

Elisabeth Eckstädt

Simulation von Gebäude-Anlagentechnik in der  
BIM-basierten Planung energieeffizienter Gebäude



Elisabeth Eckstädt

**SIMULATION VON GEBÄUDE-  
ANLAGENTECHNIK IN DER  
BIM-BASIERTEN PLANUNG  
ENERGIEEFFIZIENTER GEBÄUDE**

**TUD***press*

2025

Berichte des Instituts für Bauinformatik, Heft 23

Schriftenreihe des Instituts für Bauinformatik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Menzel

© Institut für Bauinformatik,  
Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden 2025

Institut für Bauinformatik, Technische Universität Dresden

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.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-820-6

2025 TUDpress ist ein Imprint von

Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG  
Dresden und München  
<http://www.thelem.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor.

Printed in Germany.

# Simulation von Gebäude-Anlagentechnik in der BIM-basierten Planung energieeffizienter Gebäude

Anbindung von Modelica-Modellen an OpenBIM-IFC-Modelle mittels semantischer Technologien

## Dissertation

vorgelegt

an der Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden

von **Dipl.-Ing. Elisabeth Eckstädt**

zur Erlangung des akademischen Grads Doktoringenieur

Gutachter

**Prof. Karsten Menzel**

TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Bauinformatik

**Prof. Clemens Felsmann**

TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung

**Prof. Joaquin Diaz**

TH Mittelhessen, Institut für Digitale Transformation im Bauwesen

Tag der Einreichung 30.08.2024

Tag der Verteidigung 11.12.2024

## Kurzinhaltsverzeichnis

1	Motivation, Stand von Wissenschaft und Technik .....	27
1.1	Motivation .....	28
1.2	Status Quo BIM.....	39
1.3	Status Quo der Simulation in der Gebäudeenergiedomäne.....	50
1.4	Status Quo des Zusammenwirkens von BIM und Simulation .....	54
1.5	Forschungsbedarf, Ableitung der Aufgabenstellung .....	57
1.6	Gliederung dieser Arbeit.....	60
2	Methodische und Technische Grundlagen .....	61
2.1	IFC .....	62
2.2	Modelica .....	82
2.3	Semantische Technologien .....	93
3	Methodischer Ansatz.....	101
3.1	Lösungsarchitektur des MO-x-IFC-Toolset.....	102
3.2	Vorteile durch die Verwendung von Wissensgraphen .....	103
3.3	Anforderungen an das zu entwickelnde Toolset .....	105
3.4	Überblick über die MO-x-IFC-Konverter .....	105
3.5	Schematizer (Konverter 2).....	108
3.6	MoOnt Modelica-Ontologie.....	115
3.7	Library-Ontologien.....	118
3.8	SemTran Semantic Translator (Konverter 4) .....	120
3.9	TTL2MO (Konverter 5) .....	127
3.10	MoTTL-Transcriptor (Konverter 7).....	128
3.11	ProTran Procedural Translator (Konverter 9) .....	132
3.12	Voluminizer (Konverter 10) .....	133
4	Implementierung eines Toolsets für die bidirektionale Übersetzung mittels Semantic Web 135	
4.1	Anforderungen an die Implementierung.....	136
4.2	Übersicht über die Konverter des MO-x-IFC-Toolsets .....	136
4.3	Details zu den einzelnen Konvertern MOXIK .....	138
5	Experimente .....	155
5.1	UseCase 1: BIM2SIM .....	156
5.2	UseCase 2: SIM2BIM.....	178
5.3	Vergleichende Auswertung zwischen Semantic und Procedural Translation.....	185
6	Schlussfolgerungen und kritische Bewertung .....	187
6.1	Prüfung und Diskussion der Thesen .....	188
6.2	Limitationen.....	189
6.3	Mehrwert gegenüber bestehenden Lösungen .....	189
6.4	Ausblick.....	190
	Verzeichnis verwendeter Software .....	198
	Verzeichnis der zitierten Normen .....	200
	Verzeichnis wissenschaftlicher Quellen .....	202

---

Anhang.....	212
Digitaler Anhang .....	212
Handling von Wissensgraphen - Größenbegrenzungen .....	213
Abbildungen Vereinfachung Graph im IFC.....	213

## Kurzzusammenfassung<sup>1</sup>

Die Einbindung von Anlagensimulation in den Planungsprozess von technischer Gebäudeausrüstung trägt zu einem energieeffizienteren Betrieb von Gebäuden bei. Eine wesentliche Hürde bei der Anwendung der Simulation als Planungswerkzeug ist der Aufwand für die Modellerstellung. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der automatisierten Modellerstellung basierend auf BIM (Building Information Management)-Modellen, um diesen Aufwand zu verringern. Weiterhin wird die Nachnutzung erstellter Simulationsmodelle durch die Erstellung von BIM-Modellen betrachtet.

Im Rahmen der Arbeit wurden Werkzeuge für die bidirektionale Verbindung zwischen BIM- und Simulationsmodell erstellt. Die Betrachtungen fokussieren sich dabei auf das Simulationsformat Modelica und das open-BIM-Format IFC. Die implementierten Werkzeuge basieren auf einer Analyse der Ausdrucksmächtigkeit der gewählten Formate (IFC und Modelica) und den Informationsanforderungen des ausgewählten Simulationsszenarios in den beiden UseCases BIM2SIM und SIM2BIM.

Für die Modellübertragung wurden Wissensgraphen für die intermediäre Wissensrepräsentation verwendet. Dies ermöglicht die Anwendung von in der IT bereits entwickelten semantischen Technologien für die Übersetzung zwischen BIM und Simulation. Weiterhin bieten die Wissensgraphen Anknüpfungspunkte für Anwendungsfälle die weit über die in dieser Arbeit untersuchten UseCases hinaus gehen.

Für beide betrachteten Anwendungsfälle wurde der experimentelle Nachweis erbracht, dass die automatisierte Modellerstellung soweit funktioniert, dass sie eine deutliche Zeitersparnis in der praktischen Anwendung bringt. Für die experimentelle Untersuchung wurden dabei bewusst keine artifiziellen Minimalbeispiele verwendet, sondern im Sinne eines „Feldversuchs“ Modelle aus realen Projekten verwendet.

Im Ergebnis dieser Arbeit stehen Werkzeuge zur Verfügung, die eine Integration der Simulation in den Planungsprozess deutlich erleichtern:

- Sie ermöglichen die Bearbeitung einzelner Planungsschritte im jeweils geeigneteren Werkzeug (CAD-Autorensoftware bzw. BIM-Viewer oder Simulationsumgebung) bei gleichzeitiger Gewährleistung der inhaltlichen Integrität beider beteiligten Modelle.
- Es besteht erstmals die Möglichkeit für die Anlagentechnik in nennenswertem Umfang Modelica-Modelle aus BIM-Modellen zu erstellen.
- Die Erzeugung von weiterbearbeitbaren BIM-Modellen aus Modelica-Modellen wird in dieser Arbeit erstmalig gezeigt.
- Die in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Nutzung des IFC-Formats zum Abspeichern semantisch reicher Schemata können auch in anderen Kontexten – unabhängig von der Simulation - Mehrwerte generieren.

---

<sup>1</sup> Eine Zusammenfassung der einzelnen Kapitel findet sich jeweils auf den Seiten 23, 55, 92, 125, 143 und 172.



---

## English Abstract

The integration of plant simulation into the design process for technical building equipment contributes to more energy-efficient operation of buildings. A major hurdle in the utilisation of simulation as a design tool is the expense involved in model creation. This thesis deals with automated creation of models based on BIM (Building Information Management) models in order to reduce this effort. Furthermore, the utilisation of created simulation models through the creation of BIM models is considered.

Tools for the bidirectional link between BIM and simulation models were created as part of the work. The considerations focus on the simulation format Modelica and the open BIM format IFC. The implemented tools are based on an analysis of the expressive capabilities of the selected formats (IFC and Modelica) and the information requirements of the selected simulation scenario in the two use cases BIM2SIM and SIM2BIM.

Knowledge graphs for the intermediate knowledge representation were used for the model transfer. This enables the application of semantic technologies already developed in IT for the translation between BIM and simulation. Furthermore, the knowledge graphs provide starting points for use cases that go far beyond the use cases analysed in this thesis.

Experimental proof was provided for both use cases considered that automated model creation works to an extent that it significantly saves time in practical application. Deliberately no artificial minimal examples were used for the experimental investigation, but models from real projects were used in the spirit of a 'field test'.

As a result of this thesis, tools are available that significantly simplify the integration of simulation into the design process:

- They enable the processing of individual design steps in the more suitable tool (CAD authoring software or BIM viewer or simulation environment) while at the same time ensuring the integrity of the content of both models involved.
- For the first time, it is possible to create a significant amount of Modelica models from BIM models for plant engineering.
- The creation of processable BIM models from Modelica models is demonstrated for the first time in this thesis.
- The investigations carried out in the thesis on the use of the IFC format for storing semantically rich diagrams can also generate added value in other contexts - independent of simulation.

