwärmeanschluss gehören, stellt sich die Aufgabe der zukünftigen effizienten Energieversorgung. Hierbei ergeben sich Fragestellungen hinsichtlich der zu erwartenden Wärmebedarfseinsparungen bei einer spezifischen Sanierungsrate und welche Auswirkungen diese auf die Konzeption einer eigenständigen Wärmeversorgung haben. Die Datenlage ist hinsichtlich Grunddaten zu den Gebäuden wie Grundfläche, Baualter und Nutzungsart gut, spezifischere Werte sind nicht erfasst worden.

Bad Godesberg ist ein Stadtbezirk der Bundesstadt Bonn mit rund 73000 Einwohnern (Statistikstelle der Bundesstadt Bonn 2017). Der Bezirk ist vornehmlich von Wohnbebauung dominiert, die durch Geschäfte und Bürogebäude ergänzt wird. Bad Godesberg diente als prototypischer Vorgänger für die vollständige Erfassung geografischer und semantischer Daten von Nordrhein-Westfalen (Bezirksregierung Köln 2017, Lizenz: <https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>). Er war einer der ersten Bezirke, für den ein Datensatz von insgesamt 2897 Gebäuden inklusive Gebäudegrundflächen und Gebäudehöhen sowie Außenwandflächen im CityGML-Format frei zur Verfügung gestellt wurde. Auf Basis dieses Datensatzes sowie frei verfügbarer OpenStreetMap-Daten kann für Bad-

Godesberg eine Wärmelastkarte erstellt und eine beispielhafte Auslegung eines Wärmenetzes erfolgen.

Die Entwicklung entsprechender Werkzeuge für Wärmelastprofile bei unvollständiger Datenlage ist Gegenstand der Forschung und lässt sich mit zwei Forschungsthemen umreißen. Das erste Thema betrifft die Lücke zwischen einfachen, statischen Berechnungsverfahren und detaillierten dynamischen Gebäudesimulationen (Crabb u. a. 1987). Während statische Verfahren schnell anzuwenden sind, jedoch keine Aussage über dynamische Zustände zulassen, sind etablierte Simulationsverfahren komplex, zeitaufwändig und benötigen eine hohe Informationsdichte (Nielsen 2005; Keirstead u. a. 2012; Kim u. a. 2013; Hillebrand u. a. 2014; Reinhart u. Cerezo Davila 2016). Ziel dieser Arbeit ist es daher, geeignete vereinfachte und dennoch dynamische Rechenverfahren weiterzuentwickeln. Das zweite Thema hat die meist unvollständige und zwischen den Anwendungsfällen stark unterschiedliche Datenlage im Fokus (Swan u. Ugursal 2009). Dies betrifft die Wahl einer angepassten Parametrierung und Modellierung, die den unterschiedlichen Datenständen Rechnung trägt und die typologische Anreicherung unvollständiger Datenlagen erlaubt (Nielsen 2005; Kämpf u. Robinson 2007; Robinson 2011; Duanmu u. a. 2013; Kim u. a. 2013; Hillebrand u. a. 2014). Die typologische Anreicherung bezeichnet dabei die Verwendung statistischer Daten zu großen Gebäudebeständen, die zur Vervollständigung von Datensätzen in konkreten Anwendungsfällen verwendet werden können. Dies soll in dieser Arbeit Beachtung finden, in dem die Ansätze hinsichtlich der Datenlage anpassbar sind und auch die Verwendung weniger grundlegender Daten unterstützen.

Ziel dieser Arbeit ist somit die Entwicklung parametrierbarer Gebäudemodelle zur Erstellung von Wärmebedarfsprofilen für Stadtquartiere. Dies beinhaltet sowohl die Entwicklung vereinfachter, dynamischer Gebäudemodelle als auch die Verwendung von Ansätzen, die eine einfache Parametrierung der Modelle auf Basis unterschiedlicher und unvollständiger Datenlagen mit Hilfe typologischer Verfahren erlaubt. Zusätzlich muss die Werkzeugkette weitgehend automatisiert sein, um die Untersuchung großer Gebäudebestände zu ermöglichen. Sie soll genutzt werden, um die skizzierten Anwendungsfälle zu modellieren. Hierzu muss die Werkzeugkette für verschieden große Gebäudegruppen skalierbar sein oder, wenn möglich, universell nutzbare Modelle und Methoden enthalten. Nur so lässt sich die Anwendbarkeit auf eine Vielzahl von Fragestellungen sicherstellen.

Um den genannten Teilaspekten der Werkzeugkette gerecht werden zu können, empfiehlt sich eine klare Trennung der Bereiche Parametrierung, Modellierung und Automation. Für jeden der Bereiche lassen sich getrennt Anforderungen definieren:

Die Parametrierung muss:

- Die Abbildung der Gebäudetypen für die Anwendungsfälle wie Wohnnutzung, Bürogebäude und Institutsgebäude ermöglichen. Aufgrund der klimatechnischen Anforderungen an die Labor- und Forschungsflächen müssen Instituts- und Bürogebäude getrennt betrachtet werden (David u. a. 2013).

- Auf Basis weniger grundlegender Daten machbar sein, die leicht zu erfassen sind und über typologische Ansätze vervollständigt werden können.
- So gestaltet sein, dass sie die Nutzung zusätzlicher Daten ermöglicht, falls diese vorhanden sind.
- Modular aufgebaut sein, sodass sie für verschiedene Modelle verwendbar ist.

Die Modellierung erfordert:

- Die Verwendung vereinfachter Ansätze, die alle relevanten Effekte und Einflüsse berücksichtigen können.
- Eine geringe Anzahl an Parametern, die sich automatisiert bestimmen lassen.
- Die klare Definition von Schnittstellen zu den weiteren Elementen der Werkzeugkette und insbesondere zu weiteren Modellen für urbane Energiesysteme.
- Eine explizite Berücksichtigung der Dynamiken, um so stündlich aufgelöste Ergebnisse bereitstellen zu können.

Die Automation bedingt:

- Klare Definitionen von Modulen und deren Aufgaben sowie der Schnittstellen zwischen den Modulen.
- Die Nutzung weniger bzw. aufeinander abgestimmter Modellierungs- und Programmiersprachen.
- Die Verwendung etablierter Verfahren der Softwareentwicklung zur Sicherstellung der Qualität und Wartbarkeit bzw. Erweiterbarkeit der Werkzeugkette.

Alle drei Bereiche müssen des weiteren aufeinander abgestimmt sein, um ein Ungleichgewicht hinsichtlich des Aufwandes und der Detailtiefe zu vermeiden.

Der Aufbau der Arbeit ergibt sich aus den drei genannten Teilaspekten. Nach der Erörterung der möglichen Modellierungsansätze erfolgt in den Grundlagen eine Beschreibung der Ansätze für das bauphysikalische Verhalten von Gebäuden. Das zweite Kapitel fasst den Stand der Forschung im Bereich der Parametrierung und der reduzierten Gebäudemodelle zusammen und führt die wichtigsten Arbeiten bezüglich Energiebedarfsrechnungen für Stadtquartiere auf. Im anschließenden Kapitel wird die umgesetzte Methodik für die drei Bereiche Parametrierung, Modellierung und Automation vorgestellt. Aufbauend auf der Methodik werden nachfolgend die drei skizzierten Anwendungsfälle untersucht und die erzielten Ergebnisse besprochen. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik diskutiert und eine Zusammenfassung der Arbeit gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen gelegt, die zum späteren Verständnis der Parameterberechnung und Modellierung notwendig sind. Dazu werden zunächst grundlegende Begriffe definiert sowie verschiedene Klassen von Ansätzen zur Parametrierung und Modellierung vorgestellt. Darauf aufbauend werden analytische und numerische Verfahren zur Beschreibung des bauphysikalischen Verhaltens von Gebäuden beschrieben, welche die Basis der Parameterberechnung und Modellierung in dieser Arbeit bilden. Der Fokus liegt dabei auf den Herausforderungen, die sich aus der Theorie ergeben und die in der Methodik beachtet werden müssen.

2.1 Ansätze zur Modellierung und Parametrierung

Im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten vereinfachten Gebäudesimulationen lassen sich Gebäude in drei Ebenen unterteilen:

Thermische Zonen bilden die kleinste räumliche Berechnungseinheit eines Gebäudes ab. Eine Zone umfasst alle Bereiche, die sich thermisch ähnlich verhalten, durch gleiche Nutzungsrandbedingungen gekennzeichnet sind und hinsichtlich Konditionierung keine relevanten Unterschiede aufweisen (DIN V 18599-1 2016). Im einfachsten Fall wird ein Gebäude durch eine einzelne thermische Zone beschrieben (Schoch 2013).

Wände beschreiben flächige thermische Massen wählbarer Orientierung, in denen Wärmeleitung und -speicherung stattfindet. Je nach Detaillierungsgrad des Ansatzes zur Gebäudesimulation werden mehrere Wände einer Zone zu Ersatzelementen zusammengefasst.

Schichten bezeichnen zusammenhängende Bereiche innerhalb einer Wand, welche gleiche bauphysikalische Eigenschaften aufweisen. Analog zu Wänden lassen sie sich zu Ersatzelementen zusammenfassen, wenn eine Abbildung des dynamischen Verhaltens in vereinfachter Form ausreichend und der Temperaturverlauf innerhalb einer Wand nicht von Interesse ist (Fraisse u. a. 2002).

Auf welcher Ebene ein Ansatz zur Modellierung und Parametrierung ansetzt oder ob das Gebäude an sich als kleinste Einheit betrachtet wird, hängt vom jeweiligen Modell sowie der Aufgabenstellung ab. Die Ansätze zur Bestimmung der Parameter können in verschiedene Kategorien unterteilt werden (Hensen u. Lamberts 2011; Kramer u. a. 2012; Tardioli u. a. 2015):

Black-Box-Modelle basieren rein auf Messdaten und bilden diese durch Funktionen und Parameter ohne physikalischen Bezug ab. Im Rahmen dieser Arbeit eignen sich Black-Box-Modelle nicht, da sich Änderungen am System, wie z. B. eine Sanierung, nicht ohne entsprechende Messdaten modellieren lassen.

White-Box-Modelle basieren auf einer physikalischen Beschreibung des Systems, alle Parameter haben eine physikalische Bedeutung. Nach Kämpf u. Robinson (2007) und Tardioli u. a. (2015) sind solche Modelle zu aufwändig für Stadtquartierssimulationen im Sinne der Datenanforderungen und der Rechenzeit, da die detaillierte Erfassung und Modellierung jedes Gebäudes notwendig wäre.

Grey-Box-Modelle sind eine hybride Form von physikalischen und empirischen Ansätzen und enthalten sowohl physikalisch interpretierbare als auch nicht-physikalische Parameter. Sie variieren von physikalischen Modellen mit einer geringen Anzahl geschätzter Parameter bis zu einer minimalen physikalischen Basis und vorrangig experimentell bestimmten Eigenschaften.

Eine weitere Unterteilung basiert auf der Art des Modellierungsansatzes und steht mit den Kategorien der Parameterbestimmung im Zusammenhang (Hensen u. Lamberts 2011):

Regressionsansätze sind statistische bzw. empirische Verfahren, die die Beziehungen zwischen den Unbekannten und Eingangsgrößen modellieren. Sie werden im Bereich der Black-Box-Modelle (lineare Regression, Tardioli u. a. 2015 und Support Vector Machine, Li u. a. 2009) und zum Teil für Grey-Box-Modelle (Neuronale Netzwerke, Li u. a. 2009) eingesetzt.

Wärmebilanzmethoden stellen die Einhaltung der Energieerhaltung sicher und beschreiben eine ganze Gruppe unterschiedlicher Modelle und Ansätze (Hensen u. Lamberts 2011). Sie werden im Bereich der White-Box- und Grey-Box-Modellierung eingesetzt (Kämpf u. Robinson 2007; Clarke 2001).

Gewichtsfaktormethoden beruhen auf Transformationen des Gleichungssystems zur Identifikation der dominanten Parameter (Hensen u. Lamberts 2011; VDI 6020-1 2001) und werden den White-Box und Grey-Box-Modellen zugesprochen (Hensen u. Lamberts 2011). Die Admittance Method (Milbank u. Harrington-Lynn 1974) und Thermal Response Factors (Mitalas u. Stephenson 1967; Crabb u. a. 1987) basieren auf diesen Methoden. Die Genauigkeit wird durch die Anzahl an Faktoren bestimmt, die a priori festgelegt werden muss (Gouda u. a. 2002).

Thermische Netzwerke sind aus der Finite-Volumen-Methode abgeleitet und eine räumlich diskretisierte Form der Wärmebilanzmethoden (Hensen u. Lamberts 2011). Sie können flexibel als White- und Grey-Box-Modelle eingesetzt und auf den Anwendungsfall angepasst werden, ohne eine grundsätzliche Änderung des Ansatzes zu bewirken. Sie bilden in Kombination mit einem Grey-Box-Ansatz zur Parametrierung die Grundlage der Modellierung im Rahmen dieser Arbeit und werden im Folgenden im Detail vorgestellt.

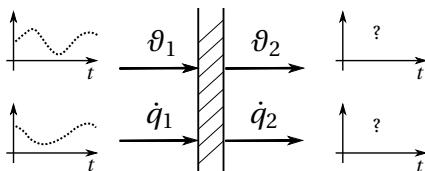


Abbildung 2.1: Wärmeübertragung an einer Wandschicht nach Leppmann (2014).

Thermische Netzwerke koppeln im Rahmen vereinfachter Ansätze wie in Abbildung 2.1 gezeigt die Eingangsgrößen Temperatur ϑ_1 und Wärmestrom $\dot{q}_1$ auf der einen Seite einer Wand mit den Ausgangsgrößen ϑ_2 und $\dot{q}_2$ auf der anderen Seite der Wand. Sie basieren auf in Reihe geschalteten thermischen Widerständen R und thermischen Kapazitäten C in Abhängigkeit der Wand- bzw. Schichtdicke d , der Wärmeleitfähigkeit λ , der spezifischen Wärmekapazität c und der Dichte ρ in der Form

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \text{und} \quad C = c \cdot \rho \cdot d. \quad (2.1)$$

So ergibt sich für jede Wand ein Vierpol bzw. Zweitor, wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Eine einfache T-Schaltung besteht aus zwei Widerständen und einer Kapazität, die abwechselnd in Reihe geschaltet werden. Im deutschsprachigen Raum wurden thermische Netzwerkmodelle durch die Arbeiten von Beuken (1936) geprägt, sie werden häufig auch als Beuken-Modell bezeichnet (Rouvel u. Zimmermann 2004). Eine ausführliche Diskussion der Theorie findet sich in Clarke (2001), Davies (2004) und Hensen u. Lamberts (2011).

An jedem Knoten, der die einzelnen Elemente miteinander verbindet (Abbildung 2.2), kann eine Temperatur bestimmt werden. Die T-Schaltungen müssen dabei nicht gleichmäßig über die Wanddicke d verteilt sein und die Anzahl an T-Schaltungen definiert sowohl die Genauigkeit als auch den Aufwand zur Lösung des Problems. In dieser Hinsicht ist das Problem der Wärmeleitung durch eine Wand analog zu beliebigen Problemen in denen die Diskretisierung im Raum definiert werden muss, z. B. strömungstechnische oder mechanische Problemstellungen. Bei diesen Problemen wer-

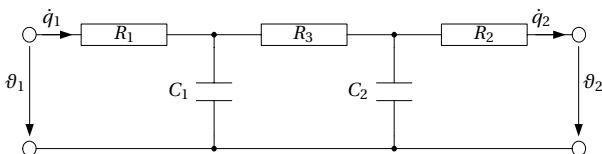


Abbildung 2.2: 3R2C-Vierpol bzw. zweifache T-Schaltung für eine Wand, die Nummerierung entspricht den Vorgaben der VDI 6007-1 (2015).

den Verfahren der Computational Fluid Dynamics (CFD) oder Finite-Elemente-Methoden (FEM) angewendet. In diesen müssen die Anzahl an Zellen sowie die Verteilung festgelegt werden. Zur Abbildung einer Zone durch ein thermisches Netzwerk werden die Vierpole für die einzelnen Wände über Widerstände miteinander gekoppelt, welche die einzelnen Wärmetransportvorgänge abbilden.

Die Netzwerk-Notation hat den Vorteil, dass sie visuell den Zusammenhang von thermischen Effekten wiedergeben kann, was in einer rein gleichungsbasierten Schreibweise nicht möglich ist (Davies 1982). Nach Carter (1990) können Knoten in thermischen Netzwerken in drei Kategorien eingeteilt werden:

Knoten mit thermischer Masse. Die thermische Masse der Knoten wird mit Hilfe thermischer Kapazitäten abgebildet, sodass diese Knoten immer mit einer Zustandsvariable assoziiert sind.

Knoten ohne thermische Masse zur Abbildung von z. B. Luftvolumina oder Wandoberflächen, denen keine thermische Masse zugeordnet ist. Solche Knoten sind meist Nachbarn von Knoten mit thermischer Masse und werden als Verbindungspunkt von multiplen Verbindungen, z. B. in einem Strahlungsnetzwerk, genutzt. Pro Knoten ohne thermische Masse muss eine algebraische Gleichung gelöst werden.

Knoten mit aufgeprägter, variierender Temperatur, z. B. an der äußeren Wandoberfläche von externen Wänden, die solarer Einstrahlung ausgesetzt sind. An diesen Knoten greifen Anregungen an, denen ein Wärmestrom zugeordnet werden kann.

Die Ordnung eines Modells ist gleich der Anzahl Knoten mit thermischer Masse bzw. der Anzahl der verwendeten Kapazitäten (Kramer u. a. 2012). Im Folgenden wird der Begriff Knoten gleichgesetzt mit den Knoten mit thermischer Masse. Jede Kapazität wird durch eine Differentialgleichung beschrieben. Jede Differentialgleichung enthält eine Zustandsvariable, nach der die Differentialgleichung gelöst werden muss (z. B. die Temperatur). Die Anzahl an Zustandsvariablen beeinflusst maßgeblich den Aufwand zur Lösung des Differentialgleichungssystems. Die Ordnung eines Modells steht somit im direkten Zusammenhang mit dem numerischen Aufwand zur Lösung des Modells. Da die räumliche Auflösung und dynamische Genauigkeit über die Anzahl von Kapazitäten und Widerständen gesteuert wird, können thermische Netzwerke sowohl für hoch aufgelöste, detaillierte White-Box-Modelle als auch für vereinfachte Grey-Box-Modelle verwendet werden. Dabei muss immer die durch die Ordnung des Modells definierte Genauigkeit im Zusammenhang mit dem Rechenaufwand bewertet werden.

Thermische Netzwerke lassen sich als Analogie von elektrischen Schaltkreisen betrachten. Die Analogie beruht auf der Ähnlichkeit der partiellen Differentialgleichungen für Wärmeleitungsprobleme und idealisierte elektrische Kabel (Rouvel 1972; Davies 1982, 2004). Die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung in einer aus homogenen Schichten aufgebauten ebenen Wand bei eindimen-

sionalem Wärmefluss lässt sich mit Hilfe der eindimensionalen, instationären Wärmeleitungsgleichung nach Fourier beschreiben durch

$$\frac{\partial \vartheta(t, x)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(t, x)}{\partial x^2}. \quad (2.2)$$

Für elektrische Übertragungsleitungen ergibt sich unter Vernachlässigung der Induktion der Ausdrück

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = \frac{1}{R_{\text{el}} \cdot C_{\text{el}}} \cdot \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2}. \quad (2.3)$$

Die beiden Probleme unterscheiden sich nur in den Parametern und deren Einheiten. Die Spannung u ist dabei analog der Temperatur ϑ (Potenzialgrößen) und der elektrische Strom I ist analog dem Wärmestrom $\dot{Q}$ (Flussgrößen) (Rouvel 1972; Davies 1982).

In Analogie zur Elektrotechnik verhält sich jede T-Schaltung wie ein Tiefpassfilter, der Anregungen mit niedrigen Frequenzen ohne Dämpfung passieren lässt und Anregungen mit hohen Frequenzen abdämpft (Ramallo-González u. a. 2013). Für jede T-Schaltung lässt sich eine charakteristische Kreisfrequenz bestimmen. Diese errechnet sich zu

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\tau}, \quad (2.4)$$

mit der Zeitkonstanten (Davies 2004)

$$\tau = R \cdot C. \quad (2.5)$$

Nach dieser Zeit fällt bzw. steigt die Temperatur auf den Wert $1/e$ der ursprünglichen Temperatur nach einer sprunghaften Anregung (Davies 2004). Mit Hilfe der Zeitkonstante lässt sich das Übertragungsverhalten der T-Schaltung beschreiben.

Thermische Netzwerke bilden die Grundlage der vorgestellten parametrierbaren Gebäudemodelle. Als weitere Aufgaben stellen sich nun die Fragen der Berechnung der Parameter sowie der Anzahl an T-Schaltungen im Netzwerk. Für die Parameterberechnung ist eine Beschreibung des bauphysikalischen Verhaltens der Gebäude notwendig, für die Wahl der Modelltopologie muss zusätzlich der numerische Aufwand zur Lösung des Gleichungssystems bewertet werden.

2.2 Beschreibung des bauphysikalischen Verhaltens von Gebäuden

Die Beschreibung der thermischen Vorgänge in den Schichten und Wänden der Gebäude spielt für die thermische Modellbildung im Rahmen dieser Arbeit eine hervorgehobene Rolle. Sie dient

sowohl als Grundlage der Parameterberechnung als auch der Modellbildung und begründet die Wahl entsprechender Ansätze für beide Fragestellungen.

Grundlegend für die Beschreibung des thermischen Verhaltens der Wände ist dabei die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung (2.2), für deren Lösung sich nach Davies (1982) verschiedene Verfahren anbieten:

Analoge Ansätze, bei denen die thermischen Probleme durch analoge elektrische Schaltkreise abgebildet werden. Dieser Ansatz wurde in der Vergangenheit intensiv genutzt und ist auf die Arbeiten von Beuken (1936) zurückzuführen.

Numerische Ansätze, welche eine direkte Lösung beliebiger Anregungen mit Hilfe finiter Differenzen Methoden ermöglichen. Das Problem wird dabei in diskrete leitende oder speichernde Elemente unterteilt. Das gebildete Modell auf Basis thermischer Netzwerke wird im Rahmen dieser Arbeit numerisch gelöst. Der rechentechnische Aufwand hängt stark vom gewählten Modell ab, sodass dieser bei der Wahl und Ausgestaltung des Modells beachtet werden muss. Die entsprechenden Grundlagen werden in Kapitel 2.2.2 erläutert.

Analytische Ansätze, welche von der Wahl der Randbedingungen abhängen und somit auch nur für Randbedingungen definierter Form gültig sind. Die Berechnung der Widerstände und Kapazitäten des in dieser Arbeit entwickelten thermischen Netzwerks beruht auf einem analytischen Ansatz, dessen Grundlagen im Folgenden vorgestellt werden. Zusätzlich erlaubt eine analytische Betrachtung Aussagen über die minimale Anzahl an T-Schaltungen, die in einem vereinfachten Gebäudemodell zulässig ist.

2.2.1 Analytische Ansätze

Die Berechnung der Widerstände und Kapazitäten der entwickelten Gebäudemodelle basiert auf einem analytischen Ansatz, dessen Grundlagen in diesem Kapitel vorgestellt werden sollen. Zusätzlich werden die analytischen Ansätze diskutiert, die eine Einschätzung der Anzahl an benötigten T-Schaltungen pro Wand in einem thermischen Netzwerk erlauben.

Die Berechnung der Widerstände und Kapazitäten beruht auf der partiellen Differentialgleichung (2.2), welche analytisch für die meisten Randbedingungen nicht lösbar ist. Es werden daher Ansätze verwendet, die sich auf spezifische Randbedingungen fokussieren, für die eine Lösung zu definieren ist (Rouvel 1972). Typische thermische Anregungen von Wänden sind nach Davies (1994):

Stationäre Anregung durch Mittelung von Wärmeflüssen in die Wand und entgegengesetzten Flüssen aus der Wand heraus, die sich über einen längeren Zeitraum weitestgehend gegenseitig aufheben.

Periodische transiente Anregung aufgrund von wiederkehrenden Effekten wie Außentemperatur und Sonneneinstrahlung.

Sprung- und stoßhafte Anregung aufgrund plötzlich auftretender, kurzfristiger Ereignisse wie z. B. interne Lasten.

Im Rahmen dieser Arbeit spielen Lösungen für periodische Anregungen eine hervorgehobene Rolle, da sie häufig zur Berechnung der für die numerische Modellierung notwendigen Parameter verwendet werden (Davies 2004). Nach Weber u. Jóhannesson (2005) und Davies (1994) kann ein instationäres Wärmeleitungsproblem bei periodischer Anregung mit der Zeitkonstante τ_{Anr} der Form

$$\tilde{\theta}_{\text{Anr}}(t) = \bar{\theta}_{\text{Anr}} \cdot e^{j\omega_{\text{Anr}} \cdot t} \quad (2.6)$$

mit

$$\omega_{\text{Anr}} = \frac{2 \cdot \pi}{\tau_{\text{Anr}}} \quad (2.7)$$

als eine unendliche Reihe harmonischer Schwingungen betrachtet werden. Der reelle Teil stellt dabei die Amplitude der Anregung, der komplexe Teil die Phasenverschiebung dar (Burmeister 1996). Eine Übersicht über die historische Entwicklung der Ansätze zur Lösung unter periodischen Randbedingungen findet sich in Davies (1982). Viele Lösungen beruhen dabei auf charakteristischen Werten für ausgewählte Materialien, Wandaufbauten und Anregungen in tabellarischer Form, z. B. in Nehring (1962) und Milbank u. Harrington-Lynn (1974). Nach (2.6) bieten sich unter periodischen Bedingungen verschiedene Lösungswege an (Leppmann 2014; Weber u. Jóhannesson 2005):

- Laplace-Transformation in den Bildbereich (Rouvel 1972),
- Separation der Variablen als Lösungsverfahren für Differentialgleichungen (Burmeister 1996),
- Fourier-Transformation in den Frequenzbereich (Weber u. Jóhannesson 2005).

Eine Lösung der Wärmeleitungsgleichung (2.2) kann nach Heindl (1966) und Rouvel (1972) mit Hilfe einer Fourier-Transformation in der Form

$$\tilde{\theta}_1 = \tilde{\theta}_2 \cdot \cosh \left((1+j) \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \right) + \tilde{q}_2 \cdot \frac{1}{\tilde{a}} \cdot \sinh \left((1+j) \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \right) \quad (2.8)$$

$$\tilde{q}_1 = \tilde{\theta}_2 \cdot \tilde{a} \cdot \sinh \left((1+j) \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \right) + \tilde{q}_2 \cdot \cosh \left((1+j) \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \right) \quad (2.9)$$

im Frequenzbereich gefunden werden. Diese Form beinhaltet bereits eine räumliche Diskretisierung in zwei Punkten. Unter Verwendung der Matrixnotation der Vierpoltheorie nach Pipes (1940) wie in Davies (1982, 2004) gegeben, kann das Problem analog in einem elektrotechnischen Kontext darstellt werden. Eine homogene Schicht einer Wand ist dabei analog zu einem elektrischen Kabel zu betrachten, jeweils unter periodischen Randbedingungen. Für Wärmeleitungsprobleme lassen sich (2.8) und (2.9) mit der Matrixnotation in der Betrachtung als Vierpol S umformen zu

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(D + jD) & \sinh(D + jD)/\tilde{a} \\ \sinh(D + jD) \cdot \tilde{a} & \cosh(D + jD) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

mit der zyklischen Dicke bzw. dimensionslosen Eindringtiefe

$$D = \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c \cdot d^2}{\tau_{\text{Anr}} \cdot \lambda}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \quad (2.11)$$

und der charakteristischen Wärmefaufnahme nach Davies (1982, 2004)

$$\tilde{a} = \sqrt{\frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c}{\tau_{\text{Anr}}}} = (1 + j) \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{\text{Anr}} \cdot \frac{C}{R}}. \quad (2.12)$$

Mit Hilfe der Additionstheoreme lassen sich nach Rouvel (1972) und Davies (2004) die Real- und Imaginärteile der einzelnen Matrixeinträge in Gleichung 2.10 trennen, wobei folgende Notation verwendet wird:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re } a_{11} + j \cdot \text{Im } a_{11} & \text{Re } a_{12} + j \cdot \text{Im } a_{12} \\ \text{Re } a_{21} + j \cdot \text{Im } a_{21} & \text{Re } a_{22} + j \cdot \text{Im } a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Die einzelnen Einträge ergeben sich nach Rouvel (1972) wie in (A.1) - (A.6) gezeigt. Für mehrschichtige Wände werden die einzelnen Vierpole für jede Schicht S_n durch Matrizenmultiplikation zu einem Gesamtsystem S_{Wand} zusammengesetzt (DIN EN ISO 13786 2008):

$$S_{\text{Wand}} = \prod_{n=1}^N S_n \quad (2.14)$$

Dabei ist S_{Wand} nicht mehr richtungssymmetrisch, sodass die Wandschichten dem Wandaufbau nach multipliziert werden müssen und nicht vertauscht werden dürfen (Rouvel 1972). Ein Tauschen in der Reihenfolge der Multiplikation würde übersetzt einem Tauschen der Schichten im Wandaufbau entsprechen, was eine Änderung des dynamischen Verhaltens der Wand bedeuten würde. Nach Rouvel (1972) ist die Frequenz bei Wänden im Allgemeinen konstant, sodass die Wanddicke bzw. R und C variieren müssen. Da bei dynamischen Vorgängen in Wänden die Anregungen unter Umständen nicht durch eine einzelne Kreisfrequenz beschrieben werden können, muss die Berechnung für jede dominante Frequenz einzeln erfolgen und die Ergebnisse überlagert werden (Rouvel 1972). Hier zeigt sich die Anwendungsgrenze dieses Lösungsweiges, da die Randbedingungen im Vorhinein hinsichtlich des Frequenzspektrums analysiert werden müssen und nicht periodische Randbedingungen nicht berücksichtigt werden können. Wie in Kapitel 3.2.1 gezeigt wird, kann dieser Ansatz aber genutzt werden, um die Parameter für ein reduziertes numerisches Simulationsmodell zu berechnen.

Im Rahmen einer vereinfachten Modellierung mit reduzierter physikalischer Auflösung stellt sich zusätzlich zur Bestimmung der Widerstände und Kapazitäten die Frage, mit welcher Anzahl an T-Schaltungen pro Schicht, Wand und thermischer Zone die relevanten Dynamiken in einem thermischen Netzwerk abgebildet werden, ohne das eine unnötig hohe Modellkomplexität verwendet wird. Die Anzahl berücksichtigter Dynamiken ist dabei wie in Kapitel 2.1 gezeigt mit der Anzahl abgebildeter Zeitkonstanten und der Anzahl an verwendeten Kapazitäten bzw. Zustandsvariablen verknüpft (Davies 2004). Die Anzahl an Zustandsvariablen pro Gebäudemodell ergibt sich somit zu

$$z_{\text{Gebäude}} = z_{\text{Zonen}} \cdot z_{\text{Wände}} \cdot z_{\text{Schichten}} \quad (2.15)$$

Auf Wandebene ist es möglich, ein auf wenige T-Schaltungen reduziertes und weiterhin akkurates Modell abzuleiten, wenn der Fokus wie in dieser Arbeit auf Oberflächentemperaturen liegt und nicht auf Temperaturen in der Wand (Fraisie u. a. 2002; Davies 2004). Für den Extremfall einer dicken Wand hängt die Oberflächentemperatur auf einer Seite der Wand nur begrenzt von der Kapazität der Wandmitte ab und der Einfluss der abgewandten Schichten tendiert gegen null. Nach Davies (1983b) gibt es somit keinen tieferen Grund, warum die Summe der Einzelkapazitäten der theoretischen Gesamtkapazität der Wand entsprechen sollte. Demnach ist es sinnvoller, die Anzahl an Kapazitäten und Widerständen so zu wählen und sie so zu dimensionieren, dass sie das Übertragungsverhalten für typische transiente Zustände bestmöglich wiedergeben (Davies 2004). Übertragen auf CFD oder FEM Probleme entspricht diese Betrachtung der Verwendung von adaptiven Netzen, welche in Bereichen höherer Dynamik eine höhere Anzahl von Zellen verwenden und den Rest vereinfacht abbilden. Für thermische Netzwerke bedeutet dies, dass der dynamisch relevante Teil einer Wand (die periodische Eindringtiefe d_{eff}) durch Kapazitäten und Widerstände abgebildet und der Rest der Wand auf einen Widerstand reduziert wird. Die periodische Eindringtiefe bezeichnet die Tiefe, bei der sich die Amplitude der Temperaturschwankungen bei Anregung der Oberfläche um den Faktor e verringert (Davies 2004). Anschaulich ist dies der Teil der Wand, der bei einer bestimmten Anregungsfrequenz an der Wärmespeicherung teilnimmt. Diese Betrachtung von d_{eff} führt zur Definition einer effektiven thermischen Masse C_{eff} neben der Gesamtkapazität C_{ges} einer Wand (Antonopoulos u. Koronaki 1998; Akander 2000). Nach Burmeister (1996) lässt sich das thermische Verhalten mit C_{eff} und der Zeitkonstante τ_{eff} nach (2.5) hinreichend genau beschreiben. Je größer die Zeitkonstante τ_{eff} ist, um so weiter zurück erstreckt sich das „Erinnerungsvermögen“ der Wand und um so träger ist die Antwort auf eine Anregung mit τ_{Anr} (Burmeister 1996).

Die periodische Eindringtiefe d_{eff} kann mit Hilfe der Fourier-Zahl Fo bestimmt werden, welche in der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung (2.2) implizit nach

$$\frac{\partial \theta(t, x)}{\partial(t/\tau)} = \frac{\lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot d^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta(t, x)}{\partial(x^2/d^2)} = Fo \cdot \frac{\partial^2 \theta(t, x)}{\partial(x^2/d^2)} \quad (2.16)$$

enthalten (Davies 2004) ist.

Die Fourier-Zahl beschreibt das Verhältnis von Wärmetransport zu Energiespeicherung und stellt eine dimensionslose Zeit dar. d ist hierbei eine für das Problem charakteristische Dicke und t eine das Problem beschreibende Zeitkonstante (Davies 2004).

$$Fo = \frac{\lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot d^2} = \frac{\text{Fähigkeit der Wand, Wärme zu leiten}}{\text{Fähigkeit der Wand, Wärme zu speichern}} \quad (2.17)$$

Bei der Berücksichtigung des Wärmeübergangs an der Oberfläche der Wand wird Fo in (2.16) mit der Biot-Zahl Bi zu $Bi^2 \cdot Fo$ erweitert. Die Biot-Zahl gibt für den Wärmetransport durch die Oberfläche einer Wand das Verhältnis des konvektiven Wärmeübergangs zur Wärmeleitfähigkeit durch die Wand an (Davies 2004).

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \frac{\text{Fähigkeit der Wand, Wärme an die Umgebung abzugeben}}{\text{Fähigkeit der Wand, Wärme zu leiten}} \quad (2.18)$$

Für eine periodische Anregung hat die Fourier-Zahl den Wert π , wenn τ die Zeitkonstante der Anregung und d die periodische Eindringtiefe beschreibt. Daraus ergibt sich

$$Fo = \pi = \frac{\lambda \cdot \tau_{\text{Anr}}}{c \cdot \rho \cdot d_{\text{eff}}^2}, \quad (2.19)$$

was nach der Eindringtiefe

$$d_{\text{eff}} = \frac{d_{\text{ges}}}{D} = d_{\text{ges}} \cdot \frac{\tau_{\text{eff}}}{\tau_{\text{ges}}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \tau_{\text{Anr}}}{\pi \cdot \rho \cdot c}} \sim \sqrt{\tau_{\text{Anr}}} \quad (2.20)$$

umgeformt werden kann.

In (2.20) kann zusätzlich der Wärmeübergang an der Oberfläche der Wand berücksichtigt werden. Dabei hat die Fourier-Zahl nicht mehr den Wert π , sondern ist abhängig von der Biot-Zahl (Davies 2004).

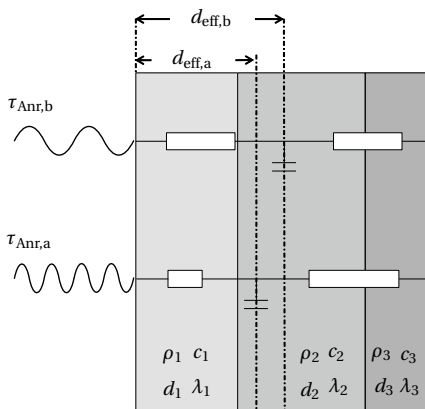
Bei der Reduktion der Modellierung auf den effektiven Teil der Wand in Form der periodischen Eindringtiefe stellt sich weiterhin die Frage, wie viele T-Schaltungen pro Wand notwendig sind, um die Oberflächentemperaturen akkurat zu bestimmen. Aus (2.20) ist ersichtlich, dass die periodische Eindringtiefe maßgeblich von der Anregungsfrequenz abhängt. Sollen mehrere Anregungsfrequenzen bei der Modellierung berücksichtigt werden, ist pro Frequenz eine T-Schaltung notwendig. Typischerweise wird das dynamische Verhalten von Gebäuden bei Vernachlässigung von höherwertigen, beispielsweise adaptiven Regelstrategien im Innenraum nur von wenigen Frequenzen maßgeblich beeinflusst (Lefebvre 1997; Saberi Derakhtenjani u. a. 2015), sodass eine Reduktion auf wenige T-Schaltungen möglich ist. Wie in Kapitel 3 gezeigt wird, basiert eine Vielzahl von Ansätzen auf der Beschränkung auf eine Anregungsfrequenz und entsprechend eine T-Schaltung. Welche

Tabelle 2.1: Typische Zeitkonstanten für die Anregung τ_{Anr} im Bereich der dynamischen Gebäudesimulation.

τ_{Anr}	Gültigkeitsbereich	Referenz
1 h	kurzzeitige Schwankungen, z. B. Regler	DIN EN ISO 13786 (2008)
1 d	tägliche Schwankungen, z. B. Wetter	DIN EN ISO 13786 (2008) Rouvel (1972) Milbank u. Harrington-Lynn (1974)
2 d	abgehängte Speichermassen	Burmeister (1996) Rouvel u. Zimmermann (1997, 2004)
7 d	Langzeitmittelung	DIN EN ISO 13786 (2008) Rouvel u. Zimmermann (1997, 2004)
1 a	Wärmeübertragung an das Erdreich	DIN EN ISO 13786 (2008)

Frequenz für die Berechnung der Widerstände und Kapazitäten zu wählen ist, hängt stark vom Anwendungsfall ab (Tabelle 2.1) und beeinflusst wie in Abbildung 2.3 gezeigt die Dimensionierung der Widerstände und Kapazitäten bzw. deren Positionierung in einer Wand.

Wie in diesem Kapitel gezeigt, eignen sich analytische Ansätze für die Wärmeleitungsgleichung zur Berechnung der Widerstände und Kapazitäten von thermischen Netzwerken unter definierten Randbedingungen. Zusätzlich kann über die periodische Eindringtiefe gezeigt werden, dass die Reduktion auf eine geringe Anzahl an T-Schaltungen pro Wand bei der Betrachtung von Oberflächentemperaturen grundsätzlich zulässig ist. Die gezeigten Ansätze eignen sich allerdings nicht für die

**Abbildung 2.3:** Zusammenhang von effektiver Dicke, den bauphysikalischen Eigenschaften und der Anregung.

eigentliche Simulation der Modelle, da hierzu die Berücksichtigung variabler Anregungsfrequenzen notwendig ist. Im Rahmen rechentechnischer Umsetzungen der Modelle bieten sich numerische Verfahren an, welche die entsprechende Flexibilität zur Berücksichtigung wechselnder Frequenzen bieten.

2.2.2 Numerische Ansätze

Wie in Kapitel 2.2 diskutiert, eignen sich primär numerische Verfahren zur Lösung des Gleichungssystems thermischer Netzwerke unter beliebigen Anregungen. Hierbei muss jedoch der rechentechnische Aufwand bewertet werden, der zur Lösung des Gleichungssystems notwendig ist. Dieser hängt wiederum vom notwendigen Löser und der Größe bzw. Art des Gleichungssystems ab. Im folgenden Kapitel sollen die entsprechenden Zusammenhänge zwischen gewähltem Modell und rechentechnischem Aufwand aufgezeigt werden.

Nach Carter (1990) und Kämpf u. Robinson (2007) ist das Differentialgleichungssystem für ein n-Knoten-Modell von der Form

$$\mathbf{C} \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}}(t) = \mathbf{A}(t) \cdot \boldsymbol{\theta}(t) + \mathbf{u}(t). \quad (2.21)$$

Dabei bezeichnet $\boldsymbol{\theta}(t)$ den Vektor der Temperaturen an den Knoten, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ die Ableitungen und $\mathbf{u}(t)$ die Anregungen. $\mathbf{C}$ bezeichnet die thermischen Kapazitäten und $\mathbf{A}(t)$ die Matrix des Wärmetransfers. Damit entspricht (2.21) der Definition einer gewöhnlichen Differentialgleichung nach Jorissen u. a. (2015)

$$0 = \mathbf{f}_{\text{imp}}(t, \dot{\mathbf{z}}, \mathbf{z}, \mathbf{u}). \quad (2.22)$$

Bei numerischen Verfahren werden die Differentialquotienten in (2.2) bzw. (2.21) durch Differenzenquotienten ersetzt (VDI 6020-1 2001) und das System zeitlich diskretisiert. Die Differenzenverfahren werden in implizite und explizite Verfahren unterteilt. Kann (2.22) in die Form

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{f}_{\text{exp}}(t, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (2.23)$$

überführt werden (Jorissen u. a. 2015), kann die Lösung mit Hilfe eines expliziten Verfahrens erfolgen. Auf (2.21) übertragen führt dies zu

$$\boldsymbol{\theta}_{i+1} = \boldsymbol{\theta}_i + \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\theta}_i + \mathbf{u}_i). \quad (2.24)$$

Der Zeitschritt muss bei expliziten Verfahren in Abhängigkeit der kleinsten charakteristischen Zeitkonstante des Systems gewählt werden, was zu sehr kleinen Zeitschritten führen kann (VDI 6020-1 2001). Treten zusätzlich zeitliche Bereiche auf, in denen diese Zeitkonstante nicht zum Tragen

kommt (steife Gleichungssysteme), führt dies zu einem unnötig kleinen Zeitschritt und hohen Rechenzeiten. Explizite Löser eignen sich somit nicht für steife Gleichungssysteme, zu denen Wärmeleitungsprobleme in thermischen Netzwerken zu zählen sind (Carter 1990). Für solche Systeme eignen sich vorrangig implizite Ansätze, bei denen die Unbekannten benachbarter Zeitpunkte in die Berechnung mit einbezogen wird. Für den Fall von (2.21) ergibt sich

$$\boldsymbol{\vartheta}_{i+1} = \boldsymbol{\vartheta}_i + \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{A}_{i+1} \cdot \boldsymbol{\vartheta}_{i+1} + \mathbf{u}_{i+1}) . \quad (2.25)$$

Wie viele benachbarte Zeitpunkte mit einbezogen werden, unterscheidet sich zwischen den Verfahren, die in Einschnitt- (z. B. Runge-Kutta) und Mehrschrittverfahren (z. B. DASSL und Lsodar) unterteilt werden (Jorissen u. a. 2015). Die Größe des verwendeten Zeitschrittes kann entweder fest vorgegeben oder variabel gehalten werden. Der Wert $f(t_{i+1}, z_{i+1}, u_{i+1})$ kann nicht explizit bestimmt werden, da z_{i+1} auf beiden Seiten der Gleichung auftritt. Hierzu ist ein Iterationsverfahren wie z. B. das Newton-Verfahren notwendig. Im Falle von mehrdimensionalen Gleichungssystemen beinhaltet dies die Berechnung der Jacobi-Matrix, welche die partiellen Ableitungen von f nach z enthält (Jorissen u. a. 2015). Die Größe der Jacobi-Matrix hängt dabei quadratisch von der Anzahl an Zustandsvariablen bzw. an Kapazitäten ab (Jorissen u. a. 2015). Die Anzahl an Knoten mit thermischer Masse in einem thermischen Netzwerk beeinflusst somit maßgeblich den Rechenaufwand zur Lösung des Gleichungssystems, da an diesen die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit bestimmt werden muss (Carter 1990).

Treten zusätzlich Knoten ohne thermische Masse im Netzwerk auf, erweitert sich das Differentialgleichungssystem zu einem differentiell-algebraischen Gleichungssystem (DAE) (Carter 1990; Jorissen u. a. 2015) mit den Bestandteilen

$$0 = \mathbf{f}_{\text{imp}}(t, \mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (2.26)$$

und

$$0 = \mathbf{g}(t, \mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) . \quad (2.27)$$

Auf den Anwendungsfall der thermischen Netzwerke übertragen ergibt sich für Knoten mit (Index m) und ohne (Index o) thermischer Masse (Carter 1990)

$$\mathbf{C}_m \cdot \dot{\boldsymbol{\vartheta}}_m(t) = \mathbf{A}_{m,o}(t) \cdot \boldsymbol{\vartheta}_o + \mathbf{A}_{m,m}(t) \cdot \boldsymbol{\vartheta}_m + \mathbf{u}_m(t) , \quad (2.28)$$

$$0 = \mathbf{A}_{o,o}(t) \cdot \boldsymbol{\vartheta}_o + \mathbf{A}_{o,m}(t) \cdot \boldsymbol{\vartheta}_m + \mathbf{u}_o(t) . \quad (2.29)$$

Über die Kopplungsgröße $\boldsymbol{\vartheta}_o$ ergibt sich daraus

$$\mathbf{C}_m \cdot \dot{\boldsymbol{\vartheta}}_m(t) = (\mathbf{A}_{m,o}(t) \cdot \mathbf{A}_{o,o}^{-1}(t) \cdot \mathbf{u}_o(t) + \mathbf{u}_m(t)) + (\mathbf{A}_{m,o}(t) \cdot \mathbf{A}_{o,o}^{-1}(t) \cdot \mathbf{A}_{o,m}(t) + \mathbf{A}_{m,m}(t)) \boldsymbol{\vartheta}_m. \quad (2.30)$$

Die Lösung der Inversen von $\mathbf{A}_{o,o}(t)$ sowie des dreifachen Matrixproduktes bestimmt dabei nach Carter (1990) den rechentechnischen Aufwand, welcher mit der Größe der Matrizen wächst. Eine Reduktion der algebraischen Variablen verringert somit den Rechenaufwand zur Lösung des gesamten Gleichungssystems. Treten untereinander gekoppelte Gleichungen in (2.27) auf, ergeben sich algebraische Schleifen innerhalb des algebraischen Teils des Gleichungssystems. Im Rahmen von thermischen Netzwerken ergeben sich algebraische Schleifen vorrangig bei der Berücksichtigung des Strahlungsaustausches im Innenraum. Je nach Modellierungsansatz können diese Schleifen linear oder nichtlinear sein. Im Falle von nichtlinearen algebraischen Schleifen ist eine iterative Lösung dieser Schleifen mittels geeigneter Verfahren wie dem Newton-Raphson-Verfahren notwendig (Jorissen u. a. 2015). Dadurch erhöht sich der Rechenaufwand zur Lösung des Systems, sodass entsprechende Schleifen zu vermeiden sind. Masselose Knoten treten in thermischen Netzwerken jedoch nur in begrenztem Maße auf, sodass nach Carter (1990) der Rechenaufwand durch Knoten mit thermischer Masse und den assoziierten Differentialgleichungen dominiert wird. Bei der vereinfachten Modellierung der Gebäude sollte somit eine möglichst geringe Anzahl an Knoten mit thermischer Masse bzw. Kapazitäten verwendet werden sowie, wenn möglich, auf Knoten ohne thermische Masse verzichtet werden.

Zusammenfassend wird aus den zur Verfügung stehenden Methoden zur Parametrierung und Modellierung der Ansatz der thermischen Netzwerke in Kombination mit einem Grey-Box-Ansatz zur Parametrierung als Basis für die in dieser Arbeit vorgestellten Gebäudemodelle auf Stadtteilebene ausgewählt. Hierfür müssen Rechenvorschriften zur Berechnung der Parameter definiert sowie die Anzahl an T-Schaltungen aus Widerständen und Kapazitäten gewählt werden. Für die Parameterberechnung bietet sich ein analytischer Ansatz für periodische Anregungen nach Rouvel (1972) an. Zusätzlich lässt sich aus einer Betrachtung der Fourier-Zahl die periodische Eindringtiefe d_{eff} definieren, die den thermisch effektiven Teil einer Wand beschreibt. Im Sinne einer vereinfachten Modellierung bietet es sich an, die Betrachtung der Wand auf d_{eff} zu reduzieren. Über den Zusammenhang von d_{eff} zur Anregungsfrequenz lässt sich ableiten, das auch mit einer minimalen Anzahl an T-Schaltungen die Dynamik der Wand abgebildet werden kann. Die Reduktion ist aus numerischer Sicht bedeutsam, da eine geringe Anzahl an Kapazitäten die numerische Lösung des Gebäudemodells bedeutend beschleunigt. Der Rechenaufwand des Modells hängt mindestens quadratisch von der Anzahl an Kapazitäten ab und wird zusätzlich von der Anzahl an Knoten ohne Kapazitäten beeinflusst. Vor allem die Kombination solcher Knoten in einer Schleife wirkt sich negativ auf den Rechenaufwand aus. Auf Basis dieser Erkenntnisse können im nächsten Kapitel die zur Verfügung stehenden Methoden zur Bestimmung der Parameter sowie Modelltopologien analysiert und zu der Fragestellung dieser Arbeit passende Methoden ausgewählt werden.

3 Stand der Forschung

Wie in Kapitel 1 diskutiert, müssen parametrierbare Gebäudemodelle entwickelt werden, die den Anforderungen zur Energiebedarfsrechnung von Stadtquartieren gerecht werden. Hierzu sind die beiden Teilfragen zu beantworten, welche Methoden sich zur Berechnung der Modellparameter unter eingeschränkter Datenlage eignen und wie vereinfachte Modelle aussehen, die auf Basis weniger Parameter und mit geringem Rechenaufwand die Dynamik der Gebäude berücksichtigen und zeitlich aufgelöste Wärmelastprofile generieren können. In Kapitel 2 wurden dazu die analytischen und numerischen Grundlagen gelegt, auf deren Basis die Berechnung der Parameter erfolgen kann und die bei der Bewertung der vereinfachten Ansätze zu Gebäudemodellierung unterstützen. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden im folgenden Kapitel die existierenden Ansätze zur Vervollständigung ungenügender Datenlagen mit Hilfe von Typologien vorgestellt, auf deren Basis eine Berechnung der Parameter erfolgen kann. Nachfolgend werden im Rahmen reduzierter Gebäudemodelle Ansätze zur Berechnung der Parameter sowie Modelltopologien und normative Verfahren diskutiert. Abschließend werden existierende ganzheitliche Werkzeuge für Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren vorgestellt und die Ansätze der vorliegenden Arbeit in diesen Kontext eingeordnet.

3.1 Typologisierung von Gebäuden

Nach Reinhart u. Cerezo Davila (2016) ist die Parametrierung von Modellen eine ausschlaggebende Quelle für Unsicherheiten und Fehler und benötigt ohne das geometrische Aufmaß ein Drittel der Gesamtzeit der Modellierung. Während eine entsprechende Datenerfassung für eine kleine Gebäudegruppe umsetzbar ist, wird sie für größere Gebäudegruppen oder ganze Stadtquartiere unpraktikabel. Für solche Liegenschaften bieten sich typologische Verfahren an, bei denen der Gebäudebestand in zusammenhängende Typologien mit ähnlichen Eigenschaften unterteilt wird.

Basis jeder Typologisierung sind Datensätze zum untersuchten Gebäudebestand. Je nach Größe des Bestandes können die Daten im Detail erhoben werden oder aufgrund von nationalen Erhebungen abgeschätzt werden. Entsprechende Erhebungen werden typischerweise von kommunalen oder nationalen Behörden geleitet bzw. in Auftrag gegeben (Swan u. Ugursal 2009). Dabei werden im Regelfall die Gebäudegeometrie, der Zustand und die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle, die Eigentumsverhältnisse und die Gebäudenutzung hinsichtlich technischer Ausstattung und Belegung erfasst (Swan u. Ugursal 2009).

Swan u. Ugursal (2009) und Kaul u. a. (2014) unterteilen die typologischen Ansätze in drei Kategorien:

Abstraktion: Verteilungen von übergeordneten Eingangsgrößen, z. B. Einwohnerdichte, bilden die Basis für Typologisierungen des Energiebedarfes.

Archetypen: Eigenschaften wie Baujahr, Geometrie, Nutzung und Gebäudetyp dienen als Eingangsdaten zur Klassifizierung des Gebäudebestandes und zur Erstellung von Archetypen.

