

BIM-INFORMATIONSMANAGEMENT BEI DER THERMISCH-ENERGETISCHEN SIMULATION VON GEBÄUDETECHNISCHEN ANLAGEN

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

vorgelegt von

Reinhard Wimmer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus König

Tag der mündlichen Prüfung: 04.02.2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Vorwort und Dank

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck für die Unterstützung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit, in der Rolle als Doktorvater.

Darüber hinaus möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich auf vielfältige Weise bei meiner Arbeit unterstützten:

- ▷ bei Professor Dr.-Ing. Markus König für die Einnahme seiner Rolle als Zweitprüfer und Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jörg Blankenbach, der das Rigorosum geleitet hat,
- ▷ bei Dr.-Ing. Tobias Maile für die ausführliche Betreuung bei der Anfertigung der Arbeit,
- ▷ bei Henning Metzmacher für die umfassende fachliche Unterstützung und seiner Rolle als Gründungsmitglied der LEC,
- ▷ bei Dr.-Ing. Alexander Vogt, Mark-Alexander Brüntjen sowie Ben Krämer für die fachliche Unterstützung, die gelegentlichen Bierchen und die leitenden Rollen in der LEC,
- ▷ bei den Studierenden, die meine Unterstützung bei deren Abschlussarbeiten erhalten haben und deren Ergebnisse teilweise in diese Arbeit einfließen.

Mein Dank gilt nicht zuletzt meiner Familie, meinen Freunden und meiner Freundin Julia Findeisen, die mich während meiner gesamten Promotionszeit unterstützten und mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen und mir somit die notwendige Ruhe und Sicherheit für die Erstellung dieser Arbeit gaben.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
Kurzfassung	vii
Abstract	ix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Gliederung	5
1.4 Hinweise für den Leser	6
2 Stand der Technik	7
2.1 BIM-Methode	7
2.2 BIM-Datenmodelle	16
2.3 Industry Foundation Classes	19
2.4 Recherche zu BIM-Anwendungsfällen	30
2.5 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik	34
2.5.1 Nutzeranforderungen	38
2.5.2 Technologische Umsetzung	45
2.6 Level of Development	50
2.7 Normen und Richtlinien	56
2.8 Zusammenfassung	62
3 Entwicklung von BIM-Anwendungsfällen	63
3.1 Rahmenbedingungen	63
3.2 Charakterisierung	65
3.3 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik	66
3.3.1 Nutzeranforderungen	67
3.3.2 Technologische Umsetzung	73
3.4 Level of Development	81
3.5 Mapping	84

3.5.1 Mapping Rules	84
3.5.2 Mapping Schema	91
3.6 Zusammenfassung	98
4 Erstellung des BIM-Anwendungsfalls	103
4.1 Rahmenbedingungen	103
4.2 Charakterisierung	106
4.3 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik	111
4.3.1 Nutzeranforderungen	113
4.3.2 Technologische Umsetzung	128
4.4 Level of Development	157
4.5 Mapping	160
4.6 Validierung der MVD	163
4.7 Zusammenfassung	166
5 Weiterführende Arbeit und Ausblick	167
Literaturverzeichnis	171
Anhang	189
Abbildungsverzeichnis	230
Tabellenverzeichnis	235

Abkürzungsverzeichnis

AIA	Auftraggeber Informationsanforderung
BAP	Building Information Modeling (BIM)-Abwicklungsplan
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BIM	Building Information Modeling
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BPMN	Business Process Model and Notation
bSI	buildingSMART International
CDE	Common Data Environment
CEN	European Committee for Standardization
CRISP	Cross-Industry Standard Process
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
FGB	Fertigstellungsgrad Bau
FGG	Fertigstellungsgrad Geometrie
FGK	Fertigstellungsgrad Kostenplan
FGT	Fertigstellungsgrad Terminplan
GUID	Globally Unique Identifier
HOAI	Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
ifcDOC	IFC Documentation Generator
ISO	Internationale Organisation für Normung
KG	Kostengruppe
LOD	Level of Development

LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LOM	Low Order Model
Lph	Leistungsphase
MEA	Modellelementautor
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
MVD	Model View Definition
PSet	Property Set
QSet	Quantity Set
STEP	Standard for the exchange of product model data
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRY	Test Reference Year
UUID	Universally Unique Identifier
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
URI	Uniform Resource Identifier
XML	Extensible Markup Language

Kurzfassung

Integrales Arbeiten in der Bauindustrie wird durch eine intensive Vernetzung aller Beteiligten ermöglicht und kann nur durch den Einsatz unterschiedlicher digitaler Modelle in den jeweiligen Disziplinen fachgerecht umgesetzt werden. Diese fortwährende Digitalisierung der Bauprozesse wird Building Information Modeling (BIM) genannt. Die in der Bauindustrie überfällige Anwendung digitaler Tools betrifft alle am Bauprozess beteiligten Expertisen. Damit die daraus resultierende Disruption strukturiert vollzogen wird, werden verschiedene Methoden eingesetzt. Diese Methoden erlauben eine zielorientierte Analyse der Prozesse von der Anwendung ausgehend, bis hin zur feinen Granularität der im Projektverlauf zu erstellenden Daten und Informationen.

In dieser Arbeit wird BIM als Teil der integralen Planungsmethodik untersucht. Im Speziellen wird als BIM-Ziel die thermisch-energetische Simulation von gebäudetechnischen Anlagen mit der harmonisierten Information Delivery Manual (IDM)- und Model View Definition (MVD)-Methode, unter Abbildung verschiedener Anwendungsbeispiele, ausgearbeitet. Daraus werden die Anforderungen für eine gegebene Software-Architektur abgeleitet und mehrere Datenmodelle miteinander verbunden. Die Verbindung der unterschiedlichen Datenmodelle wird mit dafür eigens definierten Transformationslogiken verwirklicht. Die auf der Objekt- und Datenebene basierenden Ansätze erlauben die Definition von den dazugehörigen Level of Development (LOD)s. Mit diesen umfangreichen Ausarbeitungen wird der Herausforderung begegnet, dass neu zu etablierende Werkzeuge und Methoden praxisorientiert maßgeschneidert werden müssen.

Mit der Entwicklung einer IDM wird komponentenweise vorgegeben, wie die Modellbildung zielorientiert verwirklicht wird. Dabei werden die Anwenderebene und die technologische Ebene im ersten Schritt zunächst getrennt voneinander, jedoch im zweiten Schritt integral betrachtet. In der Anwenderebene wird, vom Management, den Koordinatoren und von den Modellierern ausgehend, ein Prozessdiagramm erstellt. Innerhalb des Prozessdiagramms werden die einzelnen Aufgaben und deren Reihenfolge dokumentiert, die Schnittstellen identifiziert und im nächsten Schritt die auszutauschenden Daten und Informationen festgelegt. Diese Vorarbeit erlaubt auf der technologischen Ebene die Definition eines Datenaustauschanforderungsmodells. Damit wird festgehalten wie welche Daten und Informationen in den jeweiligen Schnittstellen ausgetauscht werden. Nach dieser Formalisierung wird abschließend eine MVD entwickelt, womit die einzelnen Schnittstellen für zukünftige Anwendungen maßgeschneidert angewendet werden. Die IDM, insbesondere das Prozessdiagramm und das Datenaustauschanforderungsmodell, sind die Grundlage zur Definition der