## Danksagung

Diese Arbeit entstand 2019 bis 2024 in meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer IIS/EAS in Dresden. Sie wurde innerhalb der Projekte FMI4BIM (gefördert vom BMWI unter Kennzeichen: 03ET1603A) und iECO (gefördert vom BMWK 68GX21011D) erarbeitet. Weiterhin erhielt ich eine Förderung der Fraunhofer Gesellschaft im sog. Talenta-Programm. Die ersten Ansätze meiner Dissertation entstanden in den Jahren 2009 bis 2014 in meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung der TU Dresden. In dieser Zeit erhielt ich zusätzlich ein Promotionsstipendium der Stiftung der deutschen Wirtschaft. Ich bedanke mich bei den Fördermittelgebern für die Möglichkeit diese Arbeit zu erstellen. Mein Dank geht auch an meine Vorgesetzten Dr. Jan Bräunig und Dr. Dirk Mayer für das Schaffen der passenden Rahmenbedingungen.

Die regelmäßigen Konsultationen in den letzten vier Jahren mit Prof. Karsten Menzel am Institut für Bauinformatik und Dr. Dirk Mayer am Fraunhofer IIS/EAS waren wichtig für den Fortschritt dieser Arbeit. Der fachliche Austausch mit Dr. Andreas Wilde, Herve Pruvost hat mich stets bereichert. Jens Kaiser danke ich herzlich für das umfangreiche und akribische Feedback zur ersten Fassung der Arbeit.

Prof. Clemens Felsmann und Prof. Joaquin Diaz danke ich für die Erstellung der Gutachten und die spannenden Fragen bei der Verteidigung und im Vorfeld. Professorin Birgit Beckmann danke ich für die Übernahme des Vorsitz der Kommission verbunden mit dem Schaffen einer freundlich-produktiven Atmosphäre.

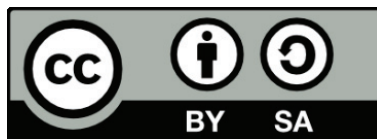
Mein persönlicher Dank geht an meine Eltern, Christian, Nadine, Basti und Verena für die Korrekturhinweise zur finalen Fassung dieser Arbeit und die jahrelange Begleitung dieses Projekts. Meinem Mann Robert danke ich für die praktische und mentale Unterstützung und für das Rücken-Frei-Halten in zwei Promotionsphasen.

---

## Lizenz

Eine wesentliche Voraussetzung für die erzielten Ergebnisse waren die zahlreichen open source Software-Tools, die ich verwenden konnte. Ich bedanke mich bei deren Autoren und Institutionen für die Bereitstellung. Eine Auflistung findet sich in Tab. 54 auf S. 198. Durch die Bereitstellung meiner Arbeit und des zugehörigen Quellcodes unter einer offenen Lizenz können nachfolgende Wissenschaftler und praktisch Interessierte hoffentlich weitere Bausteine zur BIM-basierten Planung energieeffizienter Gebäude beitragen.

Dieses Werk mit dem Titel „Simulation von Gebäude-Anlagentechnik in der BIM-basierten Planung energieeffizienter Gebäude“ steht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 (Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International)<sup>2</sup>.



Die digitale Version dieser Arbeit ist unter folgender DOI verfügbar:  
<https://doi.org/10.25368/2025.008>.



Die Erstveröffentlichung erfolgte 2025 bei TUDpress/THELEM unter der ISBN 978-3-95908-820-6 als Heft 23 in der Schriftenreihe „Berichte des Instituts für Bauinformatik“.

---

<sup>2</sup> <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

# Ausführliches Inhaltsverzeichnis

Kurzinhaltsverzeichnis.....	2
Kurzzusammenfassung.....	4
English Abstract.....	5
Danksagung.....	6
Lizenz.....	7
Ausführliches Inhaltsverzeichnis .....	8
Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	16
Verzeichnis von Quelltext- und sonstigen Dateiausschnitten.....	18
Abkürzungsverzeichnis.....	20
Glossar.....	21
1 Motivation, Stand von Wissenschaft und Technik .....	27
1.1 Motivation .....	28
1.1.1 Gebäude im Kontext des Klimawandels.....	28
1.1.2 Planungsprozess der technischen Gebäudeausrüstung .....	29
1.1.3 Rolle von BIM .....	35
1.1.4 Simulieren im Planungsprozess .....	37
1.1.4.1 Anwendungsfälle .....	37
1.1.4.2 Mehrwerte.....	37
1.1.4.3 Hemmnisse .....	38
1.2 Status Quo BIM.....	39
1.2.1 Normung .....	40
1.2.1.1 Datenstandards .....	40
1.2.1.2 Modellstandards.....	41
1.2.1.3 Methoden- und Managementstandards .....	43
1.2.2 Softwarewerkzeuge für die Bearbeitung von IFC-Modellen.....	43
1.2.2.1 Systematisierung der Werkzeuge .....	43
1.2.2.2 IFC-Bibliotheken.....	44
1.2.2.3 IFC-Viewer.....	45
1.2.3 Forschung.....	46
1.2.3.1 Multimodelle, (distributed) Digital Twin.....	46
1.2.3.2 BIM und KI .....	47
1.2.3.3 Ontologien im Bereich Anlagentechnik, Regelungstechnik, Messdaten ..	48
1.3 Status Quo der Simulation in der Gebäudeenergiedomäne.....	50
1.3.1 Arten von Simulationsverfahren .....	50
1.3.2 Simulationswerkzeuge .....	51
1.3.3 Forschung.....	53
1.4 Status Quo des Zusammenwirkens von BIM und Simulation .....	54
1.4.1 BIM2SIM.....	54
1.4.2 SIM2BIM.....	56
1.4.3 Ontologien für Modelica-Modelle .....	56
1.5 Forschungsbedarf, Ableitung der Aufgabenstellung .....	57
1.5.1 UseCases .....	58

---

1.5.2	Thesen .....	59
1.6	Gliederung dieser Arbeit .....	60
2	Methodische und Technische Grundlagen.....	61
2.1	IFC.....	62
2.1.1	Allgemeines .....	62
2.1.2	IFC-Datenschemata.....	62
2.1.3	IFC-STEP-Dateien .....	65
2.1.4	Wesentliche abstrakte Entitäten zur Datenverwaltung .....	65
2.1.4.1	IfcRoot .....	65
2.1.4.2	IfcObject .....	66
2.1.4.3	IfcProduct .....	66
2.1.4.4	IfcElement.....	67
2.1.5	Entitäten mit physikalischer Entsprechung .....	67
2.1.5.1	Bauteile.....	67
2.1.5.2	Anlagentechnik.....	68
2.1.6	Typisierung und Klassifizierung von Objekten .....	68
2.1.7	Zuordnung von Eigenschaften zu Objekten .....	70
2.1.8	Versionierung mittels IFC-Konstrukten.....	71
2.1.8.1	GlobalID .....	71
2.1.8.2	IfcOwnerHistory .....	71
2.1.8.3	Darstellung eines idealtypischen Änderungsworkflows mit Hilfe der IfcOwnerHistory .....	72
2.1.9	Strukturierung mittels IFC.....	74
2.1.9.1	Anlagenstrukturen in IFC.....	74
2.1.9.2	Räumliche Gebäudestrukturen und IfcSpace .....	74
2.1.9.3	Gruppierung von Elementen .....	78
2.1.9.3.1	Repräsentation von Heizkreisen im IFC .....	79
2.1.10	Geometriedarstellung in IFC.....	80
2.1.10.1	Darstellungskontexte.....	80
2.1.10.2	Repräsentationen .....	80
2.1.10.3	Platzierung.....	82
2.2	Modelica.....	82
2.2.1	Überblick.....	82
2.2.2	Sprachspezifikation.....	83
2.2.2.1	Klassen.....	83
2.2.2.2	Komponenten.....	84
2.2.2.3	Konnektoren .....	84
2.2.2.4	Zuordnung von Eigenschaften zu Modelica-Objekten .....	85
2.2.3	Simulationswerkzeuge.....	86
2.2.4	Model-Layer.....	87
2.2.5	Ablauf der Simulation .....	89
2.2.6	Bibliotheken.....	90
2.2.6.1	MSL.....	90
2.2.6.2	IBPSA .....	90
2.3	Semantische Technologien.....	93