Beispielgebäude: Einzelne real existierende Gebäude werden als Grundlage zur Abbildung des Gesamtbestandes genutzt.

Im Rahmen dieser Arbeit bieten sich Ansätze über Archetypen an, da sie im Gegensatz zu den anderen Methoden eine Wiederverwertbarkeit und Übertragbarkeit auf unterschiedliche Liegenschaften ermöglichen, die benötigten Eingangsgrößen in den untersuchten Anwendungsfällen vorliegen und eine gebäudescharfe Auflösung zur Untersuchung von Effizienzmaßnahmen erlauben (Swan u. Ugursal 2009). Archetypen ermöglichen die Verwendung von vereinfachten Eingangsgrößen wie Baujahr, Gebäudetyp im Sinne der Nutzung und Grundfläche zur Abschätzung der Gebäudegeometrie, den thermischen Eigenschaften sowie den Nutzungsrandbedingungen.

Parekh (2007) skizziert fünf Schritte zur Entwicklung repräsentativer Archetypen. Nach Prüfung der gesammelten Informationen über den Gebäudebestand folgt die Entwicklung von Korrelationen zwischen den vereinfachten Eingangsgrößen und den gesuchten geometrischen und thermischen Eigenschaften. Auf Basis dieser Korrelationen können in sich konsistente und zu anderen Gruppen differenzierbare Archetypen gebildet werden. Anschließend erfolgt eine Prüfung der gewählten Eingangsgrößen bezüglich ihrer Eignung als Unterscheidungskriterium der verschiedenen Archetypen. Eine abschließende Sensitivitätsanalyse erlaubt die Bewertung des Einflusses der unterschiedlichen Eingangsgrößen. Parekh (2007) entwickelte auf Basis dieses Vorgehens das Tool HOT2 XP für Archetypen des kanadischen Wohngebäudebestandes. Swan u. a. (2008) entwickelten diese Arbeiten weiter und fassten die Archetypen in einer Datenbank zusammen, um sie im Rahmen von dynamischen Wärmebedarfsrechnungen nutzbar zu machen. Eingangsgrößen sind dabei Gebäudetyp, Baujahr, Grundfläche und Anzahl an Stockwerken. Analog zu Parekh (2007) definieren Mata u. a. (2014) ein Vorgehen zur Erstellung von Archetypen, die sich in die Arbeitsschritte Segmentierung (Unterteilung des Bestandes anhand von Gebäudetyp und Baujahr), Charakterisierung (Definition aller notwendigen Eigenschaften) und Verifizierung unterteilt. Beide Verfahren folgen dem gleichen Ansatz und unterscheiden sich nur in der genauen Abgrenzung und Ausgestaltung der Arbeitsschritte.

Reinhart u. Cerezo Davila (2016), Ghiassi u. a. (2015) und Swan u. Ugursal (2009) führen eine Vielzahl von Veröffentlichungen auf, die sich mit der Entwicklung von Archetypen für spezifische Stadtquartiere oder Länder beschäftigen. Den meisten Veröffentlichungen ist dabei gemein, dass das Baujahr und der Gebäudetyp als grundlegende Unterscheidungskriterien der Archetypen zum Tragen kommen. Mit Ausnahme von Mata u. a. (2014) beschäftigen sich die Veröffentlichungen jedoch

nicht mit dem deutschen Gebäudebestand, sodass sie im Rahmen dieser Arbeit keine hervorgehobene Rolle spielen. Mata u. a. (2014) beziehen den deutschen Wohngebäudebestand mit ein und sind auf die Arbeiten von Loga u. a. (2005) zurückzuführen.

Im Rahmen der Einführung von Energieausweisen entwickelten Loga u. a. (2005) Vereinfachungen für die Datenaufnahme von Wohngebäuden. Der entwickelte Archetyp für Ein- und Mehrfamilienhäuser beinhaltet Korrelationen zwischen Grundfläche, Anzahl an Stockwerken und Gebäudegeometrie sowie Baualter und typischen Wandaufbauten bzw. verwendeten Materialien. Über die Angabe zusätzlicher Details wie Dachgauben, Dachform, Nachbargebäude, Grundriss und Beheizung des Kellers kann eine weitere Verfeinerung eines individuellen Gebäudes erfolgen. Die Arbeiten wurden im Rahmen von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007) in einen regulativen Zusammenhang gestellt. Sie bilden außerdem die Grundlage der deutschen Beteiligung am europäischen Gemeinschaftsprojekt TABULA zur Erstellung von Archetypen für den europäischen Gebäudebestand (Loga u. a. 2015). Im Rahmen dieser Beteiligung werden die entwickelten Archetypen in die übergreifende Methodik überführt und um weitere Typen ergänzt, an den grundlegenden Eigenschaften aber keine Änderungen vorgenommen.

Im Rahmen des EnEff:Stadt-Projektes UrbanReNet erweiterten Hegger u. Dettmar (2014) die Definition von Archetypen auf den urbanen Kontext und entwickelten die energetischen Stadtraumtypen (EST). Diese definieren die energetischen Eigenschaften bzw. energetische Kennzahlen und Effizienzpotenziale für typische urbane Flächen wie Wohngebäude, Grünflächen und Straßen. Die EST beschränken sich dabei auf grundlegende Eigenschaften wie Bebauungsdichte, Anzahl an Einwohnern, Anzahl an Vollgeschossen und A/V-Verhältnis. Die EST eignen sich somit vorrangig zur Erweiterung der Arbeiten von Loga u. a. (2005) zur vereinfachten Beschreibung ganzer Stadtquartiere. Für Wohngebäude definieren Hegger u. Dettmar (2014) 11 verschiedene Klassen wie historische Altstadt, Kleinstadt und Blockrandbebauung.

Hillebrand u. a. (2014) entwickelten ein Tool zur vereinfachten Bewertung von Sanierungsmaßnahmen für Bürogebäude, die *Retrofit Matrix*. Das Tool basiert auf den Archetypen für Bürogebäude von Lichtmeß (2010). Der Ansatz von Lichtmeß (2010) unterteilt Bürogebäude in Zonen gemäß ihrer Nutzung. Er erlaubt eine stufenlose Verfeinerung der Datenaufnahme und der Einbindung dieser Daten in die Archetypen. Zur vereinfachten Abschätzung der Außenflächen auf Basis einer Korrelation aus Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) werden die Grundfläche und die Geschossanzahl als Eingangsgröße verwendet. Studien von Lichtmeß zeigen, dass der Fehler in der Berechnung des Energiebedarfs durch diesen Ansatz zu vernachlässigen ist. Dabei werden die Außenflächen, die Orientierungen und die Wandaufbauten auf Basis des Baujahres und der typischen Wandaufbauten aus Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009) in einem ersten Schritt für das gesamte Gebäude abgeschätzt und anschließend mit Hilfe des prozentualen Anteils der Zonen an der Grundfläche des Gebäudes auf die einzelnen Zonen verteilt. Hillebrand u. a. (2014) verwenden eine Verteilung der Gesamtfläche auf die Zonen basierend auf Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a, b) und DIN 277-2

(2005). Die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien stammen aus DIN EN 12524 (2000) und DIN 4108-4 (2013). Die *Retrofit Matrix* erlaubt eine weitere Verfeinerung der so erhaltenen Typgebäude mittels der Definition von Grundrissstrukturen (z. B. ein oder zwei Flure) auf Basis der Arbeiten von Kaag u. a. (2008) und der Definition des Fensteranteils. Die Arbeiten von Hillebrand u. a. (2014) ermöglichen so die Verwendung von detaillierten Archetypen für Bürogebäude auf Basis einfacher Eingangsgrößen mit der Möglichkeit der Verfeinerung der geschätzten Eigenschaften.

Für Energieeffizienzuntersuchungen an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) erstellten David u. a. (2013) Energievergleichskennwerte (Typicals) zur vergleichbaren, hochschulspezifischen Bewertung von Universitäten. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden verschiedene Typen von Institutsgebäuden mit Mischnutzung in Form von Büro-, Vorlesungs- und Laborräumen untersucht. Für jede Nutzungsart und jede Baualtersklasse wurde ein Typical erstellt, über die sich mittels den Grundflächen nach Nutzungsart der jährliche Energievergleichskennwert eines Gebäudes bestimmen lässt. Die Nutzungsarten orientieren sich dabei an den Kategorien des Bauwerkszuordnungskatalogs (Bauministerkonferenz 2010) für Gebäude und Zonen im universitären Kontext. Es wurden jedoch nur Energieverbrauchskennwerte, nicht aber die zugrunde liegenden ausgewerteten Archetypen veröffentlicht.

Auf Basis der vorgestellten Arbeiten ergibt sich eine Lücke im Bereich der Archetypen für Institutsgebäude, für deren Entwicklung auf die Methodiken von Parekh (2007) und Mata u. a. (2014) zurückgegriffen werden kann. Im Bereich der Wohn- und Bürogebäude kann auf existierende Ansätze und Archetypen von Loga u. a. (2005), Hegger u. Dettmar (2014) und Hillebrand u. a. (2014) aufgebaut werden. Die Archetypen bilden die statistische Basis, auf der eine Anreicherung unvollständiger Datensätze erfolgen kann. Die angereicherten Datensätze können anschließend genutzt werden, um die Parameter für die vereinfachten Gebäudemodelle in Fällen mit unzureichender Datenlage zu ermitteln. Im Folgenden werden entsprechende Ansätze zur Berechnung der Parameter sowie die vereinfachten Gebäudemodelle vorgestellt.

3.2 Reduzierte Gebäudemodelle

Wie in Kapitel 2 gezeigt, existieren verschiedene theoretische Ansätze zur Parameterberechnung und vereinfachten Modellierung, die für Aufgabe der Erstellung parametrierbarer Gebäudemodelle genutzt werden können. Das folgende Kapitel gibt eine Einordnung der Arbeit für die Teilbereiche der Parameterbestimmung und Modelltopologie und enthält einen Abgleich mit existierenden normierten Modellen und Berechnungsverfahren.

3.2.1 Parameterbestimmung

Vorgelagert der Definition der eigentlichen Modelltopologie erfolgt die Berechnung der relevanten thermischen Parameter, für die auf die in Kapitel 2.2 vorgestellten Grundlagen aufgebaut werden kann. Die Bestimmung der dynamischen Parameter hat einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, im Speziellen auf den zeitlichen Verlauf (Jokisalo u. Kurnitski 2007; Kokogiannakis u. a. 2007). Die Ansätze zur Parameterbestimmung lassen sich in verschiedene Klassen unterteilen:

Parameteridentifikationsverfahren, die auf Basis von Messdaten vorrangig über Optimierungsansätze die für die Modellierung notwendigen Parameter schätzen. Auf die Verfahren der Parameteridentifikation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen, da für die untersuchten Anwendungsfälle die notwendigen zonen aufgelösten Messdaten oder detaillierten Gebäudemodelle nicht vorlagen. Es sei aber auf die umfangreichen Arbeiten von Xu u. Wang (2007), Jiménez u. a. (2008), Bacher u. Madsen (2011), Goyal u. Barooah (2012), Kramer u. a. (2012) und Reynnders u. a. (2014) verwiesen.

Parameterberechnungsverfahren, die auf Basis von Materialdaten und Wandaufbauten die notwendigen Parameter auf Basis von analytischen Lösungen der Wärmeleitungsgleichung berechnen. Diese unterteilen sich weiter in Ansätze zur Abbildung der gesamten und effektiven thermischen Masse.

Eine Reihe von Verfahren zur Berechnung der Parameter basiert auf einem Ansatz von Lorenz u. Masy (1982) für eine einfache T-Schaltung. Nach Tindale (1993) basiert die Berechnung der Parameter C_{ges} , R_{in} und R_{aus} auf drei Aussagen:

1. Die dynamische Sprungantwort auf einen Wärmeeintrag am Luftknoten des Innenraumes für das zusammengefasste System entspricht der Antwort bei einem aufgeteilten System.
2. Die dynamische Sprungantwort auf eine Temperaturänderung der Außentemperatur für das zusammengefasste System ist gleich der Antwort bei einem aufgeteilten System.
3. Die Zeitkonstante des Systems ergibt sich aus dem Verhältnis von Wärmespeicherung zu Wärmeleitung im stationären Zustand und kann über die Fourier-Zahl bestimmt werden.

Daraus ergeben sich Rechenvorschriften zur Abbildung der gesamten Masse in einer Kapazität und zwei Widerständen, wobei die Verteilung auf die beiden Widerstände über einen Zugänglichkeitsfaktor κ erfolgt (Gouda u. a. 2000). Gouda u. a. (2002) verwendet anstatt der Rechenvorschriften Optimierungsverfahren zur Bestimmung von Rationierungsfaktoren, die analog zu κ eingesetzt werden. Underwood (2014) erweitert diesen Ansatz, in dem er anstatt einer Sprunganregung eine sinusförmige Anregung verwendet, die nicht einseitig, sondern beidseitig auf die Wand aufgeprägt wird.

Fraisse u. a. (2002) beschreiben einen Ansatz, um mit Hilfe einer Laplace-Transformation die allgemeine Lösung für eine mehrschichtige Wand auf eine zweifache T-Schaltung zu übertragen. Sie ge-

hen dabei von einer symmetrischen Verteilung der thermischen Masse auf die beiden Kapazitäten aus und konzentrieren sich auf die Berechnung der Widerstände. Vor allem für hohe Frequenzen bei interner Anregung ergeben sich hinsichtlich der Phasenverschiebung jedoch Abweichungen, was auf die symmetrische Verteilung der Kapazitäten zurückzuführen ist.

Allen gezeigten Ansätzen ist gemein, dass der Gesamtwiderstand der Summe der Einzelwiderstände entspricht und die Summe der Kapazitäten gleich der Gesamtkapazität ist. Während das erste Kriterium die korrekte Wiedergabe der stationären Zustandes sicherstellt, erfüllt das zweite Kriterium keinen erweiterten Nutzen (Davies 1983b). Daraus ergibt sich eine zweite Gruppe von Ansätzen, bei denen das zweite Kriterium durch die Bestimmung der effektiven thermischen Masse ersetzt wird. Die Problemstellung im Rahmen dieser Ansätze mit effektiver thermischer Masse (siehe Kapitel 2.2.1) ist die Berechnung der periodischen Eindringtiefe bzw. der effektiven Kapazität sowie der Verteilung des Gesamtwiderstandes auf die einzelnen Teilwiderstände.

Einen entsprechenden Ansatz unter Berücksichtigung eines Spektrums von Frequenzen beschreiben Ramallo-González u. a. (2013). Dabei soll die „Dominant Layer Method“ (DLM) nicht nur eine Auslegungsfrequenz berücksichtigen, sondern vielmehr den Bereich mit den dominanten Frequenzen aus dem Anregungsspektrum abbilden. Als oberer Grenzwert ω_{OG} wird eine Frequenz von $0,5\text{h}^{-1}$ verwendet, da von einer Auflösung der Eingangsdaten von einer Stunde ausgegangen wird. Die stündliche Auflösung hat sich als Standardwert etabliert und ist historisch in begrenzten rechen-technischen Ressourcen begründet. Die untere Grenze ω_{UG} wird über die Zeitkonstante der vollständigen Wand ermittelt. Die DLM-Methode konzentriert sich auf die Schicht einer Wand, die im Rahmen periodischer Belastungen dominierend ist. Zur Bestimmung dieser Schicht wird die Impedanz jeder einzelnen Schicht k berechnet und ein Einflussfaktor ξ bestimmt. Die dominante Schicht lässt sich anhand des maximalen Einflussfaktors $\xi_{\max}$ bestimmen. Für jede weitere Schicht der Wand können Widerstände und Kapazitäten nach Mathews u. a. (1994) durch die Zeitkonstanten der Schicht in Richtung Raum τ_{in} und Außenseite τ_{aus} bestimmt werden. Ramallo-González u. a. (2013) konnten zeigen, dass sich mit dieser Methode höhere Genauigkeiten im Vergleich zu Fraise u. a. (2002) erreichen lassen. Im Besonderen für Wandaufbauten mit hoher thermischer Masse ergeben sich jedoch merkliche Abweichungen. Zusätzlich wurde die Methode nur auf Wandmodelle mit einer Ordnung höher als zwei angewendet.

Einen weiteren Ansatz mit effektiver thermischer Masse entwickelte Rouvel (1972) auf Basis der Arbeiten von Beuken (1936), nach denen die Gleichungen zur Berechnung der Temperatur und des Wärmestroms durch eine Wand als einfache T-Schaltung aus einem thermischen Netzwerk abgeleitet werden können. Mit Hilfe einer Laplace-Transformation und einer anschließenden Fourier-Transformation können diese Gleichungen in Abhängigkeit von ω dargestellt, in Kettenform umgeschrieben und als Übertragungsmatrix

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega \cdot R_1 \cdot C + 1 & R_1 (R_2 \cdot C \cdot j\omega + 2) \\ j\omega \cdot C & R_2 \cdot C \cdot j\omega + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ausgedrückt werden. Überträgt man diesen Ansatz nun auf ein Ersatzmodell für Wände bei Unsymmetrie von Aufbau und/oder Belastung, ergibt sich nach Rouvel für das thermische Netzwerk mit zweifacher T-Schaltung in Abbildung 2.2 die Übertragungsmatrix

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega \cdot C_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{ges}} - R_1 - R_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega \cdot C_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_2 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Stellt man nun die Impedanzen auf beiden Seiten der Wand bei symmetrischer Belastung auf und vergleicht sie mit den Impedanzen der allgemeinen Lösung der Wärmeleitung, so lassen sich auf Basis der Grundlagen in Kapitel 2.2.1 und (A.1) - (A.6) nach Rouvel (1972) und Rouvel u. Zimmermann (2004) Berechnungsvorschriften für die Widerstände und Kapazitäten ableiten, wie in (A.7) - (A.10) gegeben. Die Herleitung der Parameter aus einer symmetrischen Belastung führt nach Rouvel (1972) auch für unsymmetrische Belastungsfälle zu zulässigen Abweichungen von unter 3%, womit die Abweichungen kleiner sind als die Streuung der Stoffwerte von Baumaterialien. Für den Fall einer einseitigen thermischen Belastung lassen sich wie in Rouvel u. Zimmermann (1997) gegeben die Kapazitäten zusammenfassen und sich das Ersatzmodell wiederum zu einer einfachen T-Schaltung vereinfachen, wobei sich die Kapazität aus

$$C_{1,\text{kor}} = C_1 + C_2 \cdot \frac{R_1}{R_{\text{ges}} - R_2} \quad (3.3)$$

ergibt.

Dabei muss nur noch ein Widerstand aus der effektiven thermischen Masse berechnet werden, der zweite Widerstand gibt den inaktiven Teil der Wand wieder und ist die Differenz zwischen dem Gesamtwiderstand und dem ersten Widerstand. Die berechneten Parameter gelten pro Wand und lassen sich zu Ersatzelementen für mehrere Wände durch eine Parallelschaltung der Wände wie in (A.11) - (A.12) gegeben zusammenfassen. Dabei werden die komplexen Widerstände verwendet, da eine getrennte Parallelschaltung der Kapazitäten und Widerstände bei stark unterschiedlichen Speichermassen der einzelnen Wände zu Abweichungen führen kann (Rouvel u. Zimmermann 2004). Für mehr als zwei Wände sind (A.11) und (A.12) mehrfach auszuführen. Der Ansatz nach Rouvel (1972) gliedert sich ein in eine Reihe von Ansätzen, die alle auf der Bestimmung der Übergangsmatrix beruhen. Eine Übersicht über diese Ansätze findet sich in Davies (2004). Die verschiedenen Ansätze und Arbeiten wurden in der internationalen Norm DIN EN ISO 13786 (2008) zusammengefasst. Sie definiert die verschiedenen Begrifflichkeiten und fasst die Ansätze zu einer harmonisierten Formelsammlung zusammen. In Anhang A der Norm werden vereinfachte Verfahren zur Abschätzung der wirksamen Wärmekapazität gegeben. Demnach kann vereinfacht angenommen werden, dass bei einer Periodendauer der Schwankungen von 1 d die ersten 10 cm eines Bauteils aktiviert werden können. Dies ist jedoch stark vereinfacht, da weder die bauphysikalischen Eigenschaften der Wand noch die Anregung mit in die Abschätzung eingehen.

Als Fazit ergeben sich verschiedene Ansätze zur Parameterberechnung, die sich in die Gruppen der Methoden zur Abbildung der gesamten thermischen Masse und der effektiven thermischen Masse unterteilen lassen. Im Bereich der gesamten thermischen Masse basieren verschiedene Arbeiten auf den Grundlagen von Lorenz u. Masy (1982) oder alternativ auf Fraisse u. a. (2002). Im Bereich der für reduzierte Modelle geeigneten Ansätze mit effektiver thermischer Masse fokussieren sich die Arbeiten auf die DLM-Methode nach Ramallo-González u. a. (2013) oder dem Verfahren nach Rouvel (1972). Die Methode nach Rouvel (1972) ist im Rahmen der DIN EN ISO 13786 (2008) in einen normativen Zusammenhang gesetzt worden und ist international Stand der Technik für die Berechnung dynamischer Parameter. Aufgrund einer vollständigen analytischen Herleitung, einer geringeren Anzahl von Annahmen verglichen zu Ramallo-González u. a. (2013) und einer weiterhin akkuraten Berechnung für Wandaufbauten mit hoher thermischer Masse, erscheint die Methode nach Rouvel (1972) als sinnvolle Grundlage für die Parameterberechnung in dieser Arbeit.

3.2.2 Topologie

Neben den unterschiedlichen Ansätzen zur Parameterberechnung existieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Modelltopologien für thermische Netzwerke. Ein maßgeblicher Unterschied hinsichtlich der Topologie ist die Anzahl an T-Schaltungen bzw. Kapazitäten. Auf Basis der in Kapitel 2 gelegten Grundlagen stellt sich die Frage nach einer vereinfachten und akkuraten Topologie für Stadtteilbetrachtungen mit einer minimalen Anzahl an T-Schaltungen. Verschiedene Studien haben sich eingehend mit der optimalen Anzahl an T-Schaltungen in thermischen Netzwerkmodellen beschäftigt. Die wichtigsten sollen im Folgenden vorgestellt werden, um so die Auswahl eines für Stadtteilbetrachtungen optimalen Ansatzes zu ermöglichen.

Clarke (2001) und Wetter (2004) ermitteln die Anzahl und Verteilung der Kapazitäten für eine mehrschichtige Wand mit Hilfe der Fourier-Zahl. Ziel ist eine thermisch möglichst homogene Verteilung der Kapazitäten. Als Maßstab wird hierbei die Kenngröße Π verwendet, die nach

$$\Pi = \sqrt{\tau_{\text{Verw}}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{Anr}}}{Fo}} = \frac{d\sqrt{\rho \cdot c}}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.4)$$

als Wurzel der Verweilzeit interpretiert werden kann. Die Anzahl an Kapazitäten n_{ges} für die gesamte Wand mit $\Pi_{\text{ges}} = \sum \Pi_{\text{Schichten}}$ wird mit Hilfe eines Vergleichs zu einem Referenzmaterial mit Π_{Ref} und einem nutzerdefinierten n_{Ref} zu

$$n_{\text{ges}} = \frac{n_{\text{Ref}} \cdot \sum \Pi_{\text{Schichten}}}{\Pi_{\text{Ref}}} \quad (3.5)$$

bestimmt. Die Anzahl an Kapazitäten pro Schicht n_{Schicht} mit Π_{Schicht} variiert je nach Beschaffenheit der Schicht und wird wiederum aus einem Vergleich zur gesamten Wand nach

$$n_{\text{Schicht}} = \left\lceil \frac{n_{\text{ges}} \cdot \Pi_{\text{Schicht}}}{\sum \Pi_{\text{Schichten}}} \right\rceil \quad (3.6)$$

berechnet. Die obere Gaußklammer $\lceil \bullet \rceil$ gibt dabei an, dass der rechte Ausdruck der Gleichung ganzzahlig aufgerundet wird. Zusätzlich sollte nach Clarke (2001) die oberste Schicht der Wand Richtung Innenraum so fein diskretisiert werden, dass für jeden einer Kapazität zugeordneten Schichtabschnitt d_{Ab} die Bedingung

$$Bi = \frac{0,5 \cdot \alpha_{\text{Kon}} \cdot d_{\text{Ab}}}{\lambda_{\text{Ab}}} < 1 \quad (3.7)$$

gilt. Ziel ist eine thermisch homogene Verteilung der Kapazitäten bzw. eine gute Abbildung von Temperaturgradienten in der Wand. Eine solche Verteilung ergibt ähnliche Zeitkonstanten für alle Knoten mit thermischer Masse, was numerisch aufgrund der geringeren Steifigkeit des Gleichungssystems von Vorteil ist. Zusätzlich ermöglicht sie eine Berechnung der Wärmeströme mit hoher Genauigkeit, wodurch die Oberflächentemperaturen auch bei variablen Anregungsfrequenzen präzise abgebildet werden können. Die Oberflächentemperaturen spielen bei der Berechnung des Strahlungsaustausches eine hervorgehobene Rolle, da sie nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit der vierten Potenz in die Berechnung eingehen. Wie in Kapitel 2.2.1 ausgeführt, sind jedoch auch reduzierte Modelle in der Lage, die Oberflächentemperaturen unter typischen Randbedingungen akkurat abzubilden, sodass der erhöhte numerische Aufwand für eine thermisch homogene Verteilung der Kapazitäten im Rahmen dieser Arbeit nicht gerechtfertigt ist.

Für reduzierte Modelle beschäftigen sich verschiedene Arbeiten mit der minimal notwendigen Anzahl an Kapazitäten. Nach Davies (1994) reichen die stationäre Antwort sowie die erste Harmonische im Rahmen eines Ein-Kapazitäten-Modells pro Wand aus, um den Großteil der Antwort auf eine Anregung abzubilden. Rouvel u. Zimmermann (1997) schlagen ein analoges Vorgehen vor, verweisen aber darauf, dass die Reduktion auf ein Ein-Kapazitäten-Modell pro thermischer Zone nicht zulässig ist, da sonst die Dynamik des thermischen Systems aufgrund der unterschiedlichen Anregung und thermischen Funktion von internen und außenberührenden Bauteilen nicht mehr akkurat abgebildet werden kann. So stimmt beispielsweise bei radiativen internen Lasten der stationäre Endwert der Innenraumtemperatur für ein Ein-Kapazitäten-Modell, bei dem diese Bauteile zusammengefasst oder die internen Wände weggelassen werden, nicht mehr mit den Werten für höherwertige Modelle überein. Für die Abbildung einer thermischen Zone sind demnach mindestens zwei Ersatzelemente notwendig. Nach Achterbosch u. a. (1985) ist das Zusammenfassen von Wänden zu Ersatzelementen nur für Wände zulässig, deren Zeitkonstanten sich nicht um mehr als Faktor 3 unterscheiden. Für Anwendungen, bei denen das Modellverhalten bei höheren Frequenzen bedeutsam ist, empfiehlt sich die Verwendung von mindestens zwei Kapazitäten pro Ersatzelement, wobei die oberflächennahe Kapazität nur die Hälfte bis ein Drittel der kernnahen Kapazität betragen soll. Bacher u. Madsen (2011) zeigen in einem Vergleich von Modellen unterschiedlicher

Ordnung, dass ein Modell mit drei Kapazitäten den besten Kompromiss zwischen physikalischer Abbildung des Gebäudes und den verfügbaren Daten zur Systemidentifikation darstellt. Eine Kapazität gibt das thermische Verhalten des Heizungssystems wieder, die verbleibenden beiden Kapazitäten beschreiben getrennt die externen Wände sowie die internen Massen inklusive Wände, Luftvolumen und Einrichtung. Gleiches zeigen Reynders u. a. (2014) in einer analogen Studie, die für mehrere Gebäude unterschiedlicher Bauschwere in Modellen mit vier und fünf Kapazitäten resultiert, wobei eine Kapazität das Luftvolumen repräsentiert.

Crabb u. a. (1987) entwickelten ein Zwei-Kapazitäten-Modell, dass einen schweren Pfad mit thermischer Masse (Wände) und einen leichten Pfad ohne thermische Masse (Fenster) Richtung Umgebung beschreibt. Ein Modell mit zwei Kapazitäten ist ihrer Einschätzung nach ausreichend, da der Wärmetransfer in Gebäuden durch zwei Zeitkonstanten dominiert wird. Eine Kapazität des Modells ist assoziiert mit der thermischen Masse der Wände (große Zeitkonstante), die zweite Kapazität dient zur Abbildung des Luftvolumens und der Inneneinrichtung (kleine Zeitkonstante). Die Parameterberechnung erfolgt auf Basis der Ansätze von Lorenz u. Masy (1982). Tindale (1993) erweitert dieses Modell um eine dritte Kapazität zur Abbildung der hohen Dynamiken in den oberflächennahen Wandschichten Richtung Innenraum. Zusätzlich unterscheiden seine Arbeiten zwischen konvektivem und strahlendem Wärmeaustausch im Innenraum mit Hilfe des Rad-Air-Modells von Davies (1990). Auf Basis dieser Erweiterungen kann die Genauigkeit der Modellierung insbesondere für leichte Gebäude verbessert werden. Parallel zu Tindale (1993) benutzte Dewson u. a. (1993) das Originalmodell von Crabb u. a. (1987), um in Kombination mit Parameteridentifikationsverfahren die Genauigkeit der Parameter und Modellierung zu erhöhen. Die Anzahl an Kapazitäten und die Topologie bleiben dabei unverändert. Basierend auf diesen Arbeiten entwickelten Schultz u. Svendsen (1998) das Tool *WinSim* zur Analyse von Fenstersystemen. Dabei vernachlässigt *WinSim* den leichten Pfad des Modells nach Tindale (1993) und fasst alle Elemente im schweren Pfad zusammen. Die Parameterberechnung erfolgt auf Basis der DIN EN ISO 13786 (2008). Nielsen (2005) verwendet *WinSim* als Basis für eine weitere Modifikation des Originalmodells von Crabb u. a. (1987), dass zwischen dem Einfluss des Luftvolumens im Innenraum und der Gebäudestruktur unterscheidet. Grundsätzlich verwenden sowohl das Originalmodell als auch alle Erweiterungen ein oder zwei Kapazitäten zur Abbildung der Wände, teilweise in Kombination mit weiteren Kapazitäten für den Innenraum. Kämpf u. Robinson (2007) stellten in einer Modifikation des Modells von Nielsen (2005) das Konzept eines leichten und eines schweren Pfads wieder her und nutzen dieses Modell in der Software *CitySim*. Die Parameterberechnung basiert auf den Ansätzen von Lorenz u. Masy (1982). Nach Kämpf u. Robinson (2007) ist das Modell nicht für schwere Gebäude geeignet, bei denen der Berechnungsansatz von Lorenz u. Masy (1982) sowie die Verwendung von einer Kapazität für die gesamte Gebäudestruktur zu Abweichungen führen.

Im Gegensatz zu den Arbeiten basierend auf Crabb u. a. (1987) verwenden Gouda u. a. (2000) weiterhin den Ansatz von Lorenz u. Masy (1982), modellieren jedoch jede Wand separat mit Hilfe von zwei Kapazitäten. Die Unterscheidung der einzelnen Wände führt zu einer besseren Abbildung der hö-

heren Dynamiken und somit zu höheren Genauigkeiten bei kurzfristigen Effekten. Als zusätzliche Alternative ersetzen sie die Parameterberechnung durch ein Identifikationsverfahren basierend auf einer nichtlinearen Optimierung eines 20-Kapazitäten-Referenzmodells (Gouda u. a. 2002). Durch die Verwendung mehrerer Zielfunktionen bei der Optimierung kann dabei die Genauigkeit der Parameteridentifikation weiter gesteigert werden (Underwood 2014). Voraussetzung ist die genaue Kenntnis einer Vielzahl von Eingangsgrößen und die Akzeptanz eines erhöhten Rechenaufwandes für die Optimierung.

Einen ähnlichen Weg wählten Kim u. a. (2013, 2014); basierend auf einem komplexen Modell bestehend aus einzelnen Modellen für jede Wand und jedes Fenster in einer thermischen Zone entwickelten sie ein vereinfachtes Modell bestehend aus einer Wand und einem Fenster. Das entwickelte Modell ist dabei vollständig linear und kann in den Zustandsraum übertragen werden. Kim u. a. (2013, 2014) zeigen, dass die Abweichungen zwischen komplexem und vereinfachtem Modell für frei schwingende Testfälle unter $0,3^{\circ}\text{C}$ liegen. In einem weiteren Schritt wird das Modell mit Hilfe mathematischer Reduktionsverfahren basierend auf Moore's Methode weiter vereinfacht (Kim u. a. 2013). Bei einer vollständigen Reduktion des komplexen Modells auf die dominanten Dynamiken verringert sich jedoch das Potenzial im Rahmen einer anschließenden mathematischen Modellreduktion, sodass eine Kombination von vereinfachten Ansätzen und mathematischer Reduktion keinen erweiterten Nutzen bringt.

Aufbauend auf den Grundlagen von Beuken (1936) entwickelte Rouvel (1972) ein Rechenverfahren, welches in der Software GEBSIMU (Rouvel 2010) umgesetzt ist. Das Programm verfügt über drei verschiedene Stufen der Diskretisierung. Während im detaillierten Beuken-Modell jede Wandschicht jeder Wand durch so viele T-Schaltungen abgebildet wird, dass eine weitere Unterteilung keine messbare Genauigkeitssteigerung zur Folge hat, werden im n-K-Modell die Wände jeweils zu einer T-Schaltung zusammengefasst. Beim dritten Modell, dem 2-K-Modell, werden alle Wände zu zwei Ersatzelementen zusammengefasst (Rouvel u. Zimmermann 2004):

Asymmetrisch belastete Bauteile, die alle Außenbauteile wie Außenwände und Außenfenster umfassen.

Symmetrische belastete Bauteile, womit Innenbauteile wie Innenwände mit adiabatem Wandverhalten bezeichnet werden.

Nach Rouvel (2010) sind die Abweichungen zwischen den drei Modellvarianten in der Praxis nicht relevant. Eine weitere Vereinfachung zu einem Ein-Kapazitäten-Modell ist nach Rouvel u. Zimmermann (1997) nicht zulässig, da sonst die Dynamik des thermischen Systems nicht mehr akkurat abgebildet werden kann. Zur Lösung des Differentialgleichungssystems eignen sich nach Rouvel u. Zimmermann (2004) drei verschiedene Ansätze:

Regelungstechnische Ersatzmodelle, bei denen der Schaltkreis in ein Verzögerungsglied erster Ordnung umgewandelt wird (Rouvel u. Zimmermann 1997). Dabei müssen Vorhaltezeiten und Verstärkungsfaktoren für jeden Zeitschritt neu berechnet werden.

Numerische Verfahren, die das Differentialgleichungssystem wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt mittels numerischer Ansätze direkt lösen.

Laplace-Transformation, die eine analytische Lösung im Bildbereich erlaubt.

Die direkte numerische Lösung bietet sich dabei für softwaretechnische Lösungen an, da keine weitere Transformation des Problems notwendig ist, die die Flexibilität des Modells (z. B. Wechsel von Aktions- und Reaktionsgrößen) einschränken könnte. Ein Vergleich mit etablierten Simulationsprogrammen zeigt Abweichungen im Bereich der Schwankungsbreite zwischen den verschiedenen Programmen (Rouvel u. Zimmermann 1997).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass verschiedene Entwicklungsrichtungen für thermische Netzwerke auszumachen sind. Hoch auflösende Ansätze nach Clarke (2001) sowie eine Reihe von Modellen basierend auf Crabb u. a. (1987), Gouda u. a. (2000) und Kim u. a. (2013) weisen hohe Komplexitäten auf, sind auf ungeeignete Parameteridentifikationsverfahren zugeschnitten oder behalten signifikante Genauigkeitseinbußen. Grundsätzlich zeigen jedoch die Ansätze von Gouda u. a. (2000), Kim u. a. (2013) und Rouvel u. Zimmermann (2004) Potenzial, im Rahmen vereinfachter Gebäudemodelle zum Einsatz zu kommen. Die Frage nach der optimalen Anzahl an Kapazitäten kann nicht abschließend geklärt werden und verbleibt als offener Punkt, der im Rahmen der Methodik in Kapitel 4.2.2 eingehender untersucht wird. Eine Reihe von Studien belegt jedoch, dass mindestens zwei Kapazitäten zur Abbildung der thermischen Masse einer Zone benötigt werden (Rouvel u. Zimmermann 1997; Bacher u. Madsen 2011; Reynders u. a. 2014). Als Grundlage für die Entwicklung eines vereinfachten Gebäudemodells für Stadtteilbetrachtungen wird daher in dieser Arbeit das Zwei-Kapazitäten-Modell nach Rouvel u. Zimmermann (2004) gewählt und bei Bedarf um weitere Kapazitäten erweitert.

3.2.3 Normierte Modelle und Berechnungsverfahren

Neben den gezeigten Arbeiten zur Parameterberechnung und Modelltopologie von reduzierten Gebäudemodellen existieren eine Reihe von nationalen und internationalen Normen und Richtlinien zur Berechnung des Heizwärmebedarfes von Gebäuden. Diese sind als standardisierte Lösungen mit in den Stand der Forschung einzubeziehen und die bereits gezeigten Ansätze zur Parameterberechnung und Modellierung in diesen Kontext einzuordnen.

Zur Vereinheitlichung der verwendeten Verfahren zur analytischen Bestimmung der dynamischen wärmetechnischen Kenngrößen wurden die verschiedenen existierenden Arbeiten auf internationaler Ebene in der DIN EN ISO 13786 (2008) zusammengefasst. Sie beschreibt die grundsätzliche Lösung der Wärmeleitungsgleichung für Wände unter beidseitiger, periodischer Belastung und führt die resultierenden Gleichungen zur Bestimmung der effektiven Kapazität einer Wand zusammen. Die Norm umfasst sowohl ein detailliertes Verfahren auf Basis einer gewählten Anregungsfrequenz (und tabellarischen Empfehlungen typischer Anregungsfrequenzen) als auch ein verein-

fachtes Verfahren auf Basis der Wanddicke und ein Schätzverfahren, welches auf einer allgemeingültigen effektiven Wanddicke beruht. Insbesondere das vereinfachte und das Schätzverfahren sind dabei nur in engen Anwendungsgrenzen gültig, da implizit Annahmen zu Wandaufbau, den verwendeten Materialien und den Anregungsfrequenzen gemacht wurden. Das detaillierte Verfahren deckt sich mit dem Ansatz von Rouvel (1972), welches in Kapitel 3.2.1 eingehend vorgestellt wurde und als für geeignete Grundlage für diese Arbeit ausgewählt wurde.

Ebenfalls auf internationaler Ebene beschreibt die DIN EN ISO 13790 (2008) neben einem statischen Ansatz zur Modellierung von Gebäuden zusätzlich ein vereinfachtes Stundenverfahren. Die Norm darf zur Berechnung jährlicher Heizwärme- und Kühlbedarfe sowie informativ zur Ermittlung monatsbezogener Werte des Energiebedarfs verwendet werden. Die Norm beruht auf einem Ein-Knoten-Modell pro thermischer Zone, bei dem die gesamte thermische Masse in einer Kapazität zusammengefasst wird. Die Parameterberechnung beruht teilweise auf empirischen Parametern im Zusammenhang mit der Zeitkonstanten der thermischen Zone. Die Widerstände ergeben sich direkt als Teilwerte des Gesamtwiderstandes der Gebäudehülle. Die Berechnung der Kapazität orientiert sich an der effektiven thermischen Masse nach DIN EN ISO 13786 (2008). Dabei darf sowohl das ausführliche Verfahren als auch das vereinfachte Schätzverfahren über die Dicke der Wand angewendet werden. Zusätzliche thermische Massen zu den externen Wänden werden in der DIN EN ISO 13790 (2008) nicht berücksichtigt. Aufgrund der Verwendung von empirischen Parametern sowie des vereinfachten Verfahrens ergeben sich große Unsicherheiten in Bezug auf die tatsächlichen effektiven Massen und Zeitkonstanten. Vor allem im Bereich höherer Dynamiken (z. B. im Stundenbereich) und für komplexe Gebäude wie Bürogebäude sind größere Abweichungen im Vergleich zu höherwertigen Verfahren zu erwarten (Jokisalo u. Kurnitski 2007; Lauster u. a. 2013). Aufgrund der Einschränkung der Norm auf monatliche Zeitschritte ist seit 2015 eine Neufassung und Umstrukturierung in Planung und als DIN EN ISO 52016-1 (2015) in erster Fassung veröffentlicht. Die Berechnungen erfolgen hier pro thermischer Zone und sind eine Spezifizierung des generischen Referenzmodells in DIN EN ISO 52017-1 (2015) (van Dijk u. a. 2015). Die Norm ist in ein übergreifendes Netzwerk von Normen zur Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden eingebunden (van Dijk u. a. 2015). Als größten Unterschied führt van Dijk u. a. (2016) an, dass die Bauteile nicht mehr wie in der DIN EN ISO 13790 (2008) zu wenigen Ersatzelementen und Parametern zusammengefasst, sondern separat berechnet werden. Die Betrachtung der einzelnen Bauteile führt zu einer stark erhöhten Anzahl von Zustandsvariablen und somit stark erhöhten Rechenzeiten und numerisch herausfordernden Modelleigenschaften (van Dijk u. a. 2015). Dieser Aspekt unterlegt den Fokus der Norm auf die Berechnung einzelner Gebäude, macht sie für die Anwendung auf großskaliger Ebene jedoch ungeeignet.

Auf nationaler Ebene definiert in Deutschland die VDI 6007-1 (2015) ein Zwei-Knoten-Modell zur dynamischen Gebäudesimulation. Sie basiert dabei vollständig auf dem 2-K-Modell von Rouvel u. Zimmermann (2004) und fasst die Arbeiten von Rouvel u. Zimmermann (1997) und Rouvel (2010) zu Modelltopologien und von Rouvel (1972) und Rouvel u. Zimmermann (2004) zu Parameterberech-

nungen in einem normativen Kontext zusammen. Die beschriebene Parameterberechnung deckt sich mit den Berechnungen des detaillierten Rechenverfahrens nach DIN EN ISO 13786 (2008). Ziel der VDI 6007-1 (2015) ist die Definition eines einheitlichen, vereinfachten Verfahrens zur Berechnung von Heiz- und Kühllasten für Räume und Gebäude unter Berücksichtigung des instationären Verhaltens. Die Richtlinie umfasst sowohl eine Beschreibung der Parameterberechnung und des thermischen Netzwerkmodells als auch eine diskrete analytische Rechenvorschrift für die Innenraumtemperaturen auf Basis einer Laplace-Transformation des Differenzialgleichungssystems als Mittelwerte der gewählten Zeitschrittweite. Ergänzend zum Blatt 1 beschreiben VDI 6007-2 (2012) und VDI 6007-3 (2015) Rechenregeln zur Berücksichtigung der solaren Strahlung auf und durch Fenster sowie der Eigen- und Fremdverschattung. Alle drei Blätter bilden die Grundlage für die derzeit geltenden Verfahren zur Auslegung der Kühllast im Rahmen der VDI 2078 (2015). Die VDI 6007-1 (2015) erfüllt die Anforderungen der VDI 6020-1 (2001) und definiert eine Reihe eigener Testfälle sowie Referenzergebnisse für drei Beispieltage und enge Grenzwerte für Innenraumtemperaturen und Heiz- bzw. Kühlleistungen.

Abschließend ist zu sagen, dass kein parametrierbares Gebäudemodell existiert, dass auf die Anwendung auf Stadtquartiere und große Gebäudegruppen zugeschnitten ist und gleichzeitig sowohl die freie Wahl bzw. Analyse der optimalen Anzahl an Zustandsvariablen oder Knoten erlaubt als auch über eine assoziierte Methodik zur Bestimmung der Parameter verfügt. Das größte Potential aufgrund der erweiterbaren Topologie bietet die VDI 6007-1 (2015), die zusätzlich den Vorteil eines normativen Verfahrens beinhaltet. Sie fasst die vielversprechenden Ansätze von Rouvel (1972) bzw. der Norm DIN EN ISO 13786 (2008) zur Parameterberechnung und die Modelltopologie von Rouvel u. Zimmermann (2004) in einem Regelwerk zusammen. Sie bietet sich daher als vorrangige Basis an, auf der ein parametrierbares Gebäudemodell mit einer variablen Anzahl an Knoten für Simulationen auf Stadtquartiersebene entwickelt werden kann. Die Frage nach der optimalen Anzahl verbleibt offen und wird in Kapitel 4.2.2 eingehender untersucht.

3.3 Energiebedarfsrechnungen für Stadtquartiere

Ergänzend zu den erläuterten separaten Ansätzen zu Archetypen, Parameterberechnung und Modelltopologie existieren bereits einige Arbeiten, in denen die einzelnen Elemente im Rahmen einer übergreifenden Methodik zusammengefasst wurden. Die wichtigsten Arbeiten in diesem Bereich werden im Folgenden vorgestellt und der in dieser Arbeit verwendete Ansatz eingeordnet.

Swan u. Ugursal (2009) unterteilt die Ansätze für Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren in Top-Down und Bottom-Up Ansätze auf Basis der verwendeten Eingangsgrößen. Top-Down Ansätze beruhen dabei auf historischen Daten und bilden den Energiebedarf als Funktion von übergeordneten Größen (z. B. makroökonomische Indikatoren) ab. Im Rahmen dieser Arbeit lassen sich keine Top-Down Ansätze verwenden, da sie sich nicht zur Abbildung einzelner Gebäude oder von

Sanierungs- und Energieeffizienzmaßnahmen eignen. Bottom-Up Ansätze berechnen den Energiebedarf für einen repräsentativen Satz individueller Gebäude bzw. bilden jedes Gebäude separat ab. Sie erlauben auf diesem Wege die Berücksichtigung von Sanierungsmaßnahmen und ermöglichen eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung. Als Nachteil erfordern sie eine größere Anzahl von Eingangsgrößen, deren Erfassung einen gesteigerten Zeitaufwand erfordert. Zusätzlich sind die zugrunde liegenden Modellierungsansätze komplexer und bedingen einen höheren Grad an Automation. Basis der Modelle können dabei physikalische White-Box und Grey-Box oder messdatenbasierte regressive Black-Box Modelle sein. Reinhart u. Cerezo Davila (2016) und Kavgić u. a. (2010) greifen diese Definition von Top-Down und Bottom-Up Modellen auf und favorisieren aus den genannten Gründen ebenfalls physikalische Bottom-Up Modelle zur Erstellung von Wärmebedarfsprofilen. Nach Reinhart u. Cerezo Davila (2016) unterteilt sich der Prozess der Energiebedarfsrechnung in die Schritte Modellparametrierung, Modellierung und Validierung. Für die Modellbildung von Gebäuden auf Stadtteilebene führen sie den Begriff Urban Building Energy Models (UBEM) ein. Die folgende Übersicht fokussiert sich auf physikalische, dynamische, Bottom-Up, Grey-Box, UBEM Modelle, die über typologische Ansätze parametrierbar sind und in automatisierte Datenflussketten eingebunden sind. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften relevanter Projekte mit einem vergleichbaren Ansatz und wie die vorliegende Arbeit einzuordnen ist.

Die ersten Arbeiten in Richtung einer automatisierten Toolkette für dynamische UBEM in Verbindung mit einem Archetypen-Ansatz unternahmen Robinson u. a. (2007). Die in C++ entwickelte Software *SUNtool* richtet sich an Planer und Designer von Stadtquartieren in der Konzeptphase und verbindet Parametrierung, Modellierung, Simulation und Visualisierung in einer Anwendung. Mit einer stündlichen Auflösung ist sie vorrangig zur Analyse von Stadtquartieren mit einer Größe von 50 – 500 Gebäuden gedacht. Die einzelnen Gebäude werden dabei zonenscharf aufgelöst. Die Ergebnisse sollen in akzeptabler Zeit berechnet werden, um den Planer direkt in der Konzeptphase unterstützen zu können. Die „IDefaults“ genannten Archetypen verwenden die Nutzung und das Baujahr als Eingangsgrößen. Welche Gebäudetypen als Archetypen zur Verfügung stehen und für welches Land sie gültig sind, wird in Robinson u. a. (2007) nicht beschrieben. Als Rechenkern kommt ein hoch aufgelöstes Gebäudemodell zum Einsatz, das mit Hilfe mathematischer Reduktionsansätze zu einem vereinfachten Ansatz reduziert wird. *SUNtool* wurde 2011 durch eine Neuimplementierung eines ähnlichen Ansatzes mit dem Namen *CitySim*, ebenfalls in C++, ersetzt (Robinson 2011). So fokussiert sich auch *CitySim* auf Stadtquartiere mit stündlicher und zonenscharfer Auflösung und basiert auf den IDefault Archetypen. Hinzu kommen Archetypen für den schweizer Wohngebäudebestand. Im Unterschied zu *SUNtool* basiert *CitySim* nicht mehr auf mathematischen Reduktionsverfahren, sondern verwendet ein selbst entwickeltes thermisches Netzwerkmodell zweiter Ordnung (Kämpf u. Robinson 2007).

Parallel zu Robinson u. a. (2007) entwickelten Clarke u. a. (2008) *EDEM* zur Simulation von schottischen Wohngebäuden. Der verfügbare Satz an Archetypen ist daher auf den schottischen Bestand

zugeschnitten. Der Ansatz von EDEM ist es, mit Hilfe eines nutzerfreundlichen Tools, detaillierten Gebäudesimulationen und vereinfachten Eingangsgrößen den Heizwärmebedarf von Stadtquartieren zu berechnen. Die Archetypen wurden auf Basis von nationalen Umfragen erstellt und in thermische Klassen unterteilt. Als Eingangsgrößen werden der Dämmstandard und die Bauschwerklasse benötigt. Als Rechenkern wird die auf einzelne Gebäude spezialisierte Software ESP-r verwendet, die einen stündlichen Zeitschritt und eine zonenscharfe Auflösung erlaubt. Einen ähnlichen Ansatz mit ESP-r als Rechenkern wurde in der Software CHREM umgesetzt, die die Abbildung des kanadischen Wohngebäudebestandes mit Hilfe von realen Beispielgebäuden im Fokus hat (Swan u. a. 2008). Die in Perl geschriebene Anwendung basiert auf den realen Geometrien der einzelnen Gebäude und kann für die Evaluierung von Energieeinsparmaßnahmen verwendet werden. Vereinfachende Annahmen zu den thermischen Eigenschaften der Gebäude sind in einer Datenbank zusammengefasst. So kann mit Hilfe von 18000 - 20000 Beispielgebäuden der Heizwärmebedarf aller 9 Mio. kanadischen Wohngebäude berechnet werden. Als Eingangsgrößen dienen dabei der Gebäudetyp und das Baujahr.

Am Massachusetts Institute of Technology entwickelten Reinhart u. a. (2013) das Tool Urban Modeling Interface (UMI) zur effizienten Modellierung großer Gebäudegruppen. UMI ist als Erweiterung der CAD Software Rhinoceros konzipiert und ist in Python und der visuellen Programmierungsumgebung für Rhinoceros, Grasshopper implementiert. Als Rechenkerne kommen für die Gebäudephysik EnergyPlus und für Strahlungsberechnungen Radiance/Daysim zum Einsatz. UMI erlaubt so die Berechnung von Gebäudeenergiebedarfen, nachhaltigen Mobilitätslösungen und Tageslichtnutzung für Stadtquartiere und ganze Städte. Ziel von UMI ist die Unterstützung von Architekten und Stadtplanern bei der Planung neuer Stadtquartiere. Als Archetypen sind in UMI die Vergleichsdatensätze für Geschäftsgebäude des amerikanischen Energieministeriums (DOE Commercial Building Benchmark Models) hinterlegt, die als Eingangsgrößen den Gebäudetyp und das Baujahr verwenden. Die Simulationsergebnisse können in Rhinoceros visualisiert und räumlich aufgelöst werden.

Ein weiteres Tool zur Abbildung des Heizwärmebedarfs auf nationaler Ebene ist Energy, Carbon and Cost Assessment for Building Stocks (ECCABS), entwickelt von Mata u. a. (2013) in Matlab/Simulink. Der Fokus liegt auf dem Wohngebäudebestand der Länder der Europäischen Union, für die im Rahmen des Projektes TABULA Archetypen erarbeitet wurden (Ballarini u. a. 2014) und durch Mata u. a. (2014) für dynamische Energiebedarfsberechnungen aufbereitet wurden. Die Archetypen verwenden den Gebäudetyp und das Baujahr als Eingangsgrößen. Als Rechenkern wird das stundengenaue Verfahren der DIN EN ISO 13790 (2008) als Ein-Zonen-Verfahren verwendet.