LODs. Die LODs definieren die in der Zusammenarbeit notwendige Abstimmung der zu liefernden Modellstände. Es werden die zeitraumbezogenen Fertigstellungsgrade der einzelnen Modelle vorgegeben, wodurch eine Koordination der Projektarbeiten möglich wird. Damit die unterschiedlichen Schnittstellen ebenfalls die Daten und Informationen des jeweils generierten Outputs verlustfrei übertragen können, müssen zusätzlich noch die Transformationen der einzelnen Daten definiert werden. Dazu wird das Beziehungsgefüge der einzelnen Modelle untersucht und eine Methode zur Transformation der unterschiedlichen Daten vorgestellt. Die in dieser Arbeit aufgeführten Methoden und Ergebnisse wurden im EnEff:BIM-Forschungsprojekt ausgearbeitet und erprobt. Dieses vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Forschungsprojekt wurde von Ende 2013 bis November 2016 bearbeitet und trägt den Titel: „EnEff:BIM-Planung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Gebäuden durch Bauwerkinformationsmodelle“, mit folgendem Förderkennzeichen: 03ET1177A-F. Um weitere internationale Tätigkeiten zu kanalisieren, wurde dieses Projekt mit einem internationalen Forschungskonsortium im vom Energy and Buildings Communities Program koordinierten Forschungsprojekt „IEA EBC Annex 60: New generation computational tools for building and community energy systems based on the Modelica and Functional Mockup Interface standards“ gebündelt und gemeinsam bearbeitet.

Abstract

In this thesis, BIM is examined as part of the integral planning methodology. Specifically, the BIM goal in this thesis is to develop the thermal-energy simulation of HVAC systems using the harmonized Information Delivery Manual (IDM) and Model View Definition (MVD) method, using various application examples. Based thereon, the requirements for a given software architecture are derived and several data models are interconnected. The connection of the different data models is accomplished via specially defined transformation logics. The approaches based on the object and data level allow the definition of the associated Level of Development (LOD)s. Through these extensive elaborations future tools and methods can be established and tailored according to practical requirements.

With the development of an IDM, the goal-oriented modeling is described component by component. In the first step, the user level and the technical level are initially considered separately, but in the second step they are considered holistically. At the user level, a process diagram is defined from the perspective of management, coordinators, and modelers. While creating the process diagram, the individual tasks, the sequence of execution, and their interfaces are identified. Within the interfaces, the data and information needed for the exchange is specified. This preliminary work allows the definition of a data exchange requirement model at the technical level. Such a model records not only the method of transmission, but also the type of data and information subject to exchange in the respective interfaces.

After this formalization, a MVD will be developed. The purpose of the MVD is to tailor the individual interfaces for future applications. The IDM, in particular the process diagram and the data exchange requirements model, form the basis for the definition of the LODs. The LODs define the coordination of the model versions to be delivered during the course of the collaboration on the building project. The specification of the period-related degrees of each model's maturity allows the coordination of the project. A loss-free transfer in the different interfaces requires a further specification of the transformation of the data and information in the course of the generated output. For this purpose, the relationship structure of the individual models is examined and a method for the transformation of the different data is presented.

The methods and results presented in this thesis were elaborated and examined during the course of the EnEff: BIM research project. This research project, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, was carried out from the end of 2013 to November 2016 and bears the title: EnEff: BIM planning and operational optimization of energy-efficient buildings through building

information models", with the funding code: 03ET1177A-F. To channel further international activities, this project was bundled and edited together with an international research consortium in the IEA EBC Annex 60: "New generation of computational tools for building and community energy systems based on the Modelica and Functional Mockup Interface standards" coordinated by the Energy and Buildings Communities Program.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Projekte als Ganzes zu sehen und den Projekterfolg gemeinschaftlich durch integrale Planung zu erreichen, ist eines der Hauptziele von Building Information Modeling (BIM). BIM ist in Deutschland noch nicht gänzlich etabliert, dementsprechend existieren verschiedene Definitionen.

Bereits mehrere internationale Organisationen haben unterschiedliche Definitionen hervorgebracht. Insbesondere ist die international meist zitierte Definition vom National Building Information Modeling Standard hervorzuheben [NIBS, 2013]:

„Building Information Modeling (BIM) ist eine Methode im Bauwesen, die das Erzeugen und Verwalten von digitalen Abbildungen der physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks beinhaltet. Die Bauwerksmodelle stellen dabei eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten; von der ersten Vorplanung bis zum Rückbau.“ [Übersetzung Egger u. a., 2013].

