



Technische Universität Darmstadt

Institut für Numerische Methoden
und Informatik im Bauwesen

Robert Irmeler

Datensynthesemethoden für die Generierung dynamisch-
thermischer Simulationsmodelle im Wohngebäudebestand am
Beispiel von EnergyPlus

Datensynthesemethoden für die Generierung dynamisch- thermischer Simulationsmodelle im Wohngebäudebestand am Beispiel von EnergyPlus

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Robert Irmiler aus Schönebeck (Elbe)
Tag der Einreichung: 27.02.2019, Tag der Prüfung: 03.05.2019
Darmstadt – D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr.ir. Eduardus A.B. Koenders



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Bau- und Umweltingenieur-
wissenschaften
Institut für Numerische Methoden und
Informatik im Bauwesen

Datensynthesemethoden für die Generierung dynamisch- thermischer Simulationsmodelle im Wohn-
gebäudebestand am Beispiel von EnergyPlus
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Robert Irmeler aus Schönebeck (Elbe)

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr.ir. Eduardus A.B. Koenders

Tag der Einreichung: 27.02.2019

Tag der Prüfung: 03.05.2019

Darmstadt — D 17

Berichte des Instituts für Numerische Methoden
und Informatik im Bauwesen

Band 1/2019

Robert Irmeler

**Datensynthesemethoden für die Generierung
dynamisch-thermischer Simulationsmodelle im
Wohngebäudebestand am Beispiel von EnergyPlus**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6755-2

ISSN 1860-9430

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de



Meiner Familie





Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel für die richtigen Impulse zur richtigen Zeit, seine fachliche und moralische Unterstützung und für die Übernahme des Hauptreferats. Herrn Prof. Dr.ir. Eduardus A.B. Koenders danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Christian Schwöbel für die Betreuung meiner Studien- und Diplomarbeit. Der mir in diesem Rahmen gewährte Einblick in das wissenschaftliche Arbeiten und die komplexen Forschungsfelder der Bauinformatik legten den Grundstein für meine Entscheidung, diese Promotion in Angriff zu nehmen.

In besonderer Verbundenheit bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Steffen Franz für spannende und kreative Forschungseskapaden, konstruktive fachliche Diskussionen und Freundschaft.

Weiterer Dank gilt den Studierenden, deren Arbeiten ich betreuen durfte, sowie meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen für die gute Zusammenarbeit, die lockere Arbeitsatmosphäre und die schöne Zeit, die wir während und außerhalb der Arbeitszeit miteinander verbracht haben. Insbesondere danke ich Pascal Wiese, Michael Belwe, Anna Wagner, André Hoffmann, Meiling Shi, Laura Möller, Susanne Rohmig, Barbara Kohane, Christian Eller, Timo Bittner, Marcus Dombois, Christian Leifgen, Michael Kregger, Dr.-Ing. Philipa Petkova, Dr.-Ing. Uwe Zwinger und Dr.-Ing. Kristian Schatz.

Meiner Familie danke ich für alles.

Robert Irmeler



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	XI
Quellcodeverzeichnis	XIV
1. Einleitung und Zielsetzung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung und Ansatz	2
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Der Wohnsektor im Kontext der Energiewende	5
2.1. Anteil des Wohnsektors am deutschen Energieverbrauch	5
2.2. Das Energiekonzept 2050	7
2.3. Die Energieeffizienzstrategie Gebäude	9
2.4. Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor	10
2.5. Sanierungsbedarf im Wohngebäudebestand	12
2.5.1. Struktur des deutschen Wohngebäudebestands	12
2.5.2. Studien zu Sanierungsaktivität und Einsparpotentialen	13
2.5.3. Vorbehalte, Hürden und Herausforderungen bei der Gebäudesanierung	17
2.6. Einfluss des Nutzerverhaltens und Rebound-Effekte	18
2.6.1. Ursachen und Ausprägungen von Rebound-Effekten	19
2.6.2. Studien zur Höhe direkter Rebound-Effekte und Handlungsstrategien	20
2.7. Fazit	21
3. Energetische Modellierung und Bewertung von Wohngebäuden	23
3.1. Der Energieausweis	23
3.1.1. Arten von Energieausweisen und rechtliche Randbedingungen	24
3.1.2. Energieausweise für Wohngebäude	25
3.1.3. Kritik am Energieausweis	31
3.2. Der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP)	32
3.2.1. Inhalte des iSFP	33
3.2.2. Methodik des iSFP	34