Im Rahmen unterschiedlicher Projekte entwickelte die Universität der Künste Berlin eine Reihe verschiedener Modelle und Tools für Betrachtungen auf Stadtteilebene. Für das Projekt „Young Cities“ nutzten Huber u. Nytsch-Geusen (2011) eine Kombination aus CAD und GIS Systemen zur Verwaltung der detailliert vorhandenen Daten eines Neubaugebietes. Für die Simulation der Gebäudephysik und der Gebäudetechnik kamen EnergyPlus und Modelica zum Einsatz. Mit der Entwicklung

der institutseigenen Modelica-Modellbibliothek BuildingsSystems wurde ebenfalls die Simulation der Gebäudephysik nach Modelica übertragen und in Modellen mit unterschiedlicher Modellierungstiefe umgesetzt (Nytsch-Geusen u. a. 2012, 2013). So lassen sich auf drei Zustandsvariablen reduzierte, vereinfachte Gebäudemodelle oder detailliertere Modelle mit acht Zustandsgrößen einsetzen (Nytsch-Geusen u. a. 2014). Auf Basis dieser Bibliothek entwickelten Kaul u. a. (2014) das teilautomatisierte Verfahren Open EQuarters in Python zur Nutzung von Archetypen des deutschen Wohngebäudebestandes. Als Eingangsgrößen werden Gebäudetyp und Baujahr verwendet. Inderfurth u. a. (2014) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Datenlagen und modellierten den Campus der Technischen Universität Berlin mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens zur Parameteridentifikation auf Basis von Messdaten (Inderfurth u. a. 2015).

Als Plattform-Lösung strebt das in Java implementierte Tool SimStadt von Eicker u. a. (2015) die freie Kombination verschiedener existierender Tools an. Als Rechenkerne stehen ein vereinfachtes Ein-Zonen Gebäudemodell auf Basis der DIN EN ISO 13790 (2008), ein detailliertes Modell in der Simulationsumgebung INSEL (Monsalvete u. a. 2015) und ein Monatsverfahren nach DIN V 18599-2 (2011) zur Verfügung. SimStadt bietet eine grafische Oberfläche ähnlich einem GIS-System zur Visualisierung und räumlichen Auflösung des Gebäudebestandes. Anwendungsbereich sind Untersuchungen zu Gebäudeenergiebedarf, Effizienzmaßnahmen und Energiepotenzialen von Stadtteilen und Städten (Eicker u. a. 2015). Die Archetypen verwenden als Eingangsgrößen ebenfalls Baujahr und Gebäudetyp wie Bürogebäude, Schulen, Mehr-, Einfamilien- und Reihenhäuser. Genauere Informationen zu den Archetypen wurde nicht veröffentlicht.

Mit Virtual PULSE entwickelten Heidarinejad u. a. (2015) ein strikt web-basiertes Tool zur Modellierung von Forschungsgebäuden und deren urbanem Kontext und der Analyse des Gebäudeenergiebedarfs. Virtual PULSE ist in Ruby geschrieben und verwendet EnergyPlus als Rechenkern für die Gebäudesimulation. Trotz des stundengenauen Rechenkerns stehen in der Webanwendung nur monatliche Energiebedarfe zur Verfügung. Zielstellung von Virtual PULSE ist es, Energiemanager mit großen Gebäudebeständen bei der Erstellung von Energieszenarien und der Evaluierung von Langzeitplanungen zu unterstützen. Der verfügbare Satz an Archetypen ist analog zu UMI auf den DOE Commercial Building Benchmark Models aufgebaut und verwendet als Eingangsgrößen ebenfalls Gebäudetyp und Baujahr. Zusätzlich stellt Virtual PULSE auch einen Satz typischer Gebäudetechnik für den amerikanischen Markt zur Verfügung.

Riederer u. a. (2015) entwickeln in einem laufenden Projekt den District Modeller and Simulator (DIMOSIM). Die in Matlab implementierte Plattformlösung konzentriert sich bis dato vornehmlich auf die Modellierung des Gebäudebestandes, Informationen zur Parametrierung und den verwendeten Eingangsgrößen sind nicht verfügbar. Der stundengenaue Multi-Zonen-Rechenkern ist eine eigene Entwicklung basierend auf einem thermischen Netzwerk vierter Ordnung (Perez u. a. 2015). DIMOSIM ist vornehmlich zur Analyse von Wärmenetzen und den entsprechenden Wärmelasten konzipiert und für Netzwerke mit bis zu 200 Gebäuden getestet (Riederer u. a. 2015).

Der *City Energy Analyst* (CEA) von Fonseca u. a. (2016) fokussiert sich auf die integrale Klassifizierung und Charakterisierung von räumlich und zeitlich aufgelösten Energiebedarfsprofilen und die Analyse und Optimierung von Energiesystemen in Stadtquartieren und Städten (Fonseca u. Schlueter 2015). Ziel ist die Identifikation von Transformationspotenzialen im kommerziellen und Wohngebäudebereich hinsichtlich der räumlichen Aufteilung bzw. Ballung von Potenzialen. CEA ist in Python geschrieben und umfasst einen stundengenauen Ein-Zonen-Rechenkern auf Basis des Modells der DIN EN ISO 13790 (2008), eine Datenbank mit Beispielgebäuden für den Wohngebäudebestand und eine Integration in offene GIS-Systeme als Nutzerschnittstelle. Als Eingangsgröße für die Beispielgebäude wird nur das Baujahr benötigt. Der Erstellung der Beispielgebäude folgt ein Aggregationsschritt, bei dem der zeitliche Verlauf der dynamischen Simulationen auf den gemessenen Verbrauch des Stadtteils skaliert wird (Fonseca u. Schlueter 2015).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bereits eine Reihe von Tools und Ansätzen für parametrierbare Gebäudemodelle für Stadtteilbetrachtungen existiert. Allen gezeigten Tools ist gemein, dass sie typologische Parametrierungsmethoden mit dynamischen Gebäudesimulationen verbinden. Die wichtigsten Eigenschaften der Tools sind zur Übersicht in Tabelle 3.1 aufgeführt. Auf Seiten der Typologien sind die vorhandenen Datensätze meist auf ein bestimmtes Land und vorrangig auf den Wohngebäudebestand begrenzt. Für die Anwendungsfälle im Rahmen dieser Arbeit muss daher eine erweiterte, übergreifende Typologie für deutsche Wohn- und Bürogebäude und im Speziellen für Institutsgebäude entwickelt werden. Dazu kann auf die in Kapitel 3.1 vorgestellten Methoden zur Erstellung von Archetypen nach Parekh (2007) und Mata u. a. (2014) und die vorhandenen Typologien von Loga u. a. (2005) und Hegger u. Dettmar (2014) für Wohngebäude und von Hillebrand u. a. (2014) für Bürogebäude zurückgegriffen werden. Als Eingangsgrößen für die Archetypen werden vorrangig der Gebäudetyp im Sinne der Gebäudenutzung, das Baujahr und die Nettogrundfläche verwendet, sodass diese Größen ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit im Fokus stehen. Die Berechnung der Parameter wird in den gezeigten Tools nicht detailliert vorgestellt und ist meist direkt mit der Modelltopologie verbunden. Hier wird auf Basis von Kapitel 3.2.1 auf die Arbeiten von Rouvel (1972) zurückgegriffen, die im Rahmen der DIN EN ISO 13786 (2008) und der VDI 6007-1 (2015) standardisiert wurden. Im Bereich der Modellierung kommen in den gezeigten Arbeiten entweder auf Einzelgebäude spezialisierte Tools wie *EnergyPlus* und *ESP-r* zum Einsatz oder es wird auf vereinfachte Ansätze zurückgegriffen. Aufgrund der reduzierten Rechenzeit und der hohen Unsicherheiten durch die archetypischen Eingangsgrößen ist durch den Einsatz detaillierter Ansätze kein nutzbarer Mehrwert zu erwarten. Unter den vereinfachten Ansätzen kommen vorrangig thermische Netzwerke zum Einsatz. Aufgrund der Vielzahl existierender Modelltopologien (Kapitel 3.2.2) scheint die Entwicklung eigener Ansätze nicht zielführend. Unter den normierten Netzwerkmodellen wird in den vorgestellten Arbeiten die DIN EN ISO 13790 (2008) verwendet. Mit einer Ordnung von eins liegt sie jedoch unter der in der Literatur empfohlenen Ordnung von mindestens zwei (Rouvel u. Zimmermann 1997; Bacher u. Madsen 2011; Reynders u. a. 2014) und ist für stündliche Auflösungen nicht empfohlen. Zusätzlich befindet sich die Norm in der Überarbeitung und das ver-

einfachte Modell ist nicht mehr Teil der überarbeiteten Norm DIN EN ISO 52016-1 (2015). Die VDI 6007-1 (2015) mit einer Ordnung von zwei, die aufgrund ihrer Topologie zusätzlich die Integration weiterer Kapazitäten erlaubt, bietet sich als Alternative und Grundlage des Modells in Rahmen dieser Arbeit an. Sie fasst die Ansätze von Rouvel (1972) zur Parameterberechnung und die Modelltopologie von Rouvel u. Zimmermann (2004) in einem Regelwerk zusammen. Die zusätzliche Integration weiterer Kapazitäten erlaubt die eingehendere Untersuchung der Frage nach der optimalen Anzahl an Kapazitäten in Kapitel 4.2.2. In Kombination bilden die genannten Arbeiten zu Archetypen, Parameterberechnungsverfahren und Modelltopologien die Grundlage für Entwicklung der Methodik im nachfolgenden Kapitel.

Tabelle 3.1: Relevante Arbeiten zur automatisierten Erzeugung von Wärmebedarfsprofilen aus Gebäudetypologien.

Projektname Referenz	Zeitliche Auflösung	Räumliche Ausdehnung	Typlogisierungsansatz Spezifizierung	Simulations- modell	Open- Source	Eingangsgrößen
SUNtool Robinson u. a. (2007)	Stündlich	Zonenscharf Stadtquartier	Archetypen IDefault	White-Box + math. Reduktion	Nein	Nutzung Baujahr
EDEM Clarke u. a. (2008)	Stündlich	Gebäudescharf Stadtquartier	Archetypen Schottische Wohngeb.	ESP-r	Nein	Isolationsstand. Bauschwerekl.
CHREM Swan u. a. (2008)	Stündlich	Zonenscharf Landesweit	Beispielgebäude Kanadische Wohngeb.	ESP-r	Nein	Gebäudetyp Baujahr
CitySim Robinson (2011)	Stündlich	Zonenscharf Stadtquartier	Archetypen Schweizer Wohngeb.	Therm. Netzwerk 2. Ordnung	Nein	Gebäudetyp Baujahr
UMI Reinhart u. a. (2013)	Stündlich	Zonenscharf Stadtquartier	Archetypen US Geschäftsgebäude	EnergyPlus	Ja	Gebäudetyp Baujahr
ECCABS Mata u. a. (2014)	Stündlich	Gebäudescharf Landesweit	Archetypen Europäische Wohngeb.	ISO 13790	Nein	Gebäudetyp Baujahr
Open EQuarters Nytsch-Geusen u. Kaul (2015)	Stündlich	Gebäudescharf Stadtquartier	Archetypen Deutsche Wohngeb.	Therm. Netzwerk 3./8. Ordnung	Ja	Gebäudetyp Baujahr
SimStadt Eicker u. a. (2015)	Stündlich	Gebäudescharf Stadt	Archetypen	ISO 13790	Nein	Gebäudetyp Baujahr
Virtual PULSE Heidarinejad u. a. (2015)	Monatlich	Gebäudescharf Stadtquartier	Archetypen US Geschäftsgebäude	EnergyPlus	Ja	Gebäudetyp Baujahr
DIMOSIM Riederer u. a. (2015)	Stündlich	Zonenscharf Stadtquartier	Unbekannt	Therm. Netzwerk 4. Ordnung	Nein	Unbekannt
CEA Fonseca u. Schlueter (2015)	Stündlich	Gebäudescharf Stadtquartier	Beispielgebäude Wohngebäude	ISO 13790	Ja	Baujahr

4 Aufbau parametrierbarer Gebäudemodelle

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung parametrierbarer Gebäudemodelle für Stadtteilbetrachtungen. Wie in Kapitel 1 motiviert, bietet es sich hierzu an, die zu entwickelnde Methodik in die drei Teilbereiche Parametrierung, Modellierung und Automation zu gliedern. Dabei sollen Beiträge zur Beantwortung der Fragen geliefert werden, wie ungenügende Datenlagen ergänzt und auf dieser Basis die für die Modellierung notwendigen Parameter berechnet werden können und wie vereinfachte dynamische Modelle gestaltet werden müssen und bis zu welchem Grad eine Vereinfachung sinnvoll ist. Hierbei kann als Grundlage auf die in Kapitel 3 vorgestellten Arbeiten zurückgegriffen werden, die einen archetypischen Ansatz für die Parametrierung sowie ein thermisches Netzwerk reduzierter Ordnung für die Modellierung befürworten. Hieraus ergibt sich eine klare Teilung der Aufgabenstellung für die Methodik in den Bereichen:

Archetypische Parametrierung von Wohn-, Büro- und Institutsgebäuden zur Berechnung aller für die dynamische Simulation benötigter Parameter und Randbedingungen in stündlicher Auflösung, mit der Möglichkeit der Verfeinerung der Datengrundlage. Büro- und Institutsgebäude müssen nach David u. a. (2013) aufgrund der klimatechnischen Anforderungen getrennt betrachtet werden. Dies wird im Rahmen des Werkzeuges TEASER umgesetzt.

Dynamische Modellierung auf Basis von vereinfachten thermischen Netzwerken zur Berechnung von Wärmelastprofilen für Gebäudegruppen bei akzeptablen Rechenzeiten. Zusätzlich ist zu prüfen, welche Anzahl an Kapazitäten sinnvoll erscheint. Hierzu werden Modelle im Rahmen der Modelica-Bibliothek AixLib entwickelt.

Automation der gesamten Datenfluss- und Arbeitskette von der Datenaufnahme, Parametrierung und Simulation bis zur Auswertung aller Ergebnisse. Hierzu werden Bausteine des Paketes CampFlow weiterentwickelt.

Die DIN EN ISO 13790 (2008) fordert bei der Entwicklung einer solchen Methodik eine klare Unterscheidung zwischen Parametrierung und Modellierung. Dabei können folgende Kriterien sowohl an die programmiertechnische Umsetzung der Parametrierung als auch der Modellierung gestellt werden:

Verifizierbar: Alle Interessierten können die Eingangswerte und die angewendeten Verfahren anhand von Verifikationsbeispielen überprüfen.

Genau: Die Verfahren sollten so genau sein, wie es für die angestrebten Ergebnisse angemessen ist. Dies ist somit stark von der Zielstellung der Verfahren abhängig.

Transparent: Die Verantwortlichen sollten in der Lage sein können, jeden Schritt der Verfahren nachzuvollziehen. Dies wird durch einen klaren Umfang mit begrenzter Komplexität der Gleichungen und Parameter und klare Limitationen erreicht.

Stabil: Die Verfahren können auf eine Vielzahl von Situationen mit einem begrenzten Verlust an Genauigkeit angewendet werden.

Flexibel: Die Verfahren sollten auf eine Vielzahl von Situationen ohne größere Anpassungen anwendbar oder zumindest erweiterbar sein.

Die folgenden Kapitel stellen die entwickelten Methoden und Modelle unter den gegebenen Aspekten vor und bilden die methodische Grundlage für die Untersuchung der Anwendungsfälle. Dabei werden sowohl für die Archetypen als auch für die Modelle Test- und Beispielfälle vorgestellt, mit deren Hilfe sich beide Werkzeuge verifizieren lassen und sich Genauigkeit, Stabilität und Flexibilität bewerten lassen. Ein Ablaufdiagramm der vollständigen Methodik mit Benennung der einzelnen Teilschritte findet sich in Abbildung F4.

4.1 Parametrierung - TEASER

Für die vereinfachte Datenaufnahme, Parameterberechnung und automatische Modellgenerierung auf Basis von Archetypen wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Module der Software Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit (TEASER) entwickelt (Remmen u. a. 2017). Augenmerk dieser Module ist vorrangig die Verwendung von Archetypen und die Datenflusskette der Berechnung für die Modellierung notwendiger Parameter. Eine Einordnung der Module in den Gesamtablauf der entwickelten Methodik findet sich in Abbildung F4. Insbesondere für die Archetypen der Wohn- und Bürogebäude wird als Grundlage auf die Entwicklungen im Rahmen des Tools Retrofit Matrix (Hillebrand u. a. 2014) zurückgegriffen. TEASER wird vollständig offen und frei verfügbar auf <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER> unter der MIT-Lizenz in der Programmiersprache Python entwickelt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Module und Anwendungsbeispiele beruhen auf TEASER Version 0.6.2 (<https://github.com/RWTH-EBC/TEASER/releases/tag/v0.6.2>). Das folgende Kapitel stellt die entwickelten Archetypen im Detail vor und skizziert die entwickelte Datenflussskette, die zur Vorbereitung der dynamischen Gebäudemodelle dient.

4.1.1 Archetypen

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, eignen sich archetypische Ansätze in Anwendungsfällen, in denen eine unzureichende Datenlage vorliegt bzw. Aussagen über typische Gebäudebestände getroffen werden sollen. Die Archetypen basieren dabei auf einem repräsentativen Gebäudebestand, für den alle notwendigen Daten wie Gebäudegeometrie, die thermischen Eigenschaften und die Gebäudenutzung erhoben wurden. Aufgabe der Typologisierung ist es, Korrelationen zwischen vereinfachten

Eingangsgrößen und den geometrischen und thermischen Eigenschaften zu ermitteln. Es lassen sich aus der Literatur typische Paare von Eingangsgrößen und Eigenschaften ermitteln:

Zonierung und Randbedingungen können mit Hilfe der **Nutzungsart** abgeschätzt werden.

Kubatur und Wandflächen ergeben sich mit **Grundfläche, Gebäudehöhe und Stockwerkszahl**.

Wandaufbauten und Materialien werden auf Basis des **Bau- bzw. Sanierungsjahres** definiert.

Die folgenden Kapitel erläutern die typologischen Ansätze dieser Arbeit für Wohn-, Büro- und Institutsgebäude, die in TEASER implementiert wurden. Wie erwähnt müssen Instituts- und Bürogebäude aufgrund der klimatechnischen Anforderungen an die Labor- und Forschungsflächen getrennt betrachtet werden (David u. a. 2013).

4.1.1.1 Wohngebäude und energetische Stadtraumtypen

Die Archetypen für Wohngebäude dienen als Grundlage für die Untersuchung von Anwendungsfällen mit Wohnbebauung unter unvollständiger Datenlage. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Ansätze der Archetypen in den Bereichen Zonierung und Randbedingungen, Kubatur und Wandflächen sowie Wandaufbauten und Materialien vorgestellt.

Zonierung und Randbedingungen

Laut Volland u. Volland (2014) schreibt die DIN V 18599-1 (2016) zur Betrachtung von Wohngebäuden die Verwendung von Ein-Zonen-Modellen vor, welche alle beheizten Nutzungszonen des Gebäudes zusammenfasst. Dies basiert auf der Aussage, dass gleichmäßig beheizte Teilbereiche mit Temperaturunterschieden von weniger als 4 K zu einer Zone zusammengefasst werden können. In diesem Sinne werden Wohngebäude auch im Rahmen von TEASER als Ein-Zonen-Modelle implementiert und die internen Lasten gemäß der Wohnnutzung gewählt. Bei der detaillierten Untersuchung einzelner Gebäude sollte die Randbedingung einer Ein-Zonen-Modellierung kritisch geprüft werden, wenn nicht sichergestellt werden kann, dass eine gleichmäßige Beheizung aller Teilbereiche erfolgt.

Angaben zu internen Lasten werden grundsätzlich in Personen, Maschinen und Beleuchtung unterteilt. Für alle drei Teilbereiche müssen die flächenbezogene Last, das zeitliche Profil und die Aufteilung von konvektivem und strahlendem Anteil bestimmt werden. In TEASER werden die Angaben der VDI 2078 (2015) für die Personenlast verwendet, nach der die Hälfte der Last als konvektiv anzusehen ist. Zeitliche Profile für die Anwesenheit finden sich in der SIA 2024 (2006). Hier finden sich ebenfalls Profile für die durch Maschinen induzierten Lasten, die durch Angaben der abgestimmten DIN V 18599-10 (2016) ergänzt werden. Unterteilungen strahlender und konvektiver Anteile für Maschinen finden sich für verschiedene Anwendungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden in ASHRAE

(2005). Nach Hosni u. a. (1999) und Davies (2004) kann ein Mittelwert von $\beta_{\text{kon}} = 0,75$ angenommen werden. Für die Beleuchtung werden Flächenlasten in der SIA 2024 (2006) definiert. Der konvektive Anteil hängt stark von den verwendeten Beleuchtungslösungen ab und kann nach Zürcher u. Frank (1998) und DiLaura (2011) für Leuchtstofflampen auf $\beta_{\text{kon}} = 0,4$ festgelegt werden. Normierte Profile für die Innenraumbeleuchtung sind im deutsch- und englischsprachigen Raum nicht zu finden. Für TEASER werden Profile verwendet, die an den Anwesenheitsprofilen der Personen orientiert sind.

Ergänzend zu den internen Lasten müssen Randbedingungen für externe Einflüsse gewählt werden. Dies umfasst vorrangig den Einfluss des Wetters in Form von direkter und diffuser solarer Einstrahlung, langwelliger atmosphärischer Einstrahlung, der Lufttemperatur und der Bodentemperatur im Erdreich unter dem Gebäude. Im Falle von Lüftungstechnik ist unter Umständen zusätzlich die Außenluftfeuchte zu berücksichtigen. In TEASER werden für diese externen Lasten keine Standardwerte definiert, da diese zeitlich und örtlich stark variieren. Hier sind in Abhängigkeit vom Testfall reale Vorortdaten zu erheben bzw. virtuelle Zeitreihen zu erstellen und der Simulation aufzuprägen. Zusätzlich wird auch die Infiltration durch Undichtheiten als externe Last angenommen, für die eine Infiltrationsrate gewählt werden muss. Anhaltswerte finden sich in DIN EN 15242 (2007). Als Standardwert wird der Mittelwert der gegebenen Anhaltswerte für ein Mehrfamilienhaus mit mittlerem Level an Undichtheit und typischer Windexposition von $N = 0,4 \text{ h}^{-1}$ bezogen auf das gesamte Luftvolumen des Gebäudes gewählt. Anhaltswerte für nutzerinduzierten Luftwechsel nach Kapitel 3.2.2 lassen sich aus den Nutzungsrandbedingungen der DIN V 18599-10 (2016) ableiten. Als Infiltrationstemperatur wird die Temperatur der Außenluft verwendet.

Kubatur und Wandflächen

Die in TEASER implementierten Archetypen für Wohngebäude basieren maßgeblich auf dem Flächenschätzverfahren nach Loga u. a. (2005) zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften. Dabei werden basierend auf Nettogrundfläche A_{NGF} , Gebäudehöhe l und Anzahl an Stockwerken b_{Geschoss} die Fläche der Bodenplatte A_{Flur} , die Dachfläche A_{Dach} , die Fensterfläche A_{Fen} , die Fläche der Außenwände A_{Ext} und das Raumvolumen V nach

$$A_{\text{Flur}} = p_{\text{Flur}} \cdot \frac{A_{\text{NGF}}}{b_{\text{Geschoss}}} \quad A_{\text{Dach}} = p_{\text{Dach}} \cdot \frac{A_{\text{NGF}}}{b_{\text{Geschoss}}} \quad V = 4 \cdot \frac{A_{\text{NGF}}}{b_{\text{Geschoss}}} \cdot l \quad (4.1)$$

$$A_{\text{Fen}} = p_{\text{Fen}} \cdot A_{\text{NGF}} \quad A_{\text{Ext}} = b_{\text{Geschoss}} \cdot \left(p_{\text{Ext}} \cdot \frac{A_{\text{NGF}}}{b_{\text{Geschoss}}} + q_{\text{Ext}} \right) - A_{\text{Fen}} \quad (4.2)$$

Tabelle 4.1: Korrelationsfaktoren nach Loga u. a. (2005) in vereinfachter Form ohne optionale Parameter.

Parameter	p_{Flur}	p_{Dach}	p_{Fen}	p_{Ext}	q_{Ext}
Standardwert	1,33	1,33	0,2	0,66	30

abgeschätzt. Als Nettogrundfläche (NGF) wird dabei in Anlehnung an die DIN 277-1 (2016) die Fläche aller Grundrissebenen bezeichnet (auch als Nettoraumfläche, NRF definiert). Für die Berechnung der Flächen kommen Korrelationen des deutschen Wohngebäudebestandes zum Einsatz, die entsprechenden Korrelationsfaktoren nach Loga u. a. (2005) sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Unter der optionalen Angabe von Anbausituation zu benachbarten Gebäuden, Grundrisstyp, Teilbeheizungsgrade von Keller- und Dachgeschoss und Anzahl an Dachgauben kann die Schätzung der Kubatur über angepasste Korrelationsfaktoren verfeinert werden.

Die Außenwandfläche sowie die Fensterfläche werden im Anschluss auf vier Orientierungen verteilt, wobei in TEASER standardmäßig ein quadratisches Gebäude angenommen wird. Ergänzt werden die Flächenschätzungen nach Loga u. a. (2005) durch Schätzungen der Innenwandflächen nach DIN 277-3 (2005) auf Basis der typischen Breite und Länge aus SIA 2024 (2006), die bereits im Rahmen der Retrofit Matrix (Hillebrand u. a. 2012) eingesetzt wurden.

Wandaufbauten und Materialien

Zur Vervollständigung der Informationen der thermischen Masse werden typische Wandaufbauten sowie die bauphysikalischen Parameter der verwendeten Materialien benötigt. Wie in Kapitel 2.2 gezeigt, bewirken zwei unterschiedliche Wandaufbauten bei gleichem U-Wert, z. B. innen- und außenseitige Wärmedämmung, ein unterschiedliches dynamisches Verhalten der Wand. Eine innenliegende Dämmung schirmt einen Großteil der Wand zum Innenraum hin ab, die somit nicht mehr zur effektiven Masse der Wand zählt. Der Wandaufbau ist in dynamischen Simulationen somit von großer Bedeutung, eine reine Angabe von U-Werten, wie bei statischen Verfahren üblich, ist nicht ausreichend.

Typische exemplarische Bauteilaufbauten in Abhängigkeit des Baujahres finden sich nach Hillebrand u. a. (2012) in Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007). Enthalten sind auch Angaben zu Fenstern auf Basis von U-Werten, was für statische Bauteile ausreichend ist. Auf Basis von Loga u. a. (2015) können die Wandaufbauten einzelnen Bauepochen bzw. Baualterklassen (BAK) zugeordnet werden. Ergänzt werden die Daten für die Fenster durch Anhaltswerte für die optischen Eigenschaften G-Wert g und Konvektivanteil β_{kon} des Solarenergieeintrages (Kapitel 4.2.1.2), die in VDI 6007-2 (2012) zu finden sind.

Die wärmetechnischen Eigenschaften typischer Baumaterialien können nach Hillebrand u. a. (2012) den Normen DIN EN 12524 (2000) und DIN 4108-4 (2013) entnommen werden. Ergänzt werden

diese Werte durch oberflächenspezifische Angaben. So entspricht der Absorptionsgrad $\mu_{\text{Abs,Sol}}$ von außenliegenden Oberflächen aufgrund des Spektrums der Solarstrahlung mit einem geringen Infrarotanteil nicht dem Emissionsgrad (Schramek u. a. 2009). Der Absorptionsgrad hängt dabei von den verwendeten Materialien sowie der Farbe des Anstriches ab. Anhaltswerte für $\mu_{\text{Abs,Sol}}$ finden sich in Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel (1997) und Schramek u. a. (2009). Konvektive und radiative Wärmeübergangskoeffizienten für Innen- und Außenseiten der Bauteile finden sich in VDI 2078 (2015) und DIN EN ISO 6946 (2015). Im Rahmen dieser Arbeit wird die VDI 2078 (2015) als Primärquelle verwendet.

Energetische Stadtraumtypen

Zur Klassifikation von unterschiedlichen Stadtteilen mit Wohnnutzung und zur Unterscheidung typischer Wohnbebauungsformen entwickelten Hegger u. Dettmar (2014) 11 unterschiedliche energetische Stadtraumtypen (EST). Die in TEASER umgesetzten EST erweitern die rein geometrische Definition von Hegger u. Dettmar (2014) um die gezeigten Ansätze für Randbedingungen und Wandaufbauten. Die Ermittlung der geometrischen Eigenschaften erfolgt auf Basis vergleichbarer Ansätze wie bei Loga u. a. (2005) nach

$$A_{\text{Flur}} = A_{\text{Dach}} = \frac{A_{\text{NGF}}}{b_{\text{Geschoss}}} \quad A_{\text{Fen}} = p_{\text{Fen}} \cdot A_{\text{NGF}} \cdot \left(1 - \frac{b_{\text{Nachb}}}{4}\right) \quad (4.3)$$

$$A_{\text{Ext}} = \left(p_{\text{Ext}} \cdot A_{\text{NGF}} \cdot l - A_{\text{Flur}} - A_{\text{Dach}} - A_{\text{Fen}}\right) \cdot \left(1 - \frac{b_{\text{Nachb}}}{4}\right). \quad (4.4)$$

Dabei werden Außenwandflächen zu benachbarten Gebäuden über die Anzahl der Nachbargebäude b_{Nachb} miteinbezogen und die freie Außenwandfläche entsprechend reduziert. Eine Beschreibung der EST und die entsprechenden von Loga u. a. (2005) abweichenden Korrelationsfaktoren für die Hüllflächen p_{Ext} sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Eine detaillierte Diskussion und Anwendungsfälle zu den EST in TEASER sind in Lauster u. a. (2016) zu finden.

Durch die Integration der Typologisierung nach Loga u. a. (2005) und der EST nach Hegger u. Dettmar (2014) lassen sich in TEASER sowohl dediziert Ein- und Mehrfamilienhäuser mit geometrischen Details wie Dachgauben berücksichtigen als auch verschiedenartige Wohnbebauungen auf Stadtebene modellieren. Die entsprechenden Module bilden in TEASER sowohl die Grundlage zur detaillierten Untersuchung kleiner Gebäudegruppen (Kapitel 5.1) als auch zur Einschätzung des Wärmebedarfs großer Stadtquartiere (Kapitel 5.3).

Tabelle 4.2: Beschreibungen und Korrelationsfaktoren der energetischen Stadtraumtypen nach Hegger u. Dettmar (2014).

Name	Beschreibung	Korrelationsfaktor p_{Ext}
EST 1a	Kleinteilige, freistehende Einfamilienhausbebauung	0,87
EST 1b	Kleinteilige, freistehende Mehrfamilienhausbebauung	0,87
EST 2	Reihenhausbebauung	0,56
EST 3	Zeilenbebauung	0,41
EST 4a	Großmaßstäbliche Wohnbebauung, Punkthochhäuser	0,28
EST 4b	Großmaßstäbliche Wohnbebauung, Zeilenhochhäuser	0,28
EST 5	Blockrandbebauung	0,39
EST 6	Dörfliche Bebauung	0,7
EST 7	Historische Altstadtbebauung	0,49
EST 8a	Innenstadtbebauung, Kleinstadt	0,66
EST 8b	Innenstadtbebauung, Mittelstadt	0,8

4.1.1.2 Bürogebäude

Für Anwendungsfälle wie die in Kapitel 1 vorgestellten Forschungsliegenschaften ist die Typologisierung von Nichtwohngebäuden, im Speziellen von Bürogebäuden notwendig. Die Unterschiede zur Typologisierung von Wohngebäuden liegen vorrangig in der Zonierung und der Verteilung der Fenster-, Außenwand- und Innenwandflächen. Alle weiteren Eigenschaften werden von der vorgestellten Methodik für Wohngebäude übernommen, die entweder deckungsgleich angewendet werden kann oder für die in den angegebenen Quellen analoge Aussagen zu Nichtwohngebäuden zu finden sind.

Zonierung

Die Zonierung von Bürogebäuden in TEASER erfolgt nach dem in Hillebrand u. a. (2012) vorgestellten Ansatz auf Basis von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) und DIN 277-2 (2005). In Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) werden verschiedene typische Zonen und deren Anteil an der Nettogrundfläche aufgrund von statistischen Untersuchungen festgelegt. Hillebrand u. a. (2012) erweitern diesen Ansatz und definieren die in Tabelle 4.3 gezeigte Zonenverteilung.

Tabelle 4.3: Zonen eines typischen Bürogebäudes nach Hillebrand u. a. (2012).

Zonentyp	Nummer nach DIN V 18599-10 (2016)	Anteil an NGF
Gruppenbüro	2	50 %
Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar	4	4 %
WC und Sanitärräume in Nichtwohngebäuden	16	4 %
Verkehrsfläche	19	25 %
Lager	20	15 %
Rechenzentrum	21	2 %

Kubatur und Wandflächen

Die Außenwandflächen A_{Ext} und Fensterflächen A_{Fen} für Bürogebäude in TEASER basieren auf den Korrelationen zur Nettogrundfläche A_{NGF} auf Basis statistischer Erhebungen des deutschen Gebäudebestandes von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) und ergeben sich zu

$$A_{\text{Ext}} = 0,7658 \cdot A_{\text{NGF}}^{0,9206} \quad (4.5)$$

$$A_{\text{Fen}} = 0,074 \cdot A_{\text{NGF}}^{1,0889} . \quad (4.6)$$

Die Dachflächen und die Fläche der Bodenplatte werden auf Basis der Bruttogrundfläche (BGF) berechnet, welche nach DIN 277-1 (2016) neben der NGF auch die Konstruktionsgrundfläche (KGF) umfasst und die Gesamtfläche aller Grundrissebenen bezeichnet. Auf Basis von Anhaltswerten aus Liebchen u. a. (2007) wird dabei angenommen, dass die KGF 15 % der NGF beträgt.

Als zusätzliche Aufgabe im Vergleich zur Typologisierung von Wohngebäuden muss für die Bürogebäude als Multi-Zonen-Gebäude wie in Abbildung 4.1 gezeigt eine Verteilung der Hüllflächen auf die Zonen festgelegt werden. Nach Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010b) ist dabei eine Gewichtung nach dem Anteil der Zone an der Nettogrundfläche ein vielversprechender Ansatz. Wie Lichtmeß (2010) zeigt, basiert dieser Ansatz dabei auf zwei zentralen Annahmen:

1. Es gibt einen klaren Zusammenhang zwischen den Hüllflächen und der Grundfläche eines Gebäudes.
2. Eine unscharfe Verteilung der Hüllflächen auf die Zonen führt zu einem überschaubaren Fehler im Energiebedarf.

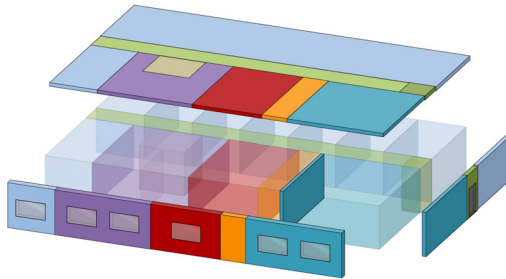


Abbildung 4.1: Zonenzuweisung der Hüllflächen nach Schlosser (2012).

Nach Lichtmeß (2010) führt dabei eine einfache Verteilung der Hüllflächen nach dem Anteil der Zone an der gesamten Nettogrundfläche nach

$$A_{\text{Ext,Zone}} = A_{\text{Ext,ges}} \cdot \frac{A_{\text{NGEZone}}}{A_{\text{NGEges}}} \quad (4.7)$$

zu einem akzeptablen Ergebnis. Für eine höhere Genauigkeit können anhand eines detaillierten Verfahrens über Korrekturwerte die Außenwandflächen nach

$$A_{\text{Ext,Zone}} = \xi \cdot A_{\text{Ext,ges}} \cdot \frac{A_{\text{NGEZone}}}{A_{\text{NGEges}}} \quad (4.8)$$

auf die Zonen aufgeteilt werden. Hier bietet TEASER eine zusätzliche Verfeinerung mit Daten aus Kaag u. a. (2008) zur detaillierteren Beschreibung der Grundrissstruktur sowie für den Fensterflächenanteil.

4.1.1.3 Institutsgebäude

Für die Untersuchung von Forschungsliegenschaften ist neben der Typologisierung der Bürogebäude eine Methodik für Forschungs- bzw. Institutsgebäude notwendig. Aufgrund der klimatischen Anforderungen an die Labor- und Forschungsflächen müssen Instituts- und Bürogebäude getrennt betrachtet werden (David u. a. 2013). Es existieren keine Veröffentlichungen, die den deutschen Institutsgebäudebestand in einer Weise typologisieren, dass sich die erhobenen Werte zur Generierung von Wärmebedarfsprofilen nutzen ließen. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die erfassten Daten zu den Institutsgebäuden des Forschungszentrums Jülich und der RWTH Aachen genutzt, um eine eigene Typologie zu definieren. Die Typologisierung unterteilt sich dabei in die von Mata u. a. (2014) definierten Schritte Segmentierung, Charakterisierung und Verifizierung (Kapitel 3.1). Eine abschließende Verifizierung der entwickelten Archetypen ist erst in Verbindung mit

Tabelle 4.4: Relevante Gebäudeklassen für Institutsgebäude nach Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK, Bauministerkonferenz 2010).

BWZK-Nummer	Bezeichnung	Gruppierung für TEASER
2000	Wissenschaftliche Lehre und Forschung	Institut Allgemein
2200	Institute für Lehre und Forschung	Institut Allgemein
2230	Erziehungswissenschaften (Gruppe 3)	Institut 4
2240	Ingenieurwissenschaften, Informatik (Gruppe 4)	Institut 4
2250	Naturwissenschaften (Gruppe 5)	Institut 4
2280	Chemie, Physik, Biologie (Gruppe 8)	Institut 8
2300	Institute für Lehre und Forschung hochinstalliert	Institut Allgemein
3000	Gesundheit	Institut Allgemein

einem verifizierten urbanen Gebäudemodell (Kapitel 4.2) möglich und erfolgt im Rahmen von Kapitel 5.2. Die Typologisierung umfasst 273 Gebäudeteile des Forschungszentrums Jülich sowie des Campus Melaten der RWTH Aachen. Beide Liegenschaften weisen einen heterogenen Gebäudebestand hinsichtlich Baujahren, Nutzungsarten und Nettogrundflächen auf (Müller u. a. 2015a), wodurch sich eine breite Datenbasis für die Typologisierung ergibt.

Für die Segmentierung wird auf die Kategorien zu Forschungsgebäuden des Bauwerkszuordnungskataloges (BWZK) nach Bauministerkonferenz (2010) zurückgegriffen, die relevanten Kategorien sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Sowohl für das Forschungszentrum Jülich als auch den Campus Melaten der RWTH Aachen lagen Zuordnungen der Gebäude zu den BWZK-Klassen vor. Um ausreichend große Gruppen innerhalb der Klasse der Institutsgebäude zu wahren, werden BWZK-Klassen mit einem Anteil kleiner 10% zur thematisch nächsten Gruppe zusammengefasst, wenn sich die Eigenschaften der Klassen nicht signifikant unterscheiden. Die Aufteilung erfolgt nach der Anzahl der Gebäude und nicht auf Basis der NGF, da die NGF als Eingangsgröße der Archetypen dient und sich somit nicht als Kriterium für die Segmentierung und Charakterisierung eignet. Eine Aufteilung der Gesamtnettogrundfläche der beiden Liegenschaften nach den Nutzungsarten der Gebäude findet sich in Anhang B (Abbildungen B.1 und B.2) und ergibt eine ähnliche Aussage wie die Aufteilung nach der Anzahl der Gebäude. In Tabelle 4.5 sind die Anzahl der Gebäude pro Klasse für die drei unterschiedliche Gruppen Institut Allgemein, Institut 4 und Institut 8 gegeben, welche in TEASER implementiert wurden.

Für die Charakterisierung wird ein Ansatz auf Basis der Bürogebäude gewählt, um eine einheitliche Typologie für Büro- und Institutsgebäude zu schaffen. Der Archetyp des Bürogebäudes wird dabei um eine weitere Zone für Labornutzung erweitert. Für die Nutzungsprofile des Laborbereiches wird auf die Profile für Zonen mit Büronutzung nach SIA 2024 (2006) zurückgegriffen, da keine separaten Profile für Labore definiert sind und von einer zeitlich ähnlichen Nutzung ausgegangen

Tabelle 4.5: Anzahl und Aufteilung der erfassten Gebäude des Forschungszentrums Jülich und des Campus Melaten der RWTH Aachen nach BAK und Nutzungsart (nach Göbel 2015 und Mans 2015).

BAK	Bürogeb.	Inst. Allg.	Inst. 4	Inst. 8	Σ
bis 1918	3	0	0	0	3
1919 - 1948	4	3	0	1	8
1949 - 1968	14	25	0	28	67
1969 - 1978	8	10	17	27	62
1979 - 1983	6	1	2	10	19
1984 - 1994	7	6	0	24	37
ab 1995	12	13	14	38	77
Σ	54	58	33	128	273

wird. Die Profile werden mit den statischen Angaben zu Laborzonen der DIN V 18599-10 (2016) kombiniert, sodass die spezifischen Randbedingungen von Laborbereichen explizite Berücksichtigung finden. Im Folgenden erfolgt eine Charakterisierung hinsichtlich Zonierung (Anteil der zusätzlichen Laborfläche an der Nettogrundfläche), Kubatur und Wandflächen sowie der Funktionen von Lüftungstechnik. Der Einsatz von Lüftungstechnik zur Konditionierung der Laborflächen hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Wärmebedarf von Institutsgebäuden (der Anteil am Gesamtenergiebedarf liegt bei bis zu 90 %, David u. a. 2013) und muss in die Typologisierung mit einbezogen werden (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009; Biechele 2015).

Zonierung

Die Zonierung basiert auf den Daten zu insgesamt 195 Gebäudeteilen des Forschungszentrums Jülich, für die eine detaillierte Aufschlüsselung der Flächennutzung nach DIN 277-2 (2005) zur Verfügung gestellt wurde (Mehrfeld 2014). Die Typologisierung der Bürogebäude nach Kapitel 4.1.1.2 wurde anhand der gegebenen Daten für Bürogebäude des Forschungszentrums überprüft. Es ergeben sich nur für die Zonen Büro und Verkehrsfläche relevante Abweichungen, wobei für die Gebäude des Forschungszentrums 17 % mehr Bürofläche angegeben wird als nach den statistischen Daten aus Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) zu erwarten ist. Aufgrund der höheren Datendichte in Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a) und Fehlstellen in den Daten des Forschungszentrums (nicht alle Bürogebäude besitzen z. B. Büro- oder Verkehrsflächen), wird die Typologisierung nach Kapitel 4.1.1.2 verwendet.

Die Zonierung der Institutsgebäude basiert auf der Methodik der Bürogebäude, wobei eine zusätzliche Zone für die Laborbereiche eingeführt wird. Diese Zone fasst die Nutzungsarten „3.3 Techno-

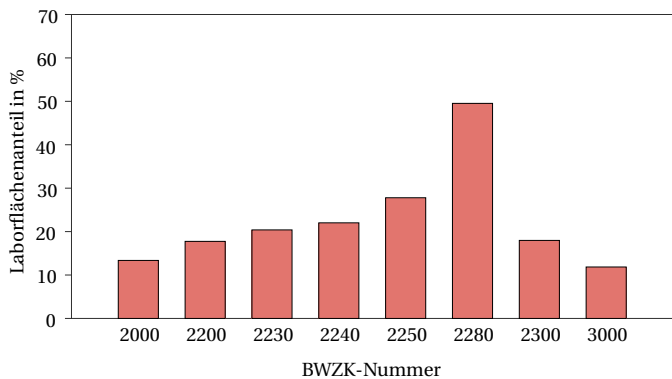


Abbildung 4.2: Mittlerer Laborflächenanteil pro BWZK-Nummer der Gebäude des Forschungszentrums Jülich bezogen auf die NGF (Mehrfeld 2014).

logische Labore“, „3.4 Physikalische, physikalischtechnische, elektrotechnische Labore“, „3.5 Chemische, bakteriologische, morphologische Labore“, „3.6 Räume für Tierhaltung“ und „3.7 Räume für Pflanzenzucht“ der DIN 277-2 (2005) zusammen. Abbildung 4.2 zeigt den gemittelten Anteil der Laborzone an der NGF für die relevanten BWZK-Nummern. Der Laborflächenanteil variiert dabei zwischen 12 % für Gebäude der BWZK-Nummer 3000 und 50 % für Gebäude der BWZK-Nummer 2280. Der anzahlgemittelte Anteil an Laborzone für die drei gebildeten Gruppen ist in Tabelle 4.6 angegeben. Die Flächen der restlichen Zonen wurden anhand der detaillierten Flächennutzungsdaten sowie der Aufteilung des Bürogebäudes geschätzt, um einen zum Bürogebäude konsistenten Ansatz zu wahren.

Tabelle 4.6: Anteil der Zonen an der NGF der archetypischen Institutsgebäude.

Zonentyp	Nummer nach DIN V 18599-10 (2016)	Inst. Allg.	Inst. 4	Inst. 8
Gruppenbüro	2	16 %	22 %	4 %
Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar	4	4 %	4 %	4 %
Sanitärräume in Nichtwohngebäuden	16	4 %	4 %	4 %
Verkehrsfläche	19	19 %	20 %	6 %
Lager	20	40 %	28 %	30 %
Rechenzentrum	21	2 %	2 %	2 %
Labor	38	15 %	20 %	50 %

Auf Basis der Typologisierung des Bürogebäudes werden die Flächen der Zonen Besprechung, Sanitärräume und Rechenzentrum für die Institutsgebäude gleich den Werten der Bürogebäude gesetzt, da angenommen wird, dass der Anteil der Zonen an der NGF nicht verringert werden kann. Der Flächenanteil der Zonen Büro, Verkehrsfläche und Labor wird weitgehend aus den Flächennutzungsdaten übernommen. Die Lagerflächen erscheinen generell sehr groß, sodass eine Verringerung der Zonenfläche als sinnvoll erachtet wird. Zusätzlich weisen die Lagerflächen keine prägnanten thermischen Anforderungen auf, sodass eine Variation dieser Fläche einen geringen Einfluss auf den Wärmebedarf eines Gebäudes hat. Der Anteil der Zone Lager wird daher so angepasst, dass sich in der Summe 100% ergeben. Die Standardabweichungen der als Mittelwerte geschätzten Zonenflächen sind für alle Zonen ähnlich groß und liegen zwischen 64% für die Verkehrsfläche und 128% für die Laborfläche (jeweils bezogen auf den Mittelwert). Über alle Zonen berechnet beträgt die Standardabweichung 113%. Sie ist damit ähnlich groß wie die Standardabweichung für die Schätzung der Zonenflächen für die Bürogebäude mit 118%. Grundsätzlich ergeben sich bei Typologisierungen verhältnismäßig große Standardabweichungen, da ansonsten sehr fein granulare Gruppen gebildet werden müssen, für die wiederum eine ausreichende Datengrundlage pro Gruppe vorhanden sein muss. Allgemein sind keine signifikanten Unterschiede im Wärmebedarf der Gebäude für andere Zonierungsvarianten zu erwarten, solange der Anteil an Büro- und Laborfläche nicht verändert wird und alle Hauptnutzarten explizit berücksichtigt werden (Schlosser 2012).

Kubatur und Wandflächen

Für die Institutsgebäude des Forschungszentrums Jülich sowie des Campus Melaten der RWTH Aachen lagen Angaben zu den Umfängen der bebauten Fläche (BF) sowie der Gebäudehöhe und Stockwerkszahl vor. Anhand dieser Größen wurden in Mans (2015) und Göbel (2015) die Außenwandflächen der Institutsgebäude berechnet und mit der Korrelation nach (4.5) verglichen. Da die Institutsgebäude in TEASER als Erweiterungen der Bürogebäude umgesetzt werden, wird auf den exponentiellen Ansatz zurückgegriffen und der lineare Ansatz der Wohngebäude nach (4.1) vernachlässigt. Es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,62$, was sich als eine begrenzte Korrelation zwischen Nettogrundfläche und Außenwandfläche interpretieren lässt. Analog zur Zonierung ergeben sich bei Typologisierungen verhältnismäßig schwache Korrelationen, die sich durch fein granulare Gruppen verbessern lassen. Zur besseren Abbildung der Institutsgebäude lassen sich die erhobenen Daten zur Erstellung eigener Korrelationen zwischen Nettogrundfläche A_{NGF} und Außenwandfläche A_{Ext} verwenden. Es ergeben sich die Korrelationen

$$A_{Ext,Inst Allg} = 11,243 \cdot A_{NGF}^{0,66} \quad (4.9)$$

und

$$A_{\text{Ext,Inst 4+8}} = 13,895 \cdot A_{\text{NGF}}^{0,6177} . \quad (4.10)$$

In den Abbildungen 4.3 und 4.4 werden die entsprechenden Punktwolken und Regressionskurven gezeigt, aus denen die Korrelationen gewonnen werden. Für die Gruppe Institut Allgemein weist die Funktion (4.9) ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,79$ auf. Für die Gruppen Institut 4 und Institut 8

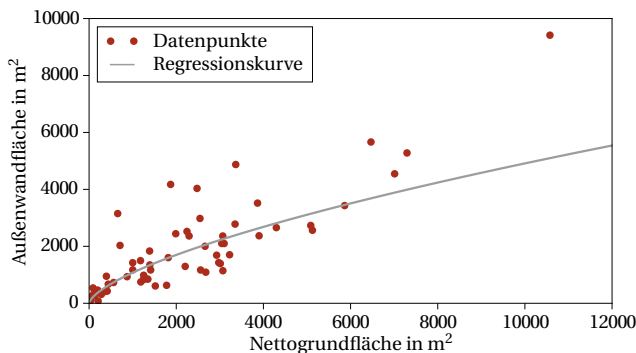


Abbildung 4.3: Verhältnis von Nettogrundfläche zu Außenwandfläche für Institutsgebäude Allgemein des Forschungszentrums Jülich und des Campus Melaten der RWTH Aachen (Mans 2015; Göbel 2015).

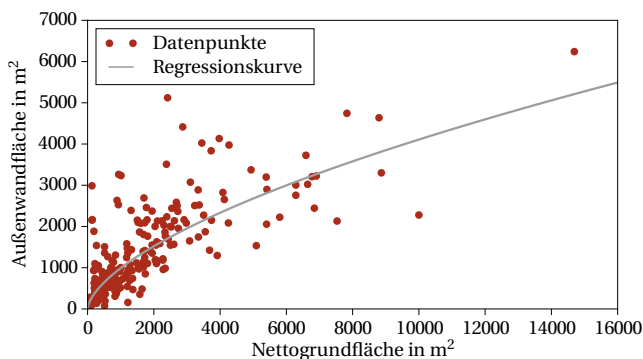


Abbildung 4.4: Verhältnis von Nettogrundfläche zu Außenwandfläche für Institutsgebäude Gruppe 4 und 8 des Forschungszentrums Jülich und des Campus Melaten der RWTH Aachen (Mans 2015; Göbel 2015).

wird dabei eine gemeinsame Funktion (4.10) gebildet, da sich so für diese Gruppen das maximale Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,70$ erreichen lässt. Für alle Gruppen lässt sich so eine bessere Korrelation als auf Basis der Bürogebäude erreichen.

Lüftungstechnik

Die Berücksichtigung von Lüftungsanlagen spielt besonders im Zusammenhang mit Institutsgebäuden und Laboranwendungen eine hervorgehobene Rolle, da der Anteil der Anlagen am Gesamtenergiebedarf bei bis zu 90 % liegt (David u. a. 2013). Sie müssen somit in die Typologisierung mit einbezogen werden (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009; Biechele 2015). Laborzonen verfügen zur Sicherstellung notwendiger Raumluftzustände und der Schadstoffabfuhr häufig über eine Luftkonditionierung. Hierbei muss eine Typologisierung der verschiedenen Funktionen von Lüftungstechnik erfolgen. Für das Forschungszentrum Jülich lagen exemplarische Daten zu 92 Gebäuden und der installierten Lüftungstechnik vor. Aus diesen Daten ließen sich die Nutzungen „Heizen“, „Kühlen“, „Entfeuchten“ und „Befeuchten“ identifizieren. Die Kombinationen dieser Nutzungsarten werden für die Typologisierung wie in Tabelle 4.7 gegeben den drei entwickelten Gruppen für Institutsgebäude zugeordnet. Der Fokus liegt dabei auf zentraler Lüftungstechnik zur alleinigen Versorgung der gesamten Laborzone, da eine weitere Verfeinerung im Rahmen der zonenscharfen Typologisierung die zusätzliche Unterteilung in technische Versorgungsbereiche erfordern würde. Eine solche Unterteilung war auf Basis der vorliegenden Daten zu den Gebäuden nicht möglich. Die mengenmäßige Zuteilung der Funktionalitäten zu den BWZK-Nummern entspricht den vorhandenen Daten, allerdings stimmt die differenzierte Zuordnung der Gebäude mit ihren Funktionalitäten zu den BWZK-Nummern nur partiell mit dem typologischen Ansatz überein. Auf Basis der verfügbaren Daten können 52 % der Gebäude mit der angegebenen Lüftungstechnik der korrekten BWZK-Nummer zugeordnet werden. Für die restlichen Gebäude kommt es vorrangig zu einer Verschiebung der Gebäude zwischen den Gruppen Institut Allgemein und Institut 4.