National wird die Schrift des Stufenplan Digitales Planen und Bauen am häufigsten zitiert [van Treeck, 2016b; König u. a., 2017; Pilling, 2017] und somit weitestgehend die dem zu Grunde liegende Definition anerkannt [BMVI u. Dobrindt, 2015]:

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethode, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“

Diese Definitionen spiegeln die Zweiteilung von BIM wieder. BIM ist Teil der lebenszyklusübergreifenden integralen Planungsmethodik und somit ein Werkzeug, das bei der Umsetzung unterstützend mitwirkt. Jedoch wird BIM in der vorher aufgeführten Definition des Bundes als Arbeitsmethode definiert. BIM ist folglich eine Methode des zentralen Informations- und des transparenten Kommunikationsmanagements. Dies führt zu einer hybriden Definition des Terminus BIM: einerseits handelt es sich um eine Methode zur Bearbeitung von Bauprojekten, verlangt aber andererseits eine IT-gestützte Verwaltung von baubezogenen Daten und wird gleichzeitig als Werkzeug anerkannt.

Alle am Bau Beteiligten sollen ihre Bauwerksdaten in ein digitales Modell eingeben und diese daraus jederzeit wieder abrufen können. Damit wird ausgedrückt, dass BIM eine digitale Abbildung der physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks darstellt, die eine passende Softwarelösung für eine effektive und kollaborative Arbeitsweise benötigt. BIM als solches dient als Informationsquelle und Kommunikationsplattform für die integrale Zusammenarbeit [Tuschy, 2014].

Um die verschiedenartigen Daten und Informationen von Baumaßnahmen integral zu koordinieren, werden objektorientierte Datenmodelle in der Planung eingesetzt. Allgemein wird anerkannt, dass die bestehende Modellvielfalt nicht durch ein universales Datenmodell ersetzt werden kann [Weise, 2006]. Je nach Anforderungen werden unterschiedliche geometrisch-semantische Datenmodelle erstellt, womit die Realität idealisiert und handhabbar abgebildet wird.

Zur Verwirklichung der ganzheitlichen Interoperabilität wird für die BIM-Softwarelandschaft ein offener Datenstandard entwickelt. Das sogenannte Industry Foundation Classes (IFC)-Datenmodell soll die für den gesamten Lebenszyklus relevanten Daten zur Kommunikation und Koordinierung zwischen den zahlreichen Applikationen vorhalten [ISO EN 16739, 2013]. Dieser Anspruch fordert ein breites Anwendungsspektrum seitens IFC, wodurch eine lebenszyklusübergreifende Flexibilität geboten werden muss, die nur unter gleichzeitiger Erhöhung der Komplexität erreicht werden kann.

Der Bauprozess führt durch sein facettenreiches Aufgabenfeld unterschiedliche Expertisen zusammen. Alle Beteiligten müssen unterschiedliche Teilaufgaben lösen, welche durch den zunehmenden Einsatz der BIM-Methode holistisch beeinflusst werden. Auswirkungen ergeben sich dabei insbesondere auf: die Richtlinien, Prozesse, Technologien und die Kenntnisse jedes Einzelnen. Durch diesen Wandel wird im Speziellen der Prozess zur Bearbeitung der einzelnen Aufgaben beeinflusst. Die konventionelle Planung von Bauprojekten ist ein durch die Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI) geprägter, seriell gestalteter und fehleranfälliger Prozess, bei dem die Bauausführung das Qualitätsdefizit der Planung ad hoc kostspielig beseitigen muss. Der integrale BIM-Ansatz hingegen fordert eine intensive Vernetzung und Koordinierung aller Beteiligten bereits vor der Bauausführung.

Die erfolgreiche Bearbeitung von BIM-Projekten funktioniert nur unter gemeinschaftlich verabschiedeten Prämissen zur Koordinierung, d.h. wer welche Daten, wann, wie und wofür generiert. Im Zentrum der individuell aufgestellten Prämissen steht das jeweilige BIM-Ziel als Teil eines Kompendiums unterschiedlicher Zielvorgaben. Zur Verwirklichung dieser Zielvorgaben werden in einem BIM-Projekt integral BIM-Anwendungsfälle erstellt. Zukünftig ist ein ganzheitlicher Leitfaden, welcher praxistauglich die relevanten Methoden vereint, unabdingbar. Ein derartiger Leitfaden ermöglicht eine effiziente Strukturierung der Herausforderungen, die diese digitale Disruption an den Bauprozess stellt.