---

2.3.1	Begriffe .....	93
2.3.2	Wissensgraphen .....	93
2.3.2.1	Erläuterung des Konzepts .....	93
2.3.2.2	Syntax .....	94
2.3.2.3	Inhalte .....	95
2.3.2.4	Abgrenzung zu alternativen Implementierungen .....	95
2.3.2.5	Triplestores .....	95
2.3.2.6	Abfrage und Manipulation von KG mit SPARQL .....	95
2.3.2.7	Einordnung verwandter Begriffe .....	96
2.3.3	Ontologien .....	97
2.3.3.1	Begriff Ontologie .....	97
2.3.3.2	Basisontologien des W3C .....	97
2.3.3.3	OWL und Reasoning .....	98
2.3.3.4	Domänen-Ontologien .....	99
2.3.3.5	Abgrenzung Ontologie und Wissensgraph .....	99
2.3.4	Tools zum Handling von Wissensgraphen .....	100
2.3.4.1	Apache Jena .....	100
2.3.4.2	Protege .....	100
2.3.4.3	Rdflib .....	100
2.3.4.4	Owready2 .....	100
3	Methodischer Ansatz .....	101
3.1	Lösungsarchitektur des MO-x-IFC-Toolset .....	102
3.2	Vorteile durch die Verwendung von Wissensgraphen .....	103
3.3	Anforderungen an das zu entwickelnde Toolset .....	105
3.4	Überblick über die MO-x-IFC-Konverter .....	105
3.5	Schematizer (Konverter 2) .....	108
3.5.1	Anforderungen / Voraussetzungen der IFC-Files .....	108
3.5.2	Anforderungen aus dem Handling mit Modelica-Tools .....	111
3.5.3	Vereinfachungsalgorithmus .....	111
3.5.4	2D-Platzierung .....	112
3.5.4.1	Anforderungen .....	112
3.5.4.2	Grundformen von Graph-Darstellungen .....	113
3.5.4.3	Gerichtete und ungerichtete Graphen .....	113
3.5.4.4	Layout-Algorithmen .....	114
3.6	MoOnt Modelica-Ontologie .....	115
3.7	Library-Ontologien .....	118
3.8	SemTran Semantic Translator (Konverter 4) .....	120
3.8.1	Allgemeines .....	120
3.8.2	Teilschritte .....	121
3.8.3	Vorteile des Semantic Reasoning .....	122
3.8.4	IFC – Modelica – Alignment .....	122
3.8.4.1	Allgemeines .....	122
3.8.4.2	Problemklassen bei Zuordnungen .....	123
3.8.4.3	Alignment IFC-AixLib für hydraulische Komponenten .....	124
3.8.4.4	IFC-IBPSA-Wrapper .....	126

3.9	TTL2MO (Konverter 5) .....	127
3.10	MoTTL-Transcriptor (Konverter 7) .....	128
3.11	ProTran Procedural Translator (Konverter 9) .....	132
3.12	Voluminizer (Konverter 10) .....	133
4	Implementierung eines Toolsets für die bidirektionale Übersetzung mittels Semantic Web 135	
4.1	Anforderungen an die Implementierung .....	136
4.2	Übersicht über die Konverter des MO-x-IFC-Toolsets .....	136
4.3	Details zu den einzelnen Convertern MOXIK .....	138
4.3.1	IFC-seitige Voraussetzungen herstellen (Schritt 1) .....	138
4.3.1.1	Umwandlung IFC2x3 in IFC4 .....	138
4.3.1.2	Korrektur der Klassen und Typen .....	138
4.3.1.3	Nachpflege fehlender Verbindungen .....	139
4.3.1.4	Vergabe von Port-Namen .....	139
4.3.1.5	Korrektur Containment .....	139
4.3.1.6	Zuordnung zu Systemen .....	139
4.3.1.7	Vergeben von Namen .....	140
4.3.1.8	Verkleinerung der IFC Modelle .....	140
4.3.1.9	Hilfsfunktionen .....	140
4.3.2	Schematizer - Abbildung der Vereinfachung in IFC (Konverter 2) .....	141
4.3.3	IFC2OWL Überführung IFC-STEP in Wissensgraph (Konverter 3) .....	142
4.3.4	SemTran Semantic Translator (Konverter 4) .....	143
4.3.4.1	Alignment .....	143
4.3.4.2	Reasoning .....	144
4.3.4.3	Enhance_mo .....	145
4.3.5	TTL2MO Erzeugung von Modelica aus ttl (Konverter 5) .....	147
4.3.6	MoTTL-Transcriptor (Konverter 7) .....	150
4.3.7	ProTran Procedural Translator (Konverter 8) .....	150
4.3.8	RDF2IFC Überführung IFC-OWL in IFC-STEP (Konverter 9) .....	153
4.3.9	Voluminizer: Erzeugen von Platzhaltergeometrien in IFC (Konverter 10) .....	153
5	Experimente .....	155
5.1	UseCase 1: BIM2SIM .....	156
5.1.1	Überblick .....	156
5.1.2	Demonstrator Serverkreis .....	156
5.1.3	Erprobung .....	158
5.1.3.1	Schritt 1: Vorbereitung .....	158
5.1.3.2	Konverter 2 Schematizer .....	164
5.1.3.3	Konverter 3 IFC2RDF .....	169
5.1.3.4	Konverter 4 Semantic Translator .....	169
5.1.3.5	Konverter 5 TTL2MO .....	172
5.1.3.6	Schritt 6: Überführung des Strukturmodells in ein rechenfähiges Simulationsmodell .....	174
5.1.4	Auswertung .....	177
5.2	UseCase 2: SIM2BIM .....	178
5.2.1	Überblick .....	178

## Verzeichnisse

5.2.2	Demonstrator Versuchsstand EAS .....	179
5.2.3	Erprobung .....	180
5.2.3.1	MoTTL-Transcriptor .....	180
5.2.3.2	Procedural Translator .....	181
5.2.3.3	RDF2IFC.....	184
5.2.3.4	Voluminizer .....	184
5.2.4	Auswertung.....	185
5.3	Vergleichende Auswertung zwischen Semantic und Procedural Translation.....	185
6	Schlussfolgerungen und kritische Bewertung .....	187
6.1	Prüfung und Diskussion der Thesen .....	188
6.2	Limitationen.....	189
6.2.1	Grenzen der Methodik.....	189
6.2.2	Grenzen der vorliegenden Implementierung .....	189
6.3	Mehrwert gegenüber bestehenden Lösungen .....	189
6.3.1	Übersetzung BIM2SIM .....	189
6.3.2	Übersetzung SIM2BIM .....	190
6.4	Ausblick.....	190
6.4.1	Anknüpfungspunkt Wissensgraph .....	190
6.4.1.1	Planung Gebäudeautomation.....	190
6.4.1.2	Programmierung der Gebäudeautomation .....	191
6.4.1.3	Inbetriebnahme und Betrieb von TGA und GA.....	191
6.4.1.4	SIM2BRICK .....	191
6.4.1.5	Analyse von Simulationsbibliotheken .....	192
6.4.2	Übertragbarkeit auf andere Simulationsmodelle .....	192
6.4.3	Anwendung für die gekoppelte Simulation .....	192
6.4.4	Verbesserungsmöglichkeiten in Hinblick auf die Implementierung .....	192
6.4.5	Auswertung in Hinblick auf Round-Trip .....	193
6.4.6	Einordnung in dDTw-Konzept und Softwarearchitektur von iECO .....	194
	Verzeichnis verwendeter Software .....	198
	Verzeichnis der zitierten Normen .....	200
	Verzeichnis wissenschaftlicher Quellen .....	202
	Anhang .....	212
	Digitaler Anhang.....	212
	Handling von Wissensgraphen - Größenbegrenzungen.....	213
	Abbildungen Vereinfachung Graph im IFC .....	213