Zusätzlich zur Typologisierung werden für die Lüftungstechnik ebenfalls Standard- und Sollwerte sowie das zeitliche Betriebsverhalten benötigt. Im Bereich der Standardwerte werden dabei der Bypass-Faktor der Entfeuchtung zu 0,2 (Lindeburg 2013), der Wärmerückgewinnungsgrad im akti-

Tabelle 4.7: Funktionen der zentralen Lüftungstechnik nach den gebildeten Gruppen für Institutsgebäude.

Gruppe	Funktionen der Lüftungstechnik
Institut Allgemein	keine Lüftungstechnik
Institut 4	Heizen, Kühlen, Entfeuchten
Institut 8	Heizen, Kühlen, Entfeuchten, Befeuchten

ven Zustand der Wärmerückgewinnung (WRG) zu 0,65 (Bosy u. a. 2001) und im deaktivierten Zustand zu 0,2 (Mehrfeld 2014) gesetzt. Anhaltswerte für die Solltemperatur inklusive Nachtabsenkung werden in DIN V 18599-10 (2016) gegeben. Der in dieser Arbeit als Standard verwendete Bereich von 45-65 % relativer Luftfeuchte ergibt sich aus der Kombination der Feuchteanforderung mit Toleranz der DIN V 18599-3 (2016) als absolute Raumfeuchten und dem Solltemperaturbereich der DIN V 18599-10 (2016). Der minimale und der maximale Volumenstrom ergeben sich aus dem Mindestluftvolumenstrom von $24 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ nach DIN V 18599-10 (2016) sowie der Angabe, dass der maximale Volumenstrom mit $48 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ das Doppelte des Mindestaußenluftvolumenstroms betragen soll. Das Betriebsprofil orientiert sich an der Anwesenheit der Nutzer in der Laborzone.

Durch die vorgestellten Archetypen für Wohn-, Büro- und Institutsgebäude ist eine statistische Grundlage zur vereinfachten Beschreibung und Parametrierung der Gebäude der Anwendungsfälle geschaffen. Sie bilden den Grundstein der Methodik zur Erstellung der parametrierbaren Gebäudemodelle und zur Berechnung der Wärmebedarfsprofile.

4.1.2 Datenflusskette

Die vorgestellten Archetypen sind vollständig in TEASER implementiert und als Modul zur Datenanreicherung Teil einer vollautomatisierten, flexiblen Datenflusskette. Diese Datenflusskette bildet die methodische Grundlage für die Parametrierung der vereinfachten Gebäudemodelle und beinhaltet wie in Abbildung 4.5 gezeigt die drei Module Datenanreicherung, Datenverarbeitung und Modellerstellung. Eine Einordnung der Module in den Gesamtablauf der entwickelten Methodik ist in Abbildung F.4 zu sehen.

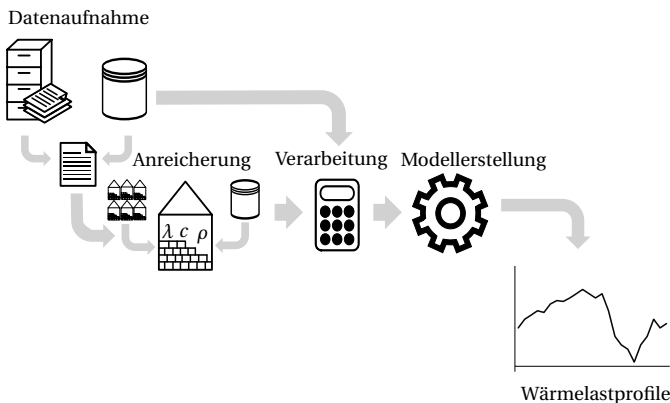


Abbildung 4.5: Schematischer Programmablauf der TEASER Module (Remmen u. a. 2017).

Der Datenflusskette vorgelagert ist die Datenaufnahme der spezifischen Grunddaten einer Liegenschaft. Über eine Eingangsschnittstelle können TEASER verschiedene Datenformate wie z. B. CityGML übergeben werden. Über eine vollständig offene und flexible Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API) können in Python beliebige Funktionen zur Datenaufnahme und -bereinigung vorgelagert werden und alle Daten direkt an TEASER übergeben werden (Kapitel 4.3).

Optional können die Eingangsdaten anschließend im Modul Datenanreicherung mit Hilfe der Archetypen angereichert werden, falls keine ausreichende Datenlage vorhanden ist. Um die Verwendung detaillierter Parameter als Eingabe zu ermöglichen und die Möglichkeiten von TEASER nicht zu limitieren, lassen sich alle Eigenschaften des erstellten Gebäudes nach der Anreicherung verfeinern. Somit berücksichtigt dieses Modul die unterschiedlichen Informationsstände, die auf Stadtebene auftreten können und erlaubt sowohl die Untersuchung kleiner Gebäudegruppen als auch großer Liegenschaften. In Abbildung F.1 ist das UML Klassendiagramm des Moduls mit der Vererbungsstruktur der Archetypen zu sehen.

Die angereicherten oder bereits vollständigen Daten bilden die Grundlage für die Verarbeitung der Informationen bzw. die Berechnung aller notwendigen Parameter im Modul Datenverarbeitung. In diesem Modul werden alle für die Modellierung notwendigen Parameter berechnet und zu einem Parametersatz zusammengefasst. Die Berechnung umfasst dabei vorrangig die Ermittlung der thermischen Widerstände und Kapazitäten der Zone auf dem Ansatz der effektiven thermischen Masse nach Kapitel 2.2.1. TEASER verwendet den Ansatz von Rouvel (1972) nach (A.1) - (A.6) und (A.7) - (A.12), der im Rahmen der VDI 6007-1 (2015) in einen normativen Rahmen gefasst und in Kapitel 3.2.1 detailliert vorgestellt wurde. Dieser Ansatz besitzt dabei den Vorteil, dass die Anzahl an Ersatzelementen, zu denen die Wände zusammengefasst werden, beliebig gewählt werden kann. In Kombination mit der Möglichkeit, die Anzahl an Zonen optional frei zu wählen bzw. zusätzliche Zonen nach der Datenanreicherung hinzuzufügen, kann somit die räumliche Diskretisierung nach (2.15) in TEASER frei gewählt werden. Dies erlaubt die Definition von vier verschiedenen Berechnungskernen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Ersatzelementen in Kapitel 4.2.1.1. Wie die vier Berechnungskerne in TEASER eingebunden sind, zeigt das UML Klassendiagramm in Abbildung F.2. Für die Wahl des Zwei-Elemente-Modells und einer Schicht pro Ersatzelement ergibt sich das Originalmodell und die entsprechende Berechnungsvorschrift der Parameter der VDI 6007-1 (2015). In Übereinstimmung mit der VDI 6007-1 (2015) und wie in Kapitel 2.2.1 gezeigt, wird in TEASER eine Anregungsfrequenz der thermischen Masse als Eingangsgröße für das Zusammenfassen der Schichten in einem Bauteil nach (A.1)-(A.6) und (A.7)-(A.10) von $\tau_{\text{Anr}} = 7 \text{ d}$ verwendet. Dies entspricht nach Tabelle 2.1 einer Langzeitmittelung der Wärmeströme. Für das Zusammenfassen der Einzelbauteile zu einem Ersatzelement nach (A.11) und (A.12) wird eine Zeitkonstante von $\tau_{\text{Anr}} = 5 \text{ d}$ vorgeschrieben. Ein Grund für die Wahl zweier unterschiedlicher Zeitkonstanten wird in VDI 6007-1 (2015) nicht gegeben.

Nach der Datenverarbeitung sind innerhalb von TEASER alle Parameter definiert und berechnet, die für die dynamische Gebäudesimulation mit Hilfe des vereinfachten Gebäudemodells aus Kapitel 4.2.1 von Nöten sind. Auf dieser Basis werden vollständige Simulationsmodelle erstellt, die in einer Modelica Simulationsumgebung geöffnet und ausgeführt werden können, um so individuelle Wärmelastprofile zu generieren. Ein UML Klassendiagramm des Moduls Modellerstellung ist in Abbildung F3 dargestellt. Alternativ lassen sich die Modelle über die in TEASER erstellten Objekte eindeutig identifizieren und können mit den automatisierten Prozessen aus Kapitel 4.3 ausgeführt werden. Alle Module innerhalb von TEASER sind strikt objekt-orientiert aufgebaut und erlauben so die Nutzung von Objekten wie bspw. Gebäude, Zone und Wand sowie deren Funktionen auch außerhalb von TEASER. Eine detaillierte Beschreibung aller TEASER Module sowie eine Übersicht an Anwendungsfällen findet sich in Remmen u. a. (2017). Die ausführliche Dokumentation aller Objekte, deren Attribute und Funktionen ist TEASER beigelegt und über <http://rwth-ebc.github.io/TEASER/> abrufbar.

Die in TEASER implementierten Module zur Datenanreicherung, Datenverarbeitung und Modellerstellung inklusive der Archetypen bilden den Ausgangspunkt der entwickelten Methodik für parametrierbare Gebäudemodelle. Auf Basis der erstellten und optional angereicherten Datensätze ist die anschließende Modellierung fundiert und sie bildet zusammen mit dieser Modellierung das Kernelement der Methodik. Die Archetypen basieren ausschließlich auf statistisch gesicherten bzw. normativen Quellen oder sind unter Angabe der Unsicherheiten im Rahmen der Arbeit entwickelt worden. Alle Teilelemente von TEASER sind objekt-orientiert, offen gestaltet und ausführlich dokumentiert, sodass eine Erweiterung, Skalierung und Anpassung auf weitere Anwendungsfälle leicht möglich ist. Die quelloffene und webbasierte Entwicklung trägt zudem einer direkten Partizipation und gemeinschaftlichen Arbeitsweise Rechnung und ermöglicht einen freien Zugang zu allen Programmteilen. Durch die Generierung der benötigten Modelldateien bietet TEASER eine direkte Schnittstelle zum zweiten Teil der Methodik, dem urbanen Gebäudemodell.

4.2 Modellierung - AixLib

Gegenstand dieses Kapitels ist das vereinfachte Gebäudemodell, welches für die Erstellung der Wärmelastprofile auf Basis der von TEASER erzeugten Datensätze und Modellparameter benötigt wird. Eine Einordnung der Modelle in den Gesamttablauf der entwickelten Methodik ist in Abbildung F4 gezeigt. Im ersten Teil des Kapitels wird das zur Vereinfachung auf die entscheidenden Zustandsgrößen reduzierte Modell im Detail vorgestellt und die zu Grunde liegende Modelltopologie erläutert. Als Basis dient die Topologie der in Kapitel 3.2 vorgestellten VDI 6007-1 (2015). Anschließend werden die vorgenommenen Linearisierungen diskutiert, die Berücksichtigung der solaren Strahlung auf Außenwände mit Hilfe der äquivalenten Außentemperatur ausgeführt und die eigentliche Implementierung des Modells umrissen. Auf Basis der Implementierung kann eine erste Einschätzung des rechentechnischen Aufwandes nach Kapitel 2.2.2 erfolgen. Anschließend wird

in Kapitel 4.2.2 auf die aus Kapitel 3 offene Frage nach der optimalen Anzahl an T-Schaltungen pro thermischer Zone eingegangen und eine Charakterisierung unterschiedlicher Modellvarianten vorgenommen. Darauf aufbauend wird die gewählte Modellvariante anhand standardisierter Testfälle verifiziert und die Umsetzung der Gebäudemodells abschließend diskutiert. Als zusätzliches Modell wird nachfolgend auf die Umsetzung der zentralen Lüftungstechnik eingegangen. Alle in dieser Arbeit entwickelten Modelle sind als Teil der Modelica-Bibliothek AixLib (Müller u. a. 2016) verfügbar und bilden zusammen mit TEASER den Kern der entwickelten Methodik. Die AixLib erweitert im Rahmen des internationalen Projektes IEA EBC Annex 60 bzw. IBPSA Project 1 die IBPSA (ehemals Annex60) Bibliothek (Wetter u. a. 2015), in welcher die eigentliche Implementierung der reduzierten Gebäudemodelle erfolgte. Modelica als Modellierungssprache unterstützt objekt-orientierte Modellierung (OOMS, Bonvini u. Leva 2012), wodurch Basisfunktionalitäten in Submodellen verpackt und beliebig vererbt werden können. Alle Modelle werden gleichungsbasiert und akausal beschrieben, was eine übersichtliche und realitätsnahe Beschreibung physikalischer Modelle ermöglicht (Wetter 2009; Wetter u. a. 2016). Die AixLib sowie die IBPSA Bibliothek werden frei und quelloffen unter <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib> und <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa> entwickelt, in dieser Arbeit werden die beiden Bibliotheken in den Versionen 3.0.0 (<https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa/releases/tag/v3.0.0>) und 0.7.0 (<https://github.com/RWTH-EBC/AixLib/releases/tag/v0.7.0>) verwendet.

4.2.1 Reduziertes Gebäudemodell

Das in diesem Kapitel vorgestellte reduzierte Gebäudemodell basiert in seiner Struktur auf dem Modell der VDI 6007-1 (2015), wodurch sich eine Reihe von Vereinfachungen ergibt. Als kleinste räumliche Einheit werden thermische Zonen betrachtet, in denen homogene Bedingungen hinsichtlich Raumtemperatur und Strahlungsverteilung von internen Wärmequellen angenommen werden. Luftströmungen innerhalb einer Zone werden nicht modelliert, sodass von einer vollständig durchmischten Luft ausgegangen wird. Der Einfluss von Möbeln und anderen Einrichtungsgegenständen wird vernachlässigt. Alle Wandoberflächen sind isotherm, sodass sich eine eindimensionale Wärmeleitung ergibt. Es wird von konstanten Wärmeübergangskoeffizienten und konstanten physikalischen Eigenschaften der Wände ausgegangen. Der Einstrahlwinkel der solaren Strahlung durch Fenster wird vernachlässigt, es erfolgt keine Nachverfolgung der Einstrahlung. Auf Basis dieser Annahmen lässt sich ein thermisches Netzwerk erstellen, das die Topologie des Modells vollständig beschreibt.

4.2.1.1 Topologie

Abbildung 4.6 zeigt das thermische Netzwerk des Zwei-Elemente-Modells, das sich an der gleichen Anzahl an Ersatzelementen orientiert wie das Modell der VDI 6007-1 (2015). Alle opaken Außenbauteile werden dabei zu einer einfachen T-Schaltung mit $R_{\text{Ext}}, C_{\text{Ext}}$ und $R_{\text{Ext,Rest}}$ zusammengefasst.

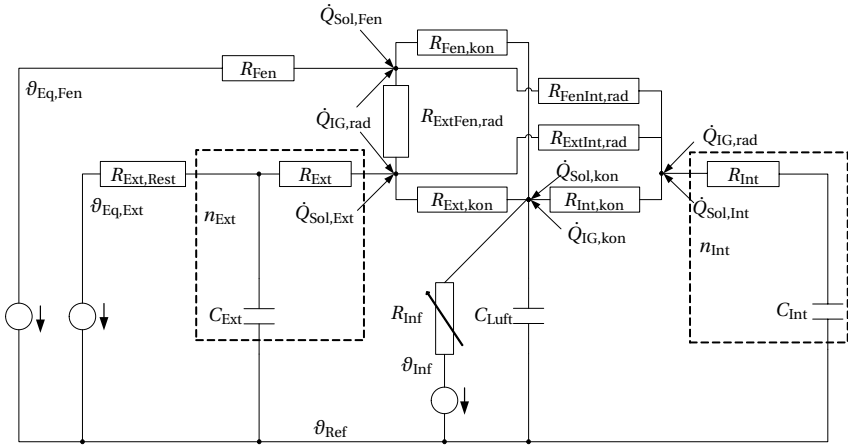


Abbildung 4.6: Thermisches Netzwerk des Zwei-Elemente-Modells der AixLib.

Während R_{Ext} und C_{Ext} den effektiven Teil d_{eff} der Außenbauteile beschreiben, dient $R_{\text{Ext,Rest}}$ zur Beschreibung der Wärmeleitung des verdeckten Teils der thermischen Masse. Ergänzend zum Modell der VDI 6007-1 (2015) erlaubt das implementierte Modell n_{Ext} -T-Schaltungen, die in Reihe geschaltet eine erhöhte Auflösung von d_{eff} erlauben. Die Verteilung der Widerstände und Kapazitäten über d_{eff} kann dabei mit Hilfe der Parametrierung festgelegt werden. Im Rahmen von Heizlastprofilen ist diese Funktionalität nach Kapitel 3.2.2 jedoch nicht von Bedeutung und wird in dieser Arbeit nicht weiter verwendet. Die Wärmeleitung durch transparente Außenbauteile wird optional abweichend zur VDI 6007-1 (2015) separat über den Widerstand R_{Fen} abgebildet. Solare Einstrahlung durch transparente Bauteile wird getrennt hiervon mit einbezogen. Das Zusammenfassen opaker und transparenter Bauteile führt aufgrund der geringen thermischen Kapazitäten der opaken Bauteile zu einer unzulässigen Phasenverschiebung der Raumtemperatur (Leppmann 2014; Lauster u. a. 2014b). Für den Fall eines zusammengefassten Ersatzelements für Außenwände und Fenster geht der Widerstand der Fenster R_{Fen} nach Rouvel (1972) und Davies (1982) für Elemente mit kleiner Zeitkonstante τ mit $1/6$ in die Berechnung ein. Die Summe von R_{Ext} , $R_{\text{Ext,Rest}}$ und R_{Fen} unter Beachtung von serieller und paralleler Verschaltung führt zum Gesamtwiderstand der Außenbauteile, die im U-Wert widergespiegelt wird. Zu beachten ist, dass in $R_{\text{Ext,Rest}}$ und R_{Fen} der Wärmeübergang (konvektiv und für langwellige Strahlung) zwischen Außenluft und Bauteiloberfläche enthalten ist. Auf der Außenseite der Außenbauteile liegen die äquivalenten Außentemperaturen $\theta_{\text{EqLuft,Ext}}$ und $\theta_{\text{EqLuft,Fen}}$ an, in denen die solare Einstrahlung auf die außen liegenden Flächen berücksichtigt wird (Kapitel 4.2.1.3). Analog zu den Außenbauteilen werden die Innenbauteile zu einer L-Schaltung (RC-Schaltung) mit R_{Int} und C_{Int} zusammengefasst, für die sich ebenfalls über n_{Int} die Diskretisie-

nung steuern lässt. Innenwände werden als verlustfreie Wärmespeicher betrachtet und haben daher keine Verbindung zu einer zusätzlichen Temperaturquelle. Alle Temperaturdifferenzen über Kapazitäten und Temperaturquellen können auf eine virtuelle Referenztemperatur ϑ_{Ref} zum Schließen des Schaltkreises bezogen werden.

Im Innenraum wird der konvektive Wärmeaustausch über eine Sternschaltung der Widerstände $R_{\text{Ext,Kon}}$, $R_{\text{Int,Kon}}$ und $R_{\text{Fen,Kon}}$ realisiert, in die die optionale Kapazität für das Luftvolumen C_{Luft} eingebunden ist. Am Sternpunkt wird die Lufttemperatur des Innenraumes berechnet. An diesem Punkt greift zusätzlich der regelbare Widerstand R_{Inf} an, über den die Infiltration bzw. natürliche Ventilation mit der Temperatur ϑ_{Inf} berücksichtigt wird. Auf einen Basiswechsel durch die Infiltration wird das Lüftungsverhalten des Nutzers abhängig von Anwesenheit, Raumtemperatur und Außentemperatur addiert. Durch die Kombination der einzelnen Einflüsse kann ein täglich und jahreszeitlich schwankender Luftwechsel abgebildet werden. Die Luftwechselraten für die einzelnen Effekte können mit Hilfe der DIN V 18599-10 (2016) abgeschätzt werden. Der Strahlungsaustausch im Innenraum wird, abweichend zur VDI 6007-1 (2015), über eine Polygonschaltung von $R_{\text{ExtInt,Rad}}$, $R_{\text{ExtFen,Rad}}$ und $R_{\text{FenInt,Rad}}$ modelliert, da nach Davies (1983a, 1993) und Davies u. Message (1992) eine Umwandlung in eine Sternschaltung nur für den Sonderfall der Dreiecksschaltung ohne zusätzliche Unsicherheiten möglich ist. Zusätzlich impliziert eine Sternschaltung, dass alle Flächen mit ihrer vollen Fläche am Strahlungsaustausch teilnehmen. Im Falle von nicht-geometrischen Modellen mit einer reduzierten Anzahl von Ersatzelementen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Ersatzelemente mit großen Flächenanteilen in Teilen mit sich selbst in Strahlungsaustausch stehen. Im Falle einer Polygonschaltung kann dieser Effekt berücksichtigt werden, in dem die Fläche für den Strahlungsaustausch der kleineren der beiden beteiligten Ersatzelemente entspricht. Eine Polygonschaltung ist somit zur Modellierung des Strahlungsaustausches in jedem Fall genauer als eine Sternschaltung.

Im Innenraum wird zwischen konvektiven und strahlenden internen Lasten unterschieden. Die Leistung strahlender interner Lasten $\dot{Q}_{\text{IG,Rad}}$ wird unabhängig von den Flächen und Temperaturen der Quellen gleichmäßig über alle Bauteilflächen (inklusive Fensterflächen) verteilt, wobei auch Heiz- und Kühlelemente als interne Lasten betrachtet werden. Eine reine Betrachtung über die Temperaturdifferenz zwischen internen Lasten und den Bauteilen bzw. ein Angreifen der Lasten an einem virtuellen Sternpunkt des Strahlungsnetzwerkes ist nach Davies (1990, 1993) nicht zulässig. Konvektive interne Lasten $\dot{Q}_{\text{IG,Kon}}$ greifen direkt am Sternpunkt der konvektiven Sternschaltung an und beeinflussen somit unmittelbar die Raumtemperatur. In Übereinstimmung mit der VDI 6007-1 (2015) wird solare Einstrahlung $\dot{Q}_{\text{Sol}}$ durch transparente Außenbauteile abweichend zu strahlenden internen Lasten behandelt. Bei der Verteilung der solaren Einstrahlung auf die Bauteile werden Außenbauteile mit der selben Orientierung wie das transparente Bauteil, durch das die Strahlung einfällt, aus der Betrachtung herausgenommen. Somit können Wand- und Fensterflächen im Innenraum mit der selben Orientierung wie die einfallende Strahlung nicht von dieser getroffen werden, was den realen Gegebenheiten entspricht. Die Berechnung der Verteilung der solaren Strahlung er-

folgt hierfür getrennt nach Außenbauteilen $\dot{Q}_{\text{Sol,Ext}}$, Fenstern $\dot{Q}_{\text{Sol,Fen}}$ und Innenbauteilen $\dot{Q}_{\text{Sol,Int}}$ unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Orientierungen v auf Basis der Flächenverhältnisse nach

$$\dot{Q}_{\text{Sol,Ext}} = \sum_{v=1}^n \dot{Q}_{\text{Sol},v} \cdot \frac{A_{\text{Ext}} - A_{\text{Ext},v}}{A_{\text{Int}} + A_{\text{Ext}} + A_{\text{Fen}} - A_{\text{Ext},v} - A_{\text{Fen},v}} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_{\text{Sol,Fen}} = \sum_{v=1}^n \dot{Q}_{\text{Sol},v} \cdot \frac{A_{\text{Fen}} - A_{\text{Fen},v}}{A_{\text{Int}} + A_{\text{Ext}} + A_{\text{Fen}} - A_{\text{Ext},v} - A_{\text{Fen},v}} \quad (4.12)$$

$$\dot{Q}_{\text{Sol,Int}} = \sum_{v=1}^n \dot{Q}_{\text{Sol},v} \cdot \frac{A_{\text{Int}}}{A_{\text{Int}} + A_{\text{Ext}} + A_{\text{Fen}} - A_{\text{Ext},v} - A_{\text{Fen},v}}. \quad (4.13)$$

Umgesetzt ist die Berechnung als Algorithmus in einer Modelica-Funktion. Dabei wird eine Matrix aufgestellt, in der jede Spalte für eine Orientierung v steht und jede Zeile für ein Ersatzelement in der Reihenfolge von (4.11)-(4.13). Durch Vektormultiplikation mit der solaren Einstrahlung nach den einzelnen Orientierungen ergibt sich jeweils ein Wert für $\dot{Q}_{\text{Sol,Ext}}$, $\dot{Q}_{\text{Sol,Fen}}$ und $\dot{Q}_{\text{Sol,Int}}$.

Ergänzt wird die Berücksichtigung der solaren Strahlung durch transparente Bauteile durch einen Faktor zur Berücksichtigung des Konvektivanteils des Solarenergieeintrages im Innenraum β_{kon} . Dieser ermöglicht die Berücksichtigung von absorbiert und konvektiv abgegebener Strahlung für transparente Bauteile nach VDI 6007-2 (2012). Er dient zur Aufteilung von $\dot{Q}_{\text{Sol}}$ in $\dot{Q}_{\text{Sol,kon}}$ und $\dot{Q}_{\text{Sol,rad}}$.

Das gezeigte Modell dient als Grundlage für die im Anhang C gezeigten Konfigurationen mit drei und vier Ersatzelementen. Diese erweitern den in Abbildung 4.6 gezeigten Aufbau um zusätzliche Elemente zur separaten Berücksichtigung von bodenberührenden Außenbauteilen (Abbildung C.2) und Dachelementen (Abbildung C.3). Zusätzlich ist als Referenz eine Konfiguration mit einem Ersatzelement umgesetzt (Abbildung C.1), in dem innenliegende thermische Massen vernachlässigt werden. Diese vier Konfigurationen bilden die Grundlage für die Charakterisierung in Kapitel 4.2.2 und erlauben eine Diskussion der Frage nach der optimalen Anzahl an Kapazitäten für reduzierte Gebäudemodelle auf Stadtteileebene.

4.2.1.2 Linearisierungen

Laut Lehmann u. a. (2013) und Picard u. a. (2015) sind dynamische Gebäudemodelle typischerweise schwach nichtlinear. Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, erhöht sich durch Nichtlinearitäten nicht nur der Rechenaufwand, zusätzlich ist der Einsatz für Anwendungen wie exakte Optimierungsverfahren oder Bode-Diagramme wie in Kapitel 4.2.2 ausgeschlossen. Um die entwickelten Modelle den Anforderungen an Rechenzeiten für Stadtteilsimulationen anzupassen, das Kriterium der Flexibilität

aus Kapitel 4 zu erfüllen und die Anwendung in anderen Arbeiten zu ermöglichen, werden Nichtlinearitäten wenn möglich vermieden.

Wie in Picard u. a. (2015) erläutert, ergeben sich die Nichtlinearitäten vorrangig aus den Teilsystemen Strahlungsaustausch im Innenraum, konvektiver Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen, Absorption solarer Strahlung in transparenten Außenbauteilen und Berechnung der Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche. Für alle vier Teilsysteme lassen unterschiedliche Ansätze zur Linearisierung heranziehen.

Der Strahlungsaustausch im Innenraum folgt dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit einer Abhängigkeit von den Oberflächentemperaturen in der vierten Potenz (Davies 2004) über

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A_1 \cdot (\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4). \quad (4.14)$$

Wie in Davies (1979, 1993) und Hensen u. Lamberts (2011) gezeigt und in Lauster u. a. (2014a) für das vorgestellte Modell erläutert, lässt sich (4.14) mit Hilfe binomischer Formeln linearisieren zu

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot (\vartheta_1^3 + \vartheta_1^2 \cdot \vartheta_2 + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2^2 + \vartheta_2^3) = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot 4T_{\text{mittel}}^3 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (4.15)$$

Hierbei gelten die Annahmen, dass $A_2 \gg A_1$, die Temperaturdifferenz zwischen ϑ_1 und ϑ_2 im Verhältnis zu den absoluten Temperaturen sehr gering ist und die gebildete Mitteltemperatur T_{mittel} über die Zeit konstant bleibt. Diese Bedingungen treffen im Allgemeinen für beheizte Innenräume zu, bei frei schwingenden Zuständen kann es zu kleinen Abweichungen kommen. Mit Hilfe von (4.15) lässt sich analog zur Konvektion ein Wärmeübergangskoeffizient α_{rad} definieren, der laut DIN EN ISO 6946 (2015) bei einem Emissionsgrad von $\epsilon = 0,9$ und einer Mitteltemperatur von $\vartheta_{\text{mittel}} = 19^\circ\text{C}$ einen Wert von $\alpha_{\text{rad}} = 5,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ annimmt.

Für den konvektiven Wärmeübergang ergeben sich nichtlineare Abhängigkeiten aufgrund erzwungener und natürlicher Konvektion von Einflussgrößen wie der Windgeschwindigkeit. Wie in Picard u. a. (2015) erläutert, lassen sich diese nichtlinearen Zusammenhänge über empirische Korrelationen für definierte Zustände als konstant annehmen. Die DIN EN ISO 6946 (2015) sowie die VDI 2078 (2015) definieren Wertebereiche für den resultierenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{kon} , in dem zwischen horizontal und vertikal überstrichenen Flächen unterschieden wird.

Die Absorption solarer Strahlung in transparenten Außenbauteilen und Berechnung der Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche hängen nicht von den Zustandsgrößen des Gebäudemodells ab und dienen somit als Eingangsgrößen für die Berechnung des Innenraumes. Es bietet sich daher an, die Berechnung dieser Größen aus dem eigentlichen Gebäudemodell auszulagern und so diese Nichtlinearitäten aus dem Modell zu eliminieren. Die Absorption solarer Strahlung in transparenten Außenbauteilen bzw. Fenstern ist vom Einfallswinkel der Strahlung abhängig. Durch den Tagesverlauf der Sonne kommt es zu schrägem Einfall, der die Reflexion an der Fensterscheibe begünstigt und

den Transmissionsgrad bzw. sekundären Wärmeabgabegrad, im g-Wert zusammengefasst, abmindert. Die VDI 6007-2 (2012) schlägt zur Berücksichtigung dieses Effektes einen Korrekturwert kor_g vor, um den die einfallende Strahlung nach (4.16) in Ergänzung zum g-Wert abgemindert wird. kor_g ist in nichtlinearer Weise abhängig von den bauphysikalischen Eigenschaften des Fensters (U-Wert U und Anzahl an Scheiben k) sowie der Neigung gegenüber der Horizontalen γ und dem Einfallswinkel der Solarstrahlung ζ .

$$\dot{Q}_{\text{Sol}} = E_{\text{Sol}} \cdot g \cdot kor_g(U, k, \gamma, \zeta) \quad (4.16)$$

Die Berechnungsschritte für die Absorption und die Solarstrahlung auf geneigte Flächen nach VDI 6007-2 (2012) und VDI 6007-3 (2015) sind in einzelne Submodelle verpackt und dem Gebäudemodell vorangestellt (Remmen 2014).

Für die Berechnung der Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche wird auf existierende Modelle der AixLib und IBPSA zurückgegriffen, die im Detail in Wetter (2004) beschrieben werden und für die diffuse Strahlung auf dem anisotropen Modell von Perez u. a. (1990) beruhen. Auf diesem Wege sind auch diese Berechnungen dem Gebäudemodell entnommen und vorangestellt.

Durch die gezeigten Maßnahmen lässt sich das reduzierte Gebäudemodell vollständig linearisieren, was sich positiv auf den Rechenaufwand auswirkt und die Anwendung von exakten Optimierungsverfahren erlaubt.

4.2.1.3 Äquivalente Außentemperatur

Zur vollständigen Berücksichtigung der solaren Einstrahlung in dem vorgestellten Modell muss in der Modelltopologie der Einfluss der Einstrahlung auf Außenbauteile in Form kurzwelliger Solarstrahlung und langwelligem Strahlungsaustausch mit der Umgebung wie in Abbildung 4.7 gezeigt berücksichtigt werden. Nach DIN EN ISO 13790 (2008) kann dies durch eine Korrektur der wirklichen Außentemperatur oder als zusätzlicher Wärmestrom im Innenraum berücksichtigt werden. Die VDI 6007-1 (2015) schlägt eine äquivalente Außentemperatur vor, die sowohl die kurzwellige Solarstrahlung als auch den langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung berücksichtigt. In den Wetterdaten ist eine langwellige horizontale Einstrahlung gegeben, aus der über das Stefan-Boltzmann-Gesetz eine Schwarzkörpertemperatur der Atmosphäre berechnet werden kann. Aus konvektivem Wärmeübergang, langwelligem und kurzwelligem Strahlungsaustausch (nur für opake Außenbauteile) ergibt sich daraus ein in Richtung Wand gerichteter Wärmestrom, der nach Nehring (1962) mit dem Wärmefluss in Richtung eines Punktes außerhalb der Grenzschicht gleichgesetzt werden kann, an dem die Temperatur ϑ_{Eq} herrscht (Remmen 2014) und nach

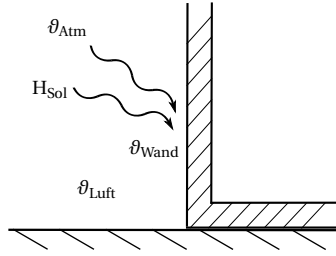


Abbildung 4.7: Definition der äquivalenten Außentemperatur als Kombination aus Außentemperatur, langwelliger und kurzwelliger Einstrahlung auf die Außenbauteile.

$$\underbrace{\alpha_{\text{kon}} \cdot (\vartheta_{\text{Luft}} - \vartheta_{\text{Wand}})}_{\dot{q}_{\text{konvektiv}}} + \underbrace{\epsilon_{\text{Atm}} \cdot \sigma \cdot (\vartheta_{\text{Atm}}^4 - \vartheta_{\text{Wand}}^4)}_{\dot{q}_{\text{langwellig}}} + \underbrace{\mu_{\text{Abs,Sol}} \cdot \mathbf{E}_{\text{Sol},v}}_{\dot{q}_{\text{kurzwellig}}} = \underbrace{(\alpha_{\text{rad}} + \alpha_{\text{kon}}) \cdot (\vartheta_{\text{Eq}} - \vartheta_{\text{Wand}})}_{\dot{q}_{\text{äquivalent}}} \quad (4.17)$$

berechnet werden kann. Hierbei gelten nach Hensen u. Lamberts (2011) die Vereinfachungen, dass alle Oberflächen opak, diffus und isotherm sind und ein homogenes Strahlungsverhalten im Sinne grauer Strahler aufweisen. Horizontüberhöhungen und andere Faktoren der Umgebung werden vernachlässigt. Zur Linearisierung von (4.17) kann der gleiche Ansatz wie in (4.15) verwendet werden. Nach VDI 6007-1 (2015) ist hier ein Wert von $\alpha_{\text{rad}} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sinnvoll. Als zusätzliche Vereinfachung wird nach Nehring (1962) die Wandtemperatur der Lufttemperatur gleichgesetzt, sodass sich als einzige Unbekannte die äquivalente Außentemperatur ϑ_{Eq} ergibt, die über

$$\vartheta_{\text{Eq}} = \vartheta_{\text{Luft}} + \frac{\alpha_{\text{rad}}}{\alpha_{\text{rad}} + \alpha_{\text{kon}}} \cdot (\vartheta_{\text{Atm}} - \vartheta_{\text{Luft}}) + \frac{\mu_{\text{Abs,Sol}} \cdot \mathbf{E}_{\text{Sol},v}}{\alpha_{\text{rad}} + \alpha_{\text{kon}}} \quad (4.18)$$

bestimmt werden kann. Die einzelnen äquivalenten Außentemperaturen in Abhängigkeit der Orientierung werden nach

$$w_v = \frac{U \cdot A}{\sum_{v=1}^i U \cdot A} \quad (4.19)$$

mit Hilfe einer Gewichtung über die Fläche und den U-Wert zu einem Wert zusammengefasst, in den über

$$\vartheta_{\text{Eq,Wand}} = \mathbf{w}_v \cdot \vartheta_{\text{Eq}} + w_{\text{Boden}} \cdot \vartheta_{\text{Boden}} \quad (4.20)$$

optional der Einfluss einer Bodenplatte mit Kontakt zur Bodentemperatur eingeht. Diese kombinierte äquivalente Außentemperatur wird in Abbildung 4.6 als Temperaturquelle wirksam, wobei

der Wärmeübergang (konvektiv und für langwellige Strahlung) zwischen dem Punkt mit äquivalenter Außentemperatur und Außenseite der Außenbauteile in den Widerständen $R_{\text{Ext,Rest}}$ und R_{Fen} enthalten ist.

4.2.1.4 Implementierung

Neben der Erarbeitung der Modelltopologie und den linearisierten Ansätzen hat die eigentliche Implementierung des Modells einen entscheidenden Einfluss auf Flexibilität, Stabilität und Transparenz der umgesetzten Methodik. Abbildung 4.8 zeigt das Klassendiagramm der den reduzierten Gebäudemodellen assoziierten Submodelle in UML-Notation. Bei der Umsetzung dieser Struktur und seiner Beziehungen kommen in Modelica verschiedene objekt-orientierte und hierarchische Methoden zum Einsatz. Die vier umgesetzten Konfigurationen des reduzierten Gebäudemodells sind Spezifikationen der generellen Klasse der RC-Kerne. Sie erben jeweils die Eigenschaften des Modelle niederer Ordnung, da sie, wie in Anhang C gegeben, jeweils eine Erweiterung derselben Grundstruktur darstellen. Dasselbe Vorgehen kommt im Falle von Modellvarianten für die äquivalente Außentemperatur, die Solarstrahlung durch Fenster, die thermische Zonen und das Multi-Zonen-Modell zum Einsatz, die alle jeweils auf einem Basismodell beruhen. So können verschiedene Modellversionen flexibel in übergeordneten Modellen eingebunden und ausgetauscht werden. Teilfunktionen der einzelnen Modellpakete sind in Basismodellen gekapselt, sodass sich insgesamt über 25 Teilmodelle ergeben. Die verschiedenen Teilmodelle werden in den beiden zentralen Modellpaketen für thermische Zonen und Multi-Zonen-Modelle aggregiert, die wiederum hierarchisch organisiert sind. Dabei sind Eins-zu-Eins oder optionale (Null-bis-Eins) Beziehungen vorherrschend, alleine die Anzahl an thermischen Zonen und der zugehörigen Heiz-/Kühler ist

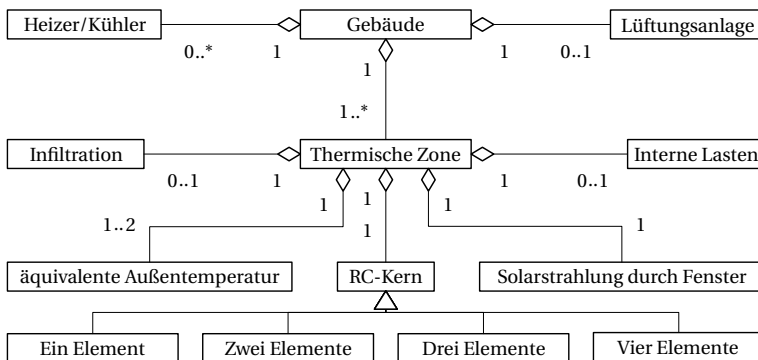


Abbildung 4.8: Hierarchisches UML Klassendiagramm mit Aggregationsbeziehungen und Vererbung der AixLib Modelle im Kontext reduzierter Gebäudemodelle.

in ihrer Anzahl variabel. Modelle mit optionalen Beziehungen stellen den Einfluss von Randbedingungen dar, die nach Bedarf in die Betrachtung mit einbezogen werden können. Die Einordnung der Modelle in den entwickelten Gesamtprozess wird in Abbildung F.4 gezeigt.

Auf Basis der gezeigten variablen Diskretisierung der Ersatzelemente in Abbildung 4.6, den vier implementierten Modellkonfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an Ersatzelementen sowie der Kombination von beliebig vielen thermischen Zonen im Multi-Zonen-Modell erlaubt die umgesetzte Modellstruktur eine freie Wahl der Diskretisierung nach (2.15). Welche Konfiguration für die Erstellung von Wärmebedarfsprofilen von Stadtquartieren mit Hilfe von Archetypen geeignet ist, ist Gegenstand von Kapitel 4.2.2. Die Anzahl an Zonen ergibt sich dabei aus den Archetypen in Kapitel 4.1, die Diskretisierung der Wände wird wie in Kapitel 3.2.2 erläutert auf eine einfache T-Schaltung pro Wand festgelegt. Pro Zone ergeben sich für das Zwei-Elemente-Modell 28 Unbekannte mit zwei Zustandsvariablen (ein Zustand pro Ersatzelement). Das Gleichungssystem enthält eine algebraische Schleife zur Beschreibung des Polygonnetzwerkes des internen Strahlungsaustausches. Da alle Parameter dieser Schleife im Vorhinein bekannt sind, kann diese vor der numerischen Lösung umgestellt und aufgebrochen werden, sodass sich ein vollständig lineares Gleichungssystem ergibt. Auf Basis der Grundlagen aus Kapitel 2.2.2 ermöglichen die Reduktion auf zwei Zustandsvariablen, die akzeptable Gesamtgröße des Gleichungssystems und die Vermeidung von algebraischen Schleifen einen effizienten Einsatz der numerischen Methoden. Das vorgestellte Modell schafft somit eine gute Basis für den Einsatz parametrierbarer Gebäudemodelle für Stadtquartiere.

4.2.2 Charakterisierung

Aus Kapitel 4.2.1.1 ergeben sich mehrere potenzielle Modelltopologien, die sich in der Anzahl an Ersatzelementen (von einem bis vier Ersatzelemente) zur Abbildung der thermischen Masse unterscheiden. Sie spiegeln die aus Kapitel 3.2.2 offene Frage wider, was die optimale Anzahl an Zuständen bzw. Kapazitäten für vereinfachte und dennoch ausreichend akkurate dynamische Gebäudemodelle für Untersuchungen auf Stadtteilebene ist. Die Anzahl an Kapazitäten pro Ersatzelement wurde in Kapitel 4.2.1.1 auf eins festgelegt, da eine Unterteilung der Schichten bei der Betrachtung von Oberflächentemperaturen nach Kapitel 2.2.1, Kapitel 3.2.2 und Fraisse u. a. (2002) keinen zusätzlichen Nutzen beinhaltet. Die Anzahl an Zonen ergibt sich aus den Archetypen in Kapitel 3.1, sodass nach (2.15) nur die Anzahl an Ersatzelementen als variable Größe bestehen bleibt. Somit bleibt zu untersuchen, welchen Einfluss die Anzahl an Ersatzelementen auf das dynamische Verhalten der Gebäude hat. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Modelle charakterisiert und die Frage nach der optimalen Anzahl an Ersatzelementen diskutiert werden. Zur Bewertung des dynamischen Verhaltens eines Modells bietet es sich an, die Reaktion der Ausgangsgröße des Modells auf die Anregung der Eingangsgrößen über den relevanten Bereich an Anregungsfrequenzen zu analysieren. Übertragen auf die vorgestellten Gebäudemodelle entspricht dies der Analyse der Raumtemperatur bei unterschiedlichen Anregungen der externen und internen Lasten. Da

diese beiden Klassen an Eingangsgrößen an unterschiedlichen Stellen im System angreifen, erfolgt die Anregung unabhängig voneinander. Die Analyse beider Eingangsgrößen wird wie in Akander (2000) und Ramallo-González u. a. (2013) ebenfalls getrennt durchgeführt. Zur Analyse des Übertragungsverhaltens bieten sich Bode-Diagramme an, in denen die Dämpfung und Phasenverschiebung der Ausgangsgröße über den gewählten Bereich an Anregungsfrequenzen aufgetragen wird. Grundlage der Bode-Diagramme bildet eine Analyse des Zustandsraummodells, welches nur für lineare und zeitinvariante Systeme aufgestellt werden kann. Aufgrund der Linearisierungen in Kapitel 4.2.1.2 und den über die Simulation konstanten Parametern sind diese Bedingungen für das vereinfachte Gebäudemodell gegeben. Die Bode-Diagramme fokussieren sich auf den für Gebäude relevanten Frequenzbereich. Die typischen täglichen und stündlichen Anregungsfrequenzen sind bei $1,15 \cdot 10^{-5}$ Hz und $2,77 \cdot 10^{-4}$ Hz gekennzeichnet.

Für die Charakterisierung ist es notwendig, einen Testfall mit bekannten geometrischen Abmessungen und bauphysikalischen Eigenschaften zu definieren. Hierzu wird ein einfacher Testraum mit einer Grundfläche von 48 m^2 , Nord- und Südwandflächen von jeweils $21,7 \text{ m}^2$ und Ost- bzw. Westwandflächen von $16,2 \text{ m}^2$ definiert, der auf dem Testraum der ASHRAE 140 (2007) basiert. Von diesem Testraum abweichende Abmaße haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse, solange das Verhältnis der Flächen zueinander nicht geändert wird. Für den gewählten Testfall sind im Bereich realistischer Raumgeometrien die größten Unterschiede zwischen den vier Modellvarianten zu erwarten, da allen Ersatzelementen im Vier-Elemente-Modell eine verhältnismäßig ähnlich große Wandfläche zugewiesen wird. Somit ist für die getrennte Betrachtung von Außenwänden, Bodenplatte und Dachfläche ein größerer Einfluss zu erwarten als für Raumgeometrien mit einem dominanten Außenbauteil. Auf Fenster wird verzichtet, da die solare Einstrahlung analog zu internen Lasten wirkt und deren Betrachtung somit keinen erweiterten Nutzen bringt. Um den Einfluss unterschiedlicher bauphysikalischer Eigenschaften beurteilen zu können, werden alle Bauelemente mit den in Constantin u. a. (2014) definierten Wandaufbauten versehen. Dabei werden die Dämmstandards „EnEV 2009“, „EnEV 2002“, „WSchV 1995“ und „WSchV 1984“ und die Bauschwerklassen „Schwer“, „Mittel“ und „Leicht“ unterschieden. Von den resultierenden 24 Modellvergleichen haben sich die Fälle „EnEV 2009 Schwer“ und „WSchV 1984 Leicht“ als Extremfälle hinsichtlich der Übereinstimmung bzw. Abweichung der Modelle herausgestellt und werden daher in dieser Arbeit vorgestellt.

Abbildung 4.9 zeigt das Bode-Diagramm für „EnEV 2009 Schwer“ bei externer Anregung. Der Verlauf aller Modelle ist sehr ähnlich, es zeigt sich ein für einen Tiefpass typisches PT_1 -Verhalten. Der Tiefpass bei externer Anregung ergibt sich aus der in Abbildung 4.6 gezeigten T-Schaltung für die Außenbauteile. Im Vergleich der Modelle ergeben sich allein für das Ein-Elemente-Modell geringe Abweichungen zu den höherwertigen Modellen. Dies betrifft sowohl die Dämpfung als auch die Phasenverschiebung. Im Speziellen bei der Betrachtung der vorherrschenden täglichen und stündlichen Frequenzen verhalten sich die Modelle mit Ausnahme des Ein-Elemente-Modells bei externer Anregung nahezu identisch.

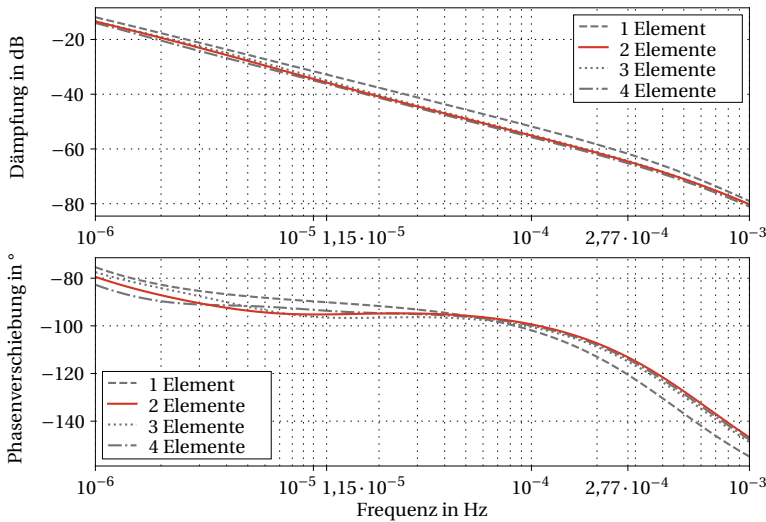


Abbildung 4.9: Bode-Diagramm bei externer Anregung der vier Modelle für einen schweren Testraum nach EnEV 2009 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.

Für den gleichen Testaufbau zeigt Abbildung 4.10 das Bode-Diagramm bei interner Anregung. Alle Modelle zeigen ein PIT_1 -Verhalten, das auf eine Überlagerung des PI-Verhaltens der Ersatzelemente und des PT_1 -Verhaltens des Luftvolumens zurückzuführen ist. Das PI-Verhalten der Ersatzelemente ergibt sich durch die raumseitige Anregung der Elemente, auf der ebenfalls die Beobachtung der Ausgangsgröße Raumtemperatur stattfindet. Insbesondere der Verlauf des Ein-Elemente-Modells weicht von den anderen Modellen ab und ist in Richtung niedriger Frequenzen verschoben, was besonders bei stündlicher Anregung zu signifikanten Differenzen führt. Für die Dämpfung des Ein-Elemente-Modells ergibt sich eine Abweichung zu den anderen Modellen von bis zu 2,7 dB. Auch unter den höherwertigen Modellen sind für die Dämpfung leichte Abweichungen im relevanten Bereich von bis zu 1,3 dB zu beobachten. Die Phasenverschiebung verhält sich im Bereich der täglichen und stündlichen Anregung für die höherwertigen Modelle identisch.

Die Abweichungen des Ein-Elemente-Modells sind auf die Vernachlässigung der internen Massen nach Abbildung C.1 zurückzuführen, durch die sich zum einen eine geringere thermische Masse für den Testraum ergibt und zum anderen die Außenbauteile nicht mehr im Wärmeaustausch mit

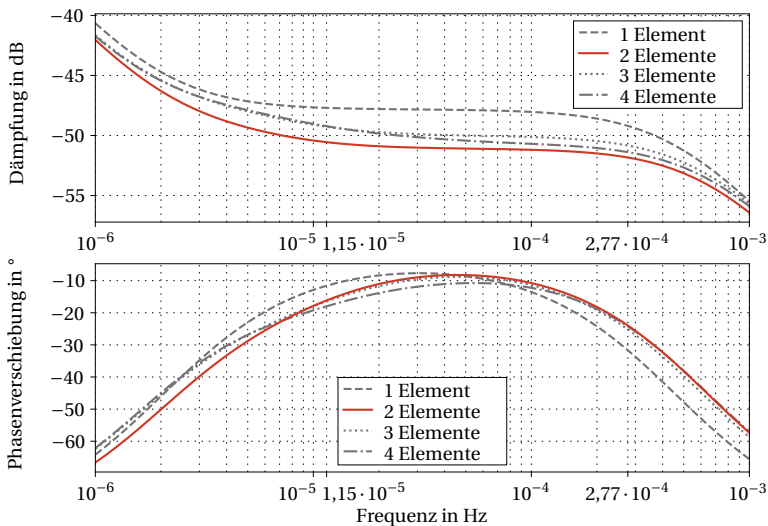


Abbildung 4.10: Bode-Diagramm bei interner Anregung der vier Modelle für einen schweren Testraum nach EnEV 2009 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.

einer thermischen Masse im Innenraum der Testfalls stehen. Dies hat vorrangig einen Einfluss bei interner Anregung, da externe Anregungen durch die Außenbauteile stark gedämpft werden.

Abbildung 4.11 präsentiert das Bode-Diagramm für den Raum „WSchV 1984 Leicht“ bei externer Anregung. Es ergeben sich vergleichbare Verläufe wie für Testraum „EnEV 2009 Schwer“, allerdings weisen das Drei- und Vier-Elemente-Modell größere Unterschiede zum Ein- und zum Zwei-Elemente-Modell auf. Es ergeben sich Differenzen zum Zwei-Elemente-Modell von 6 dB bzw. 8 dB und $25,7^\circ$ bzw. annähernd 0° bei täglicher und stündlicher Anregung. Eine Einschätzung des Einflusses dieser Differenzen ist rein anhand der Bode-Diagramme schwierig und wird im Anschluss an die Untersuchungen im Frequenzbereich durch Analysen im Zeitbereich ergänzt. Das Ein-Elemente-Modell zeigt ähnliche Abweichungen zum Zwei-Elemente-Modell wie für den schweren Testraum bei externer Anregung.