Zur Harmonisierung der unterschiedlichen Arbeiten wurde die Information Delivery Manual (IDM)-

Methode entwickelt, die auf einer komponentenbasierten Struktur die Erarbeitung aller notwendigen Daten und Informationen auf der Ebene der Nutzeranforderungen sowie auf der Ebene der technologischen Umsetzung reguliert. Darauf aufbauend werden die einzelnen Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Applikationen für die jeweilige Aufgabe mit der Model View Definition (MVD)-Methode spezifiziert und somit spezialisiert. Diese Bestandteile gilt es zu vereinen, um ebenfalls die Koordinierung des Modellfertigstellungsgrades der objektorientierten Datenmodelle mittels der Level of Development (LOD)-Methode integral zu gestalten. Eine Kombination dieser komplexen Methoden würde die Definition von BIM-Anwendungsfällen erlauben. Die dabei zwingend notwendige Interoperabilität zwischen den zu Grunde liegenden, lebenszyklusübergreifenden und hochspezialisierten Datenmodellen kann nur mit einer zusätzlichen Spezifikation des Beziehungsgefüges erfolgen.

Insbesondere die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) mit ihren vielfältigen Gewerken und ingenieurwissenschaftlichen Herausforderungen steht im Fokus der Optimierung mithilfe der BIM-Methode. Die große Bandbreite an verschiedenartigen Produkten, die vergleichsweise hohen Herstellungs- sowie Baukosten und die Tatsache, dass die TGA der Hauptkostentreiber im Betrieb ist, verleiht diesem Gesamtgewerk eine große Relevanz im Bauwesen. Damit die TGA ihren immer strengeren Anforderungen gerecht wird, gilt es, das volle Potential der BIM-Methode auszuschöpfen. Deswegen ist es erforderlich den Zugang zu den Daten und Informationen der TGA durch die BIM-Methode zu erfassen und in Form von BIM-Anwendungsfällen zu koordinieren.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, das Defizit eines Leitfadens zur Definition von BIM-Anwendungsfällen zu beseitigen. Darauf aufbauend soll im Speziellen der BIM-Anwendungsfall für die thermisch-energetische Simulation der TGA entwickelt und vorgestellt werden. Es sollen vom IFC-Datenmodell ausgehend verschiedene Datenmodelle miteinander kombiniert werden, um eine Schnittstelle zu einem Simulationswerkzeug zu definieren. Der BIM-Anwendungsfall soll dazu genutzt werden, die Prozesse zielorientiert zu gestalten und mit der softwaretechnischen Ebene zu verbinden, wodurch die charakterisierte Schnittstelle in die BIM-Umgebung integriert wird. Dafür sollen ein IDM und eine darauf basierende MVD erstellt werden. Die letztendliche Transformation zur Übersetzung der Daten soll mit sogenannten Mapping Rules vollzogen werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit gelten unter folgenden Randbedingungen:

1. Das objektorientierte, offene IFC-Datenmodell kann von dem verwendeten Autorensystem, einer BIM-Plattform, verwendet werden und erlaubt die Definition von geeigneten Anwendungsbeispielen.

2. Der Planungsprozess lässt sich praxisnah aus Normen, Richtlinien und aus dem zuvor erwähnten Forschungsprojekt EnEff:BIM ableiten und ist flexibel gestaltbar.
3. Die zu Grunde liegende Software-Architektur zur Kopplung mehrerer Datenmodelle erlaubt die Integration der entwickelten Resultate.
4. Die dem Simulationsprogramm zu Grunde liegenden Anlagenbibliotheken sind ausgereift.
5. Die im Forschungsprojekt entwickelten Anwendungsbeispiele bieten die notwendigen Daten und Informationen, die zur erfolgreichen Ausführung einer Simulation benötigt werden (siehe Abbildung 1.1).