3.3. Dynamisch-thermische Gebäudesimulation	36
3.3.1. Grundlagen der dynamisch-thermischen Gebäudesimulation	37
3.3.2. Software für die dynamisch-thermische Gebäudesimulation	46
3.3.3. Kalibrierung energetischer Simulationsmodelle	49
3.4. Energetische Gebäudemodellierung auf Basis reduzierter Benutzereingaben	53
3.4.1. Energetische Simulationen mit maschinellen Lernverfahren	53
3.4.2. Verwendung von Default-Werten und Gebäudetypologien	56
3.5. Sanierungskonfiguratoren	58
3.5.1. BMWi: Sanierungskonfigurator	58
3.5.2. Effizienzhaus-online: Sanierungsrechner	60
3.5.3. co2online: ModernisierungsCheck	62
3.5.4. Vergleich und Diskussion	63
3.6. Fazit	66
4. Digitale Gebäudemodelle als Datenbasis für energetische Simulationen	69
4.1. Building Information Modeling (BIM)	69
4.2. Industry Foundation Classes (IFC)	71
4.3. City Geography Markup Language (CityGML)	73
4.4. Green Building eXtensible Markup Language (gbXML) und SimModel	75
4.5. Digitale Gebäuderekonstruktion - „Scan-to-BIM“	76
4.6. Fazit	78
5. Kollaborative BIM-Rekonstruktion mit mobilen Endnutzengeräten	79
5.1. Aufnahme von 3D-Umgebungsdaten mit Google Tango	79
5.2. Framework für kollaborative BIM-Rekonstruktion	81
5.3. Rekonstruktions-Pipeline	84
5.4. Genauigkeit der Rekonstruktionsergebnisse	88
5.5. Fazit	90
6. Konzept für die Generierung energetischer Simulationsmodelle im Wohngebäudebestand durch Synthese ausgewählter Datenquellen	91
6.1. Anforderungen und Modellgrenzen	92
6.2. Konzept für die automatisierte Modellgenerierung durch Synthese ausgewählter Datenquellen	95
6.2.1. Energetische Modellierung von Bestandsgebäuden: Status quo	95
6.2.2. Energetische Modellierung von Bestandsgebäuden: Automatisierung durch Datensynthese	97

6.3.	Ansatz zur automatisierten Generierung des geometrischen Simulationsmodells .	100
6.3.1.	Datengrundlage: CityGML-Modell	101
6.3.2.	Datengrundlage: CityGML-Modell und rekonstruiertes IFC-Modell	105
6.4.	Ansatz zur Ableitung bauphysikalischer Gebäudeeigenschaften	107
6.5.	Ansatz zur Gebäude-Zonierung und Generierung anlagentechnischer Komponenten	109
6.6.	Ansatz zur Modellierung von Nutzungsbedingungen und elektrischen Verbrauchern	110
6.6.1.	Aufenthalt und Aktivität der Bewohner	111
6.6.2.	Ziel-Raumtemperaturen	113
6.6.3.	Wasserverbrauch	113
6.6.4.	Lüftung	115
6.6.5.	Elektrische Verbraucher	116
6.7.	Ansatz zur Kalibrierung typologiebasierter Parameter mit Smart Metering Daten .	118
6.7.1.	Grundlegendes Kalibrierungskonzept	119
6.7.2.	Entwurf eines evolutionären Optimierungsverfahrens zur Kalibrierung typologischer Modellparameter	122
6.7.3.	Integration von Strom- und Wasserverbrauchsdaten in den Kalibrierungsprozess	124
6.8.	Fazit	125
7.	Entwurf und Umsetzung des <u>Datensynthese-basierten Energetischen Modellgenerators (DEMO)</u>	127
7.1.	Anwendungsszenario	127
7.2.	Softwarearchitektur	128
7.3.	DEMO.GeoDB: Relationale Datenbank für die Verwaltung von CityGML-Modellen und Liegenschaftsdaten	130
7.4.	DEMO.TypologyDB: Relationale Datenbank für die Verwaltung typologischer Gebäudeeigenschaften	131
7.5.	DEMO.Generator	133
7.6.	DEMO.Calibrator	137
7.6.1.	Mechanismen und Parameter des genetischen Optimierungsverfahrens . .	138
7.6.2.	Informationsfluss der Kalibrierung und Parallelisierung	141
7.7.	DEMO.Web: Entwurf einer webbasierten Plattform für die energetische Simulation von Wohngebäuden	142
7.8.	Fazit	146
8.	Anwendungsbeispiele	149
8.1.	Anwendungsbeispiel 1: Modellgenerierung auf Basis amtlicher CityGML-Daten . .	149
8.1.1.	Modellgenerierung	150