In Abbildung 4.12 ist das Bode-Diagramm für den Raum „WSchV 1984 Leicht“ bei interner Anregung abgebildet. Die bereits diskutierten Abweichungen des Ein-Elemente-Modells sind hier in verstärkter Form zu beobachten, vor allem die Phasenverschiebung des Ein-Elemente-Modells weicht signifikant vom Verhalten der anderen Modelle ab. Die Modellvarianten mit zwei, drei und vier Ele-

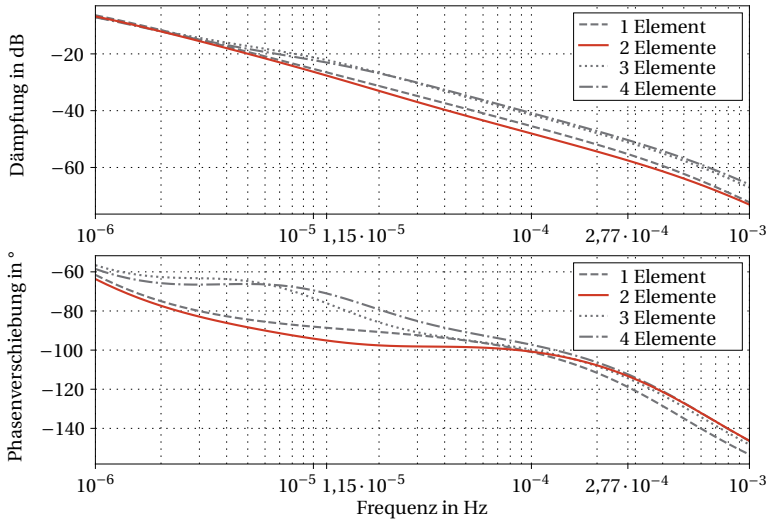


Abbildung 4.11: Bode-Diagramm bei externer Anregung der vier Modelle für einen leichten Testraum nach WSchV 1984 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.

menten zeigen analog zu den vorherigen Betrachtungen ein ähnliches Verhalten, das Zwei-Elemente-Modell weicht in ähnlichem Maße von den höherwertigen Modellen ab wie für den schweren Testraum in Abbildung 4.10.

Aus den Bode-Diagrammen lässt sich ein ähnliches Verhalten für das Zwei-, Drei- und Vier-Elemente-Modell ableiten, einzig das Ein-Element-Modell zeigt besonders bei interner Anregung Unterschiede. Es ergeben sich geringe Differenzen zwischen dem Zwei- und Vier-Elemente-Modell für Testraum „EnEV 2009 Schwer“, die für Testraum „WSchV 1984 Leicht“ ansteigen. Welchen Einfluss diese Differenzen haben, kann mit Hilfe von Untersuchungen im Zeitbereich beurteilt werden. Hierzu wird jeweils ein Jahr mit realen Wetterdaten, variierenden internen Lasten und frei schwingender Raumtemperatur simuliert. Dargestellt werden jeweils 7 Tage aus der Übergangszeit im Frühjahr, da sich hier Raumtemperaturen zwischen 15 und 22°C einstellen und die vorherrschenden täglichen und stündlichen Anregungsfrequenzen beobachtet werden können. Der Übersichtlichkeit halber fokussiert sich die Darstellung der Ergebnisse auf einen mittelschweren Testaufbau des Dämmstandards „EnEV 2002“. Die Ergebnisse für die Konfigurationen „EnEV 2009 Schwer“ und „WSchV 1984 Leicht“ finden sich in Anhang D, Abbildungen D.1 und D.2 sowie in Tabelle 4.8.

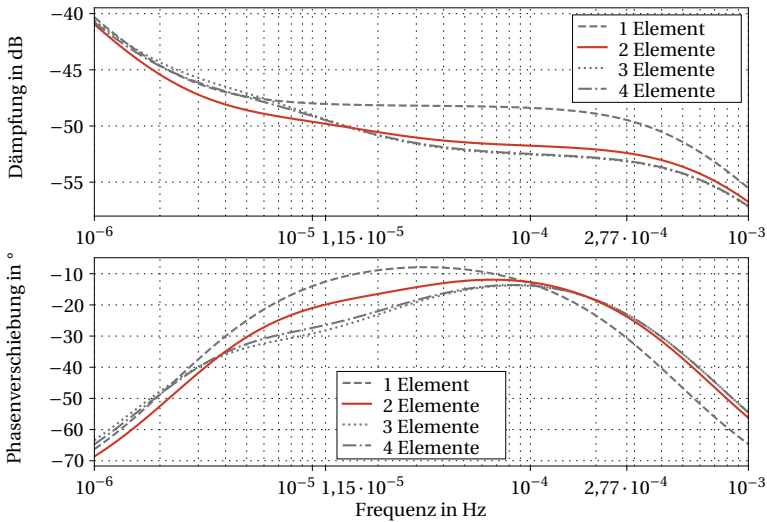


Abbildung 4.12: Bode-Diagramm bei interner Anregung der vier Modelle für einen leichten Testraum nach WSchV 1984 mit der Raumtemperatur als beobachtete Größe.

Abbildung 4.13 zeigt den zeitlichen Verlauf für den mittelschweren Testraum, in dem ein deutliches Überschwingen der Temperaturen für das Ein-Elemente-Modell erkennbar ist. Dies korreliert mit den Beobachtungen in den Bode-Diagrammen in Abbildung 4.10 und 4.12, in denen das Ein-Elemente-Modell eine geringere Dämpfung bei interner Anregung aufweist. Mit steigender Tendenz zu leichten Testfällen (Abbildung D.2) ergeben sich ebenfalls geringe Differenzen zwischen Zwei- und Drei- bzw. Vier-Elemente-Modell, insbesondere für Minimaltemperaturen. Dies ist auf geringere Speichereffekte zurückzuführen, die im Bode-Diagramm bei externer Anregung in Abbildung 4.11 in einer geringeren Dämpfung als für das Zwei-Elemente-Modell beobachtbar sind. Die Unterschiede betragen für den mittelschweren Testraum $\Delta_{\max} = 0,4 \text{ K}$, wie in Tabelle 4.8 gegeben.

Es ist zu vermuten, dass sich die Unterschiede proportional zur Größe der Grund- und Dachfläche verhalten, da bei entsprechend größeren Flächen die separate Modellierung des Bodens im Drei- und Vier-Elemente-Modell und des Daches im Vier-Elemente-Modell ein größeres Gewicht erhält. Umgekehrt führt eine im Verhältnis zur Außenwand geringere Grund- bzw. Dachfläche zu geringeren Unterschieden zwischen Zwei- und Drei- bzw. Vier-Elemente-Modell.

Auch wenn der gezeigte Testfall in diesem Sinne einen Extremfall mit einer großen Grund- bzw.

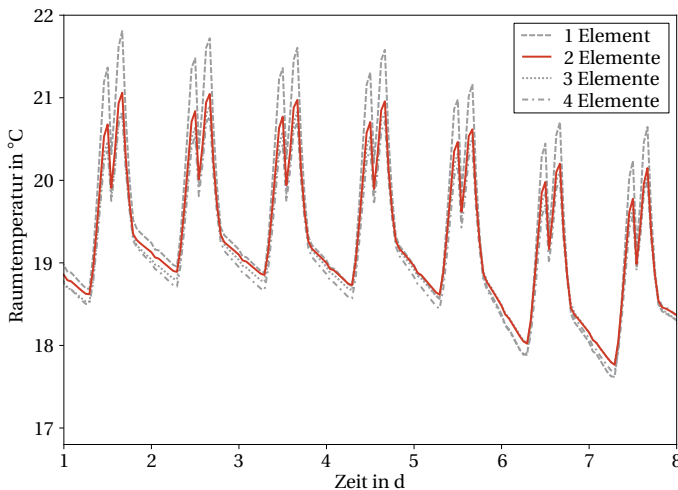


Abbildung 4.13: Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen mittelschweren Testraum.

Dachfläche darstellt, soll diese These getestet und einen Vergleich für typische Verhältnisse von Außenwand und Grund- bzw. Dachfläche zu ermöglicht werden. Hierzu wird der Testaufbau modifiziert und mit der doppelten Außenwandfläche versehen. So ergibt sich ein Verhältnis von Außenwand- zu Grund- bzw. Dachfläche, das dem Aufbau eines zweistöckigen Gebäudes entspricht. In Abbildung 4.14 ist der zeitliche Verlauf des modifizierten Testfalls zu sehen. Wie im Vergleich der Abbildungen 4.13 und 4.14 zu erkennen und in Tabelle 4.8 angegeben, ergeben sich keine nennenswerten Änderungen für die Unterschiede zwischen dem Zwei-Elemente-Modell und den höherwertigen Modellen mit $\Delta_{\max} = 0,4\text{ K}$. Im Verhältnis des Ein-Element-Modells zu den höherwertigen Modellen ergeben sich unverändert Unterschiede von $\Delta_{\max} = 1,2\text{ K}$ für Zeiten starker Temperaturanstiege. Dies lässt sich wie erwähnt auf die Vernachlässigung der internen Massen zurückführen, deren dämpfende Wirkung im Ein-Element-Modell nicht berücksichtigt wird und wodurch sich ei-

Tabelle 4.8: Maximale und mittlere Abweichungen der Temperatur in K zwischen Zwei- und Vier-Elemente-Modell für die Testräume „EnEV 2009 Schwer“, „EnEV 2002 Mittel“, „WSchV 1984 Leicht“ und „EnEV 2002 Mittel Doppelt“.

	Schwer	Mittel	Leicht	Mittel Doppelt
Max	0,3	0,4	0,7	0,4
Mittel	0,1	0,1	0,1	0,1

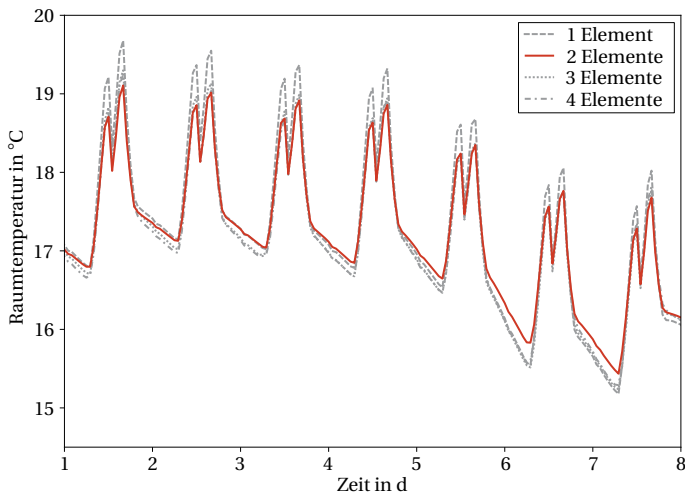


Abbildung 4.14: Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen durchschnittlich schweren Testraum mit doppelter Außenwandfläche.

ne geringere Dämpfung und Phasenverschiebung im Verhältnis zu den höherwertigen Modellen ergibt.

Aus der Charakterisierung ergibt sich, dass das Ein-Elemente-Modell sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich signifikante Unterschiede zu den höherwertigen Modellen aufweist. Dies ist auf die Vernachlässigung der internen Massen zurückzuführen, wodurch sich ein abweichendes Übertragungsverhalten ergibt. Hinsichtlich der Frage nach einer optimalen Anzahl an Ersatzelementen bzw. Kapazitäten kann somit keine generelle Empfehlung für diese Variante ausgesprochen werden. In Fällen mit geringer interner Masse und vorherrschender externer Anregung kann der Einsatz des Ein-Elemente-Modells ausreichend sein, dies ist jedoch nicht als Standardfall anzunehmen. Für das Zwei-, Drei- und Vier-Elemente-Modell ergeben sich geringfügige Unterschiede in den Bode-Diagrammen, insbesondere für leichte Wandaufbauten und vergleichbar große Außenwand- und Dachflächen. Diese Unterschiede führen zu Differenzen zwischen Zwei- und Vier-Elemente-Modell im Zeitbereich, die vorrangig in den Maximalwerten der Abweichungen zu sehen sind (Tabelle 4.8). Die Mittelwerte der Differenzen fallen geringer aus und liegen in allen Fällen im Bereich von 0,1 K. Auch für Anwendungsfälle mit durchschnittlich schweren Gebäuden und typischen Verhältnissen der Außenbauteilflächen zueinander ergeben sich nur geringfügige Differenzen in den zwischen Zwei- und Vier-Elemente-Modell, die für den gezeigten Testraum mit doppelter Außenwandfläche bei im maximal 0,4 K liegen. Auf Basis dieser Charakterisierung bietet sich daher das Zwei-Elemente-Modell als Variante mit geringer Anzahl an Ersatzelementen und akzeptablen Ab-

weichungen zu höherwertigen Modellen an, auf dessen Basis die Erstellung parametrierbarer Gebäudemodelle für Stadtquartiere erfolgen kann. Als zukünftige Erweiterung der Methodik könnte eine adaptive Auswahl des Gebäudemodells je nach Dämmstandard, Bauschwereklasse und Verhältnis der Flächen der Außenbauteile erfolgen.

4.2.3 Verifizierung

Nach der Definition der Modelltopologie und der Auswahl des Zwei-Elemente-Modells auf Basis der Charakterisierung stellt die Verifizierung der Gültigkeit der gewählten Ansätze sowie der Implementierung der Modelle einen entscheidenden Entwicklungsschritt dar. Nur so kann sichergestellt werden, dass sich das Modell wie erwartet verhält und keine unzulässigen Abweichungen aufweist. Nach Jensen (1995) bieten sich zur Verifizierung drei verschiedene Verfahren an:

Analytische Verfahren auf Basis von analytischen Ergebnissen bzw. mit Lösungen, die auf exakt den gleichen Grundlagen beruhen.

Vergleichende Verfahren zum Abgleich mit anderen Programmen, die eine gleiche Zielstellung verfolgen.

Empirische Ansätze auf der Grundlage von Messdaten.

Für die analytische Verifizierung der korrekten Implementierung des Rechenkerns beinhaltet die VDI 6007-1 (2015) zwölf verschiedene Testfälle, mit denen sich sowohl die Parameterberechnung als auch das eigentliche Modell prüfen lassen. Die Testfälle basieren auf einem einfachen Testraum in drei verschiedenen bauphysikalischen Ausführungen. Es werden sowohl Innenraumtemperaturen als auch Heizlasten als stündliche Werte für drei verschiedene Referenztage unter internen und externen Lasten geprüft. Die Referenzwerte werden in tabellarischer Form mit einer Genauigkeit von 0,1 K bzw. 1 W geliefert, was ebenfalls der erlaubten maximalen Abweichung entspricht. Für die Verifizierung anhand der VDI 6007-1 (2015) wurde das im Testfall definierte Fenster mit der Außenwand zusammengefasst, um die exakt gleichen Ansätze wie in der Richtlinie sicherzustellen. Alle zwölf Testfälle konnten erfolgreich mit Hilfe des Zwei-Elemente-Modells nachgerechnet und die korrekte Implementierung bewiesen werden. Die Testfälle werden im Rahmen der IBPSA Bibliothek automatisch bei jeder Änderung von Submodellen ausgeführt und stellen somit sicher, dass das Modell nicht durch ungewollte Änderungen unzulässige Ergebnisse liefert. Sie stehen frei und quelloffen als Teil der AixLib zur Verfügung.

Für eine vergleichende Verifizierung von Gebäudemodellen steht mit der ASHRAE 140 (2007) ein häufig genutzter und international anerkannter Standard zur Verfügung (z. B. angewendet von Henninger u. Witte 2010, Nouidui u. a. 2012 und Constantin u. a. 2014). Diese Arbeit fokussiert sich auf acht Grundfälle und vier frei schwingende Testfälle aus dem Bereich „Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests“ (Tabelle 4.9). Alle weiteren Testfälle berücksichtigen Details wie durch Vorsprünge teilverschattete Fenster, die mit den implementierten Modellen nicht nachgebildet werden

Tabelle 4.9: Übersicht ASHRAE 140 (2007) Testfälle.

Testfall	Definition
6XX	Leichte Konfiguration
9XX	Schwere Konfiguration
600, 900	Grundfälle
620, 920	Fenster an Ost- und Westseite
640, 940	Nachtabsenkung
650, 950	Nachtlüftung, keine Heizung
600FF, 900FF, 650FF, 950FF	Frei schwingend

Tabelle 4.10: Gesamte thermische Masse und effektive thermische Masse der Außenwandelemente für leichten und schweren Testfall in J/K.

	Testfall 9XX	Testfall 6XX
Gesamte thermische Masse C_{ges}	10 103 951	1 796 537
Effektive thermische Masse C_{eff}	9 149 340	1 002 580
Anteil effektiver an gesamter thermischer Masse	0,91	0,56

können. Die Abbildungen der Ergebnisse hinsichtlich Kältebedarf und Raumtemperaturen finden sich in Anhang E um den Fokus der Betrachtung auf die in dieser Arbeit relevanten Heizwärmebedarfe zu legen. Der Standard definiert eine leichte und eine schwere Konfiguration nach Tabelle 4.9 für einen einfachen, rechteckigen Testraum wie in Abbildung 4.15 gezeigt. Der Raum hat eine Grundfläche von 48 m^2 , Nord- und Südwandflächen von jeweils $21,7\text{ m}^2$, Ost- bzw. Westwandflächen von $16,2\text{ m}^2$, Südfenster von je 6 m^2 und besitzt eine adiabate Bodenplatte. Für jeden Testfall werden als Referenz die Ergebnisse von bis zu acht Standard BPS Programmen wie DOE2 (Curtis u. a. 1984), TRNSYS (Klein u. a. 1976) und ESP-r (Clarke 2001) angegeben. Getestet werden Jahreswärme- und Kühlbedarf, maximale Heiz- und Kühllast, maximale, minimale und gemittelte Raumtemperaturen sowie zeitliche Verläufe in stündlicher Auflösung für ausgewählte Referenztage. Die Verifizierung gilt grundsätzlich als erfolgreich, wenn das erzielte Ergebnis innerhalb der Extremwerte der Referenzprogramme liegt. Nach ASHRAE 140 (2007) stellen die Referenzwerte jedoch keinen wahren Standard dar, sodass die Bewertung von Abweichungen beim Nutzer liegt. Zusätzlich zum Zwei-Elemente-Modell wird als weitere Referenz ein detailliertes Gebäudemodell nach Constantin u. a. (2014) in den Test mit einbezogen, dass alle Wände separat modelliert und auf den Ansatz der effektiven thermischen Masse verzichtet. Für Fälle mit frei schwingender Raumtemperatur ist zu beachten, dass der Strahlungsaustausch in diesem Modell über den Stefan-Boltzmann-Ansatz modelliert wird.

Tabelle 4.10 zeigt die gesamte und effektive thermische Masse für die zusammengefassten äußeren Elemente der Testfälle. Das Zwei-Elemente-Modell verwendet 56 % der thermischen Masse für den leichten und 91 % für den schweren Testfall. Da die wärmespeichernden Schichten der Testräume Richtung Innenraum ausgerichtet sind, liegen diese Werte in den zu erwartenden Bereichen. Würde das Ersatzelement der Außenwände um eine zweite Kapazität ergänzt, könnte diese maximal 44 % bzw. 9 % der gesamten thermischen Masse abbilden. Diese Anteile werden durch den effektiven Teil der Wand in Richtung Innenraum abgeschirmt.

Abbildungen 4.16 und 4.17 zeigen den Jahreswärmebedarf sowie die maximalen Heizlasten für alle acht Testfälle. Die Ergebnisse sind auf den Median der Referenzwerte normiert und werden zur einfachen Auswertung in Anlehnung an Fehlerbalken mit Minimal-, Median- und Maximalwert angegeben. Es zeigt sich, dass das Zwei-Elemente-Modell für alle Testfälle in Richtung der Maximalwerte tendiert (ausgenommen die maximale Heizlast für Testfall 640). Für die Testfälle 640 und 920

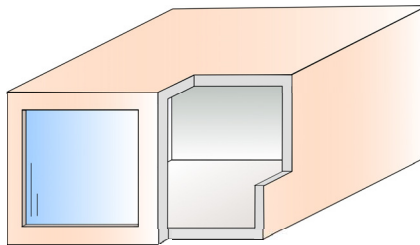


Abbildung 4.15: Aufbau des ASHRAE 140 (2007) Testraums.

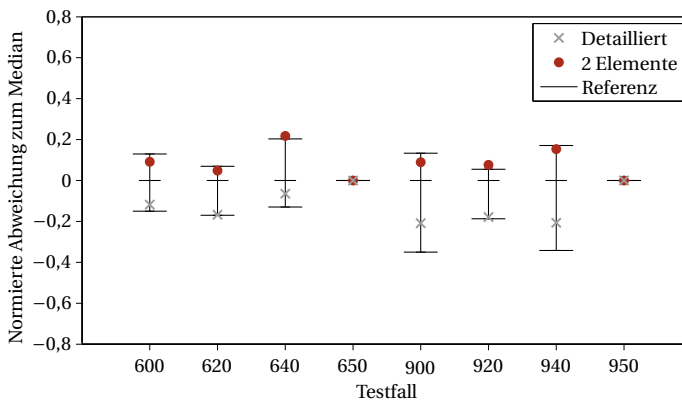


Abbildung 4.16: Vergleich des Jahreswärmebedarfs des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

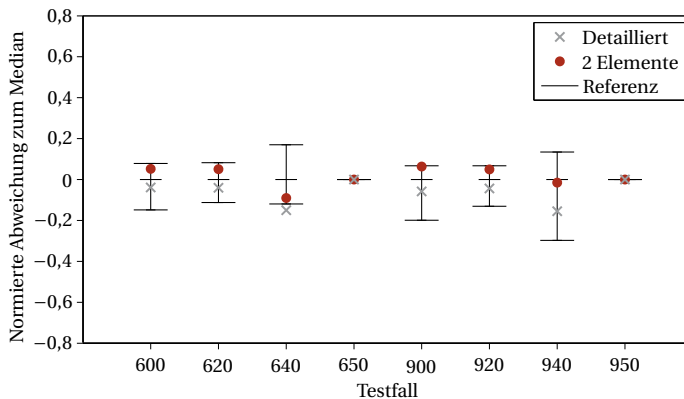


Abbildung 4.17: Vergleich der maximalen Heizlasten des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

werden die maximalen Referenzwerte für den Jahreswärmebedarf leicht überschritten, für alle übrigen Testfälle bleibt das Zwei-Elemente-Modell innerhalb der Grenzwerte. Die Testfälle 640 und 940 beinhalten wie in Tabelle 4.9 aufgeführt eine Nachtabsenkung. Diese Nachtabsenkung induziert eine zusätzliche schlagartige Änderung der Randbedingungen durch die geänderte Solltemperatur. Hierdurch ergibt sich eine kurzfristig dominante, hohe Anregungsfrequenz. Zum Zeitpunkt der Nachtabsenkung und bei der Rückkehr zum Tagbetrieb entstehen somit Zustände mit einer hohen Dynamik, in denen die thermischen Massen schnell ent- bzw. beladen werden. Diese Dynamik muss entsprechend durch die T-Schaltungen aus Kapazitäten und Widerstände abgebildet werden. Die Dynamik wird im Zwei-Elemente-Modell durch die Beschränkung auf eine T-Schaltung pro Ersatzelement mit einer, für sinusoidale Anregung ermittelten, Zeitkonstanten für die Parametrierung der effektiven thermischen Masse von 5 Tagen unzureichend abgebildet (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Die Zeitkonstante der zu diesem Zeitpunkt dominanten Anregungsfrequenz bewirkt nach (2.20) eine geringere wirksame thermische Masse, die den Zustand mit einer hohen Dynamik wiedergibt. In einem detaillierten Modell mit einer hohen Zahl von T-Schaltungen wird die wirksame, oberflächennahe thermische Masse mit einer separaten Schicht modelliert, sodass deren gespeicherte Wärme während des Beginns der Nachtabsenkung mit kurzen Zeitkonstanten in den Innenraum abgegeben werden kann. Dies bewirkt zu diesem Zeitpunkt höhere Oberflächentemperaturen für detaillierte Modelle als für das Zwei-Elemente-Modell, da die gespeicherte Wärme oberflächennah zur Verfügung steht. Das Zwei-Elemente-Modell reagiert somit träger als das detaillierte Modell und die Referenzprogramme. Dieser Effekt tritt für den leichten Testraum stärker auf als für den schweren Raum, da beim schweren Raum eine größere Speichermasse direkt an den Innenraum angrenzt, die mit Hilfe des Ansatzes der effektiven Masse hinreichend genau modelliert wird, was sich auch in

den Werten in Tabelle 4.10 widerspiegelt. Der Einfluss der Anregungsfrequenz ist diesem Fall nach (2.20) von geringerer Bedeutung als für den leichten Testraum. Angesichts einer maximalen Abweichung von den Grenzwerten von 1,5% für den Jahreswärmebedarf von Testfall 640 scheint der Einfluss von schlagartigen Änderungen der Randbedingungen jedoch auch in leichten Testfällen von untergeordneter Bedeutung für die Erstellung von Heizlastprofilen. Ein zweiter Effekt betrifft die Testfälle 620 und 920, der durch größere thermische Massen verstärkt wird. Für Testfall 920 ergeben sich Abweichungen zum oberen Grenzwert von 2,6%, die auf die Berücksichtigung von solarer Strahlung durch die Fenster zurückzuführen sind. Wie in Kapitel 4.2.1.1 erläutert, werden Außenwandflächen, in denen ein Fenster installiert ist, nicht von Solarstrahlung durch dieses Fenster getroffen. Hierdurch ergibt sich eine Asymmetrie in der Strahlungsverteilung, die zu einer unvollständigen Nutzung der thermischen Masse und somit größeren Heizwärmebedarfen als im detaillierten Modell führt, das diesen Ansatz nicht beinhaltet. Angesichts einer schmalen Bandbreite zwischen oberem Grenzwert und Median für den Heizwärmebedarf von Testfall 920 und der geringen Abweichung ist dieser Effekt jedoch ebenfalls von untergeordneter Bedeutung.

Anhang E enthält die Abbildungen für den Jahreskältebedarf, die maximalen Kühllasten sowie die frei schwingenden Testfälle. Es zeigen sich ähnliche, jedoch stärker ausgeprägte Effekte wie für die Heizfälle, insbesondere hinsichtlich dynamischer Zustände. Das Zwei-Elemente-Modell kann somit nicht alle Testfälle hinsichtlich Kühllasten und Raumtemperaturen erfüllen, zeigt jedoch auch im Speziellen für die Kühllasten ein akzeptables Verhalten. Einzig hinsichtlich minimaler und gemittelter Raumtemperaturen ergeben sich größere Abweichungen. Es sei jedoch angemerkt, dass in den frei schwingenden Testfällen Raumtemperaturen von minimal -20°C erreicht werden, für die der Ansatz eines um eine mittlere Raumtemperatur von 19°C linearisierten Strahlungsaustausches im Innenraum nach (4.15) nicht mehr gültig ist. Der radiative Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich für -20°C zu $\alpha_{\text{rad}} = 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, wodurch sich eine Reduktion des strahlenden Wärmeaustausches von 35 % abschätzen lässt. Eine detaillierte Diskussion der Fälle findet sich in Remmen (2014) und Lauster u. a. (2017).

Abbildung 4.18 zeigt den Verlauf der Heizlast für einen Referenztag des schweren Testfalls 900. Das Zwei-Elemente-Modell bleibt innerhalb der Grenzen und liegt meist nahe des oberen Grenzwertes. Die Diskussion deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Abbildungen 4.16 und 4.17, die eine tendenziell hohe Heizlast speziell für dynamische, pulsformige Zustände aufgezeigt hat.

Zusammenfassend zeigen sich bei der Verifizierung anhand der ASHRAE 140 (2007) geringe Abweichungen in Situationen mit schlagartigen Änderungen der Randbedingungen. In solchen Situationen weist das Zwei-Elemente-Modell größere Trägheiten auf als die Referenzmodelle des Standards und das gezeigte detaillierte Modell. Dies betrifft im Besonderen Änderungen der internen Wärmequellen in leichten Konfigurationen und kann durch den gewählten Ansatz der Modellreduktion erklärt werden. Insgesamt sind die Abweichungen jedoch speziell hinsichtlich Heizlasten sehr gering. Für einfache Testfälle stellt das Modell somit seine Anwendbarkeit für die Berechnung von Heizlastprofilen unter Beweis.

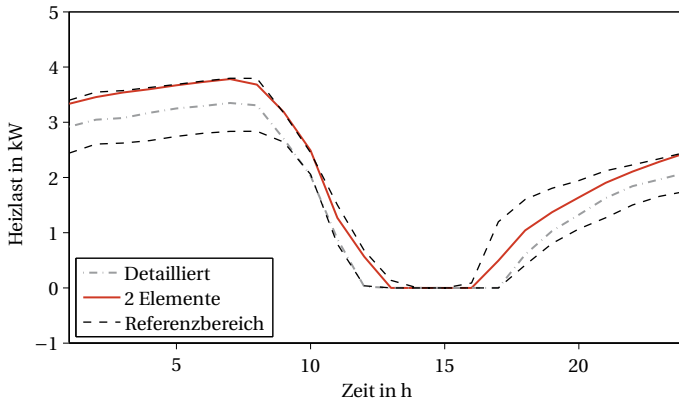


Abbildung 4.18: Vergleich der Verläufe der Heizlasten eines Referenztages mit schwerem Testfall 900 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

Um das Zwei-Elemente-Modell unter realistischen Randbedingungen und für reale Geometrien zu testen, werden die gezeigten Verifizierungen durch einen Vergleich mit der kommerziellen Software IDA ICE (Sahlin u. Grozman 2003) ergänzt. Das verwendete Einfamilienhaus nach Constantin u. a. (2014) und wie in Abbildung 4.19 gezeigt, ist eine archetypische Nachbildung deutscher Einfamilienhäuser und ist für verschiedene Bauschwereklassen (Schwer, Leicht, Mittel) und Dämmstandards

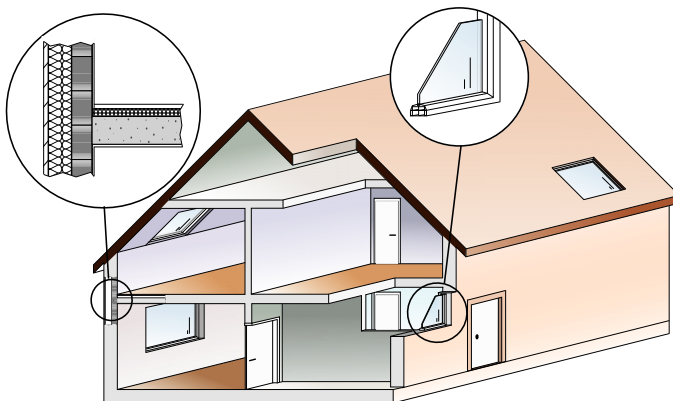


Abbildung 4.19: Aufbau eines Einfamilienhauses für Vergleichsrechnungen nach Jahangiri (2017).

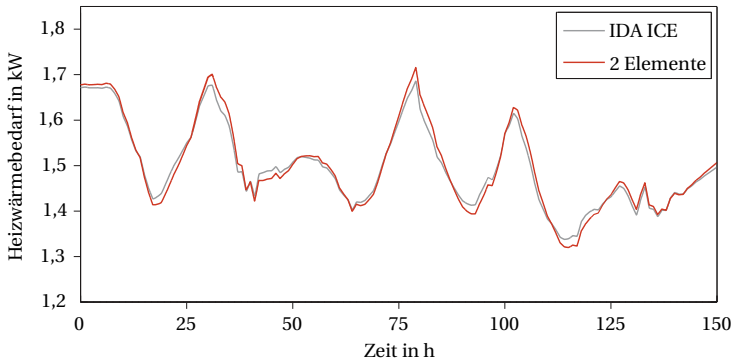


Abbildung 4.20: Exemplarischer Verlauf des Wärmebedarfs des Zwei-Kapazitäten-Modells im Vergleich zu IDA ICE für ein Einfamilienhaus für 150h nach Leppmann (2014).

(Wärmeschutzverordnung 1984 nach Bundesministerium für Wirtschaft u. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1984 bis Energieeinsparverordnung 2009 nach Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009) definiert. In dieser Untersuchung kam die schwere Konfiguration nach EnEV 2009 zum Einsatz.

Unter vereinfachenden Randbedingungen wie festen Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich die in Abbildung 4.20 gezeigten Verläufe für den Heizwärmebedarf. Dabei liegen die Abweichungen zwischen Zwei-Elemente-Modell und IDA ICE für den jährlichen Heizwärmebedarf unter 3 % bei einer Standardabweichung von $s = 80\text{ W}$ und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9898$. Hinsichtlich der Erzeugung von Wärmelastprofilen zeigen sich somit auch in diesem Vergleich unter realistischen Randbedingungen keine relevanten Unterschiede zu etablierten Verfahren für Einzelgebäude (Leppmann 2014).

Aus den gezeigten Untersuchungen zur Verifizierung lässt sich zusammenfassend schließen, dass das Zwei-Elemente-Modell sowohl für vereinfachte als auch komplexe Geometrien unter fiktiven als auch realen Randbedingungen ein annähernd gleiches Verhalten wie etablierte BPS-Programme zeigt. Im Speziellen für Wärmelastprofile sind die Abweichungen gering, sodass eine Verwendung dieses Ansatzes unter den gegebenen Unsicherheiten der Datenerfassung auf Stadtteilebene zu keinen relevanten Abweichungen führt.

Insgesamt ergibt sich aus diesem Kapitel zur Vorstellung des urbanen Gebäudemodells eine vollständige Beschreibung der Modelltopologie unter Beachtung der getroffenen Linearisierungen und der Erläuterung der objekt-orientierten Implementierung. Die Modelltopologie basiert auf der VDI

6007-1 (2015) und erweitert das in der Richtlinie beschriebene Modell um einen Widerstand zur Abbildung der Fenster. Aus diesem Grundmodell wurden vier Modellvarianten abgeleitet, die sich in der Anzahl der Ersatzelemente (von einem bis zu vier) unterscheiden. Die Modelle werden vollständig linearisiert, um den Rechenaufwand gering zu halten und die Flexibilität der Modelle zu erhöhen. Auf Basis der vollständigen Beschreibung der Modellvarianten wird mit Hilfe einer Charakterisierung der Varianten die Frage nach der optimalen Anzahl an Ersatzelementen bzw. Kapazitäten diskutiert, welche aus dem Stand der Forschung in Kapitel 3.2.2 offen geblieben war. Auf Grundlage eines einfachen Testfalls und verschiedener Dämmstandards sowie Bauschwereklassen wird mit Hilfe von Bode-Diagrammen und Analysen im Zeitbereich der Einfluss der Anzahl an Ersatzelementen auf das Übertragungsverhalten der Modellvarianten herausgearbeitet. Es zeigt sich, dass das Ein-Elemente-Modell durch die Vernachlässigung der thermischen Masse der Innenwände signifikante Abweichungen zu den anderen Varianten aufweist. Für die anderen drei Modellvarianten ergeben sich nur geringfügige Unterschiede, die unter den gegebenen Unsicherheiten der Datenerfassung auf Stadteilebene eine untergeordnete Rolle besitzen. So bietet sich das Zwei-Elemente-Modell mit einer geringen Anzahl an Ersatzelementen und einer geringen Komplexität als Alternative mit herabgesetztem Rechenaufwand bei annähernd gleichem Übertragungsverhalten für Simulationen auf Stadteilebene an. Abschließend erfolgt eine Verifizierung der gewählten Modellvariante anhand verschiedener Testfälle und Standards. Dabei können bis auf zwei Ausnahmen alle Testfälle eingehalten werden. Für die beiden Ausnahmen sind die Abweichungen gering, sodass das Zwei-Elemente-Modell keine signifikanten Abweichungen gegenüber etablierten Verfahren der Gebäudesimulation aufweist. Das Zwei-Elemente-Modell wird somit als vereinfachtes Modell für die Entwicklung parametrierbarer Gebäudemodelle für Betrachtungen auf Stadteilebene verwendet und wird für die Untersuchung der Anwendungsfälle in Kapitel 5 herangezogen.

4.2.4 Zentrale Lüftungstechnik

In Ergänzung zur Infiltration in Abbildung 4.8 bietet das entwickelte Modell die Möglichkeit, zentrale raumlüftungstechnische Anlagen (RLT) zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 4.1.1.3 beschrieben, ist dies unter anderem von Bedeutung für die Simulation von Institutsgebäuden. Um weiterhin einen der Aufgabenstellung entsprechenden Ansatz zu wählen, wird die RLT-Anlage nicht komponentenweise modelliert, sondern als geschlossenes System nach dem Schema in Abbildung 4.21 betrachtet.

Da die Dynamiken der RLT-Anlage für stündliche Wärmelastprofile aufgrund der geringen thermischen Massen eine untergeordnete Rolle spielen, ist das Modell als statisches Modell umgesetzt. Einschränkung ist zu sagen, dass im Falle von Kreislaufverbundsystemen die Modellierung der Dynamiken von RLT-Anlagen je nach Betrachtungszeitraum und Aufgabenstellung notwendig sein kann. In Modelica wird das statische Modell mit Hilfe von zeitabhängigen Zustandsautomaten realisiert, die jeweils einen der Systemzustände „Heizen“, „Kühlen“, „Befeuchten“ und „Entfeuchten“

beschreiben. Jeder der Zustände wird durch zwei Enthalpiebilanzen beschrieben, die den Wärme- bzw. Kältebedarf bestimmen (Mehrfeld u. a. 2016):

Nur Heizen

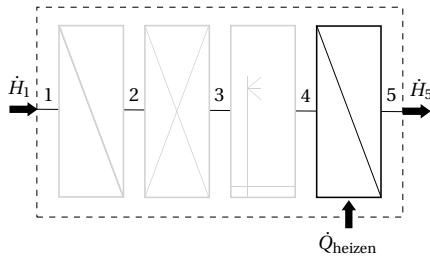


Abbildung 4.22: Bilanzraum für den Zustand „Nur Heizen“ aus Mehrfeld (2014).

$$\dot{Q}_{\text{kühlen}} = 0 \quad (4.21)$$

$$\dot{Q}_{\text{heizen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot (c_{\text{Luft}} + X_{\text{AUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\theta_5 - \theta_1) \quad (4.22)$$

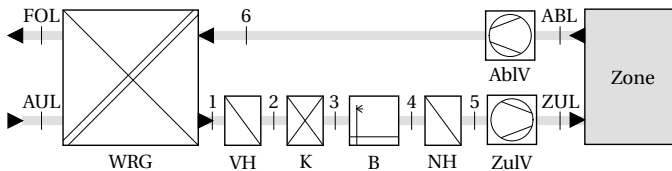


Abbildung 4.21: Schematischer Aufbau einer zentralen raumlufthtechnischen Anlage nach DIN V 18599-3 (2016) aus Mehrfeld (2014).

Nur Kühlen

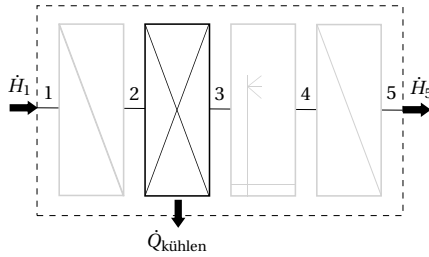


Abbildung 4.23: Bilanzraum für den Zustand „Nur Kühlen“ aus Mehrfeld (2014).

$$\dot{Q}_{\text{kühlen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot (c_L + X_{\text{AUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_5) \quad (4.23)$$

$$\dot{Q}_{\text{heizen}} = 0 \quad (4.24)$$

Entfeuchten

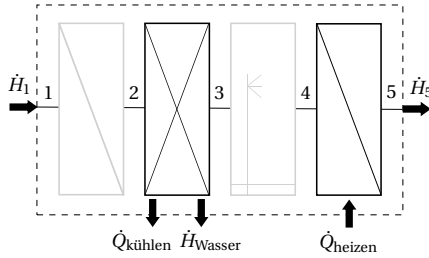


Abbildung 4.24: Bilanzraum für den Zustand „Entfeuchten“ aus Mehrfeld (2014).

$$\dot{Q}_{\text{kühlen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot [(c_{\text{Luft}} + X_{\text{AUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) + (X_{\text{AUL}} - X_{\text{ZUL}}) \cdot \Delta h_V] \quad (4.25)$$

$$\dot{Q}_{\text{heizen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot (c_{\text{Luft}} + X_{\text{ZUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\vartheta_5 - \vartheta_3) \quad (4.26)$$

Befeuchten und Heizen

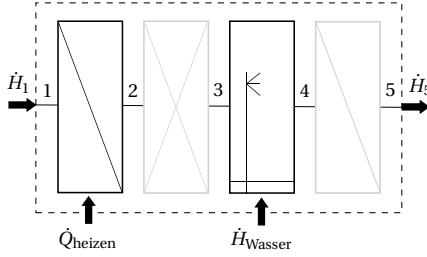


Abbildung 4.25: Bilanzraum für den Zustand „Befeuchten und Heizen“ aus Mehrfeld (2014).

$$\dot{Q}_{\text{kühlen}} = 0 \quad (4.27)$$

$$\dot{Q}_{\text{heizen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot [(c_{\text{Luft}} + X_{\text{AUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\vartheta_5 - \vartheta_1) + (X_{\text{ZUL}} - X_{\text{AUL}}) \cdot \Delta h_v] \quad (4.28)$$

Befeuchten und Kühlen

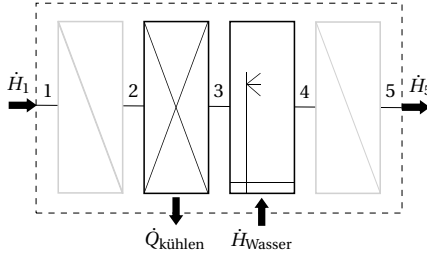


Abbildung 4.26: Bilanzraum für den Zustand „Befeuchten und Kühlen“ aus Mehrfeld (2014).

$$\dot{Q}_{\text{kühlen}} = \dot{V}_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot [(c_{\text{Luft}} + X_{\text{AUL}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_5) - (X_{\text{ZUL}} - X_{\text{AUL}}) \cdot \Delta h_v] \quad (4.29)$$

$$\dot{Q}_{\text{heizen}} = 0 \quad (4.30)$$

Als Eingangsgrößen benötigt das Modell die zeitlich variablen Volumenströme und Zustände hinsichtlich Temperatur und Feuchte der Außenluft (AUL), der Abluft (ABL) und den gewünschten Zustand der Zuluft (ZUL). Die gewünschte Feuchte der Zuluft wird dabei als erlaubter Bereich definiert. Das RLT-Modell funktioniert als ideales Modell, sodass der gewünschte Zustand immer erreicht wird und keine Leistungsbegrenzung der Komponenten möglich ist. Über Parameter lassen

sich die einzelnen Komponenten der RLT-Anlage deaktivieren, sodass auch Teilklimatisierungsanlagen simuliert werden können. Zusätzliche Parameter beschreiben den Gütegrad der Wärmerückgewinnung (WRG) sowie den Bypass-Faktor der Entfeuchtung. Dieser ist ein Maß für den Volumenstrom der Außenluft, der mit der gekühlten Fläche des Entfeuchters in Berührung kommt. Als Ausgangsgrößen berechnet das RLT-Modell den Wärme-, Kälte- und Strombedarf der Anlage zum Erreichen des gewünschten Zustandes. Für den Strombedarf lassen sich die Druckdifferenzen über die Ventilatoren sowie deren Wirkungsgrade angeben.

Im Rahmen der Arbeit von Mehrfeld (2014) konnte das RLT-Modell anhand von Messdaten an einer institutseigenen RLT-Anlage validiert werden. Dabei wurden alle Teilfunktionen ausgenommen der Befeuchtung über einen großen Bereich an Volumenströmen und Außenluftzuständen vermessen. Basierend auf diesen Untersuchungen zeigte das Modell für normale Betriebszustände Unsicherheiten im Rahmen der Messunsicherheiten und ist somit für die Generierung von Wärmelastprofilen für Stadtquartiere zufriedenstellend genau.

4.3 Automation - CampFlow

Neben TEASER und AixLib bildet CampFlow den dritten Baustein der entwickelten Werkzeugkette und bietet den Rahmen zur automatisierten Parametrierung, Erstellung, Ausführung und Auswertung von dynamischen Gebäudesimulationen. Die Einordnung der einzelnen Bausteine in die Werkzeugkette wird in Abbildung F4 im Detail vorgestellt. CampFlow greift auf die in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Schnittstellen von TEASER zurück. Initial werden, wie in Abbildung 4.27 gezeigt, Datensätze an TEASER übergeben. Innerhalb von TEASER werden die Datensätze bei Bedarf mit Hilfe der Archetypen angereichert, alle notwendigen Parameter für die Simulation berechnet und die entsprechenden Modelica Modelle exportiert. Die erzeugten Modelle werden anschließend über die Referenzierung der TEASER Objekte von CampFlow parallelisiert, automatisiert ausgeführt und die Simulationsergebnisse anschließend aufbereitet und mit Hilfe der Verfahren der Zeitreihenanalyse ausgewertet. Sowohl TEASER als auch die dynamischen Gebäudemodelle der AixLib und die Module von CampFlow sind objekt-orientiert und flexibel aufgebaut, sodass sich alle Submodule, Objekte und Teilmodelle auch in anderen Zusammenhängen nutzen lassen und ein transparenter Aufbau der Werkzeuge wie in DIN EN ISO 13790 (2008) (Kapitel 4) gefordert, sichergestellt ist. Im Folgenden werden die zwei Module von CampFlow zur Simulationsautomation und Zeitreihenanalyse vorgestellt.

4.3.1 Simulationsautomation

Die Automation der Simulationen umfasst vorrangig die übergeordnete Steuerung der kompletten Werkzeugkette vom Einlesen der Daten in TEASER aus den verschiedenen Datenquellen über die Anreicherung der Daten, die Berechnung aller notwendigen Parameter, das Zusammenstellen der

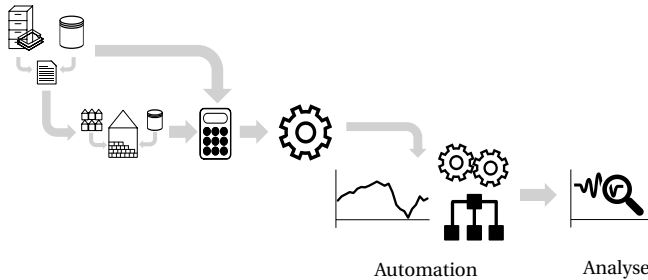


Abbildung 4.27: Schematischer Programmablauf von CampFlow und Schnittstelle zu TEASER.

vollständigen Datensätze und den Modellexport bis zur Ausführung aller Modelle und die Analyse der Ergebnisse. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der parallelisierten Ausführung der Simulationen und das Verwalten der Modelle und Ergebnisdateien. Im entsprechenden Modul von CampFlow werden dazu Modelica Skripte erstellt, welche die einzelnen Simulationen zu Paketen zusammenfassen und alle notwendigen Befehle zum Ausführen der Simulationen enthalten.

4.3.2 Zeitreihenanalyse und Auswertung

Für die Analyse der simulierten Wärmebedarfsprofile sowie den Vergleich zu Messdaten werden vorrangig Methoden der Zeitreihenanalyse benötigt. Allgemeines Ziel der Zeitreihenanalyse ist es, den zugrunde liegenden Prozess mathematisch zu beschreiben, um so langfristige Trends, wiederkehrende Muster und systematische Veränderungen in einzelnen Zeitreihen sowie Zusammenhänge zwischen verschiedenen Zeitreihen zu identifizieren (Schlittgen 2012; Steiner 2014). Insbesondere zum Zweck des Vergleichs von Mess- und Simulationsdaten wurden verschiedene Kennzahlen und Methoden der Zeitreihenanalyse in einem Modul in CampFlow implementiert, die hauptsächlich auf der Analyse der Residuen zwischen Messung und Simulation beruhen. Ein Überblick über die implementierten Methoden ist in Tabelle 4.11 gegeben.

Zur Beschreibung der Residuen stehen verschiedene Kennzahlen zur Verfügung. Im Bereich der skalenabhängigen Kennzahlen bilden die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Deviation, RMSD) und der mittlere absoluter Fehler (Mean Absolute Deviation, MAD) die wichtigsten Kennzahlen. Sie sind beide auf die Differenz der Momentanwerte bezogen, wobei diese entweder quadratisch (RMSD) oder linear (MAD) in die Berechnung eingehen. Die beiden Kennzahlen zeigen somit eine unterschiedliche Sensitivität gegenüber Ausreißern und liefern in Kombination eine Aussage über die Verteilung der Residuen (Steiner 2014). Ergänzt werden diese

Kennzahlen durch skalenunabhängige Kennzahlen, die eine Einschätzung der Residuen erlauben. Analog zum RMSD werden in CampFlow die auf die Differenz der Extremwerte normierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Normalized Root Mean Square Deviation, NRMSD) sowie die auf den Mittelwert normierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Deviation, CV(RMSD)) verwendet.

Zur visuellen Einschätzung der Unterschiede zwischen Messung und Simulation sowie der Bewertung von konstanten und linearen Differenzen werden Prognose-Realisationsdiagramme (PRD) verwendet (Unger 2015). Diese tragen die Simulationswerte über den Messwerten auf, sodass für eine perfekte Abbildung der Messung durch die Simulation die Winkelhalbierende zu erwarten ist. Wie gut die entstehende Punktwolke der Winkelhalbierenden folgt, lässt sich mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes R^2 bewerten. Das Bestimmtheitsmaß nach

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_{\text{Mess},t} - y_{\text{Sim},t})^2}{\sum_{t=1}^n (y_{\text{Mess},t} - y_{\text{Mess,mittel}})^2} \quad (4.31)$$

setzt dabei die Summe der quadratischen Differenzen zwischen Momentanwerten der Messung und Simulation ins Verhältnis zur Summe der quadratischen Differenzen zwischen Momentanwerten der Messung und deren Mittelwert. Ein Bestimmtheitsmaß nahe 1 entspricht einer nahezu perfekten Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation während negative Werte bedeuten, dass der Mittelwert der Messung eine bessere Schätzung darstellt als die Simulation (Lauster u. a. 2014a). Zusätzlich können über eine lineare Regression der Y-Achsenabschnitt sowie die Steigung einer Ausgleichsgeraden durch die Punktwolke gewonnen werden. Diese beiden Größen liefern einen Eindruck, ob die Abweichungen zur Winkelhalbierenden ein konstantes oder lineares Verhalten aufweisen.

Zur Bewertung, ob der allgemeine Verlauf der Simulation dem Verlauf der Messung entspricht, kann ein χ^2 -Richtungstest verwendet werden (Steiner 2014). Nimmt innerhalb eines Zeitschrittes der Verlauf der Messung zu, so sollte auch der Verlauf der Simulation positiv sein, für fallende Messwerte gilt die umgekehrte Aussage. Zusätzlich wird ein Toleranzband eingeführt, in dem die Änderung der Residuen als konstant angenommen wird. Das Band ist standardmäßig auf 1,5 % der Residuen verglichen zu dem Momentanwert der Messung gesetzt. Es ergibt sich eine Tabelle mit neun möglichen Ausprägungen, aus denen die kongruenten Paare aufsummiert werden. Die Summe sollte für eine 3x3-Kontingenztafel größer als 30 % betragen, um einen statistisch signifikanten Zusammenhang aufzuweisen. Ein statistisch nicht signifikantes Rauschen wäre gleichbedeutend mit der Aussage, dass eine rein zufällig verteilte Zeitreihe die gleich Aussagekraft besitzt wie die Simulation.

Als letzte Analyseverfahren werden Autokorrelationsfunktionen (Autocorrelation Function, ACF) sowie kumulative Periodogramme verwendet. Beide Verfahren zielen darauf ab, zeitlich wiederholende Muster innerhalb der Residuen aufzudecken. In beiden Methoden ist es möglich, über den aufgetragenen Lag bzw. die Frequenz die Periodizitäten der Muster zu identifizieren und so eine

Einschätzung über den Ursprung der Muster zu erhalten. Beide Verfahren beinhalten einen Test auf weißes Rauschen (z. B. Kolmogorov-Smirnov Test), der ein rein statistisches bzw. zufälliges Verhalten der Residuen aufdecken würde. Für ein ACF-Diagramm ist es notwendig, dass die Residuen stationär sind und weder einen Trend noch eine Änderung der Varianz aufweisen. In CampFlow sind der Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) und der Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin Test (KPSS) implementiert, für die ein P-Wert von $< 0,05$ auf stationäre Residuen schließen lässt (Steiner 2014).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in diesem Kapitel zum Aufbau parametrierbarer Gebäudemodelle die methodische Erarbeitung der Werkzeugkette für Stadtteilmatrizen erfolgt. Dabei sind die drei Bereiche der archetypischen Parametrierung, der dynamischen Modellierung und der Prozessautomation zu unterscheiden. Für die vereinfachte Parametrierung auf Basis weniger Grunddaten wurden Archetypen für Wohn-, Büro- und Institutsgebäude vorgestellt, wobei für die Institutsgebäude eine weitgehende Neuentwicklung eines Archetypen für solch eine Gebäudenutzung erfolgte. Die Archetypen sind in das Python Modul TEASER eingebunden, welches in den Schritten Datenanreicherung, Datenverarbeitung und Modellerstellung eine freie Wahl der Ausgangsdaten und eine flexible Verwendung der einzelnen Funktionalitäten erlaubt.