---

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Energieflussbild Deutschland 2022 – Angaben in Petajoule (PJ) .....	28
Abb. 2 Endenergieverbrauch (Haushalte+GHD) nach Anwendungszweck 2021 – Angaben in Petajoule (PJ) .....	28
Abb. 3 CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland .....	29
Abb. 4 Überblick: Teilprozesse und Austauschdokumente im Planungsprozess .....	30
Abb. 5 beispielhafter Ausschnitt aus einem Strangschema .....	31
Abb. 6 Planungsprozess Netzplanung: Modelle und Dokumente im Planungsprozess .....	32
Abb. 7 beispielhafte Darstellung von Heizkreisen im Schaltschema .....	33
Abb. 8 Planungsprozess Zentralplanung .....	34
Abb. 9 McLeamy-Kurve .....	36
Abb. 10 Vergleich des Kommunikationsablaufes nach traditioneller Planung und Planung nach der BIM-Methode .....	47
Abb. 11 Einordnung von Ontologien in Künstliche Intelligenz (KI) .....	48
Abb. 12 Szenarien der Thermischen/Thermohydraulischen Simulation in der Planungsphase (BauSIM2020) .....	51
Abb. 13 Übersicht zu den technologischen Kernbestandteilen und den UseCases dieser Arbeit ..	59
Abb. 14 Klassenhierarchie von IfcProduct .....	67
Abb. 15 Bauteile - definierte Entitäten aus dem Schema IfcProductExtension .....	68
Abb. 16 definierte Anlagentechnische Elemente aus dem Schema IfcProductExtension .....	69
Abb. 17 ausgewählte Entitäten in der IFC-Klassenhierarchie .....	77
Abb. 18 Strukturierung der Räume eines Modell nach unterschiedlichen Kriterien (Screenshot aus KIT-Viewer) .....	78
Abb. 19 Subklassen und Superklasse von IfcSystem .....	78
Abb. 20 Auswahl der Darstellungskontexte im FZK-Viewer .....	80
Abb. 21 Gegenüberstellung Originalgeometrie und BoundingBox .....	82
Abb. 22 Funktionsumfang von Modelica-Tools .....	86
Abb. 23 Benutzeroberfläche des Tools Dymola 2022 mit dem Arbeitsbereich für die Modellerstellung .....	87
Abb. 24 Diagram Layer eines Modelica-Modells (Ausschnitt) .....	88
Abb. 25 Icon und Diagramm Layer eines Beispielsmodells (AixLib.Fluid.HeatPumps.HeatPump) ...	89
Abb. 26 Prozessschritte und Zwischenergebnisse bei der Bearbeitung eines Executable Modelica- Modells .....	90
Abb. 27 Packages in der MSL .....	90
Abb. 28 Package Struktur der IBPSA Libraries .....	91
Abb. 29 Wissenspyramide, ergänzt nach (Herrmann 2012) .....	93
Abb. 30 Linked Open Data Cloud, Bildquelle: <a href="https://lod-cloud.net/versions/">https://lod-cloud.net/versions/</a> .....	96
Abb. 31 Wissensgraphen-Stapel für die Domäne Modelica (links) und IFC (rechts) (orange: Domänen-Ontologien, gelb: Instanz-KG) .....	100
Abb. 32 Status Quo, klassischer und semantischer Lösungsansatz .....	102
Abb. 33 Zusammenwirken von MO-x-IFC-Konverter (MOXIK) für die UC1 und UC2 zur Überführung zwischen IFC und Modelica .....	103
Abb. 34 Verknüpfung von Informationen zu Wissen mit Hilfe von Wissensgraphen .....	104
Abb. 35 beteiligte Wissensgraphen für die bidirektionale Übersetzung .....	106

Abb. 36 Klassendiagramm von wsm, Bildquelle: angepasst Darstellung basierend auf (Wolfram Research 2014) .....	116
Abb. 37 UML Diagramm MoOnt.....	118
Abb. 38 Wissensgraphen-Stapel und zugehöriger Stapel von Modelica Bibliotheken .....	119
Abb. 39 Übersicht zum Translate Schritt zwischen Modelica und IFC .....	122
Abb. 40 Arten von Zuordnungen im Allgemeinen.....	123
Abb. 41 Screenshot der Wrapper-Bibliothek .....	127
Abb. 42 Screenshot der Parameter der IfcPump-Klasse in der Wrapper-Bibliothek .....	127
Abb. 43 Ablauf auf schematischer und Instanz-Ebene.....	128
Abb. 44 Gegenüberstellung eines für die Massenermittlung ungeeignet und geeignet aufbereiteten Modelica-Modells.....	132
Abb. 45 Gegenüberstellung „Semantic Translation“ zu „Procedural Translation“ für UC4 SIM2BIM BRICK .....	132
Abb. 46 Komponenten und Wissensgraphen – vorhandene und neue Implementierung .....	136
Abb. 47 Kälteschema Neubau EAS: Lesbarkeit erst ab Blatthöhe 840 (A0-Querformat und in Überbreite) .....	141
Abb. 48 Konverter für BIM2SIM .....	156
Abb. 49 IFC-Modell der Architektur des Beispielgebäudes .....	157
Abb. 50 Ausschnitt aus dem Schaltschema des Kaltwassersystems im Gebäude, vollständiges Schema in Abb. 47 .....	157
Abb. 51 Konstruktionsmodell des Kaltwassersystems (das betrachtete Teilsystem in rot).....	158
Abb. 52 Schemaausschnitt: Verteilerabgang Serverkreis (Quelle: Klemm) .....	158
Abb. 53 Ursprungsgraph .....	160
Abb. 54 Komponenten im DG-Modell, die im Originalmodell ohne Verbindung zur Nachbarkomponenten ausgespielt wurden .....	161
Abb. 55 Zuordnungen aller IfcProduct des fertig aufbereiteten Modell (Screenshot aus simpleBIM) .....	162
Abb. 56 Ableitung des Funktionsmodells aus dem Konstruktionsmodell am Beispiel des Serverkreises (Darstellung mit matplotlib).....	165
Abb. 57 IfcGroup „replacement_12“ visualisiert in simpleBIM .....	166
Abb. 58 Gegenüberstellung der 3D-Geometrie .....	166
Abb. 59 Geometrie des Modells, welches nur noch die berechnungsrelevanten Bauteile enthält .....	167
Abb. 60 Anzahl der Knoten in den verschiedenen Verarbeitungsstufen des Graphen .....	167
Abb. 61 schematische Darstellung des Serverkreis' im IFC.....	169
Abb. 62 Diagram Layer des erzeugten Modells (Screenshot aus Dymola).....	173
Abb. 63 Ausschnitt aus Abb. 51, rot markiert replacement_045 (Flowsegment(163)) .....	174
Abb. 64 globale Parameter des erzeugten Modells (Screenshot aus Dymola) .....	176
Abb. 65 Parameter einer Modellkomponente (Screenshot aus Dymola) .....	176
Abb. 66 Diagram Layer des nachbearbeiteten Modells (entspricht XYZ.mo in Abb. 33 und Tab. 29) .....	177
Abb. 67 Zusammenspiel der Komponenten für den UseCase SIM2BIM .....	178
Abb. 68 Demonstrator Versuchsstand EAS (entspricht XYZ.mo in Abb. 33 und Tab. 29) .....	180
Abb. 69 angereichertes 3D-IFC-Modell des HIL-Prüfstands (Screenshots aus dem KIT-Viewer) ..	185
Abb. 70 Softwarekomponenten für Round-Trip BIM2SIM2BIM .....	195
Abb. 71 Architektur dDTw auf GAIA-X (Bildquelle: Michael Polter nach (Strnadl u. a. 2024)) .....	196

---

Abb. 72 Vereinfachung für System RK .....	214
Abb. 73 Vereinfachung für System Erzeugung.....	215
Abb. 74 Vereinfachung für System ULK .....	216
Abb. 75 Vereinfachung für System BKA.....	217
Abb. 76 Vereinfachung für System RLT.....	218

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Normen BIM Datenstandards.....	40
Tab. 2 BIM Modell-, Methoden- und Managementstandards .....	42
Tab. 3 Übersicht BIM-Tools .....	44
Tab. 4 IFC-Bibliotheken .....	45
Tab. 5 Marktübersicht IFC-Viewer .....	46
Tab. 6 Vergleich von IFC-Viewern anhand ausgewählter Softwarefunktionen.....	46
Tab. 7 Übersicht Simulatoren.....	52
Tab. 8 Übersicht Modelica-Bibliotheken für die Gebäudedomäne.....	53
Tab. 9 wissenschaftliche Veröffentlichung im Bereich BIM2SIM.....	54
Tab. 10 wissenschaftliche Veröffentlichungen zu IFC2Modelica .....	56
Tab. 11 Mächtigkeit der 38 Datenschemata in IFC 4.0.2.1 .....	63
Tab. 12 Ausgewählte Types und Entities aus ausgewählten Datenschemata.....	64
Tab. 13 Attribute von IFCSpace.....	70
Tab. 14 Attribute von IfcOwnerHistory .....	72
Tab. 15 Attribute von IfcWall .....	73
Tab. 16 Attribute von IfcSpatialStructureElement .....	75
Tab. 17 Beispiel für einfache räumliche Struktur in IFC .....	75
Tab. 18 Beispiel für komplexe räumliche Struktur in IFC .....	76
Tab. 19 Möglichkeiten zur Repräsentation von Heizkreisen in IFC .....	79
Tab. 20 Zuordnung von IfcRepresentationContext, RepresentationIdentifier, RepresentationType und IfcRepresentationItems zu verschiedenen Darstellungsformen .....	81
Tab. 21 Restriktionen wichtiger Klassen in Modelica.....	84
Tab. 22 wichtige Modelica Konnektoren .....	85
Tab. 23 Funktionsumfang von Modelica-Tools im Vergleich .....	86
Tab. 24 Gegenüberstellung der IBPSA-Bibliotheken .....	92
Tab. 25 Minimalbeispiel für eine Gebäudeontologie .....	97
Tab. 26 Basisontologien .....	97
Tab. 27 Reasoner – ergänzt nach (Noll 2013; „OWL Implementations“ 2020).....	98
Tab. 28 OWL Profile (übersetzt nach („OWL 2 Referenz“ 2012; „OWL Referenz“ 2004).....	99
Tab. 29 Zwischenstände bei Anwendung von MO-x-IFC für die UC1 und UC2 .....	106
Tab. 30 Übersicht MO-x-IFC-Konverter (MOXIK) .....	108
Tab. 31 unterstützte Klassen und predefined Types im IFC-AixLib-Mapping.....	109
Tab. 32 Anforderungen an IFC-Files, die mit MO-x-IFC bearbeitet werden sollen .....	110
Tab. 33 Graphen nach (Baedung 2020).....	113
Tab. 34 open-source Layout-Algorithmen für Graphen .....	115
Tab. 35 Gegenüberstellung Ontologien im Bereich IFC und Modelica .....	119
Tab. 36 Kennzahlen der entwickelten Ontologien .....	120
Tab. 37 Problemklassen in Bezug auf Übersetzung .....	124
Tab. 38 Mapping für hydraulische Komponenten.....	125
Tab. 39 Mapping-Tabelle IFC Modelica für Komponenten von Lüftungsanlagen .....	126
Tab. 40 Übersicht MO-x-IFC-Konverter (MOXIK) .....	137
Tab. 41 Skalierung und Platzierung der verschiedenen Layouts.....	142
Tab. 42 Erläuterung der Klassen im Alignment .....	144