8.1.2. Simulationsergebnisse	156
8.2. Anwendungsbeispiel 2: Modellgenerierung auf Basis von IFC-Daten	158
8.2.1. Modellgenerierung	158
8.2.2. Simulationsergebnisse	160
8.3. Anwendungsbeispiel 3: Modellgenerierung durch Fusion von CityGML- und IFC-Daten	161
8.3.1. Modellgenerierung	161
8.3.2. Simulationsergebnisse	163
8.4. Anwendungsbeispiel 4: Modellgenerierung mit Indoor-Scan	164
8.4.1. Geometrische Rekonstruktion	165
8.4.2. Modellgenerierung	168
8.4.3. Simulationsergebnisse	168
8.5. Vergleich von Anwendungsbeispiel 4 mit BMWi-Sanierungskonfigurator	171
8.6. Diskussion	175
8.7. Fazit	176
9. Zusammenfassung und Ausblick	179
9.1. Zusammenfassung	179
9.2. Ausblick	181
9.3. Abschließendes Fazit	182
Literaturverzeichnis	185
A. Anhang	207
A.1. Individueller Sanierungsfahrplan	207
A.2. Datenformate für digitale Gebäudemodelle	208
A.3. Hardware für die Aufnahme räumlicher Umgebungsdaten	209
A.4. Gebäude- und Bauteiltypologien	211
A.5. Nutzungs- und Verbrauchsprofile	216
A.6. DEMO-Quellcodeauszüge	220

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1.	Top-10 Rangliste der Nationen mit dem höchsten Energieverbrauch (*: [29], **: [63])	5
Abbildung 2-2.	Endenergieverbrauch in Deutschland nach Anwendungsbereich 2015 [19], *: Informations- und Kommunikationstechnik	6
Abbildung 2-3.	Endenergieverbrauch in privaten Haushalten nach Anwendungsbereich 2015 [2]	6
Abbildung 2-4.	Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren [3]	7
Abbildung 2-5.	Vergleich des gebäudebezogenen Primärenergiebedarfs von Referenzszenario und Zielwert im Jahr 2050 [17]	9
Abbildung 2-6.	Der deutsche Gebäudebestand [48]	13
Abbildung 2-7.	Anteil der Baualtersklassen am Wohngebäudebestand (Stand: 2014) [15]	13
Abbildung 2-8.	Mittlerer flächenbezogener Endenergieverbrauch des Gebäudebestands nach Gebäudealtersklassen [15]	14
Abbildung 2-9.	Modernisierungszustand für EFZH nach Baualtersklassen [176]	16
Abbildung 2-10.	Modernisierungszustand für MFH nach Baualtersklassen [176]	16
Abbildung 2-11.	Sanierungsraten 2005 bis 2008 je Bauteilgruppe [94]	16
Abbildung 3-1.	Links: Energieverbrauchsausweis (Ausschnitt), Rechts: Energiebedarfsausweis (Ausschnitt); Quelle: Anlage 6 (zu § 16) der EnEV 2014, Muster Energieausweis für Wohngebäude	25
Abbildung 3-2.	Energieflussbild zur Berechnung der Heizungs-, Lüftungs- und Trinkwassererwärmung gemäß DIN V 4701-10 (Kap. 4.2.1)	28
Abbildung 3-3.	Bilanzierungsschritte und zu ermittelnde Werte nach dem Monatsbilanzverfahren gemäß DIN V 4108-6 (Kap. 5.6.3)	29
Abbildung 3-4.	Ablauf der energetischen Bilanzierung von Wohngebäuden nach DIN V 18599-1 (Kap. 9.3)	30
Abbildung 3-5.	Individueller Sanierungsfahrplan: Energetische Bewertung des Ist-Zustands (Muster) [22]	33
Abbildung 3-6.	Informationsfluss einer dynamisch-thermischen Gebäudesimulation, [107]	38
Abbildung 3-7.	Schema eines Beuken-Modells in T-Schaltung für den eindimensionalen Wärmefluss durch eine Wand	43