Die archetypische Parametrierung liefert einen Beitrag zu der Diskussion aus Kapitel 1 über eine angepasste Parametrierung, die den unterschiedlichen Datenständen auf Stadtteilebene Rechnung trägt. Im Bereich der dynamischen Modellierung standen die Fragen nach einem vereinfachten und dennoch dynamischen Gebäudemodell sowie die optimale Anzahl an Ersatzelementen für thermische Netzwerkmodelle auf Stadtteilebene im Fokus. Auf Basis der VDI 6007-1 (2015) wurde eine Modelltopologie entworfen, die hinsichtlich der Anzahl an Ersatzelementen variabel ist und für einen verringerten Rechenaufwand vollständig linearisiert wurde. Aus dieser Modelltopologie konnten vier Modellvarianten mit unterschiedlicher Anzahl an Ersatzelemente (eins bis vier) abgeleitet und anschließend ihr dynamisches Verhalten mit Hilfe von Bode-Diagrammen und Analysen im Zeitbereich verglichen werden.

Dabei zeigte das Zwei-Elemente-Modell nur geringe Abweichungen zu den höherwertigen Modellen, womit es sich in Kombination mit den Eigenschaften einer geringen Zahl an Ersatzelementen und einer geringen Komplexität als Grundlage für parametrierbare Gebäudemodelle für Stadtteilmatrizen anbietet. Abschließend erfolgte eine Verifizierung des Zwei-Elemente-Modells anhand verschiedener Testfälle und Standards, in denen das Modell keine signifikanten Abweichungen zu etablierten Verfahren der Gebäudesimulation aufzeigte.

Ergänzt wird das Gebäudemodell durch ein Modell für Lüftungstechnische Anlagen, welches für die Abbildung von Institutsgebäuden mit klimatisierten Laborzonen notwendig ist. Der dritte Bereich der Prozessautomation teilt sich in zwei Module zur parallelisierten Automation der Simulation sowie für Methoden der Zeitreihenanalyse. Das Modul für Zeitreihenanalysen umfasst verschiedene Kennzahlen und Methoden wie Prognose-Realisations-Diagramme, χ^2 -Richtungstests, Autokorrelationsfunktionen und kumulative Periodogramme. Ein Überblick über die implementierten

Methoden ist in Tabelle 4.11 gegeben. Die Kombination aller Module der Werkzeugkette dient als Grundlage für die Untersuchung der in Kapitel 1 skizzierten Anwendungsfälle, in denen die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Werkzeugkette getestet werden soll.

Tabelle 4.11: Übersicht über die verwendeten Methoden der Zeitreihenanalyse.

Bezeichnung	Kategorie	Beschreibung
RMSD	skalenabhängige Kennzahl	Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung liefert eine Aussage zur Verteilung der Residuen, durch quadratische Beziehungen ergibt sich ein größerer Einfluss von Ausreißern.
MAD	skalenabhängige Kennzahl	Der mittlere absolute Fehler liefert ebenfalls eine Aussage zur Verteilung der Residuen, durch lineare Abhängigkeiten ist der Einfluss von Ausreißern geringer.
NRMSD	skalenunabhängige Kennzahl	Auf die Differenz der Extremwerte normierter RMSD.
CV(RMSD)	skalenunabhängige Kennzahl	Auf den Mittelwert normierter RMSD.
PRD	Diagramm	Prognose-Realisations-Diagramm zur Gegenüberstellung von Simulations- und Messdaten, perfekte Abbildung entspricht der Winkelhalbierenden.
R^2	statistisches Gütemaß	Bestimmtheitsmaß zur Bewertung eines PRDs, 1 entspricht einer perfekten Übereinstimmung.
χ^2	statistischer Test	Bewertung der Richtung von Simulations- und Messwert pro Zeitschritt, ab 30 % besteht ein signifikanter Zusammenhang.
ACF	Diagramm	Darstellung zeitlich wiederkehrender Muster innerhalb der Residuen, Test auf weißes Rauschen.
kum. Periodogramm	Diagramm	Darstellung der integrierten Intensitäten zu den Frequenzen der Periodizitäten, Test auf weißes Rauschen.
ADE, KPSS	statistische Tests	Tests auf Trend- und Varianzstationarität als Voraussetzung für Tests auf weißes Rauschen.

5 Anwendung

An den in Kapitel 1 skizzierten Anwendungsfällen soll im Folgenden die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik für Liegenschaften verschiedener Größen gezeigt werden. Der erste Fall konzentriert sich dabei auf Lastverschiebung für eine kleine Gebäudegruppe. Der zweite Testfall hat eine Forschungsliegenschaft und die Verifizierung der Methodik im Fokus. Der dritte Fall umfasst ein vollständiges Stadtquartier, an dem das Zusammenwirken mit weiteren Werkzeugen zur Visualisierung und Optimierung demonstriert wird. Alle Anwendungsfälle werden zu Vergleichszwecken auf dem gleichen Rechner simuliert, die Systembeschreibung des Rechners ist in Tabelle 5.1 gegeben.

Tabelle 5.1: Systembeschreibung des verwendeten Rechners und der installierten Programmversionen.

Eigenschaft	Wert
Anzahl und Leistung Prozessoren	6 · 2,9GHz, 12 Threads
Arbeitsspeicher	32GB
Betriebssystem	Windows 7, 64 Bit
Simulationsumgebung	Dymola 2017, 64 Bit
Compiler	Visual Studio 2013 Community Edition
Programmiersprache	Python 3.4.3.5, 64 Bit

5.1 Lastverschiebung im Wohnquartier

Im Rahmen des Projektes „IEA EBC Annex 60“ (Wetter u. van Treeck 2017) entstand der DESTEST Vergleichsfall aus 24 Gebäuden mit Wohnnutzung, für die Zonierung und Gebäudephysik auf Basis des belgischen Gebäudebestandes genau definiert werden (Remmen u. a. 2017). Sie sind wie in Abbildung 5.1 gezeigt über ein Wärmenetz miteinander verbunden. Aufgrund der detaillierten Beschreibung kann auf die Verwendung der Archetypen von TEASER verzichtet werden. Ziel des Anwendungsfalls ist die prototypische Untersuchung von Regelstrategien zur Lastverschiebung, durch die eine Reduktion des Primärenergiebedarfs erreicht werden kann (Müller u. a. 2015b). Alle Informationen zu den Gebäuden werden per Skript in TEASER hinterlegt und anschließend die Parameterberechnung sowie die Modellerstellung ausgeführt. Über CampFlow können die erstellten Modelle in Stundenschritten simuliert und die Ergebnisse für ein Jahr aggregiert werden. Auf dem in Tabelle 5.1 gezeigten Rechner werden dafür unter 10 min benötigt.

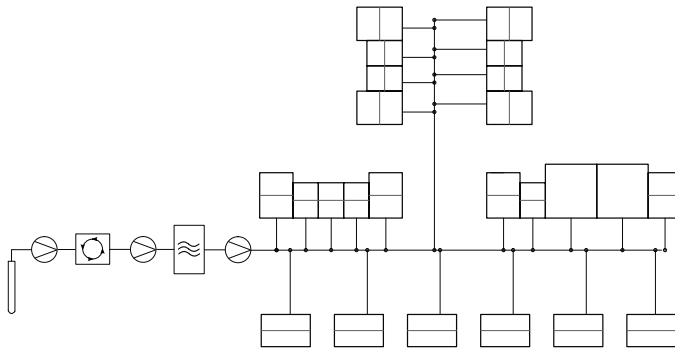


Abbildung 5.1: Übersicht über den im Annex 60 (Wetter u. van Treeck 2017) entwickelten DESTEST Vergleichsfall mit 24 Gebäuden, Wärmenetz und Wärmeerzeugerkreis.

Als Anwendung soll an diesem Fall gezeigt werden, welchen Einfluss eine Lastverschiebung der Heizlast auf den Primärenergiebedarf des Stadtquartiers hat. Hierzu wird das Stadtquartier zentral über eine nicht modulierende Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer elektrischen Leistung von 100 kW und einen Wasserspeicher (40–60 °C) mit einem Fassungsvermögen von 200 m³ mit Wärme versorgt (Abbildung 5.1). Die Wärmepumpe wird in der Referenzvariante so geregelt, dass sie bei entlademem Speicher (< 45 °C) einschaltet und ausgeht, sobald der Speicher voll geladen ist (> 60 °C). Für die Lastverschiebung wird zusätzlich das zeitlich abhängige Angebot an erneuerbaren Energien (EE) in die Regelung mit einbezogen.

Ziel ist es, die Wärmepumpe verstärkt während Zeiten mit einem Überangebot an regenerativem Strom zu nutzen, um so einen geringeren Bedarf an Primärenergie (PE) zu erreichen (Stinner u. a. 2017). Hierzu wird in Zeiten mit Überangebot der Speicher bereits ab 55 °C wieder beladen, sodass in Zeiten ohne Überangebot auf den Einsatz der Wärmepumpe verzichtet und die Last zeitlich verschoben werden kann. Als Eingangssignal für die Regelung wird ein variierender Primärenergiefaktor (f_P) verwendet, der für diesen Fall einem Rechteckprofil folgt und entweder 2,75 (kein Überangebot) oder 0 (Überangebot) beträgt (Stinner u. a. 2017).

Zum Einsatz kommen drei verschiedene Zeitreihen mit Primärenergiefaktoren, die sich durch den Anteil an Zeiten mit Überangebot unterscheiden. Differenziert werden sie dabei durch den Deckungsbeitrag ν , der angibt, wie groß der jährliche Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtzeugung ist (Stinner u. a. 2017). In diesem Anwendungsfall werden Zeitreihen mit einem Deckungsbeitrag von 60 %, 80 % und 100 % verwendet.

In Abbildung 5.2 sind beispielhaft die Temperaturverläufe im Speicher für den Referenzfall und die Variante mit EE Signal, $\nu = 100\%$ zu sehen. Der Einfluss des Signals kommt deutlich zum Tragen und führt zu einem häufigeren Laden des Speichers. Dies führt wie in Tabelle 5.2 zu einer erhöhten

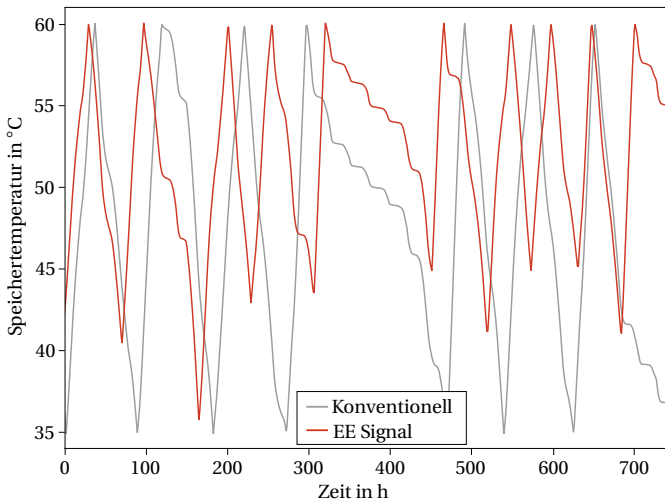


Abbildung 5.2: Verlauf der Speichertemperatur über einen Zeitraum von 750 Stunden für einen Deckungsbeitrag erneuerbarer Energien von $\nu = 100\%$.

Anzahl an Ladezyklen und aufgrund der höheren Speicherverluste durch die im Schnitt gestiegenen Temperaturen zu einem erhöhten Strombedarf. Durch das günstigere Nutzen der PE-Faktoren ergibt sich jedoch gleichzeitig ein um 6 % verringerter PE-Bedarf im Vergleich zum Referenzfall.

In diesem Anwendungsfall konnte die entwickelte Methodik für die Untersuchung von Lastverschiebung eingesetzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Modelle trotz der Vereinfachungen in der Lage sind, die Dynamiken weiterhin mit ausreichender Präzision abzubilden, sodass die Betrachtung von Lastverschiebung ermöglicht wird.

Tabelle 5.2: Vergleich der Regelungsstrategien ohne Signal der erneuerbaren Energien, mit Signal und einem Deckungsbeitrag ν von 60 %, 80 % und 100 %.

Regelungsstrategie	Anzahl Zyklen	Strombedarf	PE-Bedarf	Einsparung PE
ohne EE Signal	96	450 kWh	970 kWh, $\nu = 60\%$ 812 kWh, $\nu = 80\%$ 683 kWh, $\nu = 100\%$	-
mit EE Signal, $\nu = 60\%$	111	454 kWh	956 kWh	1,5 %
mit EE Signal, $\nu = 80\%$	121	459 kWh	788 kWh	3 %
mit EE Signal, $\nu = 100\%$	124	462 kWh	641 kWh	6 %

5.2 Liegenschaft mit Forschungsgebäuden

Wie in Kapitel 1 skizziert, ist die Betrachtung von Forschungsliegenschaften von hervorgehobener Bedeutung. Das Forschungszentrum Jülich stellt als eines der größten Forschungszentren Deutschlands einen geeigneten Anwendungsfall für Energiebedarfsrechnungen von Forschungsliegenschaften dar, in Abbildung 5.3 ist eine Übersicht über die Liegenschaft zu sehen. Der Campus des Forschungszentrums umfasst 120 Gebäude, die großteils an ein aus dem Großkraftwerk Weisweiler gespeistes Fernwärmenetz angeschlossen sind.

Die Liegenschaft besitzt sowohl hinsichtlich der Baualtersklassen als auch der Nutzungen einen heterogenen Gebäudebestand, die entsprechenden Aufteilungen finden sich in den Abbildungen 5.4 und B.2. Die Datenlage am Forschungszentrums ist weitgehend vollständig, auch wenn zu einem Teilbestand der Gebäude aus Sicherheitsaspekten keine Daten herausgegeben werden können (Abbildung 5.3). Für diese Gebäudegruppen standen jedoch aggregierte Wärmefarfsprofile zu Verfügung, sodass ihr Einfluss auf die Untersuchungen berücksichtigt werden konnte. Für den gesamten Gebäudebestand standen stündliche Messungen des Wärmeverbrauchs an der Übergabestelle der Fernwärme inklusive etwaiger Betriebszeiten der lokalen Notfall- bzw. Spitzenlastversorgung über Großkessel zur Verfügung.

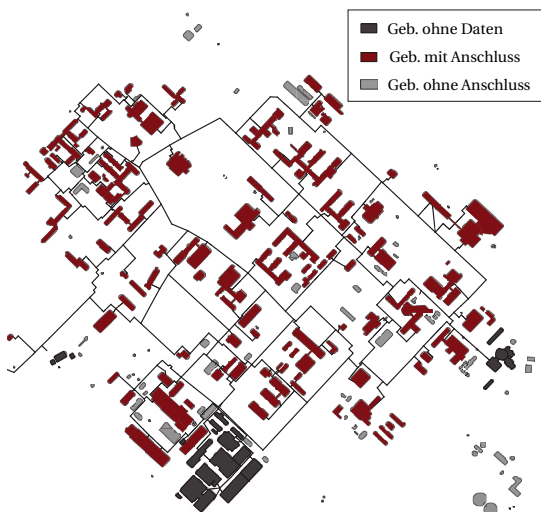


Abbildung 5.3: Übersicht des Forschungszentrums Jülich mit Wärmenetz, über das Netz versorgten Gebäuden, nicht angeschlossenen Gebäuden und Gebäuden ohne ausreichende Datengrundlage.

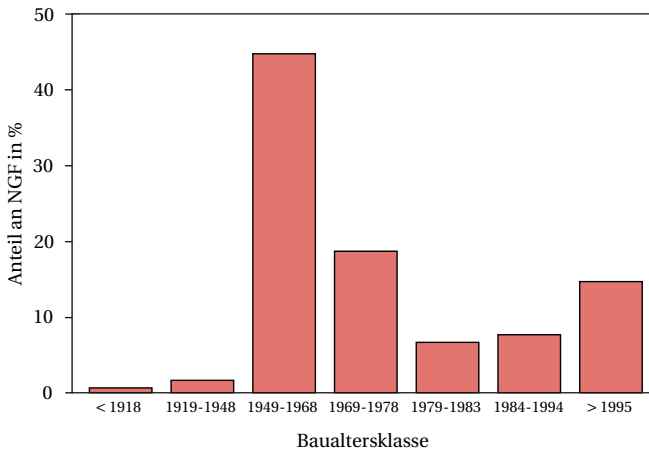


Abbildung 5.4: Anteil an Nettogrundfläche pro Baualterklasse der Gebäude des Forschungszentrums Jülich (Remmen u. a. 2017).

Lücken in den Messdaten (< 4 %) konnten mit Hilfe eines Theil-Sen-Schätzers aufgefüllt werden (Steiner 2014). Ergänzend standen Messwerte der Wetterbedingungen wie Außentemperatur und solare Einstrahlung zur Verfügung. Aufgrund fehlender Wartung und Alterung des Sensors für die solare Einstrahlung wurde über Korrelationen zur Messstation der RWTH Aachen an Campus Melaten ein Alterungsfaktor bestimmt und die Werte entsprechend korrigiert (Unger 2015). Im Rahmen der Masterplanung des Forschungszentrums stellt sich die Frage, welche Wärmebedarfe sich bei einer jährlichen Sanierungsrate von 1,7 % in den Referenzjahren 2020, 2030, 2040 und 2050 ergeben und wie sich diese Rate auf die Wärmeversorgung des Forschungszentrums auswirkt. Als Sanierungsstandard wird dabei die EnEV 2014 (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2014) verwendet. Zusätzlich erlaubt die bis auf wenige Ausnahmen vollständige Datenlage eine detaillierte Verifizierung der vorgestellten Methoden und Modelle.

Zur Untersuchung des Forschungszentrums wurde die vollständige in Kapitel 4.3 vorgestellte Werkzeugkette inklusive der Archetypen für Büro- und Institutsgebäude verwendet. Die Parametrierung aller Gebäude basiert auf den Minimalanforderungen von NGF, Gebäudehöhe, Stockwerkszahl, Nutzungsart und Baujahr, die vom Forschungszentrum zur Verfügung gestellt bzw. für Stockwerkszahl durch Schätzungen ergänzt wurden. Für den Einsatz der Toolkette am Beispiel des Forschungszentrums ist der neu entwickelte Archetyp für Institutsgebäude ein elementarer Baustein. Ohne diesen Archetyp wäre eine Untersuchung des Forschungszentrums nicht möglich. Für die Sa-

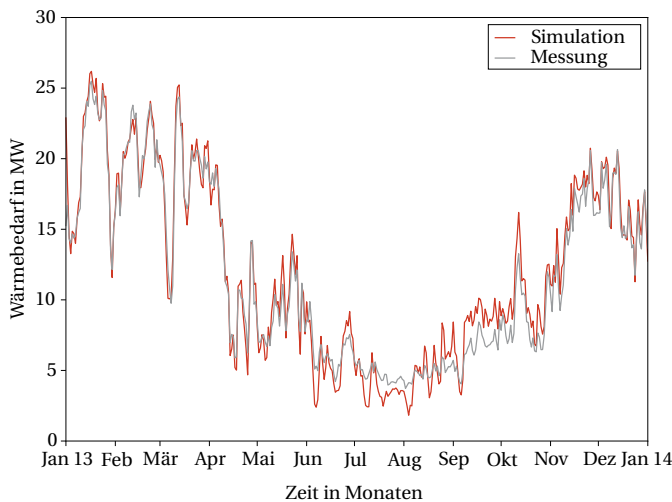


Abbildung 5.5: Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Jahres 2013 für das Forschungszentrum Jülich in täglicher Auflösung.

nierung der Gebäude wird auf eine Funktion in TEASER zurückgegriffen, mit der sich der gesamte Gebäudebestand auf einen definierbaren Zustand sanieren lässt. Als Ergebnis erhalten sich stündlich aufgelöste Wärmelastprofile pro Gebäude für ein Jahr, der vollständige Prozess bedarf auf dem in Tabelle 5.1 gegebenen Rechner unter 8h.

Die Verifizierung der entwickelten Methodik erfolgt anhand des Vergleichs der stündlich aufgelösten Simulations- und Messdaten. Abbildung 5.5 zeigt zur geeigneten Visualisierung beide Zeitreihen abweichend in täglicher Auflösung. In den Simulationsdaten wurden eine Abschätzung der Netzverluste des Wärmenetzes sowie Messdaten zu Gebäuden mit Datenschutz (Abbildung 5.3) integriert. Sowohl der generelle Verlauf als auch die Ausprägung der Varianz der Messdaten kann durch die Simulation im visuellen Vergleich präzise abgebildet werden. Signifikante visuelle Unterschiede ergeben sich vorrangig im dritten Quartal von Juli bis September in Zeiten niedriger Wärmebedarfe. Die Simulation scheint grundsätzlich eine leicht höhere Varianz aufzuweisen als die Messdaten. Der visuelle Eindruck bestätigt sich in der Betrachtung der Jahreswerte mit einem jährlichen Wärmeverbrauch von 103 GWh und einem simulierten Wärmebedarf von 106 GWh. Dies entspricht einer Differenz von 2,9% bezogen auf den Jahreswärmeverbrauch.

Die generell gute Übereinstimmung von Messung und Simulation lässt sich ebenfalls im PRD in Abbildung 5.6 ablesen. Die Punktwolke aus stündlichen Simulationsdaten aufgetragen über den Messdaten gleicher Auflösung zeigt eine geringe Anzahl Ausreißer in Richtung zu hoher simulier-

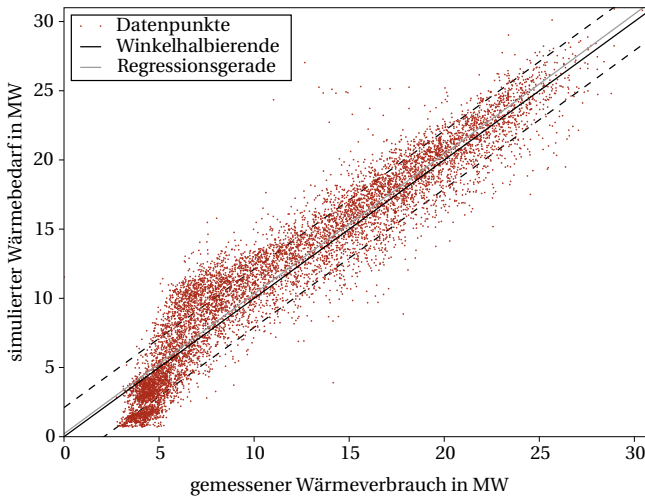


Abbildung 5.6: Prognose-Realisations-Diagramm mit gemessenem Wärmeverbrauch und simuliertem Wärmebedarf für das Forschungszentrum Jülich.

ter Bedarfe, was sich in den Kennzahlen der Residuen $\text{RMSD} = 2,1 \text{ MW}$ und $\text{MAD} = 1,7 \text{ MW}$ widerspiegelt. Im Falle einer großen Anzahl an Ausreißern würden die beiden Kennzahlen aufgrund der unterschiedlichen Sensitivität gegenüber Ausreißern stärker voneinander abweichen. Die gestrichelten Linien in Abbildung 5.6 geben den Bereich des RMSD um die Winkelhalbierende an (als positive und negative Abweichung).

Die relativen Kennzahlen betragen bezogen auf den Mittelwert $\text{CV}(\text{RMSD}) = 17,8\%$ und bezogen auf die Extremwerte der Residuen $\text{NRMSD} = 6,9\%$. Beide Kennzahlen deuten eine geringe Schwankungsbreite des RMSD und somit eine dichte Punktwolke an, was sich in Abbildung 5.6 visuell bestätigen lässt. Als zusätzliches Gütekriterium können das Bestimmtheitsmaß und eine lineare Regression bewerten, wie gut die Punktwolke dem Idealmaß der Winkelhalbierenden folgt. Das Bestimmtheitsmaß bezogen auf die Winkelhalbierende nach (4.31) beträgt $R^2 = 0,894$ und bestätigt somit die hohe Güte der Simulation als Schätzer der Messung. In Abbildung 5.6 ist zusätzlich die Regressionsgerade abgebildet, die den besten Fit zur Punktwolke darstellt. Der Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden liegt bei $q = 0,2 \text{ MW}$, die Steigung beträgt $p = 1,01$. Beide Werte liegen somit nah am Optimum der Winkelhalbierenden und belegen, dass weder ein konstanter Versatz noch ein linearer Trend zwischen Messung und Simulation erkennbar ist.

Zur Bewertung der Übereinstimmung der zeitlichen Verläufe von Messung und Simulation kann der χ^2 -Richtungstest aus CampFlow verwendet werden. Als Resultat ergeben sich die in Tabelle 5.3

Tabelle 5.3: Ausprägungen und Ergebnisse des χ^2 -Richtungstests für Messung und Simulation für das Forschungszentrum Jülich.

Simulation\Messung	fallend	konstant	steigend	Summe
fallend	1425	804	787	3016
konstant	592	976	851	2419
steigend	679	897	1749	3325
Summe	2696	2677	3387	8760

gegebenen Ausprägungen und Werte. Mit 4150 Werten in den betreffenden Ausprägungen auf der Hauptdiagonalen können 47% aller Richtungsänderungen richtig vorhergesagt werden. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang ist wie in Kapitel 4.3.2 erklärt ab 30% vorhanden, sodass auch in dieser Betrachtung von einer zuverlässigen Abbildung der Messung durch die Simulation ausgegangen werden kann.

Zur Analyse der bestehenden Abweichungen hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens lassen sich ACF-Plot und kumulatives Periodogramm verwenden. Sie ermöglichen eine Abschätzung, auf welche Frequenzen und somit möglicherweise auf welche Einflüsse die Abweichungen zurückzuführen sind. Für den ACF-Plot in Abbildung 5.7 muss zunächst die Stationarität der Residuen geprüft wer-

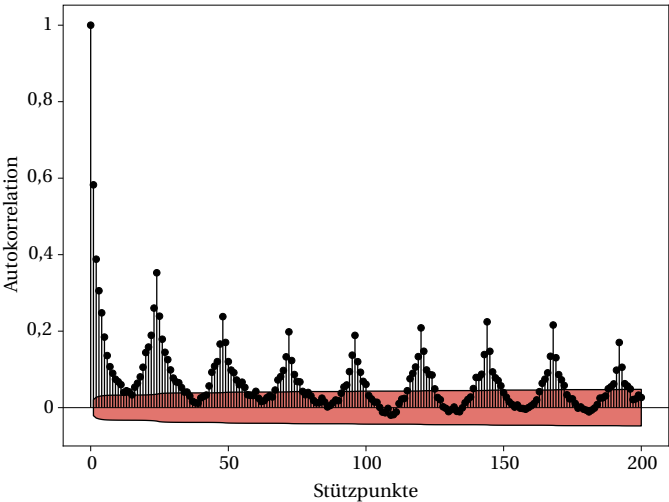


Abbildung 5.7: ACF-Diagramm der Residuen von Messung und Simulation des Wärmebedarfs für das Forschungszentrum Jülich mit 200 Stützpunkten.

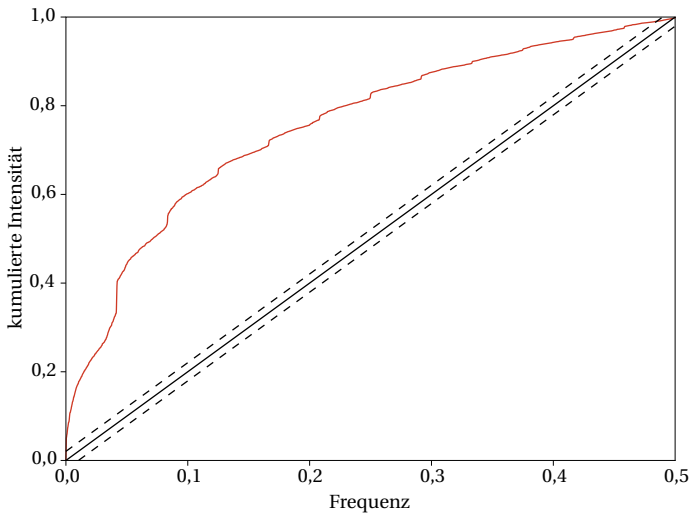


Abbildung 5.8: Kumulatives Periodogramm der Residuen von Messung und Simulation des Wärmebedarfs für das Forschungszentrum Jülich.

den. Die P-Werte des ADF-Tests und des KPSS-Tests sind mit $P_{\text{ADF}} = 6,23 \cdot 10^{-22}$ und $P_{\text{KPSS}} = 0,01$ beide kleiner als der Grenzwert von 0,05, womit von einer stationären Zeitreihe ausgegangen werden kann. Die Verwendung des ACF-Plots in Abbildung 5.7 ist somit gültig. Der ACF-Plot zeigt eine klare Ablehnung der Hypothese weißen Rauschens (Kapitel 4.3.2), wozu eine durchgängige Einhaltung des gekennzeichneten Bereiches notwendig wäre. Vielmehr zeigt sich eine klare Periodizität von 24 h, die aufgrund des Oberschwingungsverhaltens über die Tage abnimmt. Ab dem fünften bis zum siebten Tag ist ein Ansteigen der Relevanz für diese Periodizität zu sehen, was auf eine zusätzliche, schwächer ausgeprägte Periodizität mit der Frequenz einer Woche zurückzuführen ist. Die tägliche Periodizität ist entweder auf externe oder interne Lasten bzw. Randbedingungen zurückzuführen, da nur hier entsprechende Anregungsfrequenzen vorhanden sind. In Kombination mit der wöchentlichen Periodizität treten die internen Lasten als Ursache in den Vordergrund. Diese ist klar mit dem abweichenden Verhalten des Heizverbrauches aufgrund der abwesenden Nutzer korreliert, womit in der Abbildung des Nutzereinflusses, dessen Regel- und Lüftungsverhaltens folgerichtig weiteres Potenzial zur Verbesserung der Simulation zu finden ist.

Das kumulierte Periodogramm in Abbildung 5.8 unterstützt diese Aussagen, vor allem die tägliche Periodizität mit $0,0344 \text{ a}^{-1}$ ist klar als dominierender Einfluss auf die Residuen erkennbar. Auch im kumulativen Periodogramm wird die Hypothese von weißem Rauschen (gestrichelter Bereich um die Winkelhalbierende) klar abgelehnt. Durch das deterministische Verhalten der Simulation

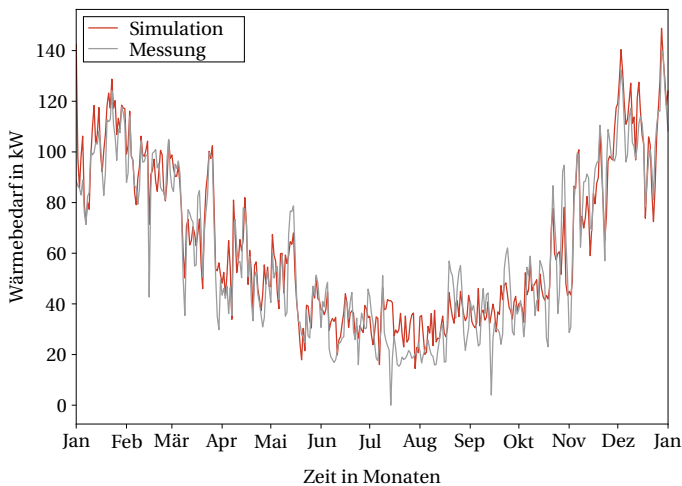


Abbildung 5.9: Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Gebäudes 0710, Gebäudeteil V in täglicher Auflösung.

ist weißes Rauschen jedoch auch nur dann zu erwarten, wenn alle Einflüsse korrekt abgebildet werden und nur stochastische Effekte der Messdaten zum Tragen kommen.

Alle bisherigen Analysen beschränken sich auf die Betrachtung des gesamten Gebäudebestandes des Forschungszentrums Jülich. Auf dieser globalen Ebene kann es durch positive und negative Abweichungen zwischen Simulation und Messung zu Ausgleichseffekten kommen. Zur Ergänzung werden im Folgenden lokale Analysen an zwei Gebäuden gezeigt, die einen Eindruck auf Einzelgebäudeebene vermitteln sollen.

In Abbildung 5.9 ist der gemessene und simulierte Wärmebedarf für das Gebäude 0710 in täglicher Auflösung gezeigt. Das Gebäude besteht aus mehreren Gebäudeflügeln, aufgrund der Anordnung der Messstellen beschränkt sich die Auswertung auf den Gebäudeflügel V. Bei dem Gebäude 0710-V handelt es sich um ein Institutsgebäude der Klasse 4 mit einer Nettogeschossfläche von 2704 m^2 und vier Geschossen. Das Gebäude wurde im Jahr 1974 gebaut und weist einen gemessenen spezifischen Wärmeverbrauch von $195 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ auf. Wie in Abbildung 5.9 zu sehen, zeigen Simulation und Messung für dieses Gebäude im zeitlichen Verlauf einen hohen Übereinstimmung. Sowohl das Niveau als auch die Varianz werden auf Basis täglicher Werte in der Simulation gut wiedergegeben. Dies spiegelt sich im simulierten spezifischen Wärmebedarf wider, der mit $204 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ um 4,5% von der Messung abweicht. Bei der Betrachtung dynamischer Kennzahlen auf Basis stündlicher Werte ergeben sich ein $\text{RMSD} = 26,4 \text{ kW}$ sowie die relativen Kennzahlen $\text{CV}(\text{RMSD}) = 43,8\%$ und $\text{NRMSD} = 10,9\%$. Analog zum Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,525$ belegen diese Werte eine große

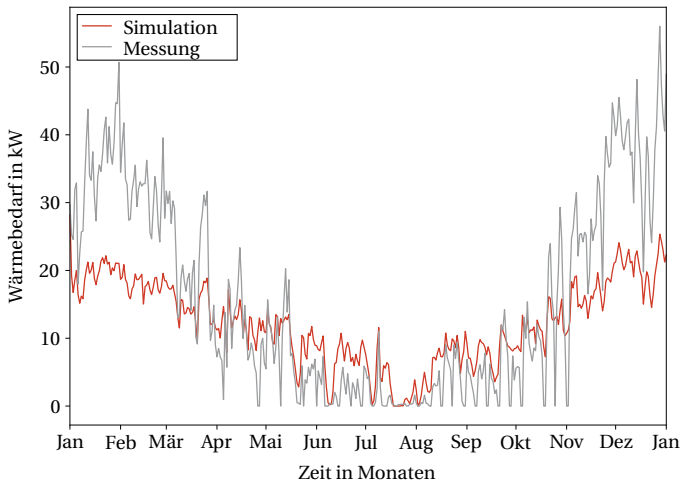


Abbildung 5.10: Wärmelastprofil für Messung und Simulation des Gebäudes 1080 in täglicher Auflösung.

re Abweichung als auf Liegenschaftsebene, der Verlauf kann aber grundsätzlich gut wiedergegeben werden.

Das zweite Gebäude 1080 ist eine alleinstehende, eingeschossige Experimentierhalle aus dem Jahr 1986, das der Klasse Institut Allgemein zugeordnet ist. Es ist mit einer Nettogrundfläche von 440 m^2 deutlich kleiner als das Gebäude 0710-V. Der gemessene spezifische Wärmeverbrauch liegt mit $318\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ deutlich höher, obwohl beide Gebäude aus ähnlichen Baujahren stammen. In Abbildung 5.10 zeigt sich im Vergleich des täglichen Wärmebedarfs zwischen Simulation und Messung eine deutliche Diskrepanz, sowohl für das Niveau als auch für die Varianz der Zeitreihen. Dabei sind das Niveau und die Varianz der Messung höher als die der Simulation, beide Zeitreihen weisen aber ein saisonales Verhalten auf. Für die Simulation ergibt sich ein spezifischer Wärmebedarf von $243\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, was einer Abweichung von 22,8% entspricht. Auch für die dynamischen Kennzahlen ergeben sich mit $\text{RMSD} = 16,9\text{ kW}$, $\text{CV}(\text{RMSD}) = 106,7\%$ und $\text{NRMSD} = 20,8\%$ deutlich größere relative Abweichungen als für Gebäude 0710-V. Das Bestimmtheitsmaß ergibt sich zu $R^2 = 0,297$ und ist signifikant niedriger. Das Gebäude ist mit Faserzementplatten verkleidet, was nicht dem archetypischen Wandaufbau für diese Epoche entspricht. Zusätzlich verfügt das Gebäude über mehrere große Rolltore. Aufgrund dieser bautechnischen Eigenschaften ist zu vermuten, dass sowohl der Wärmedurchgangskoeffizient als auch die Infiltrationsrate deutlich über den archetypischen Werten liegen dürften. Hierdurch lässt sich ein im Mittel deutlich größerer Wärmebedarf für das Gebäude 1080 im Verhältnis zum Archetyp ableiten. Die von der archetypischen Zonierung der In-

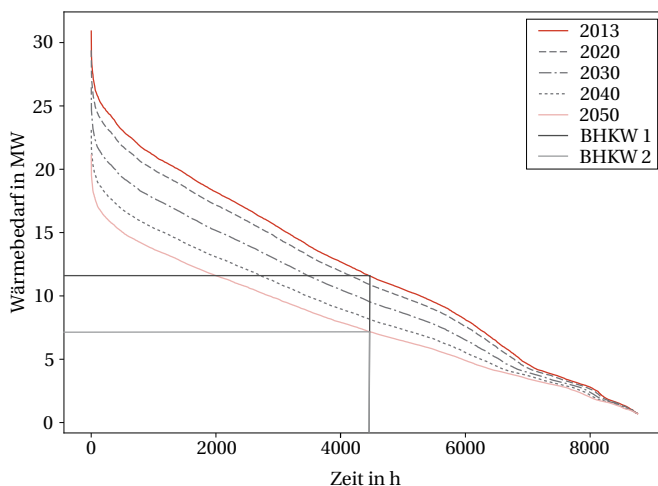


Abbildung 5.11: Jahresdauerlinien des Wärmebedarfs des Forschungszentrums Jülich für 5 Referenzjahre bei einer jährlichen Sanierungsrate von 1,7%.

stitutsgebäude abweichende Zonierung als eine große Halle ohne Innenwände oder Zwischendecken bewirkt zusätzlich, dass das Gebäude einer sehr leichten Bauweise entspricht, wodurch sich die größere Varianz im Vergleich zum Archetypen erklären lässt. Insgesamt ist zu sagen, dass das Gebäude 1080 stark von den archetypischen Annahmen abweicht und als Extremfall der Gruppe Institut Allgemein große Diskrepanzen zur Simulation des entsprechenden Archetyps aufweist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation die Messung auf Liegenschaftsebene zufriedenstellend widerspiegelt. Sowohl die Lage als auch die Varianz der Messung werden von der Simulation vollständig wiedergegeben, in allen Kennzahlen lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung ablesen. Die existierenden Abweichungen lassen sich auf den Einfluss des Nutzers durch Regelführung und Ventilationsverhalten zurückführen. Bei der Betrachtung von Einzelgebäuden kann Gebäude 0710-V in der Simulation gut abgebildet werden, für Gebäude 1080 ergeben sich größere Abweichungen. Die Simulation eignet sich somit, um eine Änderung des Wärmebedarfes durch Sanierungen und deren Auswirkungen auf Liegenschaftsebene zu untersuchen, während für die Betrachtung von Einzelgebäuden Detailinformationen notwendig sein können.

Für die Analyse der zukünftigen Wärmebedarfe sind die Jahresdauerlinien der Aggregation aller an das Wärmenetz angeschlossener Gebäude bei einer Sanierungsrate von 1,7% pro Jahr für die Referenzjahre 2013, 2020, 2030, 2040 und 2050 in Abbildung 5.11 gegeben. Es ist ersichtlich, dass es über die Dekaden zu einer abnehmenden Senkung des Wärmebedarfes kommt. Dies ergibt sich durch

die Sanierungsreihenfolge, in der ältere Gebäude vorrangig saniert werden und somit ein Großteil des Potenzials zwischen 2013 und 2040 genutzt wird. Die Jahresdauerlinien weisen unterschiedlich starke Steigungen bei ähnlichen Anfangs- und Endpunkten auf. Dies hat starke Auswirkungen sowohl auf die Auslegung als auch die Betriebsführung der Wärmeversorgung. Bei einer geplanten Eigenversorgung durch Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einer geforderten Volllaststundenzahl von 4500 h ergeben sich Auslegungsleistungen von 11 MW und 7 MW für die Jahre 2013 und 2050. Im Sinne einer zukünftig ausgerichteten Wärmeversorgung und abhängig vom Zeitpunkt der Installation sollte von einer kleineren bzw. flexiblen Auslegungsleistung ausgegangen werden, um eine Überdimensionierung zu vermeiden.

Anhand dieses Anwendungsfalls konnte eine detaillierte Verifizierung der entwickelten Methodik durchgeführt werden, die eine ausreichende Genauigkeit der verwendeten Verfahren belegt. Zusätzlich wurde die Methodik eingesetzt, um den zukünftigen Wärmebedarf einer großen Liegenschaft abzuschätzen und die Auswirkungen auf die Wärmeversorgung aufzuzeigen.

5.3 Stadtteil mit Mischnutzung

Als Stadtbezirk der ehemaligen Bundeshauptstadt Bonn ist Bad Godesberg ein beliebtes Wohngebiet für Diplomaten und Bundesbedienstete mit vielen Einfamilien- und kleinen Mehrfamilienhäusern, eine kartografische Ansicht ist in Abbildung 5.12 zu sehen. Unterbrochen wird die vornehmliche Wohnbebauung durch Verwaltungsgebäude, Ladenzeilen und Büronutzungen. Im Rahmen

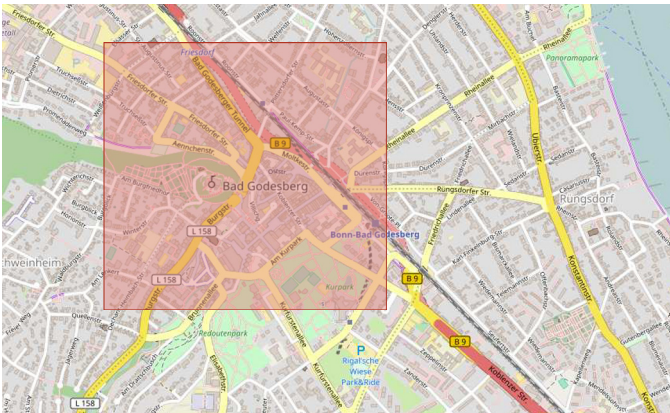


Abbildung 5.12: Kartografische Ansicht mit markiertem Ausschnitt von Bad Godesberg auf Basis von ©OpenStreetMap-Mitwirkende unter CC BY-SA, www.openstreetmap.org/ copyright.

dieser Arbeit dient Bad Godesberg als Anwendungsfall mit einer großen Anzahl an Gebäuden, über die nur unvollständig grundlegende Daten vorhanden sind. Er soll aufzeigen, wie sich die entwickelte Methodik mit weiteren Werkzeugen verbinden lässt, um eine flexible Anwendung zu ermöglichen. Dabei soll exemplarisch eine Wärmelastkarte erstellt sowie eine Vorauslegung eines Wärmenetzes erfolgen. Beide Instrumente lassen sich als strategische Werkzeuge zur weiteren Planung der zukünftigen Wärmeversorgung nutzen. Hierzu kommen in Kombination mit der entwickelten Methodik eine Datenbank mit GIS-Anbindung sowie das eigenständige Python Paket PyCity (Schiefelbein u. a. 2017) zum Einsatz. Aufgrund unterschiedlicher Datenquellen wird die Verwendung der Methodik separat für beide Instrumente vorgestellt.

Als Grundlage für die Erstellung der Wärmelastkarte mit Hilfe der GIS-Anwendung werden geografische und semantische Daten im CityGML-Format benötigt. Bad Godesberg diente als prototypischer Vorgänger für die Erfassung geografischer und semantischer Daten von Nordrhein-Westfalen (Bezirksregierung Köln 2017, Lizenz: <https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>). Es war einer der ersten Bezirke, für den ein Datensatz von insgesamt 2897 Gebäuden inklusive Gebäudegrundflächen und Gebäudehöhen sowie Außenwandflächen im CityGML-Format frei zur Verfügung gestellt wurde. Abbildung 5.12 zeigt den 1 km² großen Ausschnitt, der durch den Datensatz beschrieben wird. Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf diesen Ausschnitt.

Der Datensatz enthält vornehmlich geometrische Angaben zu bebauter Fläche, Gebäudehöhe und Außenwandflächen, sodass für eine Nutzung in TEASER die Daten durch Nutzungstypen, Baujahre und Stockwerkszahl ergänzt werden müssen. Für die Nutzungstypen wird angenommen, dass alle Gebäude mit einer bebauten Fläche größer als 600 m² und einer Gebäudehöhe kleiner als 15 m Büro- bzw. Verwaltungsgebäude sind (Remmen u. a. 2017). Zusätzlich werden 10 % der Gebäude mit einer bebauten Fläche größer als 100 m² als Bürogebäude angenommen. Allen restlichen Gebäude werden einer Wohnnutzung zugeordnet. Die Baujahre werden nach Remmen u. a. (2017) auf Basis der statistischen Verteilung für Deutschland aus Deutsche Energie-Agentur GmbH (2015) geschätzt. Für die Stockwerkszahl wird eine Gleichverteilung der Stockwerkshöhe zwischen 2,5 und 4 m angenommen, aus der mit Hilfe der Gebäudehöhe die Stockwerkszahl ermittelt werden kann (Remmen u. a. 2017). Auf Basis des so erhaltenen Datensatzes an Grunddaten werden in TEASER die Funktionen zur weiteren Datenanreicherung genutzt, die reduzierten AixLib-Gebäudemodelle exportiert und unter Annahme archetypischer Randbedingungen sowie eines Referenzwetterdatensatzes der TRY-Region 6 mit Hilfe von CampFlow automatisiert ausgeführt. Der vollständige Prozess benötigt dabei auf dem in Tabelle 5.1 gegebenen Rechner rund 14 h. Abbildung 5.13 zeigt die resultierende Wärmelastkarte mit den spezifischen Wärmebedarfen der Gebäude. Sie kann als Grundlage zur geografischen Analyse der Schwerpunkte der Wärmebedarfe genutzt werden, um Potenziale zum lokalen Nutzen von Wärmequellen oder der Definition von Vorranggebieten für die Gebäudesanierung dienen. Der jährliche Gesamtwärmebedarf aller Gebäude beträgt 159 GWh.

Zur Netzauslegung wird PyCity verwendet, das auf Eingangsdaten der OpenStreetMap (OSM) Datenbank (www.openstreetmap.org) basiert. Neben den bebauten Flächen und Höhen der Gebäu-



Abbildung 5.13: Ausschnitt der 3D-Ansicht einer exemplarischen Wärmelastkarte für Bad Godesberg. Alle Angaben in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

de enthält OSM zusätzlich Daten zu Gebäudenutzung und Baujahr. Zum Schätzen fehlender Daten enthält PyCity Funktionen, die Annahmen zu Nutzung und Baujahr machen. Die verwendeten Daten von ©OpenStreetMap-Mitwirkende, CC BY-SA, www.openstreetmap.org/copyright umfassen den gleichen Ausschnitt wie die CityGML-Daten in Abbildung 5.12. Der Datensatz enthält mit 1335 Gebäuden bedeutend weniger Entitäten. Zurückzuführen ist dies auf eine andere Zuordnung bebauter Flächen zu Gebäuden. Zukünftig ist ein Zusammenführen von CityGML und OSM Datensätzen erstrebenswert. Die in PyCity geladenen Daten werden genutzt, um für jedes Gebäude ein archetypisches Gegenstück in TEASER zu erzeugen. Anschließend werden die erzeugten Modelle über CampFlow ausgeführt. Aufgrund einer höheren Anzahl an Wohngebäuden, die als Ein-Zonen-Modelle betrachtet werden, ergibt sich eine Dauer von 8 h auf dem in Tabelle 5.1 gegebenen Rechner. Anschließend werden die Ergebnisse geladen und in PyCity eingebunden. PyCity bietet eine Funktion zur Netzauslegung auf Basis der Lastprofile und der geografischen Lage der Gebäude. Abbildung 5.14 zeigt einen Ausschnitt des generierten Wärmenetzes, das bei Randbedingungen von 90°C Vorlauftemperatur, 50°C Rücklauftemperatur, 10°C Bodentemperatur, einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 2 m/s und einem U-Wert der Rohre von $0,47\text{ W}/(\text{mK})$ eine einfache Gesamtlänge von $20,4\text{ km}$ und einen Rohrdurchmesser von $0,26\text{ m}$ aufweist.

In Ergänzung zur Betrachtung der Gebäude und des Wärmenetzes kann auf Basis der Wärmebedarfe der Gebäude eine Konzeptionierung der zentralen Wärmebereitstellung durchgeführt werden. Als Zielstellung wird ein möglichst geringer Primärenergiebedarf definiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Versorgungsszenarien betrachtet.

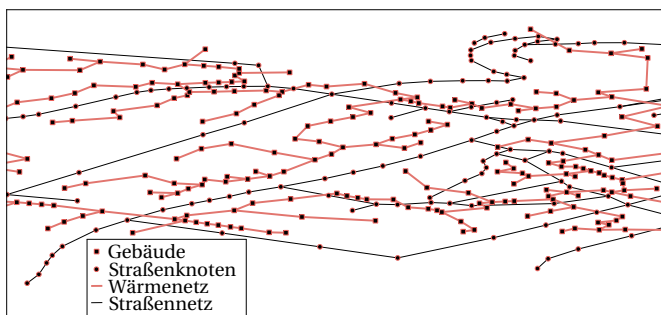


Abbildung 5.14: Ausschnitt aus Bad Godesberg mit Straßennetz- und Wärmenetztopologie sowie Straßen- und Gebäudeknoten aus PyCity.

Das erste Szenario fokussiert sich auf Gas als Brennstoff. Zur Grundlastversorgung wird ein BHKW mit einer Volllaststundenzahl von 4500 h, einem thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 0,5$, einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 0,4$ und einer minimalen Teillast von 30 % eingesetzt. Die Spitzenlastversorgung wird über einen Kessel mit $\eta = 0,95$ sichergestellt. In Abbildung 5.15 ist die Konzeptionierung anhand der Jahresdauerlinie des Gesamtwärmebedarfs gezeigt. Für das BHKW er-

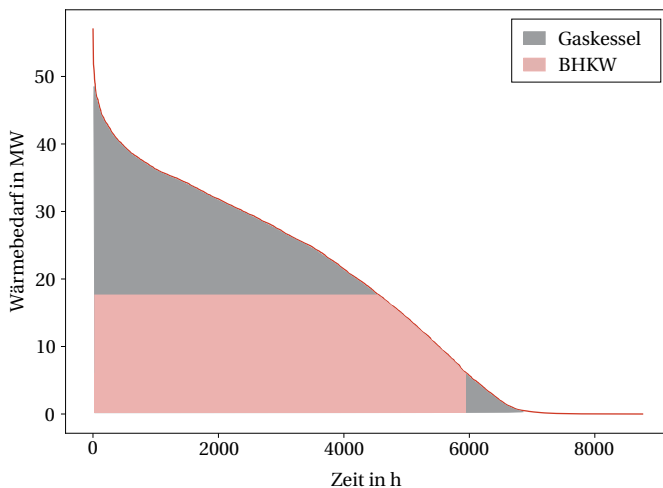


Abbildung 5.15: Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis der Verwendung von Gas.

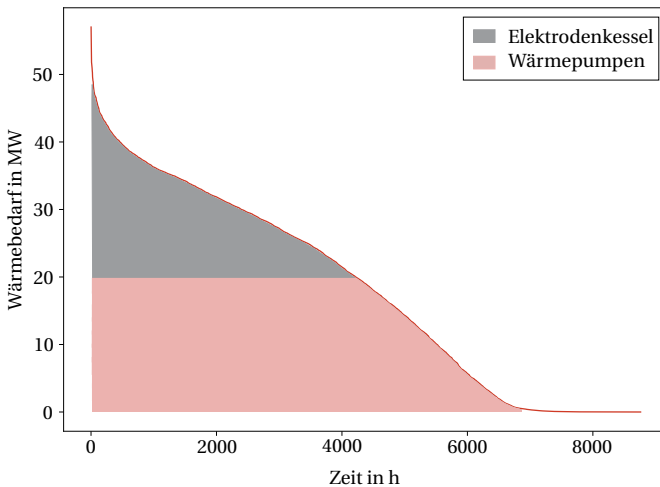


Abbildung 5.16: Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis der Verwendung von Strom.

gibt sich aus der definierten Volllaststundenzahl eine Auslegungsleistung von 18 MW. Der restliche Wärmebedarf wird durch den Kessel gedeckt. Da das BHKW sowohl Wärme als auch Strom produziert, müssen für eine vollständige Bilanz beide Energieformen berücksichtigt werden. Die anzusetzenden Primärenergiefaktoren f_p sind in Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2014) gegeben, für Gas wird ein Wert von 1,1 verwendet. Auf Basis der Wärmemengen und der Primärenergiefaktoren ergibt sich ein gesamter Primärenergiebedarf von 286 GWh, wobei 80,6 GWh Strom produziert werden. Dieser Strom muss in den weiteren Szenarien ebenfalls bereitgestellt werden, um einen Vergleich zu erlauben.