---

Tab. 43 Parameter der verwendeten AixLib Komponenten .....	149
Tab. 44 zusammengehörige Versionen von MoOnt und MoTTL-Transcriptor .....	150
Tab. 45 Platzhalter-Geometrien .....	154
Tab. 46 Bezeichnung der Zustände im Experiment zu UC1 BIM2SIM .....	156
Tab. 47 Aufbereitungsschritte für das Beispielfile .....	161
Tab. 48 Effekt der Größenreduzierung der IFC-STEP-Dateien am Beispiel EAS KLT (für alle Teilsysteme) .....	163
Tab. 49 Anzahl der Knoten in den verschiedenen Verarbeitungsstufen des Graphen .....	168
Tab. 50 Kennzahlen beteiligte Wissensgraphen (Beispiel Serverkreis) .....	170
Tab. 51 Laufzeiten Reasoning .....	170
Tab. 52 Nachbearbeitung der MO-Datei .....	174
Tab. 53 Bezeichnung der Zustände im Experiment zu UC1 BIM2SIM .....	179
Tab. 54 FLOSS-Software .....	198
Tab. 55 kommerzielle Software .....	199
Tab. 56 zitierte Normen .....	200
Tab. 57 Zusammenstellung der zur Arbeit gehörigen Quelltexte, Beispieldateien und Binaries .	212
Tab. 58 Handling großer Textdateien – Grenzen der Werkzeuge .....	213

## Verzeichnis von Quelltext- und sonstigen Dateiausschnitten

Lis. 1 Ausschnitt aus der DATA-Sektion (DATA section) einer IFC-STEP-Datei .....	65
Lis. 2 Drei Varianten einen Raum innerhalb von IFC zu klassifizieren .....	70
Lis. 3 IfcChangeActionEnum .....	72
Lis. 4 Beispielhafte Entitäten für die Erstellung einer OwnerHistory .....	72
Lis. 5 Triple als Pseudocode .....	93
Lis. 6 Beispiele für Instanz- (orange) und Schemawissen (blau) als Pseudocode .....	94
Lis. 7 gültiges RDF-Tripel serialisiert als RDF/XML (entspricht Tripel 5 aus Lis. 6) .....	94
Lis. 8 RDF-Tripel serialisiert als Turtle-Syntax (entspricht Tripel 5 aus Lis. 6) .....	95
Lis. 9 Beispieltriple aus A-Box, T-Box und der Verbindung von A- und T-Box in Turtle-Syntax Orange: Instanzwissen (A-Box), blau: Schemawissen (T-Box), pink: Verbindung .....	95
Lis. 10 Beispiel für eine SPARQL query .....	95
Lis. 11 Beispiel für ein PropertyChainAxiom .....	96
Lis. 12 Beispiel Reasoning .....	98
Lis. 13 Klassendefinition der Wrapper-Komponente für IfcPump .....	127
Lis. 14 Ausschnitt aus der Transkription der AixLib in einen KG (grün: statement aus MoOnt, blau: statements aus AixLib) .....	129
Lis. 15 Vergleich eines Ausschnitts aus dem Carnot_y-Wärmepumpenmodell (Bibliothekskomponente) als natives Modelica file (oben) und als Mo-KG (unten) turtle syntax. ....	130
Lis. 16 Vergleich eines Ausschnitts aus dem heatPumpPlant (Modelica Executable) als natives Modelica file (oben) und als Mo-KG (unten) turtle syntax .....	131
Lis. 17 Beispiel Header-Abschnitt einer IFC-STEP-Datei .....	138
Lis. 18 Ausschnitt aus Beispiel-IFC B25.ifc (STEP-Syntax) .....	142
Lis. 19 Ausschnitt aus Beispiel IFC als KG B25.ttl (Turtle-Syntax), dieser umfasst einen Teil der Informationen in Lis. 18 .....	143
Lis. 20 Aufruf der IFctoRDF Kommandozeilenanwendung .....	143
Lis. 21 Ausschnitt aus Alignment zur Zuordnung von Umwälzpumpen in IFC und AixLib (ttl-Syntax) .....	144
Lis. 22 Ausgewählte Triple aus XYZ_ifc.ttl gemäß Tab. 46 .....	144
Lis. 23 Semantic Reasoning .....	145
Lis. 24 SPARQL query für die Ergänzung von Informationen im Mo-KG .....	146
Lis. 25 Codeausschnitt zur Übertragung der Positionsinformationen aus IFC-KG in Mo-KG .....	146
Lis. 26 Codeausschnitt zur Übertragung der connections aus IFC-KG in Mo-KG .....	147
Lis. 27 TTL2MO Teil 1: Komponenten finden und erzeugen (Parametrierung in orange) .....	148
Lis. 28 TTL2MO Teil 2: Finden und Erzeugen von Verbindungen .....	149
Lis. 29 ProTran: wesentliche Bestandteile (nur ausschnittsweise wiedergegeben) .....	151
Lis. 30 ProTran: Funktionen zur Erzeugung der Klassenzuordnungen (Ersatz für das Reasoning) .....	152
Lis. 31 Ausschnitt aus der Library-Ontologie einer benutzerdefinierten Modelica-Bibliothek .....	153
Lis. 32 Aufruf der IfcOWL-to-IfcSTEP Kommandozeilenanwendung .....	153
Lis. 33 Aufruf des Konverter 3 IFC2RDF .....	169
Lis. 34 Ausschnitt aus geschlussfolgerten Triple KG XYZ_classes_mo.ttl in Turtle-Syntax .....	171
Lis. 35 Ausschnitt aus Beispiel moont als KG XYZ_mo.ttl (Turtle-Syntax), farblich hervorgehoben sind die Ergänzungen zu Lis. 34 .....	172

---

Lis. 36 Ausschnitt aus HIL\_mo.ttl (Imports farbig hervorgehoben) (entspricht XYZ\_mo.ttl in Abb. 33 und Tab. 29) ..... 181

Lis. 37 Auszug aus der HIL\_ifc.ttl (entspricht XYZ\_ifc.ttl in Abb. 33 und Tab. 29)..... 183

Lis. 38 Ausschnitt aus der HIL\_F.ifc (entspricht XYZ\_F.ifc in Abb. 33 und Tab. 29)..... 184