Abbildung 3-8.	EnergyPlus - Aufbau und Übersicht des Datenflusses, [54]	48
Abbildung 3-9.	Sanierungskonfigurator des BMWi: Ausgabe der Ergebnisse für energetische Bewertung und gewählte Sanierungsmaßnahme (blau)	59
Abbildung 3-10.	Sanierungskonfigurator von Effizienzhaus-online: Eingabeformular Fenster	61
Abbildung 3-11.	co2online-ModernisierungsCheck: Startformular	63
Abbildung 4-1.	Ausschnitt aus dem IFC-Datenmodell [26]	72
Abbildung 4-2.	CityGML Levels of Detail [33] (nach [74])	73
Abbildung 4-3.	CityGML 2.0 Datenmodell (reduziert/vereinfacht) [33]	74
Abbildung 4-4.	Schema des bidirektionalen Datenaustauschs mit SimModel [130] .	76
Abbildung 5-1.	Tango-fähige mobile Endgeräte: (a) Google Project Tango DevKit („Yellowstone“ Tablet) [138], (b) Asus ZenFone AR [8], (c) Lenovo Phab 2 Pro [108]	80
Abbildung 5-2.	Komponentendiagramm des kollaborativen Rekonstruktions-Framework, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML) [67]	82
Abbildung 5-3.	Beispiele für Benutzeroberflächen der Tango Client Android-App: (a) Übersicht für die Verwaltung unterschiedlicher Rekonstruktionsprojekte, (b) Echtzeitvisualisierung von Scandaten eines kollaborativen Scanvorgangs (drei Geräte)	83
Abbildung 5-4.	Flussdiagramm des kollaborativen Scanprozesses basierend auf Lokalisierung (ADF) und Positions-Tracking (VIO), nach ISO/IEC 19510:2013 Object Management Group Business Process Model and Notation (OMG BPMN 2.0.1) [67]	83
Abbildung 5-5.	Flussdiagramm des kollaborativen Rekonstruktionsprozesses, nach ISO/IEC 19510:2013 Object Management Group Business Process Model and Notation (OMG BPMN 2.0.1) [67]	84
Abbildung 5-6.	Flussdiagramm des Rekonstruktionsprozesses (Rekonstruktions-Pipeline), nach ISO/IEC 19510:2013 Object Management Group Business Process Model and Notation (OMG BPMN 2.0.1) [67]	85
Abbildung 5-7.	(a) Beispiel für <i>window search areas</i> , (b) Prozess der Fenster-Rekonstruktion basierend auf Punktwolkendaten und Bildverarbeitung [67]	87
Abbildung 5-8.	Beispiel-Datensatz: (a) Eingangsdaten, (b) Bereinigte Daten, (c) Tür-Rekonstruktion, (d) Raum-Segmentierung, (e) Äußere Kontur, (f) Wand-Rekonstruktion, (g) Rekonstruierter Grundriss, (h) Generiertes IFC-Modell [67]	87