Im zweiten Szenario liegt der Schwerpunkt auf Strom als Primärenergie. Für die Grundlastversorgung kommen zehn modulierende Wärmepumpen mit einer Leistung von jeweils 2 MW zum Einsatz. Als Wärmequelle kann auf Rheinwasser aus weniger als 1 km Entfernung zurückgegriffen werden. Der Rhein weist im Mittel eine Temperatur von 14 °C auf (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2018). Für umgesetzte Projekte mit Flusswassernutzung und ähnlichen Vor- und Rücklauftemperaturen ergeben sich nach Wolf u. a. (2014) Leistungszahlen (Coefficient of Performance, COP) zwischen 3 und 3,5. In Rahmen dieser Studie wird ein COP von 3 angesetzt. Für die Deckung der Spitzenlast kommt ein Elektrodenkessel mit $\eta = 0,99$ zum Einsatz. Der bereitzustellende Strom wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Für alle Systeme wird f_p zu 1,8 gesetzt. Abbildung 5.16 zeigt die Konzeptionierung des strombasierten Szenarios anhand der Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs. Die Wärmepumpen decken dabei 69 % des Gesamtwärme-

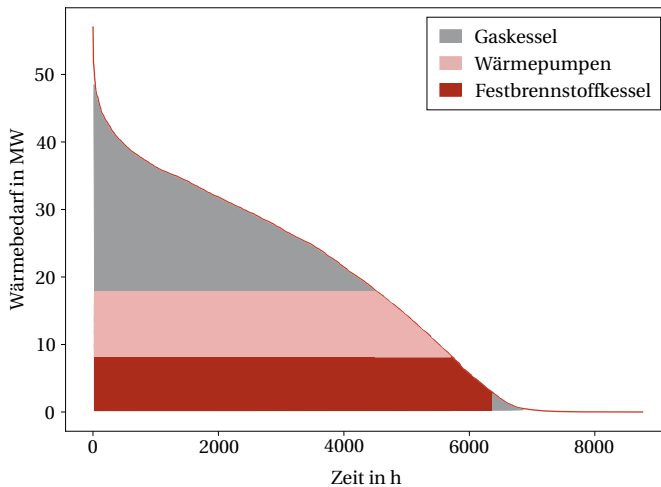


Abbildung 5.17: Jahresdauerlinie und Konzeptionierung der zentralen Wärmeerzeugung für Bad Godesberg auf Basis einer diversifizierten Energieversorgung.

bedarfs. Mit den gegebenen Leistungszahlen und Wirkungsgraden sowie dem Primärenergiefaktor ergibt sich ein Primärenergiebedarf von 300 GWh.

Für das dritte Szenario ist die Zielsetzung eine diversifizierte Wärmeerzeugung auf Basis verschiedener Energieträger. Der Grundlastanteil der Erzeugung wird über einen Festbrennstoffkessel mit Holzhackschnitzeln und einer Leistung von 8 MW gedeckt. Für den Kessel wird ein Wirkungsgrad von 0,9 und eine minimale Teillast von 30 % festgelegt. Der Primärenergiefaktor f_p für Holz beträgt 0,2. Die Mittellast wird mit Hilfe von fünf Wärmepumpen der gleichen Art wie im zweiten Szenario bereitgestellt. Für die Spitzenlastabdeckung wird ein Gaskessel wie im ersten Szenario betrieben. Der zu bilanzierende Strom wird wie im zweiten Szenario aus dem öffentlichen Netz bezogen. In Abbildung 5.17 ist die Konzeptionierung anhand der Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs zu sehen. Es ergibt sich ein Primärenergiebedarf von 255 GWh, was vorrangig auf den niedrigen Primärenergiefaktor für Holz zurückzuführen ist. Demnach sollte für einen möglichst geringen Primärenergiebedarf das Energiesystem nach dem dritten Szenario gewählt werden.

Dieser Anwendungsfall konnte zeigen, wie sich die entwickelte Methodik für große Quartiere mit Werkzeugen zur Visualisierung, Konzeptionierung und Optimierung von Gebäudebestand, Wärmenetzen und Wärmeerzeugung kombinieren lässt. Alle drei gezeigten Anwendungsfälle bilden die Grundlage für die Diskussion der Ergebnisse, in denen die Fälle im Kontext der entwickelten Methodik diskutiert werden, um so die Toolkette und ihre Anwendbarkeit bewerten zu können.

6 Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse hat zum Ziel, die in Kapitel 1 gestellten Anforderungen an die parametrierbaren Gebäudemodelle und die zugehörige Werkzeugkette anhand der drei gezeigten Anwendungsfälle zu diskutieren und zu bewerten. Hierzu werden getrennt die Bereiche Parametrierung, Modellierung und Automation auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Zusätzlich werden in Kapitel 4 Kriterien genannt, die bei der Implementierung der Werkzeugkette zu beachten sind. Diese Kriterien betreffen die Verifizierbarkeit, Genauigkeit, Transparenz, Stabilität und Flexibilität der Werkzeugkette und sollen im Folgenden ebenfalls für die drei Bereiche diskutiert werden.

Als Anforderung an die Parametrierung wird in Kapitel 1 gefordert, dass die Abbildung verschiedener Gebäudetypen wie Wohnnutzung, Bürogebäude und Institutsgebäude auf Basis weniger Grunddaten machbar sein soll. Diese Grunddaten sollen leicht zu erfassen sein und bei Bedarf um zusätzliche, detaillierte Informationen ergänzt werden können. Die Parametrierung soll modular aufgebaut sein, um so den Einsatz verschiedener Modelle und Module je nach Anwendungsfall zu erlauben.

Um diese Anforderungen an die Parametrierung zu erfüllen, wurde das Python Paket TEASER entwickelt, welches eine modulare Struktur auf Basis der Teilbereiche Datenanreicherung, Datenverarbeitung und Modellerstellung beinhaltet. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine hohe Transparenz und Flexibilität, da die verschiedenen Funktionalitäten je nach Anwendungsfall eingebunden werden können. Im Bereich der Datenanreicherung werden archetypische Ansätze für Wohn-, Büro- und Institutsgebäude definiert, welche die Verwendung von TEASER für verschiedene Typen von Liegenschaften ermöglicht. So konnte im ersten Anwendungsfall die gute Datenlage vollständig genutzt und alle angegebenen Parameter für einen kleinen Wohngebäudebestand verwendet werden.

Für den zweiten Anwendungsfall bietet sich die Verwendung der Archetypen an, da alle entsprechenden Basisparameter einer Forschungsliegenschaft erfasst werden konnten. Hier war vor allem die Entwicklung eines Archetypen für Institutsgebäude von hervorgehobener Bedeutung, da bisher kein Archetyp für diesen Gebäudetyp zur Verfügung stand. Für den dritten Anwendungsfall wurde ebenfalls auf die Archetypen zurückgegriffen, wobei durch den modularen Aufbau weitere Verfahren zur Schätzung der Basisparameter eingebunden werden konnten.

Zusätzliche Transparenz und Stabilität erhalten die Archetypen durch Verwendung von öffentlichen und standardisierten Quellen für Randbedingungen und statistische Grundlagen. Die Anwendung der archetypischen Ansatzes ist bis jetzt auf Wohn-, Büro- und Institutsgebäude beschränkt. Zusätzlich können die realen Begebenheiten stark von den angenommenen typischen Randbedingungen abweichen. Insbesondere bei der Betrachtung einzelner Gebäude treten diese Abweichungen

in verstärktem Maße zu Tage, sodass vor Anwendung der Archetypen die lokalen Begebenheiten zu prüfen sind. Die Auswirkungen dieses Ansatzes können im Zusammenhang mit der Verifizierung des Gebäudemodells in Kapitel 4.2.3 beobachtet werden.

Hier zeigen sich auch die Grenzen dieses Ansatzes, der die Wahl einer sinusoidalen Anregungsfrequenz zur Berechnung der Parameter beinhaltet. Für Fälle, in denen die gewählte typische Anregungsfrequenz von den realen Begebenheiten abweicht, ergeben sich Abweichungen in der Abbildung der Dynamik. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Abweichungen jedoch von untergeordneter Bedeutung, da aus der vereinfachten Parametrierung und den geschätzten Randbedingungen größere Unsicherheiten zu erwarten sind.

Für die Modellierung wird in Kapitel 1 die Verwendung vereinfachter Ansätze gefordert, die alle relevanten Effekte berücksichtigen und im Speziellen die Dynamik der Gebäude bei zeitlicher Auflösung im Stundenbereich abbilden können. Die Modelle sollen über klare Schnittstellen zu weiteren Modellen und Elementen der Werkzeugkette verfügen und eine geringe Zahl einfacher Parameter als Eingangsgrößen benötigen. Zur Abbildung der Dynamik wird ein Ansatz auf Basis thermischer Netzwerke gewählt und als Grundlage für die Modelltopologie das standardisierte Modell der VDI 6007-1 (2015) verwendet. Durch die Implementierung von vier Modellvarianten mit reduzierten Anzahlen an Ersatzelementen ergibt sich für die Modelle eine große Flexibilität hinsichtlich verschiedener Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Anforderungen und hinsichtlich der Auflösung dynamischer Effekte.

Alle vier Varianten sind in der Modelica Bibliothek AixLib frei verfügbar. Im Rahmen der Charakterisierung stellte sich das Zwei-Elemente-Modell als in Fällen geeignet heraus, in denen neben der Abbildung der entscheidenden Dynamiken auch der rechentechnische Aufwand sowie die Modellkomplexität beachtet werden müssen. Die individuellen Anforderungen einer Fragestellung an zulässigen Aufwand und Genauigkeit müssen jedoch für jeden Einzelfall separat bewertet werden. Die Verifizierung des Zwei-Elemente-Modells anhand verschiedener Standards und Testfälle garantiert eine transparente und stabile Implementierung des Modells innerhalb der Werkzeugkette.

Die sich ergebenden Abweichungen in zwei Testfällen sind von untergeordneter Natur, verdeutlichen jedoch die Anwendungsgrenzen des Modells für Fälle mit hohen Dynamiken oder schlagartigen Änderungen der Randbedingungen. Sind für solche Anwendungsfälle die minimalen und maximalen Raumtemperaturen von hervorgehobener Bedeutung, kann der Einsatz des Zwei-Elemente-Modells unzulässig sein. Im Rahmen dieser Arbeit kommt den Minimal- und Maximaltemperaturen jedoch keine besondere Rolle zu, sodass der Einsatz des Modells gerechtfertigt ist. Im Zusammenhang mit den Anwendungsfällen ist das Zwei-Elemente-Modell in allen drei Fällen in der Lage, die geforderten Dynamiken innerhalb der Wärmebedarfe der Liegenschaften abzubilden.

Im Speziellen für das Forschungszentrum Jülich zeigen sich im Abgleich mit den Messdaten keine Abweichungen, die auf eine unzureichende Abbildung der Dynamik im Gebäudemodell schließen lassen. Hinsichtlich der Rechenzeiten ergeben sich in allen Fällen Zeiten von unter einem Tag, wo-

mit die Rechenzeit in einem guten Verhältnis zum Gesamtaufwand zur Untersuchung der Anwendungsfälle steht. Als Parameter verwenden die Modelle ausschließlich Größen, die im Rahmen der Archetypen aus TEASER zur Verfügung stehen. Innerhalb der Modelle werden die Raumtemperatur sowie Heizlast pro Zone als Schnittstelle zur Verfügung gestellt, auf deren Basis weitere Modelle und Werkzeuge mit den Modellen verbunden werden können.

In Kapitel 1 werden hinsichtlich der Automation der Werkzeugkette die Anforderungen einer klaren Definition der Module, ihrer Aufgaben und Schnittstellen gestellt. Zusätzlich sollten die verwendeten Modellierungs- und Programmiersprachen aufeinander abgestimmt sein und die Automation mit Hilfe etablierter Verfahren zur Softwareentwicklung transparent und stabil aufgebaut sein. Die Umsetzung der Automation im Python Paket CampFlow ist in zwei getrennte Module zur Automation der Simulation sowie Zeitreihenanalyse unterteilt. Durch die klare Definition der Aufgaben der beiden Module ergibt sich eine hohe Flexibilität und Transparenz der Module. Der verwendete objekt-orientierte Ansatz bewirkt eine klare Struktur innerhalb der Module, die eine Prüfung einzelner Teilfunktionen ermöglicht und die Sicherstellung der Qualität der Implementierung unterstützt.

Innerhalb der Anwendungsfälle werden beide Module zur Parallelisierung der Simulation sowie zur Analyse der Ergebnisse eingesetzt. Die Zeitreihenanalyse kommt dabei im Speziellen für das Forschungszentrum Jülich zum Einsatz und ermöglicht die detaillierte Analyse der Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Vor allem das Prognose-Realisationsdiagramm, der χ^2 -Richtungstest sowie die Autokorrelationsfunktion dienen als hilfreiche Analysewerkzeuge zur Einschätzung der Abweichungen. Momentan sind die Funktionalitäten auf den Bereich der Zeitreihenanalyse beschränkt, was für die gezeigten Anwendungsfälle ausreichend ist. Die übergreifende Automation der Werkzeugkette kommt vorrangig im dritten Testfall zum Tragen, in dem die Kette mit weiteren Tools zur Visualisierung und Netzauslegung gekoppelt wird. Durch die klare, objekt-orientierte Strukturierung der Module ist eine Kopplung der gesamten Kette oder einzelner Teile ohne die Definition zusätzlicher Schnittstellen möglich.

Als Fazit ergibt sich aus der Diskussion der Ergebnisse, dass die in Kapitel 1 definierten Anforderungen für die drei Teilbereiche durch die Werkzeuge TEASER, AixLib und CampFlow im Rahmen der gezeigten Anwendungsfälle erfüllt werden. Die so entwickelten parametrierbaren Gebäudemodelle sind auf unterschiedlichen Ebenen verifiziert und stabil und lassen sich flexibel in verschiedenen Anwendungen einsetzen. Die Genauigkeit der Werkzeuge konnte in den Verifizierungsfällen sowie anhand von Messdaten für das Forschungszentrum Jülich gezeigt werden. Durch die quelloffene und objekt-orientierte Struktur der Werkzeuge ist eine hohe Transparenz der entwickelten Methoden sichergestellt. Einschränkend ist allerdings zu sagen, dass die Anwendbarkeit nur im Rahmen der gezeigten Fälle gegeben ist. Für weitere Anwendungsfälle muss in Abhängigkeit der Zielstellung geprüft werden, ob der archetypische Ansatz sinnvoll eingesetzt werden kann und ob durch den gewählten Modellierungsansatz sowie die Berechnung der Parameter die Dynamiken der Gebäude in ausreichender Weise abgebildet werden können.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung parametrierbarer Gebäudemodelle zur Erstellung von Wärmelastprofilen und für Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren. Hierzu war die Entwicklung von vereinfachten und dennoch dynamischen Gebäudemodellen notwendig, die den Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und Modellkomplexität auf Stadtteilebene gerecht werden. Zusätzlich musste eine Methodik entwickelt werden, die es ermöglicht, die Gebäudemodelle auf Basis weniger und einfach erfassbarer Eingangsdaten vollständig zu parametrieren. Beide Teilbereiche, Parametrierung und Modellierung waren in einen übergreifenden Prozess zur Automation der Werkzeugkette einzubinden. Mit Hilfe dieser Methodik sollten drei Anwendungsfälle untersucht werden, die sich sowohl hinsichtlich Anzahl an Gebäuden als auch der Aufgabenstellung unterschieden.

Die entwickelte Methodik zur vereinfachten Parametrierung wurde im Rahmen des Python Moduls TEASER umgesetzt. TEASER unterteilt sich in drei Teilprozesse zur Datenanreicherung, Datenverarbeitung und Modellerstellung. Der Teilprozess Datenanreicherung dient der Verwendung weniger Grunddaten als Eingangsgrößen, auf Basis derer mit Hilfe verschiedener Archetypen für die Nutzungsarten Wohngebäude, Bürogebäude und Institutsgebäude vollständige Datensätze generiert werden können. Die Anreicherung der Daten basiert auf Angaben zu Nutzungsart, Baujahr, Nettogrundfläche, Stockwerkszahl und Stockwerkshöhe und fußt auf statistischen Daten zum deutschen Gebäudebestand. Diese Daten umfassen Angaben zu Zonierung und Randbedingungen, Kubatur und Wandflächen sowie zu Wandaufbauten und Materialien. Für den Archetyp Institutsgebäude, der für den Anwendungsfall des Forschungszentrums Jülich erforderlich war, erfolgte eine eigene Typologisierung, da keine ausreichenden statistischen Erhebungen für Forschungsgebäude zur Verfügung standen.

Der entwickelte Archetyp unterteilt sich in drei Kategorien von Institutsgebäuden und erweitert den Ansatz für Bürogebäude um eine Zone für Labornutzung. Zusätzlich wird eine Lüftungstechnische Anlage zur Versorgung der Laborzone hinzugefügt, da diese einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Wärmelastprofile von Institutsgebäuden aufweist. Die Verwendung der Archetypen ist optional, in Fällen mit ausreichender Datenlage oder wenigen Fehlstellen können ebenfalls nur Teile der Archetypen verwendet bzw. ganz auf ihren Einsatz verzichtet werden. Im Teilprozess Datenverarbeitung werden alle für die Simulation notwendigen Parameter berechnet. Die Berechnung der thermischen Eigenschaften der Gebäudemasse erfolgt dabei auf Basis der effektiven thermischen Masse bzw. der periodischen Eindringtiefe nach VDI 6007-1 (2015). Dies erlaubt eine Reduktion der benötigten Parameter sowie eine vereinfachte Modellierung bei einer weiterhin akkuraten Abbildung der dynamischen Effekte. Der Teilprozess Modellgenerierung fokussiert sich auf die au-

tomatische Erstellung der vollständig parametrisierten Gebäudemodelle und dient als Schnittstelle zur eigentlichen Simulation.

Die vereinfachten, dynamischen Gebäudemodelle wurden in der Modellierungssprache Modelica implementiert und sind Teil der internationalen IBPSA Bibliothek sowie der darauf aufbauenden AixLib Bibliothek. Sie basieren auf thermischen Netzwerken aus T-Schaltungen von Kapazitäten und Widerständen und ermöglichen über die Anzahl an T-Schaltungen eine variable Wahl an Zustandsvariablen. Dies erlaubt eine Reduzierung der Modellkomplexität und der Rechenzeiten bei gleichzeitiger Reduktion der Abbildung dynamischer Effekte. Grundlage zur Reduktion an T-Schaltungen ist dabei das Zusammenfassen der Wände zu Ersatzelementen. Aus vier entwickelten Modellen stellte sich mit Hilfe einer Charakterisierung im Frequenz- und Zeitbereich ein an die VDI 6007-1 (2015) angelehntes Modell als beste Variante mit reduzierten Rechenzeiten und ausreichender Abbildung der Dynamiken auf Stadtteilebene heraus. Zu höherwertigen Modellen ergaben sich keine relevanten Abweichungen.

Das Modell fasst Außen- und Innenbauteile pro Zone zu jeweils einem Ersatzelement zusammen und ergänzt einen zusätzlichen, parallel zu den Außenbauteilen geschalteten Widerstand für Fenster. Es ist vollständig linear, beinhaltet eine algebraische Schleife und zwei Zustandsvariablen pro Zone. Dies ermöglicht eine effiziente und schnelle Lösung des Gleichungssystems. Das Modell konnte anhand standardisierter Testfälle mit etablierten Verfahren und Programmen zur Simulation einzelner Gebäude verglichen werden. Bis auf zwei der relevanten Testfälle konnte das Modell die geforderten Grenzwerte einhalten. In diesen beiden Fällen sind die Abweichungen gering, sodass eine Verwendung dieses Ansatzes unter den gegebenen Unsicherheiten der Datenerfassung auf Stadtteilebene zu keinen relevanten Abweichungen führt. Ergänzt wird das Gebäudemodell durch ein statisches Modell für Lüftungstechnische Anlagen auf Basis von Enthalpiebilanzen. Dieses Modell dient zur Berücksichtigung der Luftkonditionierung von Laborzonen und konnte anhand von Messungen an einem Prüfstand ebenfalls verifiziert werden.

Die übergreifende Automation ist in dem Python Modul CampFlow zusammengefasst und erlaubt die Steuerung der Werkzeugkette ausgehend von verschiedenen Quellen und Formaten an Eingangsdaten. Alle Teilprozesse von TEASER lassen sich einzeln ansteuern und die erzeugten AixLib Modelle können parallelisiert ausgeführt werden. Anschließend können die Ergebnisse in eine objekt-orientierte Struktur in Python geladen und analysiert werden. Zur Analyse stehen verschiedene Kennzahlen und Funktionen der Zeitreihenanalyse in assoziierten Modulen zur Verfügung. Als Kernelemente dienen hierzu die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSD), die auf die Differenz der Extremwerte normierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (NRMSD), Prognose-Realisationsdiagramme (PRD) in Verbindung mit dem Bestimmtheitsmaß, Autokorrelationsdiagramme (ACF) und χ^2 -Richtungstests. In Kombination erlauben diese Elemente eine detaillierte Bewertung der Ergebnisse und ermöglichen Rückschlüsse auf mögliche Quellen von Abweichungen.

Alle drei Elemente, TEASER, AixLib-Gebäudemodelle und CampFlow, sind modular und objekt-orientiert aufgebaut und definieren klare Schnittstellen, sodass sie eine flexible Verwendung in Kombination mit weiteren Werkzeugen und Modellen erlauben. Der modulare Aufbau sorgt zusätzlich für eine hohe Transparenz, die es Anwendern ermöglicht, jeden Teil der Methodik nachzuvollziehen. TEASER und AixLib werden quelloffen und versionsverwaltet unter <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER> und <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib> entwickelt, womit sowohl die Historie als auch der aktuelle Entwicklungsstand der Öffentlichkeit zugänglich ist.

Anhand von drei Anwendungsfällen mit unterschiedlicher Anzahl an Gebäuden und verschiedenen Fragestellungen konnte die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik gezeigt sowie die Werkzeugkette verifiziert werden. Für ein kleines Wohnquartier mit 24 Gebäuden, für das detaillierte Informationen zu den Gebäuden vorhanden sind, konnte auf die Verwendung der Archetypen verzichtet werden. Der Anwendungsfall wurde genutzt, um den Einfluss einer Regelung der Wärmeversorgung unter Einbezug der Verfügbarkeit regenerativen Stroms zu zeigen. Mit Hilfe des modularen Aufbaus der Werkzeugkette konnten alle Informationen zu den Gebäuden in den Prozess der Parametrierung einbezogen werden. Die Dynamik der Gebäude kann mit ausreichender zeitlicher Auflösung abgebildet werden, sodass eine Lastverschiebung auf Basis des 15-minütigen Signals der Verfügbarkeit regenerativen Stroms erfolgen kann. Die Simulation des Gesamtsystems dauert dabei unter 10 min.

Als zweiter Anwendungsfall steht die Liegenschaft des Forschungszentrums Jülich mit 120 Gebäuden zur Verfügung, die aufgrund der heterogenen Mischung an Baualterklassen und Nutzungstypen inklusive Institutsgebäuden einen guten Anwendungsfall für die Untersuchung von Forschungsliegenschaften darstellt. Für das Forschungszentrum konnte ein vollständiger Satz der benötigten Grunddaten erfasst werden, sodass auf die Archetypen in TEASER zurückgegriffen werden konnte. Insbesondere dem Archetyp für Institutsgebäude kommt in diesem Zusammenhang eine hervorgehobene Rolle zu, da er elementar für die Untersuchung von Forschungsliegenschaften ist.

Aufgrund einer konsistenten Erfassung von Messdaten für die Wärmeversorgung konnte anhand des Forschungszentrums Jülich eine umfassende Verifizierung der Werkzeugkette vorgenommen werden. Hierzu kamen die Methoden der Zeitreihenanalyse aus CampFlow zum Einsatz. Für den Vergleich der stündlichen Daten eines vollständigen Jahres ergaben sich Unterschiede zwischen Simulation und Messung für den Jahreswärmeverbrauch von unter 3%, wobei die gute Übereinstimmung durch statistische Kennzahlen wie den NRMSD mit 6,9% und ein Bestimmtheitsmaß von 0,894 bestätigt wird. Im Anschluss wurden für das Forschungszentrum Jülich die Auswirkungen von Gebäudesanierungen auf den zukünftigen Wärmebedarf und somit auf die Auslegung der Wärmeerzeugung aufgezeigt. Die Simulation des Forschungszentrums bedurfte dabei weniger als 8 h.

Als dritter Anwendungsfall wurde ein Ausschnitt des Bonner Stadtteils Bad Godesberg simuliert, für den aus verschiedenen Quellen Informationen zu den Gebäuden vorlagen. Zum einen stand ein

Satz vornehmlich geometrischer Informationen im CityGML Format zur Verfügung, zum anderen konnten für den Ausschnitt OpenStreetMap-Daten gesammelt werden. Beide Datensätze wurden mit Hilfe zusätzlicher Funktionen zur Schätzung der Grunddaten ergänzt. Auf Basis der Datensätze konnten eine Wärmelastkarte erstellt und eine Netzauslegung für ein fiktives Wärmenetz durchgeführt werden. In beiden Fällen wurden vornehmlich Archetypen für Wohngebäude verwendet, die für die angenommene Mischnutzung durch Bürogebäude ergänzt wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Gebäuden in den Datensätzen (2897 Gebäude im CityGML Datensatz und 1335 Gebäude aus den OpenStreetMap-Daten) ergeben sich Rechenzeiten von 8 h und 14 h. Dieser Anwendungsfall fokussiert sich auf die Kopplung der entwickelten Werkzeugkette mit weiteren Werkzeugen für spezifische Zielstellungen wie die Visualisierung des Energiebedarfs von Liegenschaften oder die Netzauslegung. Für beide Zielstellungen war die Kopplung mit der Werkzeugkette aufgrund des modularen Aufbaus ohne zusätzliche Schnittstellen möglich.

Auf Basis der Anwendungsfälle konnte gezeigt werden, dass sich die entwickelten parametrierbaren Gebäudemodelle für Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren zur Simulation großer Liegenschaften unter unvollständiger Datenlage eignen. Dabei erfüllen alle Teile der Werkzeugkette die Kriterien der Verifizierbarkeit, Genauigkeit, Transparenz, Stabilität und Flexibilität. Sie können somit für verschiedene Zwecke im Bereich der urbanen Energiesystemmodellierung eingesetzt werden, wenn die Zielstellung des Anwendungsfalls die Nutzung einer archetypischen Parametrierung und von vereinfachten Gebäudemodellen mit reduzierter Dynamik zulässt.

Die entwickelten Modelle bieten verschiedene Anknüpfungspunkte zur weiteren Entwicklung der Methodik sowie der Kombination mit zusätzlichen Ansätzen. Die Modelle und Methoden können in Simulationsumgebungen für Stadtquartiere integriert werden, wodurch zusätzlich die Berücksichtigung von Effekten wie Wärmeinseln und Windstrukturen möglich wäre. Hierzu empfiehlt sich die Kopplung zu existierenden Werkzeugen mit Hilfe des FMI-Standards. Darüber hinaus kann die Anbindung von TEASER zu Informationsmodellen und Datenaustauschformaten wie CityGML und IFC4 vertieft werden, um eine integrative Nutzung in Planungsprozessen zu ermöglichen. Weiterhin bietet sich die Entwicklung einer visuellen Nutzerschnittstelle zur Aggregation aller Informationen, Funktionen und Rechenergebnisse an. Diese Schnittstelle sollte vollständig webbasiert sein, um die Integration im Rahmen einer Cloudlösung zu ermöglichen. Abschließend bietet die Einbindung von Kalibrierungsverfahren auf Basis von Messdaten die Möglichkeit, eine zusätzliche Informationsquelle in Form der Messdaten zur Bestimmung der Parameter zu nutzen.

Literaturverzeichnis

Achterbosch u. a. 1985

ACHTERBOSCH, G.G.J. ; JONG, P.P.G. de ; KRIST-SPIT, C. E. ; VAN DER MEULEN, S. F. ; VERBERNE, J.: The development of a convenient thermal dynamic building model. In: *Energy and Buildings* 8 (1985), Nr. 3, S. 183–196. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(85\)90003-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(85)90003-9)

Akander 2000

AKANDER, Jan: *The ORC method: Effective modelling of thermal performance of multilayer building components*. Stockholm, The Royal Institute of Technology, Diss., 2000

Antonopoulos u. Koronaki 1998

ANTONOPOULOS, K. A. ; KORONAKI, E.: Apparent and effective thermal capacitance of buildings. In: *Energy* 23 (1998), Nr. 3, S. 183–192. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00088-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00088-1)

Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 1997

ARBEITSGEMEINSCHAFT MAUERZIEGEL: *Solarabsorption auf Außenwänden und Reduktion der Transmissionswärmeverluste*. Bonn, 1997 (AMz-Bericht 5/1997)

ASHRAE 2005

ASHRAE: *2005 ASHRAE handbook: Fundamentals*. S.I. ed. Atlanta, GA. : ASHRAE, 2005. – ISBN 9781931862714

ASHRAE 140 2007

Norm ASHRAE 140-2007 2007. *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*

Bacher u. Madsen 2011

BACHER, Peder ; MADSEN, Henrik: Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 7, S. 1511–1522. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005>

Ballarini u. a. 2014

BALLARINI, Ilaria ; CORGNATI, Stefano P. ; CORRADO, Vincenzo: Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. In: *Energy Policy* 68 (2014), S. 273–284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>

Bauministerkonferenz 2010

BAUMINISTERKONFERENZ ; AUSSCHUSS FÜR STAATLICHEN HOCHBAU, FACHKOMMISSION BAU- UND KOSTENPLANUNG, NETZWERK KOSTENPLANUNG (Hrsg.): *Bauwerkszuordnungskatalog*. 2010

Beuken 1936

BEUKEN, Clemens L.: *Wärmeverluste bei periodisch betriebenen elektrischen Öfen: Eine neue Methode zur Vorausbestimmung nicht-stationärer Wärmeströmungen*. Berlin : Triltsch & Huther, 1936

Bezirksregierung Köln 2017

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN: *Geobasis NRW*. <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3d-gm/>. Version: 2017

Biechele 2015

BIECHELE, Benedikt: *Energieeffizienz von Hochschulgebäuden: Analyse, Bewertung und Verbesserungsansätze*. Kassel, Universität Kassel, Diss., 2015

Bonvini u. Leva 2012

BONVINI, Marco ; LEVA, Alberto: Exploiting Object-Oriented Modelling for Scalable-Detail Studies on Control for Energy Efficiency. In: *IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Dubrovnik, 2012, S. 770–775

Bosy u. a. 2001

BOSY, Bruno ; DOSCHKO, Werner ; HELBIG, Klaus: *Zentralheizungs- und Lüftungsbau*. Bad Homburg vor der Höhe : Gehlen, 2001. – ISBN 9783441921639

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2007

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG ; BMVBS (Hrsg.): *Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand*. Berlin, 2007

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG ; BMVBS (Hrsg.): *Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand*. Berlin, 2009

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2010a

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG ; BMVBS (Hrsg.): *Vereinbarung zur geometrischen und technischen Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand*. Berlin, 2010 (BMVBS-Online-Publikation 26/2010)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2010b

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG ; BMVBS (Hrsg.): *Weitergehende Vereinfachungen für die Zonierung von Nichtwohngebäuden bei der Erstellung von Energieausweisen sowie im öffentlich-rechtlichen Nachweis nach EnEV*. Berlin, 2010 (BMVBS-Online-Publikation 30)

Bundesministerium für Wirtschaft u. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 1984

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT ; BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU: *Wärmeschutzverordnung 1984: WSchV*. 1984

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2011

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung: Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*. Berlin, 2011

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE ; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Die Energieeinsparverordnung 2009: EnEV*. 1. Aufl. Berlin, 2009 (VBI-Schriftenreihe Teil I)

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie u. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2014

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE ; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Die Energieeinsparverordnung 2014. EnEV*. Berlin, 2014 (VBI-Schriftenreihe)

Burmeister 1996

BURMEISTER, Harald: *Die quantitative gebäuderelevante Darstellung von Klimadaten: Die Klimaflächen*. Zürich, ETH, Diss., 1996

Carter 1990

CARTER, Cyril: Computational methods for passive solar simulation. In: *Solar Energy* 45 (1990), Nr. 6, S. 379–384. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90159-A](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(90)90159-A)

Clarke 2001

CLARKE, J. A.: *Energy simulation in building design*. 2. ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. – ISBN 0750650826

Clarke u. a. 2008

CLARKE, J. A. ; GHOURI, S. ; JOHNSTONE, C. M. ; KIM, J. M. ; TUOHY, P. G.: *The EDEM Methodology*

for Housing Upgrade Analysis, Carbon and Energy Labelling and National Policy Development. In: *eSim 2008: The Fifth IBPSA - Canada Conference*. Québec, 2008, S. 135–142

Constantin u. a. 2014

CONSTANTIN, Ana ; STREBLOW, Rita ; MÜLLER, Dirk: The Modelica HouseModels Library: Presentation and Evaluation of a Room Model with the ASHRAE Standard 140. In: *The 10th International Modelica Conference*. Lund : Linköping University Electronic Press, 2014 (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 293–299

Crabb u. a. 1987

CRABB, J. A. ; MURDOCH, N. ; PENMAN, J. M.: A simplified thermal response model. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 8 (1987), Nr. 1, S. 13–19

Curtis u. a. 1984

CURTIS, Richard B. ; BIRDSALL, Bruce ; BUHL, W. F. ; ERDEM, Ender ; ETO, Joseph ; HIRSCH, James J. ; OLSON, Karen H. ; WINKELMANN, Frederick C.: The DOE-2 Building Energy Analysis Program. In: OLSON, Karen H. (Hrsg.): *ASEAN Conference on Energy Conservation in Buildings*. Singapur, 1984

David u. a. 2013

DAVID, Ruth ; JAINTA, Oliver ; REGEL, René ; JENSCH, W.: *Schlussbericht für das Forschungsvorhaben HoEff Schlussbericht für das Forschungsvorhaben HoEff im Rahmen des Förderkonzeptes EnBop – Energetische Betriebsoptimierung*. 2013

Davies 1979

DAVIES, M. G.: A thermal circuit for radiant exchange. In: *Building and Environment* 14 (1979), Nr. 1, S. 43–46. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(79\)90027-1](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(79)90027-1)

Davies 1982

DAVIES, M. G.: Transmission and storage characteristics of walls experiencing sinusoidal excitation. In: *Applied Energy* 12 (1982), Nr. 4, S. 269–316. [http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619\(82\)90066-6](http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619(82)90066-6)

Davies 1983a

DAVIES, M. G.: Optimal designs for star circuits for radiant exchange in a room. In: *Building and Environment* 18 (1983), Nr. 3, S. 135–150. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(83\)90006-9](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(83)90006-9)

Davies 1983b

DAVIES, M. G.: Optimum Design of Resistance and Capacitance Elements in Modelling a Sinusoidally Excited Building Wall. In: *Building and Environment* 18 (1983), Nr. 1/2, S. 19–37

Davies 1990

DAVIES, M. G.: An Idealised Model for Room Radiant Exchange. In: *Building and Environment* 25 (1990), Nr. 4, S. 375–378. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90011-F](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(90)90011-F)

Davies 1993

DAVIES, M. G.: Definitions of Room Temperature. In: *Building and Environment* 28 (1993), Nr. 4, S. 383–398. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90015-U](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(93)90015-U)

Davies 1994

DAVIES, M. G.: The Thermal Response of an Enclosure to Periodic Excitation: The CIBSE Approach. In: *Building and Environment* 29 (1994), Nr. 2, S. 217–235

Davies u. Message 1992

DAVIES, M. G. ; MESSAGE, P. J.: The Relation Between the Radiant Star Temperature in an Enclosure and the Mean Observable Temperature. In: *Building and Environment* 27 (1992), Nr. 1, S. 85–92. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90012-E](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(92)90012-E)

Davies 2004

DAVIES, Morris G.: *Building Heat Transfer*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978-0-470-84731-2

Deutsche Energie-Agentur GmbH 2015

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH (Hrsg.): *Der dena-Gebäudereport 2015: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin, 2015

Dewson u. a. 1993

DEWSON, T. ; DAY, B. ; IRVING, A. D.: Least squares parameter estimation of a reduced order thermal model of an experimental building. In: *Building and Environment* 28 (1993), Nr. 2, S. 127–137

DiLaura 2011

DILAURA, David: *The lighting handbook: Reference and application*. 10. ed. New York, NY : Illuminating Engineering Society of North America, 2011. – ISBN 978-0-87995-241-9

DIN 277-1 2016

Norm DIN 277-1 Januar 2016. *Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen - Teil 1: Hochbau*

DIN 277-2 2005

Norm DIN 277-2 Februar 2005. *Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau - Teil 2: Gliederung der Netto-Grundfläche (Nutzflächen, Technische Funktionsflächen und Verkehrsflächen)*

DIN 277-3 2005

Norm DIN 277-3 April 2005. *Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau - Teil 3: Mengen und Bezugseinheiten*

DIN 4108-4 2013

Norm DIN 4108-4 Februar 2013. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*

DIN EN 12524 2000

Norm DIN EN 12524 Juli 2000. *Baustoffe und -produkte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte*

DIN EN 15242 2007

Norm DIN EN 15242 September 2007. *Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration*

DIN EN ISO 13786 2008

Norm DIN EN ISO 13786 April 2008. *Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods*

DIN EN ISO 13790 2008

Norm DIN EN ISO 13790 September 2008. *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*

DIN EN ISO 52016-1 2015

Norm DIN EN ISO 52016-1 März 2015. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie der Heiz- und Kühllast in einem Gebäude oder einer Gebäudezone - Teil 1: Berechnungsverfahren*

DIN EN ISO 52017-1 2015

Norm DIN EN ISO 52017-1 März 2015. *Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung der Dynamischen Thermischen Balance in einem Gebäude oder Bauzone - Teil 1: Allgemeines Berechnungsverfahren*

DIN EN ISO 6946 2015

Norm DIN EN ISO 6946 Juni 2015. *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*

DIN V 18599-1 2016

Vornorm DIN V 18599-1 Oktober 2016. *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*

DIN V 18599-10 2016

Vornorm DIN V 18599-10 Oktober 2016. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*

DIN V 18599-2 2011

Vornorm DIN V 18599-2 Dezember 2011. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*

DIN V 18599-3 2016

Vornorm DIN V 18599-3 Oktober 2016. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung*

Duanmu u. a. 2013

DUANMU, Lin ; WANG, Zhenjiang ; ZHAI, Zhiqiang J. ; LI, Xiangli: A simplified method to predict hourly building cooling load for urban energy planning. In: *Energy and Buildings* 58 (2013), S. 281–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.029>

Eicker u. a. 2015

EICKER, Ursula ; SCHUMACHER, Jürgen ; ZIRAK, Maryam ; BARTKE, Nora ; NOUVEL, Romain ; COORS, Volker: An Automated Method for Urban Energy Simulation based on 3D City Models. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 2477–2482

Fonseca u. a. 2016

FONSECA, Jimeno A. ; NGUYEN, Thuy-An ; SCHLUETER, Arno ; MARECHAL, Francois: City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. In: *Energy and Buildings* 113 (2016), S. 202–226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>

Fonseca u. Schlueter 2015

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>

Fraisse u. a. 2002

FRAISSE, Gilles ; VIARDOT, Christelle ; LAFABRIE, Olivier ; ACHARD, Gilbert: Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. In: *Energy and Buildings* 34 (2002), Nr. 10, S. 1017–1031. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00019-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00019-1)

Ghiassi u. a. 2015

GHIASSI, Neda ; HAMMERBERG, Kristopher ; TAHERI, Mahnameh ; PONT, Ulrich ; SUNANTA, Owat ; MAHDAVI, Ardeshtir: An Enhanced Sampling-Based Approach to Urban Energy Modeling. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 626–632

Göbel 2015

GÖBEL, Christoph: *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gebäude- und netzseitiger Energieeinsparmaßnahmen für die Wärmeversorgung des Forschungszentrums Jülich*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2015

Gouda u. a. 2000

GOUDA, M. M. ; DANAHER, S. ; UNDERWOOD, C. P.: Low-order model for the simulation of a building and its heating system. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 21 (2000), Nr. 3, S. 199–208

Gouda u. a. 2002

GOUDA, M. M. ; DANAHER, S. ; UNDERWOOD, C. P.: Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. In: *Building and Environment* 37 (2002), Nr. 12, S. 1255–1265. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00121-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00121-4)

Goyal u. Barooah 2012

GOYAL, Siddharth ; BAROOAH, Prabir: A method for model-reduction of non-linear thermal dynamics of multi-zone buildings. In: *Energy and Buildings* 47 (2012), S. 332–340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.005>

Hegger u. Dettmar 2014

HEGGER, Manfred (Hrsg.) ; DETTMAR, Jörg (Hrsg.): *Energetische Stadtraumtypen: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2014. – ISBN 978-3816792925

Heidarinejad u. a. 2015

HEIDARINEJAD, Mohammad ; MATTISE, Nicholas W. ; DAHLHAUSEN, Matthew ; NIKKHO, Saber K. ; LIU, Jiying ; GRACIK, Stefan ; LIU, Kai ; SHARMA, Krishang ; ZHANG, Haoyue ; WENTZ, Joshua R. ; ROUDSARI, Mostapha S. ; PITCHUROV, George ; SREBRIC, Jelena: Urban Scale Modeling of Campus Building using Virtual PULSE. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 1861–1868

Heindl 1966

HEINDL, W.: Der Wärmeschutz einer ebenen Wand bei periodischer Belastung. In: *Die Ziegelindustrie* 19, 20 (1966, 1967), Nr. 18,1,18, S. 685–693,2–8,593–599

Henninger u. Witte 2010

HENNINGER, Robert H. ; WITTE, Michael J.: *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*. Arlington Heights, 2010

Hensen u. Lamberts 2011

HENSEN, Jan (Hrsg.) ; LAMBERTS, Roberto (Hrsg.): *Building performance simulation for design and operation*. London and New York, NY : Spon Press, 2011. – ISBN 978-0-415-47414-6

Hillebrand u. a. 2014

HILLEBRAND, G. ; ARENDS, G. ; STREBLOW, R. ; MADLENER, R. ; MÜLLER, D.: Development and design of a retrofit matrix for office buildings. In: *Energy and Buildings* 70 (2014), S. 516–522.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.029>

Hillebrand u. a. 2012

HILLEBRAND, G. ; STREBLOW, Rita ; MÜLLER, Dirk ; ARENDS, G. ; KUMBAROGLU, G. ; MADLENER, R.: Evaluation Tool and Retrofit Matrix for Office Buildings. In: *EON Energy Research Series* 4 (2012), Nr. 4

Hosni u. a. 1999

HOSNI, M. H. ; JONES, B. W. ; XU, H.: Experimental results for heat gain and radiant/convective split from equipment in buildings. In: *ASHRAE Transactions* 105 (1999), Nr. 2, S. 527–539

Huber u. Nytsch-Geusen 2011

HUBER, Jörg ; NYTSCH-GEUSEN, Christoph: Development of Modeling and Simulation Strategies for Large-Scale Urban Districts. In: *Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Sydney, 2011, S. 1753–1760

Inderfurth u. a. 2014

INDERFURTH, A. ; RIBAS TUGORES, C. ; NYTSCH-GEUSEN, C.: Modellierung des Thermischen Energiebedarfs des Universitätscampus Berlin-Charlottenburg. In: *BauSIM 2014: Fifth German-Austrian IBPSA Conference*. Aachen, 2014, S. 271–278

Inderfurth u. a. 2015

INDERFURTH, Alexander ; NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; RIBAS TUGORES, Carles: Parameter Identification for Low-Order Building Models using Optimization Strategies. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 427–433

Jahangiri 2017

JAHANGIRI, Pooyan: *Applications of Paraffin-Water Dispersions in Energy Distribution Systems*. Aachen, RWTH Aachen University, Diss., 2017

Jensen 1995

JENSEN, S.: Validation of building energy simulation programs: A methodology. In: *Energy and Buildings* 22 (1995), Nr. 2, S. 133–144. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)00910-C](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(94)00910-C)

Jiménez u. a. 2008

JIMÉNEZ, M. J. ; MADSEN, H. ; ANDERSEN, K. K.: Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB. In: *Building and Environment* 43 (2008), Nr. 2, S. 170–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.030>

Jokisalo u. Kurnitski 2007

JOKISALO, Juha ; KURNITSKI, Jarek: Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 2, S. 236–247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.007>

Jorissen u. a. 2015

JORISSEN, Filip ; WETTER, Michael ; HELSEN, Lieve: Simulation Speed Analysis and Improvements of Modelica Models for Building Energy Simulation. In: *The 11th International Modelica Conference*. Versailles : Linköping University Electronic Press, 2015 (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 59–69

Kaag u. a. 2008

KAAG, W. ; UMMENHÖFER, T. ; FISCH, M. N. ; PROSAB (Hrsg.): *Forschungsprojekt "energieeffiziente Sanierung von Bürogebäuden der 50er bis 70er Jahre - Erarbeitung einer Planungshilfe"*. Braunschweig, 2008

Kämpf u. Robinson 2007

KÄMPF, Jérôme Henri ; ROBINSON, Darren: A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 4, S. 445–453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.002>

Kaul u. a. 2014

KAUL, W. ; NYTSCH-GEUSEN, C. ; WEHAGE, P. ; FÄRBER, M.: Teilautomatisierte Akquise Energetischer Gebäudedaten für die Quartiersanalyse und -Simulation durch den Einsatz von Geo-Informationen-Systemen (GIS). In: *BauSIM 2014: Fifth German-Austrian IBPSA Conference*. Aachen, 2014, S. 547–554

Kavgic u. a. 2010

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>

Keirstead u. a. 2012

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>

Kim u. a. 2014

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.066>

Kim u. a. 2013

KIM, Eui-Jong ; PLESSIS, Gilles ; ROUX, Jean-Jacques ; HUBER, Jean-Luc: Reduction of Building Models for Use in Urban Energy Analysis. In: *Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Chambery, 2013, S. 3490–3497

Klein u. a. 1976

KLEIN, Sanford A. ; BECKMANN, W. A. ; DUFFIE, John A.: TRNSYS: A Transient Simulation Program. In: *ASHRAE Transactions* 82 (1976)

Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2015

KLIMARAHMENKONVENTION DER VEREINTEN NATIONEN (Hrsg.): *Übereinkommen von Paris*. Paris, 2015

Kokogiannakis u. a. 2007

KOKOGIANNAKIS, Georgios ; CLARKE, Joe ; 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: *Building Simulation 2007: 10th Conference of International Building Simulation Performance Association*. Beijing, 2007, S. 39–46

Kramer u. a. 2012

KRAMER, Rick ; VAN SCHIJNDEL, Jos ; SCHELLEN, Henk: Simplified thermal and hygric building models: A literature review. In: *Frontiers of Architectural Research* 1 (2012), Nr. 4, S. 318–325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2012.09.001>

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2018

LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Tagesmittelwerte für Karlsruhe / Rhein - Wassertemperatur*. <https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/79491/>. Version: 2018

Lauster u. a. 2014a

LAUSTER, M. ; TEICHMANN, J. ; FUCHS, M. ; STREBLOW, R. ; MUELLER, D.: Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale. In: *Building and Environment* 73 (2014), S. 223–231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.016>

Lauster u. a. 2014b

LAUSTER, Moritz ; BRÜNTJEN, Mark-Alexander ; LEPPMANN, Henning ; FUCHS, Marcus ; TEICHMANN, Jens ; STREBLOW, Rita ; VAN TREECK, Christoph ; MÜLLER, Dirk: Improving a Low Order Building Model for Urban Scale Applications. In: *BauSIM 2014: Fifth German-Austrian IBPSA Conference*. Aachen, 2014, S. 511–518

Lauster u. a. 2013

LAUSTER, Moritz ; CONSTANTIN, Ana ; FUCHS, Marcus ; STREBLOW, Rita ; MÜLLER, Dirk: Comparison of Two Standard Simplified Thermal Building Models. In: *International Conference Future Buildings & Districts*. Lausanne, 2013, S. 885–890

Lauster u. a. 2017

LAUSTER, Moritz ; CONSTANTIN, Ana ; REMMEN, Peter ; FUCHS, Marcus ; MÜLLER, Dirk: Verification of a Low Order Building Model for the Modelica Library AixLib using ASHRAE Standard 140. In: *Building Simulation 2017: 15th Conference of International Building Performance Simulation Association*. San Francisco, 2017, S. 468–477

Lauster u. a. 2016

LAUSTER, Moritz ; MANS, Michael ; REMMEN, Peter ; FUCHS, Marcus ; MÜLLER, Dirk: Scalable Design-Driven Parameterization of Reduced Order Models using Archetype Buildings with TEASER. In: *BauSIM 2016: Sixth German-Austrian IBPSA Conference*. Dresden, 2016, S. 535–542

Lefebvre 1997

LEFEBVRE, G.: Modal-based simulation of the thermal behavior of a building: The m2m software. In: *Energy and Buildings* 25 (1997), Nr. 1, S. 19–30. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00984-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00984-X)

Lehmann u. a. 2013

LEHMANN, B. ; GYALISTRAS, D. ; GWERDER, M. ; WIRTH, K. ; CARL, S.: Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation. In: *Energy and Buildings* 58 (2013), S. 250–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.007>

Leppmann 2014

LEPPMANN, Henning: *Vergleich von thermisch-energetischen Gebäudemodellen anhand von zwei verschiedenen Gebäudesimulationsprogrammen*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik und Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2014

Li u. a. 2009

LI, Qiong ; MENG, Qinglin ; CAI, Jiejun ; YOSHINO, Hiroshi ; MOCHIDA, Akashi: Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and different artificial

neural networks. In: *Energy Conversion and Management* 50 (2009), Nr. 1, S. 90–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.033>

Lichtmeß 2010

LICHTMESS, Markus: *Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden*. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Diss., 2010

Liebchen u. a. 2007

LIEBCHEN, Jens H. (Hrsg.) ; VIERING, Markus G. (Hrsg.) ; ZANNER, Christian (Hrsg.): *Bau-management und Bauökonomie: Aktuelle Entwicklungen*. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007 (Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9091-7>. – ISBN 978–3–8351–0152–4

Lindeburg 2013

LINDEBURG, Michael R.: *Mechanical Engineering Reference Manual for the PE Exam*. Thirteenth edition. Belmont, CA : Professional Publications, 2013. – ISBN 9781591264149

Loga u. a. 2005

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: Kurverfahren Energieprofil*. 1. Darmstadt, 2005. ISBN 3932074769

Loga u. a. 2015

LOGA, Tobias ; STEIN, Britta ; DIEFENBACH, Nikolaus ; BORN, Rolf: *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. neue Ausg. Darmstadt : Wohnen und Umwelt, 2015. – ISBN 978–3–941140–47–9

Lorenz u. Masy 1982

LORENZ, F. ; MASY, G.: *Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittance de chauffage dans le bâtiments. Traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps*. Liege, 1982

Mans 2015

MANS, Michael: *Energetischer und wirtschaftlicher Vergleich von Zukunftsszenarien im Gebäudebestand und Wärmenetz des Campus Melaten*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2015

Mata u. a. 2014

MATA, É. ; SASIC KALAGASIDIS, A. ; JOHNSON, F.: Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. In: *Building and Environment* 81 (2014), S. 270–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013>

Mata u. a. 2013

MATA, Érika ; KALAGASIDIS, Angela S. ; JOHNSON, Filip: A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks. In: *Energy and Buildings* 56 (2013), S. 100–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.037>

Mathews u. a. 1994

MATHEWS, E. H. ; RICHARDS, P. G. ; LOMBARD, C.: A first-order thermal model for building design. In: *Energy and Buildings* 21 (1994), Nr. 2, S. 133–145. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)90006-X](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(94)90006-X)

Mehrfeld 2014

MEHRFELD, Philipp: *Experimentelle Untersuchung von Lüftungstechnik in Laboren*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2014

Mehrfeld u. a. 2016

MEHRFELD, Philipp ; LAUSTER, Moritz ; HUCHTEMANN, Kristian ; MÜLLER, Dirk: Multi-Mode Model of an Air Handling Unit for Thermal Demand Calculations in Modelica. In: *BSO 2016: Third IBPSA - England Conference*. Newcastle, 2016, S. 219–226