## Abkürzungsverzeichnis

Als Begriff verwendete Abkürzungen finden sich im Glossar

Abkürzung	Bedeutung
AIA	Auftraggeber-Informationen-Anforderungen
Aix	Namespacekürzel
AixLib	Eigennamen für die Modelica Library
AS	Anlagensimulation
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BOT	Building Topology Ontology
BRICK	Ontologie
bS	buildingSMART (Verein)
CDE	Common Data Environment
CEN	Comité Européen de Normalisation, Europäisches Komitee für Normung
CFD	Computational Fluid Dynamics
DAE	Differential algebraic and discrete equations
DIN	Deutsches Institut für Normung
ESIM	Ontologie
FLOSS	Free/Libre and Open Source Software
GA	Gebäudeautomation
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GS	Gebäudesimulation
HLK	Heizung, Lüftung, Kälte
HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen
i.d.R.	In der Regel
IFC	Industrial Foundation Classes
IFC-KG	IFC-Knowledge Graph
insb.	Insbesondere
ISO	International Standardisation Organisation
KB	Knowledge Base
KG	Knowledge Graph
MBL	Modelica Buildings Library
MDLG	Modelica-Diagram-Layer-Größeneinheiten
MLS	Modelica Language Specification
mo	Dateiendung von Modelica-Dateien
Mo-KG	Modelica-Knowledge Graph
MoC	Model of Computation
MO-x-IFC	Gewähltes Kürzel für den entwickelten Workflow
MOXIK	MO-x-IFC-Komponente, entspricht PS
MSL	Modelica Standard Library
owl, OWL	Web Ontology Language
PPP	Pre- und Postprocessing
PS	Prozessschritt
RDF	Resource Description Framework
RDFS rdfs	Namespacekürzel, Resource Description Framework Schema
red	Index für „reduziert“
sog.	sogenannt
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
SWT	Semantic Web Technologies
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TTL, ttl	Turtle
UC	UseCase
VDI	Verein deutscher Ingenieur
W3C	World Wide Web Consortium
WG	Wissensgraph, auch KG
xyz	Platzhalter für Bezeichnung des Beispielmodells
ZS	Zustand, Zwischenschritt, Zwischenstand



# Glossar

Vorbemerkung zur sprachlichen Darstellung:

- Informationen aus dem IFC-Schema im Text: In der Regel werden keine Übersetzungen vorgenommen, sondern die Fachbegriffe aus dem Schema verwendet. i.d.R. werden dafür auch keine Übersetzungen angegeben, da dem Leser entsprechend Englischkenntnisse unterstellt werden und die Lesbarkeit somit besser wird. Die Begriffe werden *kursiv und mit einer grauen Unterlegung* hervorgehoben.
- Um die Zuordnung zu den englischsprachigen Referenzdokumenten zu erleichtern, werden im Folgenden die *englischen Begriffe* und *Eigennamen* innerhalb des deutschen Textes verwendet. Im Sinne der Lesbarkeit wird auf die Verwendung von Anführungszeichen verzichtet und stattdessen *Kursivsetzung* genutzt.

Begriff (Kontext)	Erläuterung und Verweise innerhalb dieser Tabelle	Verweis auf Einführungstexte*
<b>A-Box</b>	spezielle Art von →Wissensgraph, die →Instanzwissen enthält Synonym zu →Instanz-KG	2.3.3.5
<b>Alignment</b>	Ist eine spezielle Realisierung eines Mappings in Form eines Wissensgraphen Abgrenzung: Mapping, Zuordnung	1.2.3.2
<b>Anlagengraph</b>	Struktur aus Komponenten einer Anlage und den zugehörigen Verbindungen	S. 74
<b>Anlagensschema</b>	Synonym zu →Schema, , Überbegriff zu →Strang- und →Schaltschema	-
<b>Annotation</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einer Klasse in Modelica Abgrenzung: → parameter, → stringComment, → documentation string	2.2.2.4 S. 85
<b>Attribut</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einer Klasse im IFC-Standard Abgrenzung: → Property	2.1.7 S. 70
<b>Autorentool</b>		1.2.2.1
<b>Berechnungsmodell</b>	Spezialform eines →Funktionsmodells	35
<b>berechnungsrelevant</b>	Menge der Informationen, die für eine Berechnung nötig sind Im Falle einer Simulationsberechnung bedeutet berechnungsrelevant = →simulationsrelevant (beide Begriffe werden daher in dieser Arbeit synonym verwendet) Abgrenzung: nicht-berechnungsrelevant	-
<b>DataTypeProperty</b>	<i>Art eines Objekts</i> in RDF <b>Synonym zu Literal</b>	2.3.2.1
<b>documentation string</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einer Klasse in Modelica Begrifflichkeit aus MLS Synonym: →stringComment Abgrenzung: → parameter, → annotation	2.2.2.4 S. 85
<b>Domäne</b>	In dieser Arbeit wird unterschieden zwischen <ul style="list-style-type: none"> <li>- den beiden Fach-Domänen Modelica und IFC</li> <li>- sowie der semantischen Domäne im Gegensatz zur Domäne der nativen Dateiformate</li> </ul>	
<b>Eigenschaft</b>	Überbegriff zu → Attribut und → Property bzw. Quantity in der IFC-Domäne, sowie zu → Parameter, → annotation, → stringComment, → documentation string in der Modelica-Domäne	2.1.7 S. 70
<b>Eingabeparameter</b>	Für CLI, in dem Zusammenhang wird bewusst nicht der Begriff →Parameter verwendet	-
<b>Executable</b>	→Modelica-Executable	
<b>Funktionsmodell</b>	Wichtiges Modell in der Planung, enthält alle →strukturelevanten Bauteile Abgrenzung: →Konstruktionsmodell	34
<b>Gebäudeautomation</b>	Überbegriff zu Raum- und Anlagenautomation	-
<b>GlobalID</b>	Globally Unique Identifier für Ifc-Root-Objekte, →Identifikator in IFC-Modellen	2.1.4.1

## Verzeichnisse

Begriff (Kontext)	Erläuterung und Verweise innerhalb dieser Tabelle	Verweis auf Einführungstexte*
<b>Heizkreis</b>	Gruppe der Komponenten hinter einem Verteilerabgang → Kühlkreis	32
<b>IFC-Funktionsmodell</b>	Repräsentation eines Funktionsmodells im Format IFC	Tab. 29
<b>IFC-KG</b>	→ Zwischenstand des → MO-x-IFC-Workflows	Tab. 29
<b>IFC-Schaltschema</b>	Zweidimensionale Repräsentation des Funktionsmodells in IFC	S. 33
<b>IFC-Viewer</b>	Bestimmte Art eines Softwarewerkzeugs für die Handhabung von IFC-Modellen	1.2.2.1, 1.2.2.3
<b>IfcProperty</b>	Synonym zu → Property	-
<b>Identifikator</b>	Eineindeutig kennzeichnendes Merkmal in einer bestimmten Domäne z.B. → identifier und → GlobalID	-
<b>identifier</b>	→ Identifikator in Modelica-Modellen	2.2.2.2
<b>Information</b>	Abgrenzung zu → Wissen	2.3.1
<b>Instanz</b>	Begriff wird in der Arbeit auf 3 Arten benutzt, wenn Verwechslungsgefahr besteht, werden konkretere Begriffe verwendet 1. Liste von Instanzen in STEP-Files → STEP-Instanz 2. Instanzen von Klassen in Modelica bilden → Komponenten in Modelica-Modellen 3. bei der Unterscheidung zwischen den Wissensarten → Instanzwissen (A-Box) und → Schemawissen (T-Box) 4. <i>individuals</i> in einem Wissensgraph (rdf:type), im Gegensatz zu Klassen in einem Wissensgraph (rdf:subClassOf, rdf:equivalentClass)	-
<b>Instanz-Objekt</b>	Art von Objekten in der IFC-Domäne Gegenteil von → Type-Objekt	S. 64
<b>Instanz-KG</b> <b>Instanz-Graph</b>	Instanzwissen in Form eines → Wissensgraph Synonym zu → A-Box Abgrenzung: → Ontologie	-
<b>Instanzwissen</b>	→ Wissen über konkrete Zusammenhänge der realen Welt Kann auf vielerlei Art abgespeichert werden, z.B. als Foto, Messdaten in Excel, IFC-Modell, Modelica-Modell Abgrenzung: → Schemawissen	-
<b>Kind-Klasse</b>	Bestandteil einer Vererbungshierarchie, in Abgrenzung zur Eltern-Klasse	-
<b>Knowledge Graph (KG)</b>	Wird i.d.R. nicht verwendet, die Abkürzung KG hingegen schon Synonym: → Wissensgraph, → RDF-Wissensgraph	2.3.2.1
<b>Knowledge-Base (KB)</b>	Zusammenstellung mehrerer → Wissensgraphen Besteht aus → A-Box und → T-Box	2.3.3.5
<b>Komponente (Modelica-Modell)</b>	Im Kontext eines Modelica-Modells: Instanzen von Klassen in Modelica bilden <i>Komponenten</i> in Modelica-Modellen	2.2.2 S. 83
<b>Konstruktionsmodell</b>	Neben dem → Funktionsmodell wichtiges Modell in der Planung	34
<b>Konverter</b>	Bestandteile des → MO-x-IFC-Toolset	3.1
<b>Kühlkreis</b>	Analoges Konzept zu → Heizkreis in der Kühlung von Gebäuden	S. 32
<b>Library</b>	Softwarebibliothek In dieser Arbeit i.d.R. verwendet für → Modelica-Bibliotheken Ausnahme: auch für Python- oder Java-Bibliotheken	-
<b>Mapping</b>	Im Text hauptsächlich verwendet für den umgangssprachlichen Begriff „Zuordnung“ Abgrenzung: Alignment Synonym: Zuordnung	-
<b>Mapping-Tabelle</b>	Informationen bzgl. der Zuordnung von Entitäten in zwei Domänen	-
<b>maschinenlesbar</b>	Für die automatisierte Weiterverarbeitung gedachte Informationen, im Gegensatz zu <i>menschenlesbaren</i> Informationen	-
<b>Mo-KG</b>	→ Zwischenstand des → MO-x-IFC-Workflows	Tab. 29
<b>MO-x-IFC-Toolset</b>	Überbegriff über die in dieser Arbeit entwickelten Konverter	3.1
<b>MO-x-IFC-Workflow</b>	Arbeitsschritte, die mit dem → MO-x-IFC-Toolset unterstützt werden sollen	3.1