Abbildung 5-9.	Darstellung der Rohdaten, des rekonstruierten Grundrisses, des generiertes IFC-Modells, sowie des Vergleichsmodells (nach Handaufmaß) für die Testumgebungen „Apartment 1“ (Oben), „Apartment 2“ (Mitte), „Office“ (Unten) [67]	89
Abbildung 6-1.	Aktivitätsdiagramm der herkömmlichen energetischen Modellierung von Bestandsgebäuden, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	96
Abbildung 6-2.	Aktivitätsdiagramm der automatisierten energetischen Modellierung von Bestandsgebäuden basierend auf einem Datensynthese-Prozess, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	98
Abbildung 6-3.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten, geometrischen Modellierungsprozesses; Datengrundlage: CityGML-Modell und Benutzereingaben, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML); Modell-Abbildungen beispielhaft	101
Abbildung 6-4.	Schematische Darstellung des Ansatzes zur Grundrissgenerierung; Links: für rechteckige Gebäudegrundform; Rechts: für beliebige Gebäudegrundform	102
Abbildung 6-5.	Schematische Darstellung des Ansatzes zur Generierung von Fensterflächen; Links: Schema zur anteiligen Aufteilung der Fensterflächen auf die Fassade in Abhängigkeit der Gebäudeausrichtung; Rechts: Randabstände, Brüstungshöhe und verwendete Standardmaße für Fensterplatzierung	105
Abbildung 6-6.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten, geometrischen Modellierungsprozesses; Datengrundlage: CityGML-Modell, rekonstruiertes IFC-Modell aus Indoor-Scan und Benutzereingaben, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML); Modell-Abbildungen beispielhaft	106
Abbildung 6-7.	Visualisierung des Konzepts zur Fusionierung von CityGML- und IFC-Modellen in Bezug auf die Dachform: a) Beispiel für CityGML-Daten eines Dachs (3D-Koordinaten des Firsts und der Traufe), b) Beispiel für eine rekonstruierte Gebäudebegrenzung eines gescannten Gebäudes (IFC), c) Fusionierung der Datensätze durch Anpassung der CityGML-Koordinaten der Dachtraufe und nachträglicher Triangulation zur Erzeugung ebener Dachflächen	107

Abbildung 6-8.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten, bauphysikalischen Modellierungsprozesses, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML); Modell-Abbildungen beispielhaft	108
Abbildung 6-9.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten, anlagentechnischen Modellierungsprozesses, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML); Modell-Abbildungen beispielhaft	109
Abbildung 6-10.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten Modellierungsprozesses der nutzungsbezogenen Randbedingungen, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML); Modell-Abbildungen beispielhaft	111
Abbildung 6-11.	Werktags-Aufenthaltsprofil für den Personentypen „Erwachsener“, weitere Profile in A.5 Abbildung A-8	112
Abbildung 6-12.	Aktivitätsprofil von Montag bis Freitag für den Personentyp „Erwachsener“ (weitere Profile in Anhang A.5 Abbildung A-9)	112
Abbildung 6-13.	Modelliertes Verbrauchsprofil der Warmwasserentnahmekomponenten mit X als dem Durchflussfaktor (maximale Fließrate/Wasserentnahme bei $X = 1$)	114
Abbildung 6-14.	Normierte H0-Lastprofile für Sommer-Saison (15.05. bis 14.09.), die angegebenen Verbrauchsfaktoren beziehen sich auf viertelstündliche Leistungsmittelwerte [164]	116
Abbildung 6-15.	Vereinfachte, Saison-abhängige Dynamisierungsfunktion zur Skalierung der Lastprofile, Grundlage: [9]	118
Abbildung 6-16.	Aktivitätsdiagramm des automatisierten Kalibrierungsprozesses zur Anpassung typologischer Modellparameter, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	120
Abbildung 6-17.	Aktivitätsdiagramm des genetischen Algorithmus zur Anpassung typologischer Modellparameternach, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	123
Abbildung 7-1.	Anwendungsfalldiagramm des <u>D</u> atensynthese-basierten <u>E</u> nergetischen <u>M</u> odellgenerators (DEMO), nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	128
Abbildung 7-2.	Komponentendiagramm des <u>D</u> atensynthese-basierten <u>E</u> nergetischen <u>M</u> odellgenerators (DEMO), nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	129
Abbildung 7-3.	Relationales Datenbankmodell für die Verwaltung typologischer Gebäudeeigenschaften	132