Milbank u. Harrington-Lynn 1974

MILBANK, N. O. ; HARRINGTON-LYNN, J.: Thermal response and the admittance procedure. In: *The Building Services Engineer* (1974), Nr. 42, S. 38–54

Mitalas u. Stephenson 1967

MITALAS, G. P. ; STEPHENSON, D. G.: *Room thermal response factors*. Ottawa : Division of Building Research, National Research Council, 1967

Monsalvete u. a. 2015

MONSALVETE, Pilar ; ROBINSON, Darren ; EICKER, Ursula: Dynamic Simulation Methodologies for Urban Energy Demand. In: *Energy Procedia* 78 (2015), S. 3360–3365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.751>

Müller u. a. 2015a

MÜLLER, Dirk ; FUCHS, Marcus ; LAUSTER, Moritz ; TEICHMANN, Jens: *EnEff:Campus - Entwicklung eines integralen Planungshilfsmittels: Abschlussbericht*. Aachen, 2015. (FKZ.03ET1004A)

Müller u. a. 2016

MÜLLER, Dirk ; LAUSTER, Moritz ; CONSTANTIN, Ana ; FUCHS, Marcus ; REMMEN, Peter: AixLib - An Open-Source Library within the IEA-EBC Annex60 Framework. In: *BauSIM 2016: Sixth German-Austrian IBPSA Conference*. Dresden, 2016, S. 3–9

Müller u. a. 2015b

MÜLLER, Dirk ; MONTI, Antonello ; STINNER, Sebastian ; SCHLÖSSER, Tim ; SCHÜTZ, Thomas

; MATTHES, Peter ; WOLISZ, Henryk ; MOLITOR, Christoph ; HARB, Hassan ; STREBLOW, Rita: Demand side management for city districts. In: *Building and Environment* 91 (2015), S. 283–293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.026>

Nehring 1962

NEHRING, Gerhard: Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer in klimatisierte Räume infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente. In: *Gesundheits-Ingenieur* 83 (1962), Nr. 7,8,9, S. 185–189,230–242,253–284

Nielsen 2005

NIELSEN, Toke R.: Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. In: *Solar Energy* 78 (2005), Nr. 1, S. 73–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.016>

Nouidui u. a. 2012

NOUIDUI, Thierry S. ; PHALAK, Kaustubh ; ZUO, Wangda ; WETTER, Michael: Validation and Application of the Room Model of the Modelica Buildings Library. In: *The 9th International Modelica Conference*. München : Linköping University Electronic Press, 2012 (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 727–736

Nytsch-Geusen u. a. 2014

NYTSCH-GEUSEN, C. ; MUCHA, K. ; Inderfurth, A. ; RÄDLER, J.: Entwicklung eines räumlich und physikalisch adaptiven energetischen Gebäudemodells in Modelica. In: *BauSIM 2014: Fifth German-Austrian IBPSA Conference*. Aachen, 2014, S. 218–225

Nytsch-Geusen u. a. 2012

NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; HUBER, Jörg ; LJUBIJANKIC, Manuel ; RÄDLER, Jörg: Modelica BuildingSystems - Eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. In: *BauSIM 2012: Fourth German-Austrian IBPSA Conference*. Berlin, 2012, S. 271–278

Nytsch-Geusen u. a. 2013

NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; HUBER, Jörg ; LJUBIJANKIC, Manuel ; RÄDLER, Jörg: Modelica BuildingSystems – eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. In: *Bauphysik* 35 (2013), Nr. 1, S. 21–29. <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201310045>

Nytsch-Geusen u. Kaul 2015

NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; KAUL, Werner: Generation of Dynamic Energetic District Models from Statistical Relationships. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 324–330

Parekh 2007

PAREKH, Anil: Development of Archetypes of Building Characteristics Libraries for Simplified Energy Use Evaluation of Houses. In: *Building Simulation 2007: 10th Conference of International Building Simulation Performance Association*. Beijing, 2007, S. 921–928

Perez u. a. 2015

PEREZ, Nicolas ; RIEDERER, Peter ; INARD, Christian ; PARTENAY, Vincent: Thermal Building Modelling Adapted to District Energy Simulation. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 270–277

Perez u. a. 1990

PEREZ, Richard ; INEICHEN, Pierre ; SEALS, Robert ; MICHALSKY, Joseph ; STEWART, Ronald: Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. In: *Solar Energy* 44 (1990), Nr. 5, S. 271–289. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)

Picard u. a. 2015

PICARD, Damien ; JORISSEN, Filip ; HELSEN, Lieve: Methodology for Obtaining Linear State Space Building Energy Simulation Models. In: *The 11th International Modelica Conference*. Versailles : Linköping University Electronic Press, 2015 (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 51–58

Pipes 1940

PIPES, Louis A.: The matrix theory of four-terminal networks. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Series 7* 30 (1940), Nr. 202, S. 370–395. <http://dx.doi.org/10.1080/14786444008520727>

Ramallo-González u. a. 2013

RAMALLO-GONZÁLEZ, Alfonso P. ; EAMES, Matthew E. ; COLEY, David A.: Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions. In: *Energy and Buildings* 60 (2013), S. 174–184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.014>

Reinhart u. Cerezo Davila 2016

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>

Reinhart u. a. 2013

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:

Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambery, 2013, S. 476–483

Remmen 2014

REMMEN, Peter: *Validierung eines vereinfachten Gebäudemodells*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2014

Remmen u. a. 2017

REMMEN, Peter ; LAUSTER, Moritz ; MANS, Michael ; FUCHS, Marcus ; OSTERHAGE, Tanja ; MÜLLER, Dirk: TEASER: An open tool for urban energy modelling of building stocks. In: *Journal of Building Performance Simulation* (2017), S. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>

Reynders u. a. 2014

REYNDERS, G. ; DIRIKEN, J. ; SAELENS, D.: Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals. In: *Energy and Buildings* 82 (2014), S. 263–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.025>

Riederer u. a. 2015

RIEDERER, Peter ; PARTENAY, Vincent ; PEREZ, Nicolas ; NOCITO, Christophe ; TRIGANCE, Romain ; GUIOT, Thierry: Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 2499–2506

Robinson u. a. 2007

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.002>

Robinson 2011

ROBINSON, Darren (Hrsg.): *Computer modelling for sustainable urban design: Physical principles, methods and applications*. 1. publ. London u.a.: Earthscan, 2011. – ISBN 978–1–8440–7679–6

Roland Berger GmbH 2017

ROLAND BERGER GMBH (Hrsg.): *Wärmewende in Sicht*. München, 2017 (Roland Berger Focus)

Rouvel 1972

ROUVEL, Lothar: Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft* 24 (1972), Nr. 6, S. 245–262

Rouvel 2010

ROUVEL, Lothar: *Thermische Gebäudesimulation GEBSIMU: Berechnungsverfahren zum instationären thermischen Gebäudeverhalten*. München, 2010

Rouvel u. Zimmermann 1997

ROUVEL, Lothar ; ZIMMERMANN, Frank: Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens. In: *HLH Lüftung/Klima - Heizung/Sanitär - Gebäudetechnik* 48,49 (1997, 1998), Nr. 10, 12, 1, S. 66–75, 24–31, 18–29

Rouvel u. Zimmermann 2004

ROUVEL, Lothar ; ZIMMERMANN, Frank: Berechnung des instationären thermischen Gebäudeverhaltens Teil 1. In: *HLH Lüftung/Klima - Heizung/Sanitär - Gebäudetechnik* (2004), Nr. 3, S. 39–46

Saberi Derakhtenjani u. a. 2015

SABERI DERAKHTENJANI, Ali ; CANDANEDO, José A. ; CHEN, Yuxiang ; DEHKORDI, Vahid R. ; ATHIENITIS, Andreas K.: Modeling approaches for the characterization of building thermal dynamics and model-based control: A case study. In: *Science and Technology for the Built Environment* 21 (2015), Nr. 6, S. 824–836. <http://dx.doi.org/10.1080/23744731.2015.1057060>

Sahlin u. Grozman 2003

SAHLIN, Per ; GROZMAN, Pavel: IDA Simulation Environment - A Tool for Modelica Based End-User Application Deployment. In: *The 3rd International Modelica Conference*. Linköping : Linköping University Electronic Press, 2003 (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 105–114

Schiefelbein u. a. 2017

SCHIEFELBEIN, Jan ; JAVADI, Amir ; FUCHS, Marcus ; MÜLLER, Dirk ; MONTI, Antonello ; DIEKERHOF, Michael: Modellierung und Optimierung von Mischgebieten. In: *Bauphysik* 39 (2017), Nr. 1, S. 23–32. <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201710001>

Schlittgen 2012

SCHLITTGEN, Rainer: *Angewandte Zeitreihenanalyse mit R*. s.l. : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012 (Lehr- und Handbücher der Statistik). <http://lib.mylibrary.com/detail.asp?id=609155>. – ISBN 978–3–486–71214–8

Schlosser 2012

SCHLOSSER, Stefan: *Einfluss der Zonierung auf die dynamische Simulation von Büro- und Laborgebäuden*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2012

Schoch 2013

SCHOCH, Torsten: *EnEV 2012 und DIN V 18599: Nichtwohnbau Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele*. 3., Aufl. Berlin : Beuth, 2013 (Bauwerk). – ISBN 3410221840

Schramek u. a. 2009

SCHRAHEK, Ernst-Rudolf (Hrsg.) ; RECKNAGEL, Hermann (Hrsg.) ; SPRENGER, Hermann (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [09/10]: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. 74. Aufl. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2009. – ISBN 978–3–8356–3134–2

Schultz u. Svendsen 1998

SCHULTZ, Jørgen M. ; SVENDSEN, Svend: Winsim: a simple simulation program for evaluating the influence of windows on heating demand and risk of overheating. In: *Solar Energy* 63 (1998), Nr. 4, S. 251–258

SIA 2024 2006

Merkblatt SIA 2024 März 2006. *Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik*

Statistikstelle der Bundesstadt Bonn 2017

STATISTIKSTELLE DER BUNDESSTADT BONN: *Bevölkerung in der Stadt Bonn*. <http://www2.bonn.de/statistik/default.asp?2.1>. Version: 2017

Steiner 2014

STEINER, Simon: *Zeitreihenanalyse des Wärmeverbrauchs von Stadtquartieren*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2014

Stinner u. a. 2017

STINNER, Sebastian ; SCHLÖSSER, Tim ; HUCHTEMANN, Kristian ; MÜLLER, Dirk ; MONTI, Antonello: Primary energy evaluation of heat pumps considering dynamic boundary conditions in the energy system. In: *Energy* 138 (2017), S. 60–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.029>

Swan u. a. 2008

SWAN, L. ; UGURSAL, V. I. ; BEAUSOLEIL-MORRISON, I.: A New Hybrid End-Use Energy and Emissions Model of the Canadian Housing Stock. In: *COBEE Conference*. Dalian, 2008

Swan u. Ugursal 2009

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>

Tardioli u. a. 2015

TARDIOLI, Giovanni ; KERRIGAN, Ruth ; OATES, Mike ; O'DONNELL, James ; FINN, Donal: Data

Driven Approaches for Prediction of Building Energy Consumption at Urban Level. In: *Energy Procedia* 78 (2015), S. 3378–3383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.754>

The World Bank 2017

THE WORLD BANK: *Urban population (% of total)*. <http://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>. Version: 2017

Tindale 1993

TINDALE, A.: Third-order lumped-parameter simulation method. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 14 (1993), Nr. 3, S. 87–97

Underwood 2014

UNDERWOOD, C. P.: An improved lumped parameter method for building thermal modelling. In: *Energy and Buildings* 79 (2014), S. 191–201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.001>

Unger 2015

UNGER, Christian: *Simulation und Analyse von thermischen Kurzzeiteffekten auf Stadtteilebene*. Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2015

van Dijk u. a. 2016

VAN DIJK, Dick ; SPIEKMAN, Marleen ; VAN OEFFELEN, Linda H.: EPB standard EN ISO 52016: Calculation of the building's energy needs for heating and cooling, internal temperatures and heating and cooling load. In: *REHVA Journal* 2016 (2016), Nr. 3, S. 18–22

van Dijk u. a. 2015

VAN DIJK, Dick ; SPIEKMAN, Marleen ; VAN ORSHOVEN, Dirk ; PLOKKER, Wim: Subset of EPB standards on the energy use and the thermal performance of buildings and building elements. In: *REHVA Journal* 2015 (2015), Nr. 1, S. 6–16

VDI 2078 2015

Richtlinie VDI 2078 Juni 2015. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*

VDI 6007-1 2015

Richtlinie VDI 6007-1 Juni 2015. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell*

VDI 6007-2 2012

Richtlinie VDI 6007-2 März 2012. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Fenstermodell*

VDI 6007-3 2015

Richtlinie VDI 6007-3 Juni 2015. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung*

VDI 6020-1 2001

Richtlinie VDI 6020-1 Mai 2001. *Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation*

Volland u. Volland 2014

VOLLAND, Karlheinz ; VOLLAND, Johannes: *Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2014*. 4. Auflage. Köln : Müller, 2014. – ISBN 978-3-481-03156-5

Weber u. Jóhannesson 2005

WEBER, T. ; JÓHANNESSON, G.: An optimized RC-network for thermally activated building components. In: *Building and Environment* 40 (2005), Nr. 1, S. 1–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.012>

Wetter 2004

WETTER, Michael: *Simulation-Based Building Energy Optimization*. Berkeley, University of California, Diss., 2004

Wetter 2009

WETTER, Michael: Modelica-based modelling and simulation to support research and development in building energy and control systems. In: *Journal of Building Performance Simulation* 2 (2009), Nr. 2, S. 143–161. <http://dx.doi.org/10.1080/19401490902818259>

Wetter u. a. 2016

WETTER, Michael ; BONVINI, Marco ; NOUIDUI, Thierry S.: Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization. In: *Energy and Buildings* 117 (2016), S. 290–300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.017>

Wetter u. a. 2015

WETTER, Michael ; FUCHS, Marcus ; GROZMAN, Pavel ; HELSEN, Lieve ; JORISSEN, Filip ; LAUSTER, Moritz ; MÜLLER, Dirk ; NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; PICARD, Damien ; SAHLIN, Per ; THORADE, Matthias: IEA EBC Annex 60 Modelica Library - An International Collaboration to Develop a Free Open-Source Modelica Library for Buildings and Community Energy Systems. In: *Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, 2015, S. 395–402

Wetter u. van Treeck 2017

WETTER, Michael ; VAN TREECK, Christoph: *IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems*. 2017 <http://www.iea-annex60.org/pubs.html>. – ISBN 978-0-692-89748-5

Wolf u. a. 2014

WOLF, S. ; FAHL, U. ; BLES, M. ; VOSS, A. ; JAKOBS, R.: *Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland: Endbericht*. Stuttgart, 2014. (FKZ 0327514A)

Xu u. Wang 2007

XU, Xinhua ; WANG, Shengwei: Optimal simplified thermal models of building envelope based on frequency domain regression using genetic algorithm. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 5, S. 525–536. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.010>

Zürcher u. Frank 1998

ZÜRCHER, Christoph ; FRANK, Thomas: *Bau und Energie, Leitfaden für Planung und Praxis*. Bd. 2: *Bauphysik: Leitfaden für Planung und Praxis*. Wiesbaden and s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 1998 <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-92789-7>. – ISBN 332292789X

Anhang

A Herleitung der Parameterberechnung

Die einzelnen Einträge in (2.13) ergeben sich nach Rouvel (1972) zu

$$Re\ a_{11} = Re\ a_{22} = \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \quad (\text{A.1})$$

$$Im\ a_{11} = Im\ a_{22} = \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$Re\ a_{12} = R \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}} \left(\cosh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) + \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \right) \quad (\text{A.3})$$

$$Im\ a_{12} = R \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}} \left(\cosh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) - \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \right) \quad (\text{A.4})$$

$$Re\ a_{21} = -\frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \left(\cosh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) - \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \right) \quad (\text{A.5})$$

$$Im\ a_{21} = -\frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C} \left(\cosh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) + \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{Anr}} \cdot R \cdot C}\right) \right) \quad (\text{A.6})$$

Diese lassen sich über einen Abgleich mit der Übertragungsmatrix einer zweifachen T-Schaltung nach Rouvel (1972) und Rouvel u. Zimmermann (2004) wie in (3.2) gegeben zur Berechnung der Widerstände und Kapazitäten der T-Schaltung nutzen. Die entsprechenden Rechenvorschriften ergeben sich zu

$$R_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{(Re\ a_{22} - 1) \cdot Re\ a_{12} + Im\ a_{22} \cdot Im\ a_{12}}{(Re\ a_{22} - 1)^2 + Im\ a_{22}^2} \quad (A.7)$$

$$R_2 = \frac{1}{A} \cdot \frac{(Re\ a_{11} - 1) \cdot Re\ a_{12} + Im\ a_{11} \cdot Im\ a_{12}}{(Re\ a_{11} - 1)^2 + Im\ a_{11}^2} \quad (A.8)$$

$$C_1 = A \cdot \frac{(Re\ a_{22} - 1)^2 + Im\ a_{22}^2}{\omega \cdot (Re\ a_{12} \cdot Im\ a_{22} - (Re\ a_{22} - 1) \cdot Im\ a_{12})} \quad (A.9)$$

$$C_2 = A \cdot \frac{(Re\ a_{11} - 1)^2 + Im\ a_{11}^2}{\omega \cdot (Re\ a_{12} \cdot Im\ a_{11} - (Re\ a_{11} - 1) \cdot Im\ a_{12})}. \quad (A.10)$$

Die berechneten Parameter gelten pro Wand ($a, b, c, \dots$) und lassen sich zu Ersatzelementen für mehrere Wände durch eine Parallelschaltung der Wände nach

$$R_{\text{komb}} = \frac{R_a \cdot C_a^2 + R_b \cdot C_b^2 + \omega^2 \cdot R_a \cdot R_b \cdot (R_a + R_b) \cdot C_a^2 \cdot C_b^2}{(C_a + C_b)^2 + \omega^2 \cdot (R_a + R_b)^2 \cdot C_a^2 \cdot C_b^2} \quad (A.11)$$

$$C_{\text{komb}} = \frac{(C_a + C_b)^2 + \omega^2 \cdot (R_a + R_b)^2 \cdot C_a^2 \cdot C_b^2}{C_a + C_b + \omega^2 \cdot (R_a^2 \cdot C_a + R_b^2 \cdot C_b) \cdot C_a \cdot C_b} \quad (A.12)$$

zusammenfassen. Dabei werden die komplexen Widerstände verwendet, da eine getrennte Parallelschaltung der Kapazitäten und Widerstände bei stark unterschiedlichen Speichermassen der einzelnen Wände zu Abweichungen führen kann (Rouvel u. Zimmermann 2004).

B Parametrierung

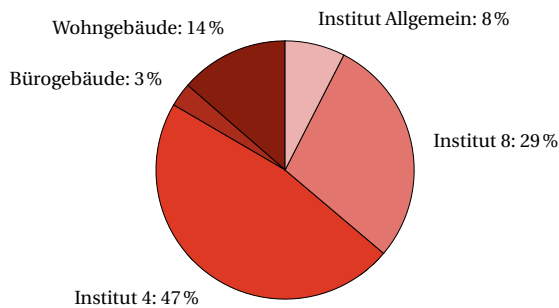


Abbildung B.1: Anteil der einzelnen für die Typologisierung relevanten BWZK-Klassen an der NGF aller relevanten BWZK-Klassen für den Campus Melaten der RWTH Aachen.

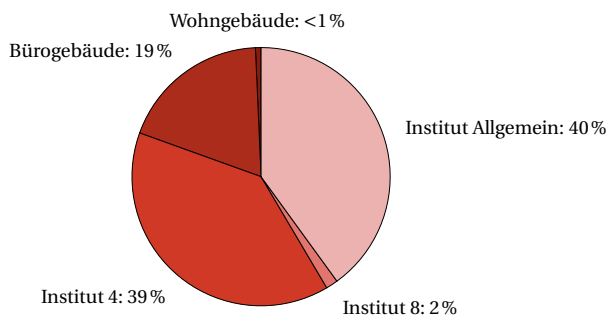


Abbildung B.2: Anteil der einzelnen für die Typologisierung relevanten BWZK-Klassen an der NGF aller relevanten BWZK-Klassen für das Forschungszentrum Jülich.

C Modelltopologien

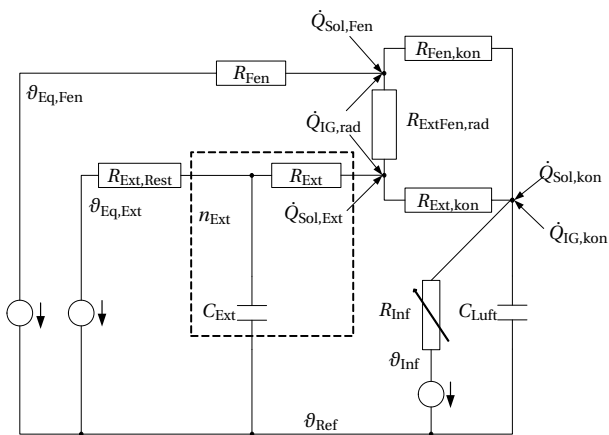


Abbildung C.1: Thermisches Netzwerk des Ein-Element-Modells der AixLib.

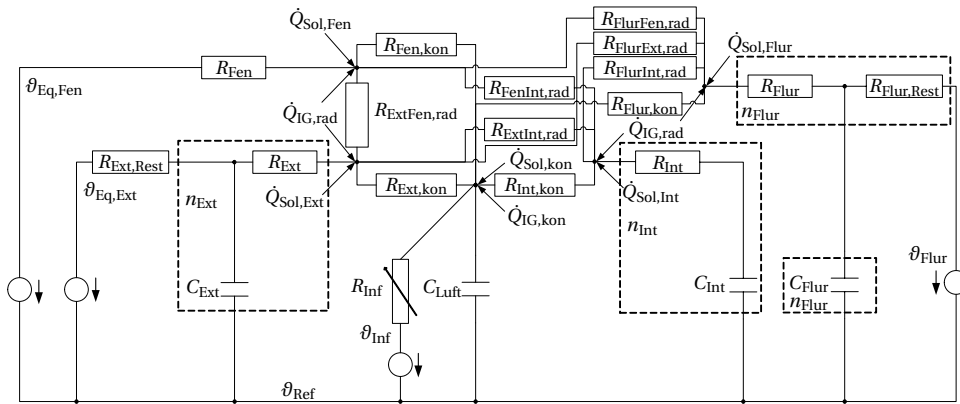


Abbildung C.2: Thermisches Netzwerk des Drei-Elemente-Modells der AixLib.

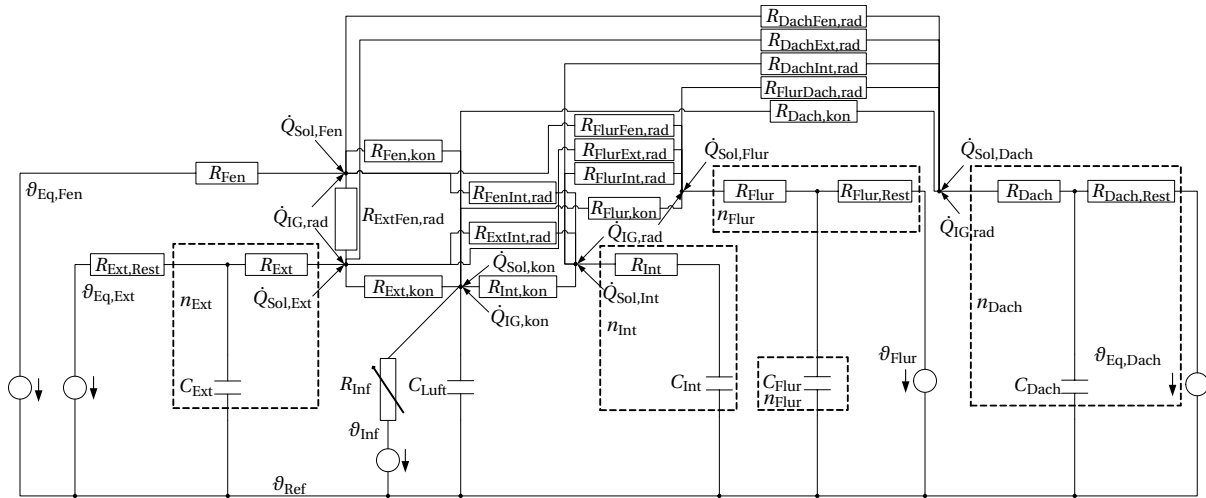


Abbildung C.3: Thermisches Netzwerk des Vier-Elemente-Modells der AixLib.

D Charakterisierung

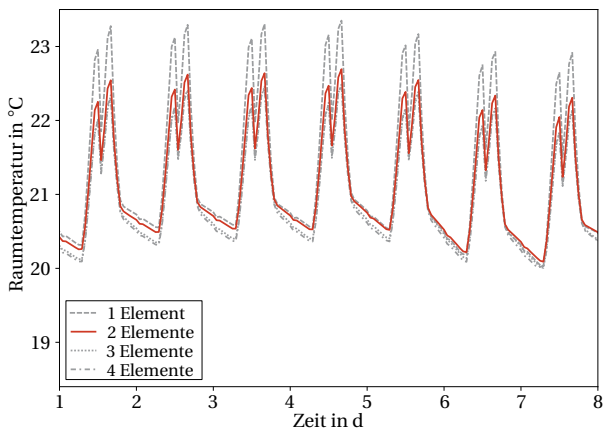


Abbildung D.1: Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen schweren Testraum.

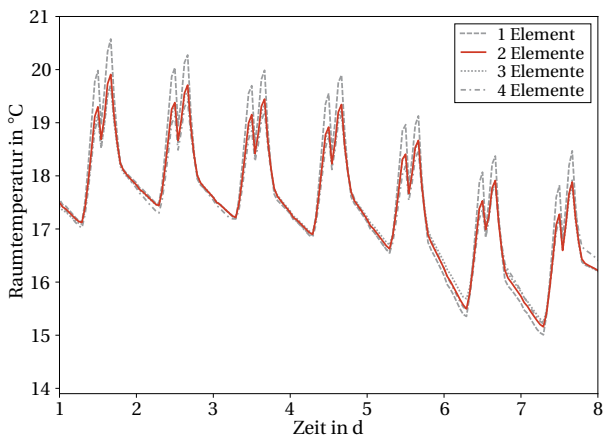


Abbildung D.2: Vergleich der vier Modelle im Zeitbereich für einen leichten Testraum.

E Verifizierung

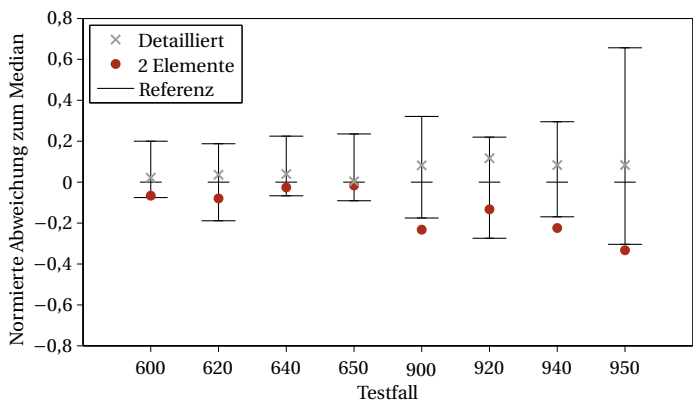


Abbildung E.1: Vergleich des Jahreskältebedarfs des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

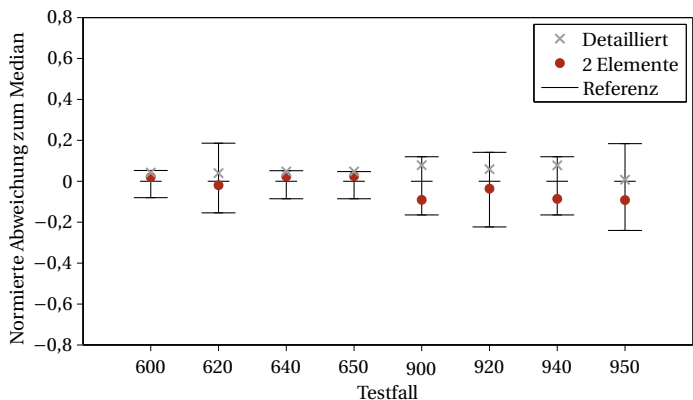


Abbildung E.2: Vergleich der maximalen Kühllasten des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

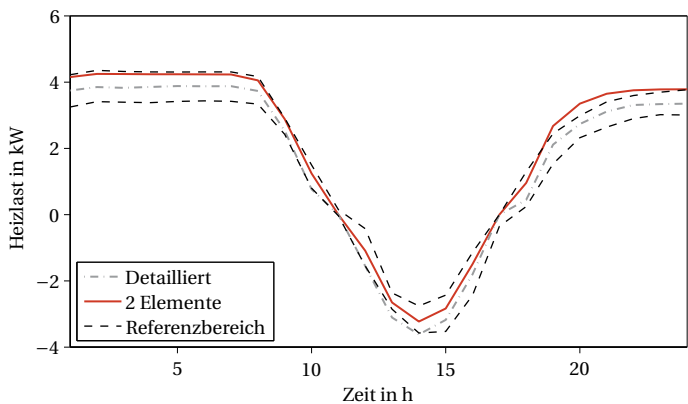


Abbildung E.3: Vergleich der Verläufe der Heizlasten eines Referenztages mit leichtem Testfall des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

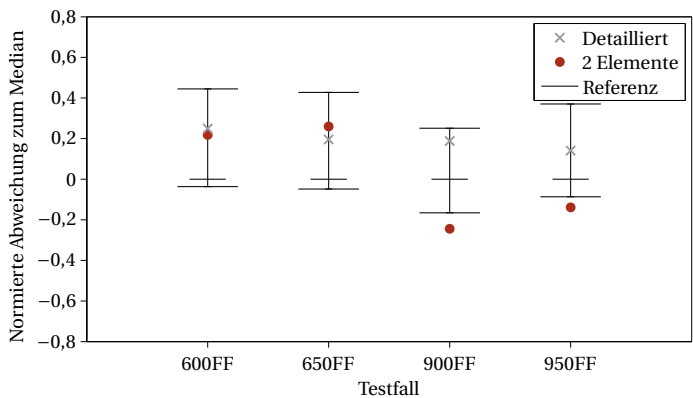


Abbildung E.4: Vergleich der maximalen Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

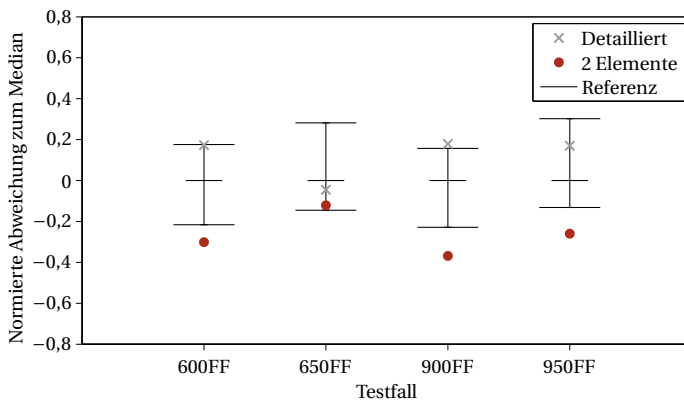


Abbildung E.5: Vergleich der gemittelten Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

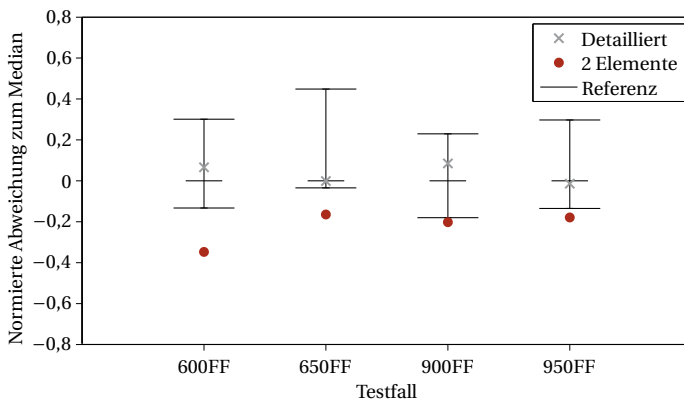


Abbildung E.6: Vergleich der minimalen Raumtemperaturen für frei schwingende Testfälle des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

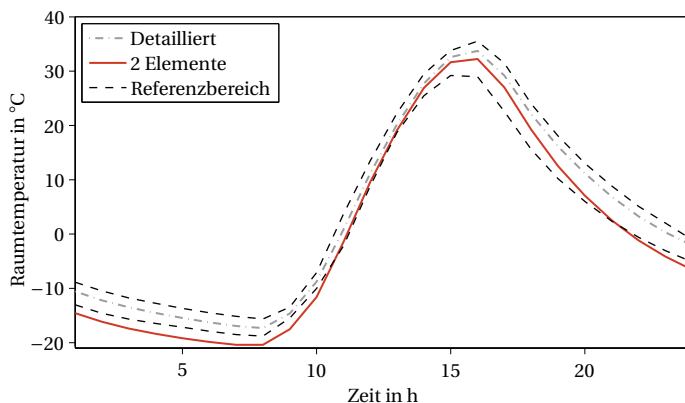


Abbildung E.7: Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit leichtem Testfall 600 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

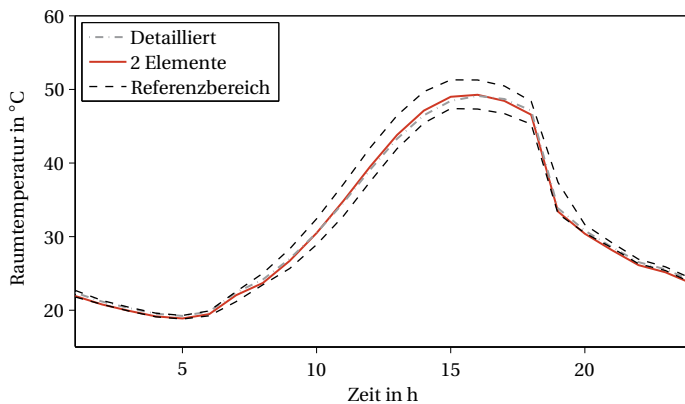


Abbildung E.8: Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit leichtem Testfall 650 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

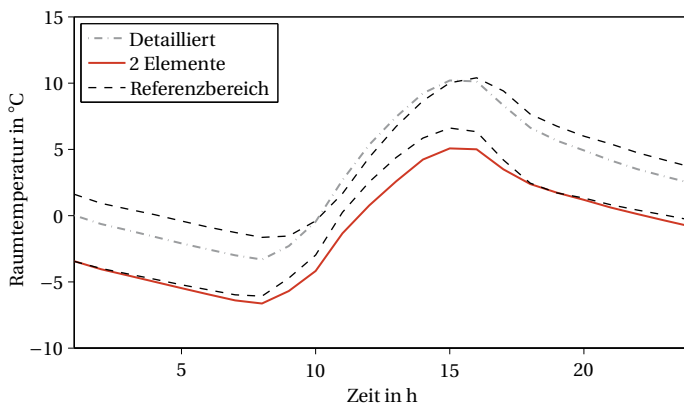


Abbildung E.9: Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit schwerem Testfall 900 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

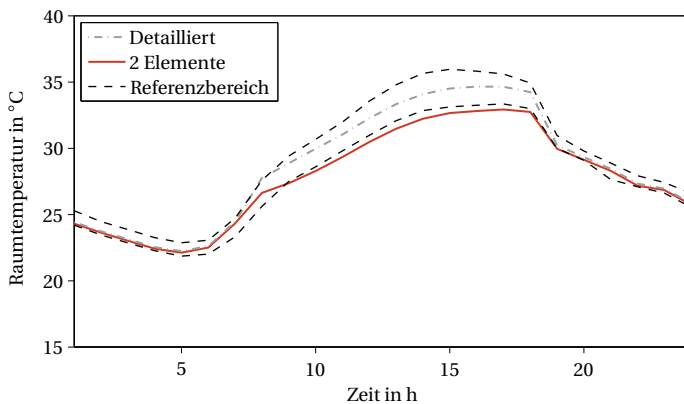


Abbildung E.10: Vergleich der Verläufe der Raumtemperatur eines Referenztages mit schwerem Testfall 950 des Zwei-Elemente-Modells mit den ASHRAE 140 (2007) Referenzwerten und einem detaillierten Gebäudemodell.

F Datenflusskette

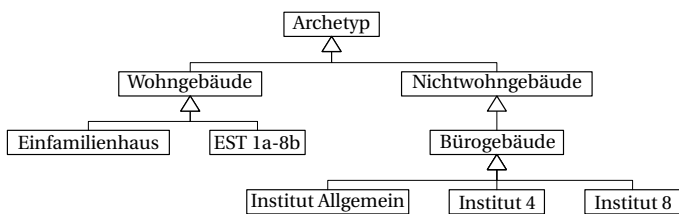


Abbildung F.1: UML Klassendiagramm mit Vererbung der Archetypen im TEASER Modul Datenanreicherung.

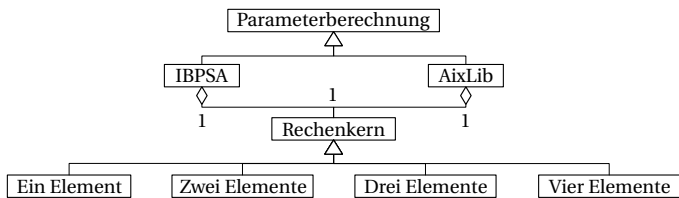


Abbildung F.2: UML Klassendiagramm mit Aggregationen und Vererbung des Moduls Datenverarbeitung in TEASER.

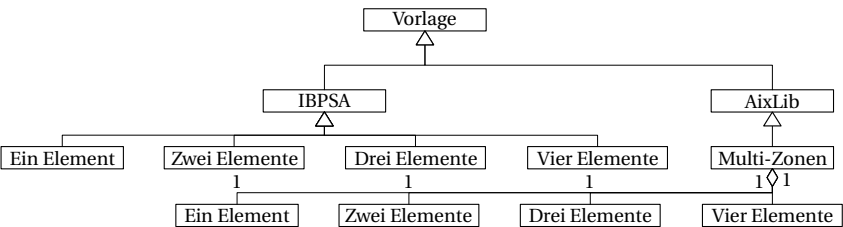


Abbildung F.3: UML Klassendiagramm mit Aggregationen und Vererbung des Moduls Modellerstellung in TEASER.

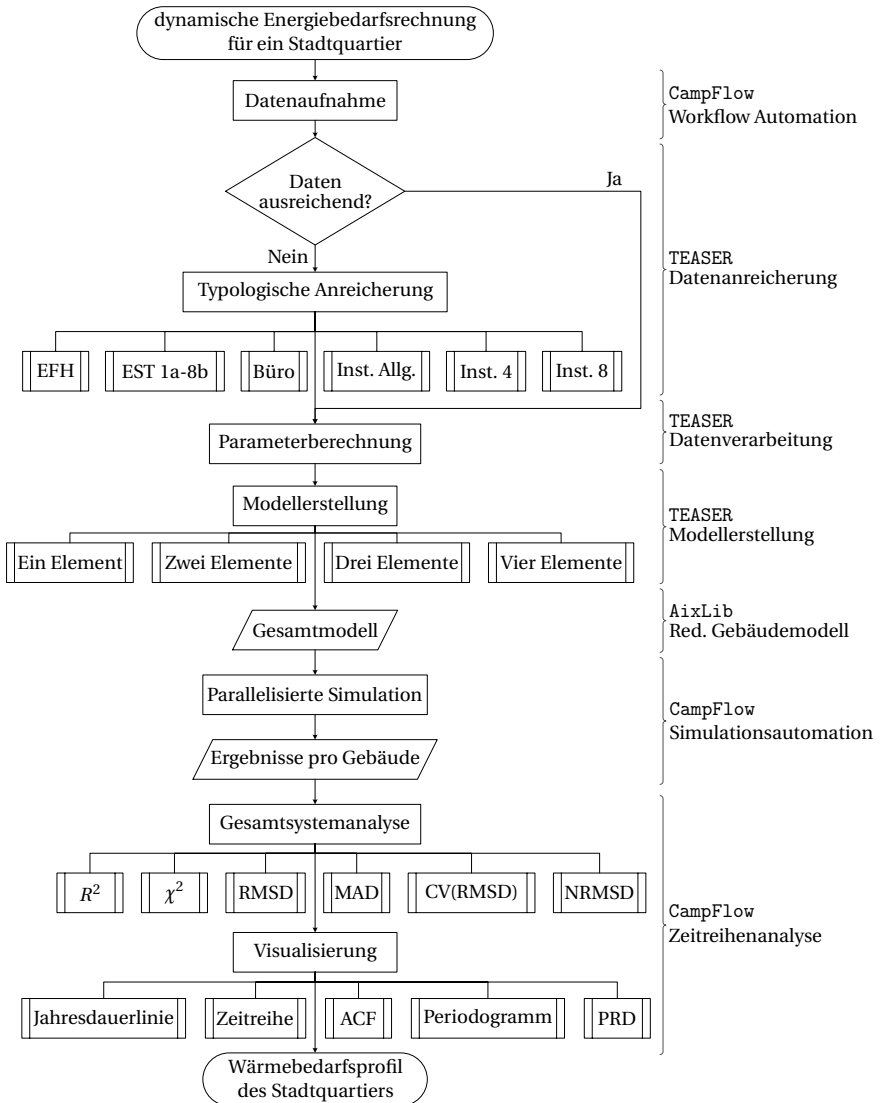


Abbildung E4: Ablaufdiagramm der Prozesskette zur dynamischen Energiebedarfsrechnung von Stadtquartieren.

E.ON ERC Band 1**Streblow, R.**

Thermal Sensation and
Comfort Model for
Inhomogeneous Indoor
Environments
1. Auflage 2011
ISBN 978-3-942789-00-4

E.ON ERC Band 2**Naderi, A.**

Multi-phase, multi-species
reactive transport modeling as
a tool for system analysis in
geological carbon dioxide
storage
1. Auflage 2011
ISBN 978-3-942789-01-1

E.ON ERC Band 3**Westner, G.**

Four Essays related to Energy
Economic Aspects of
Combined Heat and Power
Generation
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-02-8

E.ON ERC Band 4**Lohwasser, R.**

Impact of Carbon Capture and
Storage (CCS) on the European
Electricity Market
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-03-5

E.ON ERC Band 5**Dick, C.**

Multi-Resonant Converters as
Photovoltaic Module-
Integrated Maximum Power
Point Tracker
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-04-2

E.ON ERC Band 6**Lenke, R.**

A Contribution to the Design of
Isolated DC-DC Converters for
Utility Applications
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-05-9

E.ON ERC Band 7**Brännström, F.**

Einsatz hybrider RANS-LES-
Turbulenzmodelle in der
Fahrzeugklimatisierung
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-06-6

E.ON ERC Band 8**Bragard, M.**

The Integrated Emitter Turn-
Off Thyristor - An Innovative
MOS-Gated High-Power
Device
1. Auflage 2012
ISBN 978-3-942789-07-3

E.ON ERC Band 9**Hoh, A.**

Energiebasierte Bewertung
gebäudetechnischer Anlagen
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-08-0

E.ON ERC Band 10**Köllensperger, P.**

The Internally Commutated
Thyristor - Concept, Design
and Application
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-09-7

E.ON ERC Band 11**Achtnicht, M.**

Essays on Consumer Choices
Relevant to Climate Change:
Stated Preference Evidence
from Germany
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-10-3

E.ON ERC Band 12**Panašková, J.**

Olfaktorische Bewertung von
Emissionen aus Bauprodukten
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-11-0

E.ON ERC Band 13**Vogt, C.**

Optimization of Geothermal
Energy Reservoir Modeling
using Advanced Numerical
Tools for Stochastic Parameter
Estimation and Quantifying
Uncertainties
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-12-7

E.ON ERC Band 14**Benigni, A.**

Latency exploitation for
parallelization of
power systems simulation
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-13-4

E.ON ERC Band 15**Butschen, T.**

Dual-ICT – A Clever Way to
Unite Conduction and
Switching Optimized
Properties in a Single Wafer
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-14-1

E.ON ERC Band 16**Li, W.**

Fault Detection and
Protection in Medium
Voltage DC Shipboard
Power Systems
1. Auflage 2013
ISBN 978-3-942789-15-8

E.ON ERC Band 17**Shen, J.**

Modeling Methodologies for
Analysis and Synthesis of
Controls and Modulation
Schemes for High-Power
Converters with Low Pulse
Ratios
1. Auflage 2014
ISBN 978-3-942789-16-5

E.ON ERC Band 18**Flieger, B.**

Innenraummodellierung einer
Fahrzeugkabine
in der Programmiersprache
Modelica

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-17-2

E.ON ERC Band 19**Liu, J.**

Measurement System and
Technique for Future Active
Distribution Grids

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-18-9

E.ON ERC Band 20**Kandzia, C.**

Experimentelle Untersuchung
der Strömungsstrukturen in
einer Mischlüftung

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-19-6

E.ON ERC Band 21**Thomas, S.**

A Medium-Voltage Multi-
Level DC/DC Converter with
High Voltage Transformation
Ratio

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-20-2

E.ON ERC Band 22**Tang, J.**

Probabilistic Analysis and
Stability Assessment for Power
Systems with Integration of
Wind Generation and

Synchrophasor Measurement

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-21-9

E.ON ERC Band 23**Sorda, G.**

The Diffusion of Selected
Renewable Energy
Technologies: Modeling,
Economic Impacts, and Policy
Implications

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-22-6

E.ON ERC Band 24**Rosen, C.**

Design considerations and
functional analysis of local
reserve energy markets for
distributed generation

1. Auflage 2014

ISBN 978-3-942789-23-3

E.ON ERC Band 25**Ni, F.**

Applications of Arbitrary
Polynomial Chaos in Electrical
Systems

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-24-0

E.ON ERC Band 26**Michelsen, C. C.**

The *Energiewende* in the
German Residential Sector:
Empirical Essays on
Homeowners' Choices of
Space Heating Technologies

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-25-7

E.ON ERC Band 27**Rolfs, W.**

Decision-Making under Multi-
Dimensional Price Uncertainty
for Long-Lived Energy
Investments

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-26-4

E.ON ERC Band 28**Wang, J.**

Design of Novel Control
algorithms of Power
Converters for Distributed
Generation

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-27-1

E.ON ERC Band 29**Helmedag, A.**

System-Level Multi-Physics
Power Hardware in the Loop
Testing for Wind Energy
Converters

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-28-8

E.ON ERC Band 30**Togawa, K.**

Stochastics-based Methods
Enabling Testing of Grid-
related Algorithms through
Simulation

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-29-5

E.ON ERC Band 31**Huchtemann, K.**

Supply Temperature Control
Concepts in Heat Pump
Heating Systems

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-30-1

E.ON ERC Band 32**Molitor, C.**

Residential City Districts as
Flexibility Resource: Analysis,
Simulation, and Decentralized
Coordination Algorithms

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-31-8

E.ON ERC Band 33**Sunak, Y.**

Spatial Perspectives on the
Economics of Renewable
Energy Technologies

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-32-5

E.ON ERC Band 34**Cupelli, M.**

Advanced Control Methods for
Robust Stability of MVDC
Systems

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-33-2

E.ON ERC Band 35**Chen, K.**

Active Thermal Management
for Residential Air Source Heat
Pump Systems

1. Auflage 2015

ISBN 978-3-942789-34-9

E.ON ERC Band 36**Pâques, G.**

Development of SiC GTO
Thyristors with Etched
Junction Termination
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-35-6

E.ON ERC Band 37**Garnier, E.**

Distributed Energy Resources
and Virtual Power Plants:
Economics of Investment and
Operation
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-37-0

E.ON ERC Band 38**Call, D.**

Occupants' Behavior and its
Impact upon the Energy
Performance of Buildings
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-36-3

E.ON ERC Band 39**Isermann, T.**

A Multi-Agent-based
Component Control and
Energy Management System
for Electric Vehicles
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-38-7

E.ON ERC Band 40**Wu, X.**

New Approaches to Dynamic
Equivalent of Active
Distribution Network for
Transient Analysis
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-39-4

E.ON ERC Band 41**Garbuzova-Schiftler, M.**

The Growing ESCO Market for
Energy Efficiency in Russia: A
Business and Risk Analysis
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-40-0

E.ON ERC Band 42**Huber, M.**

Agentenbasierte
Gebäudeautomation für
raumluftechnische Anlagen
1. Auflage 2016
ISBN 978-3-942789-41-7

E.ON ERC Band 43**Soltan, N.**

High-Power Medium-Voltage
DC-DC Converters: Design,
Control and Demonstration
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-42-4

E.ON ERC Band 44**Stieneker, M.**

Analysis of Medium-Voltage
Direct-Current Collector Grids
in Offshore Wind Parks
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-43-1

E.ON ERC Band 45**Bader, A.**

Entwicklung eines Verfahrens
zur Strompreisvorhersage im
kurzfristigen Intraday-
Handelszeitraum
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-44-8

E.ON ERC Band 46**Chen, T.**

Upscaling Permeability for
Fractured Porous Rocks and
Modeling Anisotropic Flow
and Heat Transport
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-45-5

E.ON ERC Band 47**Ferdowsi, M.**

Data-Driven Approaches for
Monitoring of Distribution
Grids
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-46-2

E.ON ERC Band 48**Kopmann, N.**

Betriebsverhalten freier
Heizflächen unter zeitlich
variablen Randbedingungen
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-47-9

E.ON ERC Band 49**Fütterer, J.**

Tuning of PID Controllers
within Building Energy
Systems
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-48-6

E.ON ERC Band 50**Adler, F.**

A Digital Hardware Platform
for Distributed Real-Time
Simulation of Power Electronic
Systems
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-49-3

E.ON ERC Band 51**Harb, H.**

Predictive Demand Side
Management Strategies for
Residential Building Energy
Systems
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-50-9

E.ON ERC Band 52**Jahangiri, P.**

Applications of Paraffin-Water
Dispersions in Energy
Distribution Systems
1. Auflage 2017
ISBN 978-3-942789-51-6

E.ON ERC Band 53**Adolph, M.**

Identification of Characteristic
User Behavior with a Simple
User Interface in the Context of
Space Heating
1. Auflage 2018
ISBN 978-3-942789-52-3

E.ON ERC Band 54**Galassi, V.**

Experimental evidence of
private energy consumer and
prosumer preferences in the
sustainable energy transition

1. Auflage 2017

ISBN 978-3-942789-53-0

E.ON ERC Band 55**Sangi, R.**

Development of Exergy-based
Control Strategies for Building
Energy Systems

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-942789-54-7

E.ON ERC Band 56**Stinner, S.**

Quantifying and Aggregating
the Flexibility of Building
Energy Systems

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-942789-55-4

E.ON ERC Band 57**Fuchs, M.**

Graph Framework for
Automated Urban Energy
System Modeling

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-942789-56-1

E.ON ERC Band 58**Osterhage, T.**

Messdatengestützte Analyse
und Interpretation
sanierungsbedingter
Effizienzsteigerungen im
Wohnungsbau

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-942789-57-8

E.ON ERC Band 59**Frieling, J.**

Quantifying the Role of Energy
in Aggregate Production
Functions for Industrialized
Countries

1. Auflage 2018

ISBN 978-3-942789-58-5

Diese Arbeit stellt eine Methodik und ein Software-Framework vor, welche eine dynamische Energiebedarfsrechnung von großen Gebäudebeständen auf Basis weniger Eingangsdaten erlauben. Solche zeitaufgelösten Bedarfsrechnungen bilden die Grundlage für Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz in Wärmeversorgungssystemen von Stadtquartieren. Die Methodik umfasst dabei vereinfachte und dennoch dynamische Gebäudemodelle auf Grundlage thermischer Netzwerke reduzierter Ordnung, die den Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und Modellkomplexität auf Stadtteilebene gerecht werden. Zusätzlich beinhaltet die Methodik ein Verfahren, das es ermöglicht, die Gebäudemodelle auf Basis weniger und einfach erfassbarer Eingangsdaten unter Verwendung von statistischen Archetypen vollständig zu parametrieren. Am Anwendungsfall einer Forschungsliegenschaft ergeben sich für Simulation und Messung des zeitaufgelösten Wärmebedarfs aller Gebäude Abweichungen von unter 3 % für den Jahreswärmebedarf. Beide Teilbereiche, Parametrierung und Modellierung, sind in einen übergreifenden Prozess zur Automation der Werkzeugkette eingebunden. Die Parametrierung ist im Rahmen des Software-Frameworks in der Python-Bibliothek TEASER umgesetzt. Die reduzierten Gebäudemodelle sind Teil der Modelica-Bibliothek AixLib. Beide Bausteine stehen offen und frei zur weiteren Verwendung zur Verfügung.