Begriff (Kontext)	Erläuterung und Verweise innerhalb dieser Tabelle	Verweis auf Einführungstexte*
<b>Modelica-Bibliothek</b>	Auch →Library	2.2.6
<b>Modelica-Executable</b>	Ausführbarer Simulationsmodell in Modelica	2.2.2.1
<b>Objekt</b>	Bestandteil eines →Anlagengraph im IFC-Modell (→Konstruktions- oder →Funktionsmodell) Hat ggf. ein Pendant im →Simulationsmodell	-
<b>Ontologie</b>	spezielle Art von →Wissensgraph, die →Schemawissen enthält Schemawissen in Form eines →Wissensgraph (vorher bezeichne ich es nicht als Ontologie, obwohl der Begriff das hergeben <u>würde</u> ) Abgrenzung: →Instanz-KG Synonym →T-Box	2.3.3.1
<b>Parameter</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einer Klasse in Modelica Abgrenzung: → annotation, → stringComment, → documentation string, → Eingabeparameter	2.2.2.4 S. 85
<b>predefinedType</b>	Attribut, welches viele Klassen im IFC-Schema tragen	2.1.4.2
<b>Procedural Translation</b>	Alternative zu →Semantic Translation	3.1
<b>Procedural Translator</b>	→Konverter im →MO-x-IFC-Toolset, welcher →Procedural Translation realisiert	3.1
<b>Property</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einem Objekt in IFC mit Hilfe der IfcRelDefinesByProperties-Relation Im Kontext OWL gibt es auch viele Begrifflichkeiten die „property“ enthalten (z.B. →PropertyChain, →DataTypeProperty, ObjectProperty), jedoch nicht das allein stehende Wort „Property“. An Textstellen wo Verwechslungsgefahr bestünde wird daher in Abgrenzung zur OWL Domäne →“IfcProperty“ statt „Property“ verwendet Abgrenzung: → Attribut Synonym: → IfcProperty	2.1.7 S. 70
<b>PropertyChain</b>	Beliebig lange Ketten von Eigenschaftszuordnungen in →Wissensgraphen	2.3.2.6
<b>RDF-Wissensgraph</b>	In dieser Arbeit synonym verwendet zu →Wissensgraph, da andere Wissensgraphen nicht behandelt werden	2.3.2.4
<b>Reasoner</b>	Software zum Schlussfolgern basierend auf OWL-Konstrukten	2.3.3.3
<b>Reasoning</b>	Deutsch: Schlussfolgern Begriff wird hier bewusst als englischer Term verwendet, um Verwechslungen mit dem umgangssprachlichen Wort auszuschließen	2.3.3.3
<b>Reasoning-Engine</b>	Nicht verwendet, → Reasoner	-
<b>Ressourcenentitäten</b>	Datenstrukturen aus dem resource layer in IFC, können nicht eigenständig existieren, sondern nur, wenn sie von anderen Entitäten referenziert werden	S. 62
<b>Schaltschema</b>	Austauschdokument zur Darstellung der Zentralplanung, wird ergänzt durch das →Strangschema derselben Anlage	S. 33
<b>Schema</b>	Synonym zu →Anlagenschema, Überbegriff zu →Strang- und →Schaltschema	-
<b>schemarelevant</b>	Menge der Informationen, die üblicherweise in einem Schema dargestellt werden. In Bezug auf die dargestellten Bauteile, betrifft es jene die Änderungen am Fluidstrom hervorrufen, die über einen konstanten Druckverlust hinausgehen, sowie sicherheitsrelevante und weitere Bauteile →Simulationsrelevant, →berechnungsrelevant, →strukturelevant	S. 35
<b>Schemawissen</b>	→Wissen über allgemeine Zusammenhänge der realen Welt Kann auf vielerlei Art existieren: z.B. das Wissen, dass Fenster aus Rahmen und Glas bestehen (ist auch so formuliert im IFC-Schema) Abgrenzung: →Instanzwissen	-
<b>Semantic Reasoning</b>	Synonym zu →Reasoning	2.3.3.3
<b>Semantic Translation</b>	Alternative zu →Procedural Translation	3.1
<b>Semantic Translator</b>	→Konverter im →MO-x-IFC-Toolset, welcher →Semantic Translation realisiert	3.1

## Verzeichnisse

Begriff (Kontext)	Erläuterung und Verweise innerhalb dieser Tabelle	Verweis auf Einführungstexte*
<b>shape</b>	Kombination aus Konnektoren und Parameter einer Modelica-Klasse	84
<b>Simulationskern</b>	Synonym: → Simulator	1.3.2
<b>Simulationsmodell</b>	Spezialform eines → Berechnungsmodells	35
<b>simulationsrelevant</b>	Menge der Informationen, die für eine Simulation nötig sind Simulation ist dabei eine Form der Berechnung, der Begriff wird daher in dieser Arbeit synonym zu → berechnungsrelevant verwendet	-
<b>Simulationsumgebung</b>	Enthält mehrere → Simulationswerkzeuge	2.2.3
<b>Simulationswerkzeug</b>	Überbegriff zu → Simulator, Benutzerschnittstelle, Modellbibliotheken	1.3.2, 2.2.3
<b>Simulator</b>	Das Simulationswerkzeug, welches die Simulation durchführt (der Ablauf einer Simulation wird in Abschnitt 2.2.5 beschrieben Synonym: Simulationskern	1.3.2
<b>Stand</b>	Begriff auf dem Kontext „Planungsprozess“ Arbeitsstand eines Modell Üblich ist auch die Verwendung der Begriffe „Version“ oder „data drop“	1.2
<b>STEP-Instanz</b>	Verwendung, wenn Abgrenzung zu anderen Nutzungen des Begriffs → Instanz nötig	2.1.2 S. 62
<b>Strangschema</b>	Austauschdokument zur Darstellung der Netzplanung, wird ergänzt durch das → Schaltschema derselben Anlage	S. 33
<b>stringComment</b>	Zuordnung einer → Eigenschaft zu einer Klasse in Modelica Begrifflichkeit aus moont Synonym: → documentation string Abgrenzung: → parameter, → annotation	2.2.2.4 S. 85
<b>Strukturmodell</b>	→ Zwischenstand des → MO-x-IFC-Workflows	Tab. 29
<b>strukturelevant</b>	Schnittmenge der → schemarelevanten Informationen mit den → berechnungs- bzw. → simulationsrelevanten Informationen	S. 35
<b>Submodell</b>	Begriff aus der Modelica-Domäne zur Beschreibung der Verschachtelung von Modellen, Submodelle sind → Komponenten von → Supermodellen	-
<b>Supermodell</b>	Abgrenzung zu → Submodell	-
<b>T-Box</b>	Synonym zu → Ontologie	2.3.3.1
<b>Toolset</b>	→ MO-x-IFC-Toolset	-
<b>Transkription</b>	Prozess der Übertragung von nativen Datenformaten in Wissensgraph Zugehöriges Werkzeug heißt allgemein → Transkriptor	3.1
<b>Transkriptor</b>	Allgemeines Bezeichnung eines Werkzeugs zur → Transkription Konkrete Tools in dieser Arbeit <i>MoTTL-Transcriptor</i> <i>RDF2IFC</i> <i>IFC2RDF</i> <i>MoTTL-Rescriptor</i>	3.1
<b>Translation</b>	Prozessschritt im → MO-x-IFC-Toolset, kann als → Semantic oder → Procedural Translation realisiert werden	108
<b>Translator</b>	Oberbegriff über → Konverter im → MO-x-IFC-Toolset, welche die → Übersetzung zwischen zwei Domänen realisieren	3.1
<b>Type-Objekt</b>	Art von Objekten in der IFC-Domäne Gegenteil von → Instanz-Objekt	S. 64
<b>type</b>	Bezeichnung für das Konzept <i>Klasse</i> in Modelica	2.2.2.1
<b>Übersetzung</b>	→ Übertragung zwischen in zwei Domänen	-
<b>Übertragung</b>	Oberbegriff zu → Transkription und → Translation	-
<b>Updater</b>	Softwarekomponente zum zusammenführen von zwei Modellständen	6.4.5
<b>UseCase</b>	Anwendungsfall für den Einsatz des MO-x-IFC-Toolset	-
<b>Wissen</b>	Wissen entsteht durch Verknüpfung von → Informationen Es wird unterschieden in → Schemawissen und → Instanzwissen	2.3.1