Abbildung 7-4.	Komponentendiagramm des DEMO.Generator, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	134
Abbildung 7-5.	Sequenzdiagramm zur Darstellung des Informationsflusses zur Generierung eines typologischen Simulationsmodells, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	136
Abbildung 7-6.	Komponentendiagramm des DEMO.Calibrator, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	138
Abbildung 7-7.	Schematische Darstellung des Prinzips des Stochastic Universal Sampling: die Breite der Felder repräsentiert die Fitness der einzelnen Individuen; Gelb bedeutet das Individuum wurde selektiert .	140
Abbildung 7-8.	Sequenzdiagramm des Informationsflusses der Modellkalibrierung, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML) . . .	142
Abbildung 7-9.	Komponentendiagramm der DEMO-Webplattform, nach ISO/IEC 19505-2:2012 Unified Modeling Language (UML)	143
Abbildung 7-10.	Erfassung der erforderlichen Benutzereingaben	144
Abbildung 7-11.	Erfassung der optionalen Benutzereingaben	144
Abbildung 7-12.	Visualisierung des generierten Modells und Vergleich der Simulationsergebnisse mit Smart Meter Daten	145
Abbildung 7-13.	Visualisierung der Kalibrierungsergebnisse	145
Abbildung 7-14.	Simulation von Sanierungskonfigurationen	146
Abbildung 8-1.	Darstellung des gewählten Anwendungsbeispiels; (a) Visualisierung in Google Earth, (b) Darstellung des CityGML-Eingabedatensatzes . .	149
Abbildung 8-2.	SketchUp-Visualisierung des generierten OpenStudio-Modells für Eingabevariante A; (a) Perspektivische Ansicht, (b) Thermische Zonen, (c) Thermische Zonen / Grundriss, (d) Ansicht-Nord, (e) Ansicht-Ost, (f) Ansicht-Süd, (g) Ansicht-West	152
Abbildung 8-3.	Ausschnitt der OpenStudio-Benutzeroberfläche; Generierte Räume und begrenzende, opake Bauteile	153
Abbildung 8-4.	Ausschnitt der OpenStudio-Benutzeroberfläche; Generierte, typologiebasierte Bauteilaufbauten	153
Abbildung 8-5.	Ausschnitt der OpenStudio-Benutzeroberfläche; Generiertes Aktivitätsprofil für eine Erwachsene Person (Sommer, Samstag); In der Mitte ist das generierte Aktivitätsprofil zu sehen, welches die Aktivität in W/Person im Tagesverlauf modelliert.	154

Abbildung 8-6.	Ausschnitt der OpenStudio-Benutzeroberfläche, Visualisierung des generierten Warmwasserkreislaufs; Im oberen Bereich ist die Heizungsanlage abgebildet, von dort aus wird das erhitzte Wasser den modellierten Verbrauchern (Heizungen / Wasserentnahmestellen) zugeführt (Mitte).	155
Abbildung 8-7.	SketchUp-Visualisierung des generierten OpenStudio-Modells für Eingabevariante B; (a) Perspektivische Ansicht, (b) Thermische Zonen, (c) Thermische Zonen / Grundriss, (d) Ansicht-Nord, (e) Ansicht-Ost, (f) Ansicht-Süd, (g) Ansicht-West	156
Abbildung 8-8.	Simulierte mtl. Heizenergieverbräuche für Eingabevarianten A und B (von oben)	157
Abbildung 8-9.	Darstellung des gewählten IFC-Eingabedatensatzes; (a) Perspektivisch, (b) Grundriss OG, (c) Grundriss EG	158
Abbildung 8-10.	Ausschnitt aus der IFC-Datei (STEP) des Eingabedatensatzes; Deklaration der Raumnutzungsart „LivingRoom“ als IFCPROPERTY-SINGLEVALUE Name (#2238)	159
Abbildung 8-11.	SketchUp-Visualisierung des generierten OpenStudio-Modells; (a) Perspektivische Ansicht, (b) Thermische Zonen, (c) Thermische Zonen / Grundriss EG, (d) Ansicht-Nord, (e) Ansicht-Ost, (f) Ansicht-Süd, (g) Ansicht-West	159
Abbildung 8-12.	Simulierte monatliche Heizenergieverbräuche für Anwendungsbeispiel 2	160
Abbildung 8-13.	Darstellung der gewählten CityGML- und IFC-Eingabedatensatzes; (a) CityGML-Modell (b) IFC-Modell perspektivisch, (b) IFC-Modell Grundriss OG, (c) IFC-Modell Grundriss EG	161
Abbildung 8-14.	SketchUp-Visualisierung des generierten OpenStudio-Modells; (a) Perspektivische Ansicht, (b) Thermische Zonen, (c) Thermische Zonen / Grundriss OG, (d) Thermische Zonen / Grundriss EG, (e) Ansicht-Nord, (f) Ansicht-Ost, (g) Ansicht-Süd, (h) Ansicht-West . . .	162
Abbildung 8-15.	Simulierte monatliche Heizenergieverbräuche für Anwendungsbeispiel 3	163
Abbildung 8-16.	Darstellung des ausgewählten Anwendungsbeispiels; (a) Foto des Testgebäudes, (b) Darstellung des CityGML-Eingabedatensatzes . . .	164
Abbildung 8-17.	Punktwolke gesamt; (a) Perspektivisch, (b) Schnitt	165
Abbildung 8-18.	Scandaten der Geschosse UG, EG, und OG in Schnittansicht von oben; Oben: Texturierte Mesh-Geometrie, Unten: Punktwolke	166