Begriff (Kontext)	Erläuterung und Verweise innerhalb dieser Tabelle	Verweis auf Einführungstexte*
<b>Wissensgraphen (KG)</b>	Sehr allgemeines Datenmodell/Art der Datenspeicherung Wird in dieser Arbeit immer in Form von Files gespeichert Zugehöriger Standard: RDF, verwendete Serialisierung TTL Inhalt eines KG kann → Schemawissen (dann wird der KG als → Ontologie bezeichnet) oder → Instanzwissen sein (dann wird der KG als → Instanz-KG bezeichnet) Mehrere KG bilden eine → Knowledge-Base Synonym: → RDF-Wissensgraph	2.3.2.1
<b>Wrapper-Bibliothek</b>	Hilfskonstrukt zur eindeutigen Zuordnung zwischen Modelica und IFC, erstellt in der Modelica-Domäne	3.8.4.4
<b>Zuordnung</b>	Synonym zu → Mapping	-

\* Abschnitt oder Seite



# 1 Motivation, Stand von Wissenschaft und Technik

Im diesem Kapitel wird zunächst hergeleitet, dass Gebäude einen wesentlichen Hebel für die Erreichung der Klimaziele bieten. Ein entscheidender Aspekt ist dabei eine energieeffiziente Anlagentechnik. Diese kann insbesondere durch den Einsatz von Simulationsverfahren in der Planungsphase erreicht werden. Es wird aufgezeigt, wie der Planungsprozess klassischerweise abläuft und wie sich Simulationsverfahren darin einordnen. Als wesentliche Hürde dafür erweist sich der Aufwand für die Modellerstellung. Diese kann durch die Nutzung von Building Information Management (BIM) abgemindert werden.

Anschließend wird der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich BIM dargestellt. Es wird ein kurzer Überblick über die bestehende Normenlandschaft und die marktverfügbaren Tools gegeben, sowie der Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten zusammengefasst. Für die weiteren Arbeiten wird das Format IFC ausgewählt, da es das open-BIM-Prinzip erfüllt, bereits weite Anwendung in der Praxis findet und sehr ausdrucksstark ist.

Im nächsten Abschnitt wird der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich Gebäude- und Anlagensimulation zusammengefasst. Auch hier wird ein kurzer Überblick über die bestehende Normenlandschaft und die marktverfügbaren Tools gegeben, sowie der Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten zusammengefasst. Für die weiteren Arbeiten wird die Modellierungssprache Modelica ausgewählt, da dafür leistungsfähige Bibliotheken, Simulatoren und Benutzerschnittstellen als open-source-Software verfügbar sind.

Wesentlich für den Einsatz der Anlagensimulation in der Planungsphase ist das Zusammenwirken von BIM und Simulation. Dies ist Gegenstand der Forschung, aber noch nicht „Stand der Technik“. Es wird ein Überblick über die Forschungsarbeiten in diesem Bereich gegeben. Semantische Technologien erscheinen vielversprechend als Lösungsansatz für das Zusammenwirken von BIM und Simulation, daher wird der Stand der Forschung im Bereich der Ontologien für Modelica-Modelle ebenfalls dargestellt.

Im letzten Abschnitt wird die Aufgabenstellung für diese Arbeit abgeleitet und zwei wesentliche praktisch relevante Use-Cases definiert:

- BIM2SIM: Erstellung eines Simulationsmodells aus einem BIM-Modell
- SIM2BIM: Erstellung eines BIM-Modells basierend auf einem Simulationsmodell

Es werden die zu untersuchenden Thesen aufgestellt und ein Überblick über den Aufbau der weiteren Arbeit gegeben.

## 1.1 Motivation

### 1.1.1 Gebäude im Kontext des Klimawandels

Fast die Hälfte der Endenergie (43%) in Deutschland wird in den Sektoren Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) verbraucht (Abb. 1). Deren Verbrauchsverhalten ist, wie Abb. 2 zeigt, stark vom Wärmebedarf dominiert. Nimmt man die Verbräuche für Kühlung und Beleuchtung hinzu, erkennt man den großen Einfluss der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) auf den Energieverbrauch der Industrienation Deutschland.

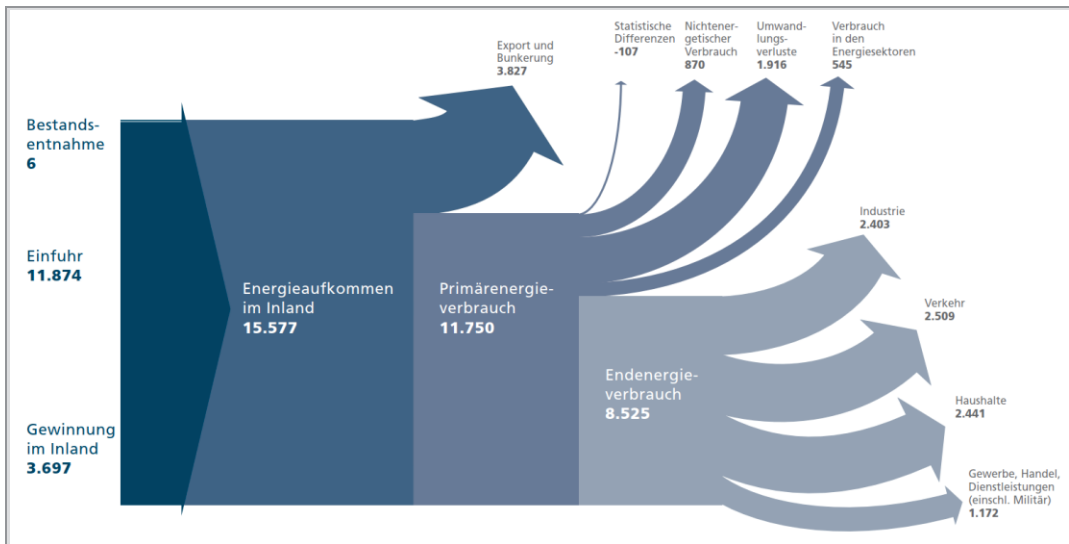


Abb. 1 Energieflussbild Deutschland 2022 – Angaben in Petajoule (PJ)  
Bildquelle (AGEB 2023)

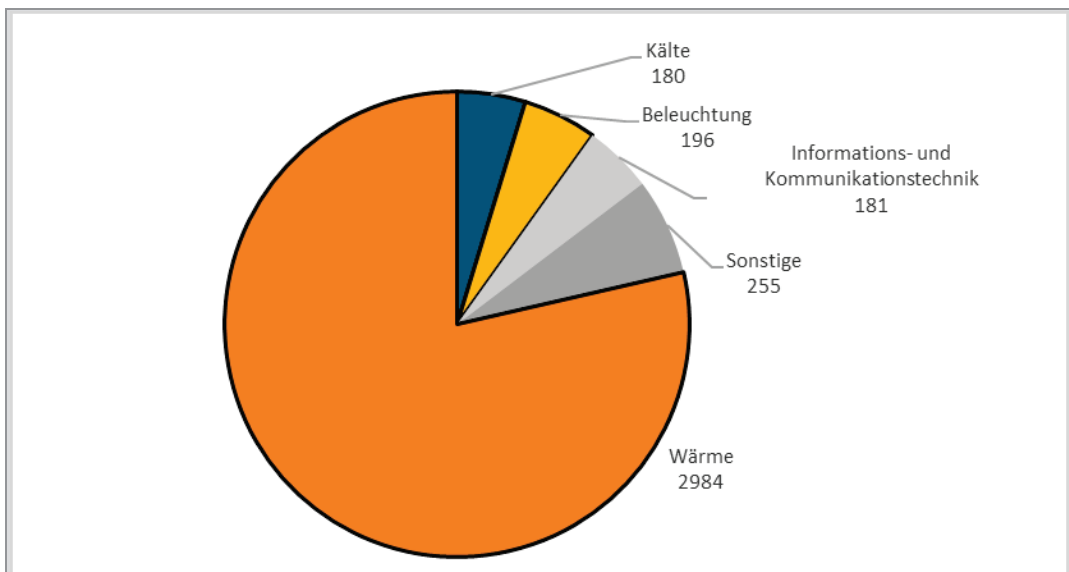


Abb. 2 Endenergieverbrauch (Haushalte+GHD) nach Anwendungszweck 2021 – Angaben in Petajoule (PJ)  
89% des Endenergieverbrauchs werden von TGA-Anlagen verursacht  
eigene Darstellung nach (AGEB 2022)