Abbildung 8-19.	Rekonstruktionsergebnisse für UG , EG und OG (von oben); (a) Punktwolke, (b) Grobe Grundrissrekonstruktion Tango API (Eingangsdatensatz), (c) Rekonstruierter Grundriss, (d) Erzeugtes IFC-Modell	167
Abbildung 8-20.	SketchUp-Visualisierung des generierten OpenStudio-Modells; (a) Perspektivische Ansicht, (b) Thermische Zonen, (c) Thermische Zonen / Grundriss UG, (d) Thermische Zonen / Grundriss EG, (e) Thermische Zonen / Grundriss OG, (f) Ansicht-Nord, (g) Ansicht-Ost, (h) Ansicht-Süd, (i) Ansicht-West	169
Abbildung 8-21.	Simulierte monatliche Heizenergieverbräuche für Anwendungsbeispiel 4	171
Abbildung 8-22.	Screenshot der Benutzeroberfläche des BMWi-Sanierungskonfigurators mit Eingaben und Ergebnissen für das Testgebäude aus Anwendungsbeispiel 4	172
Abbildung 8-23.	Screenshot der Benutzeroberfläche des BMWi-Sanierungskonfigurators mit Eingabe der Sanierungsmaßnahme und Ergebnissen	174
Abbildung A-1.	Individueller Sanierungsfahrplan: Langfristige Sanierungsstrategie mit Schritt-für-Schritt Maßnahmenpaketen (Muster) [22]	207
Abbildung A-2.	Beispiele für kompakte Tiefensensoren: (a) Asus ZenFone AR [8], (b) Occipital Structure [168], (c) Orbeece Persee [133], (d) Pico Flexx [139], (e) Intel RealSense D435 [88], (f) ZED Mini [166].	210
Abbildung A-3.	Haustypenmatrix der IWU-Gebäudetypologie [113], S. 9	211
Abbildung A-4.	Beispiel-Datensatz „EFH_B“ der IWU-Gebäudetypologie [113], S. 150	212
Abbildung A-5.	Beispiel für Datensätze der alten IWU-Gebäudetypologie (2005) mit differenzierter Aufteilung der Fensterflächen nach räumlicher Ausrichtung [93]	213
Abbildung A-6.	Übersicht TABULA-Berechnungsverfahren (korrigiert auf Niveau von Verbrauchswerten); [113], Anhang C.3	214
Abbildung A-7.	Beispiel für einen Datensatz der ZUB-Bauteiltypologie: Außenwand, massiv, Hochlochziegel, 2-schalig; [197], S. 26	215
Abbildung A-8.	Raumbezogene Aufenthaltsprofile für die Personentypen „Kind“ und „Erwachsener“, Datengrundlage: [50]	217
Abbildung A-9.	Nutzerprofile für metabolische Wärmeerzeugung durch Aktivität; Datengrundlage: [50], [7] p.8.6 Table 4	218
Abbildung A-10.	Normierte H0-Standardlastprofile nach BDEW, der angegebene Verbrauchsfaktor bezieht sich jeweils auf den Tagesstromverbrauch [164]	219



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1.	Energiekonzept 2050: Status und Ziele [48], [18], [20], [23]	8
Tabelle 2-2.	Endenergiebedarfeinsparung und CO ₂ -Minderung durch Erhöhung der Sanierungsrate der Gebäudehülle auf 1,5 bzw. 2,5 % pro Jahr, nach Holm u. Sprengard [83]	17
Tabelle 2-3.	Abschätzungen zu langfristigen, direkten Rebound-Effekten in OECD Ländern, nach Sorell [163]	20
Tabelle 3-1.	Ansätze zur Integration von Nutzerverhalten in energetische Gebäudesimulationen [85]	45
Tabelle 3-2.	Referenzgebäude für den Vergleich unterschiedlicher Sanierungskonfiguratoren	64
Tabelle 3-3.	Vergleich unterschiedlicher Sanierungskonfiguratoren - Ergebnisse .	65
Tabelle 5-1.	Validierungsergebnisse der Testumgebungen: Fehlerangaben beziehen sich auf den Vergleich mit einem per Handaufmaß erstellten Gebäudemodell [67]	89
Tabelle 6-1.	Default-Werte für Ziel-Temperaturen verschiedener Raumtypen . . .	113
Tabelle 6-2.	Anteil verschiedener Raumtypen am Stromverbrauch, Grundlage: [37]	117
Tabelle 6-3.	Beispiele typologischer Modellparameter für eine Kalibrierung auf Basis von Smart Meter Messdaten des Heizenergieverbrauchs	121
Tabelle 7-1.	Erforderliche Benutzereingaben für die automatisierte Modellgenerierung	137
Tabelle 7-2.	Parameter des implementierten genetischen Optimierungsverfahrens	141
Tabelle 8-1.	Eingabevarianten für Anwendungsbeispiel 1	151
Tabelle 8-2.	Simulationsergebnisse für Anwendungsbeispiel 1	157
Tabelle 8-3.	Eingabedaten für Anwendungsbeispiel 2	159
Tabelle 8-4.	Simulationsergebnisse für Anwendungsbeispiel 2	160
Tabelle 8-5.	Eingabedaten für Anwendungsbeispiel 3	162
Tabelle 8-6.	Simulationsergebnisse für Anwendungsbeispiel 3	163
Tabelle 8-7.	Eingabedaten für Anwendungsbeispiel 4	168
Tabelle 8-8.	Simulationsergebnisse für Anwendungsbeispiel 4	170

Tabelle 8-9.	Eingabedaten in den BMWi-Sanierungskonfigurator für das Testgebäude aus Anwendungsbeispiel 4	171
Tabelle 8-10.	Vergleich der Ergebnisse des BMWi-Sanierungskonfigurators mit Anwendungsbeispiel 4 und Gegenüberstellung mit IWU-Referenzwert und Abrechnungsdaten	173
Tabelle 8-11.	Vergleich der Ergebnisse des BMWi-Sanierungskonfigurators mit Anwendungsbeispiel 4 für die Simulation der Sanierungsmaßnahme „Fenstertausch“	174
Tabelle A-1.	Unterschiede zwischen CityGML und IFC [33]	208
Tabelle A-2.	Hardwarespezifikationen verschiedener Tiefensensoren und mobiler Endgeräte ([8], [168], [133], [139], [88], [166]	209
Tabelle A-3.	Nutzerprofil „Kind“: Aufenthaltszeiten und metabolische Wärmeerzeugung durch Aktivität, nach [50], [7] p. 8.6 Table 4	216
Tabelle A-4.	Nutzerprofil „Erwachsener“: Aufenthaltszeiten und metabolische Wärmeerzeugung durch Aktivität, nach [50], [7] p. 8.6 Table 4	216
Tabelle A-5.	Systematik zur Abschätzung des Jahresstromverbrauchs, nach deutschem Stromspiegel [37]	216

Quellcodeverzeichnis

7.1. SQL-Abfrage einer CityGML-Referenz aus einer ALKIS-Datenbank auf Basis der Gebäudeadresse	130
7.2. SQL-Abfrage der Gebäude-ID aus einer 3DCityDB-Datenbank auf Basis der CityGML-Referenz	131
7.3. SQL-Abfrage von Gebäudehüllflächen-Objekten aus einer 3DCityDB-Datenbank auf Basis der Gebäude-ID	131
7.4. SQL-Abfrage von Geometriedaten eines Hüllflächen-Objekts aus einer 3DCityDB-Datenbank	131
8.1. Minimalbeispiel zur Ausführung des DEMO-Modellgenerators	150
8.2. Beispiel für Definition eines CustomConstructionSet für die Modellgenerierung . .	175
A.1. Quellcodeausschnitt der Klasse <i>RoofMergerIfcGml</i> für die Fusionierung von CityGML-Dachgeometrie und IFC-Außenwandgeometrie (Package <i>Import</i> in <i>Demo.Generator.GeneratorLibrary</i>)	220