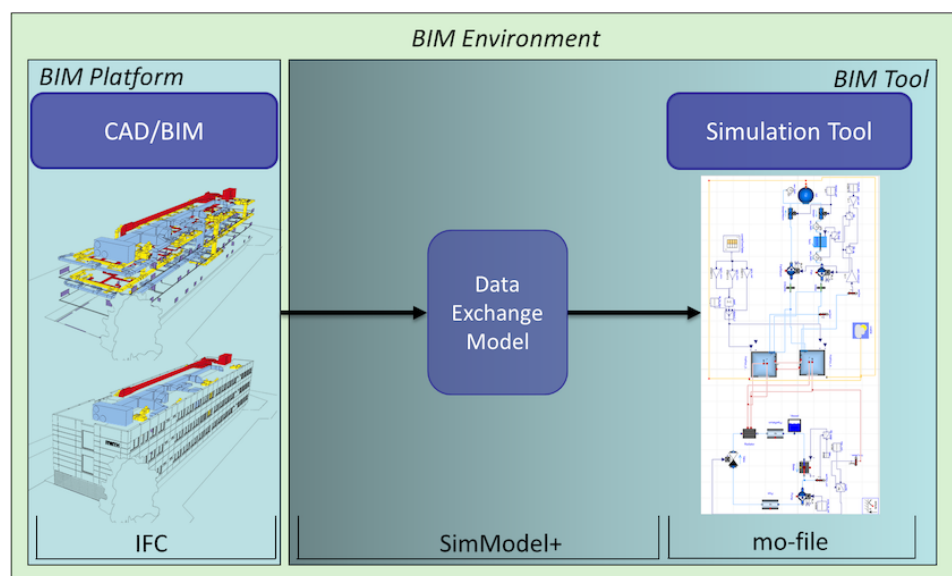


Abbildung 1.1: Übersicht des im EnEff:BIM-Forschungsprojekt entwickelten Frameworks [E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, 2018].

Aufgrund der angestrebten Integration der Nutzer- und softwaretechnischen Ebene werden drei Teilziele abgeleitet. Erstens: Die harmonisierte IDM- und MVD-Methode wird angewendet, um den Prozess zu analysieren und zielgerichtet zu gestalten. Es werden vom Management und den Anwendern die Prozessschritte und relevanten Informationen erfasst, analysiert und objektorientiert dokumentiert. Darauf aufbauend werden schemaabhängig Schnittstellen für die relevanten Daten und Informationen spezifiziert. Zweitens: Damit vermittelt werden kann, welchen Modellfertigstellungsgrad die Daten und Informationen im gemeinsamen Datenmodell haben, müssen LODs generisch und alphanumerisch für den jeweiligen BIM-Anwendungsfall definiert werden. Die objektorientierten Datenmodelle fungieren als Grundlage, um Interpretationsspielräume und nicht eindeutige Verantwortungszuweisungen zu eliminieren. Drittens: Zur Integration der unterschiedli-

chen Datenmodelle müssen die Spezifikationen des Beziehungsgefüges definiert werden. Alle drei Teilziele sind notwendig, um eine vollständige und praxisnahe Umsetzung eines BIM-Anwendungsfalls zu ermöglichen.

In dem Verbundprojekt EnEff:BIM wurden informationstechnische Methoden für die Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten entwickelt. Die Modellierung, Simulation und Betriebsoptimierung erfolgte auf Basis offener BIM-Modelle mit dem Ziel, ausgehend von einem Planungsmodell einen durchgängigen Datenaustausch (über das IFC-Format) in der Fachplanung zu erreichen. Im Gegensatz zur Verfolgung einer Softwareeinzellösung wurde hierbei gezielt der objektorientierte Modellierungsansatz Modelica integriert. Das Projekt hat ein einheitliches digitales Format zum Austausch von Daten für die Gebäude- und Anlagensimulation entwickelt, das bestehende IFC-Schema zur Beschreibung von TGA-Elementen erweitert und die Umsetzung an ausgewählten Elementen der Gebäudetechnik demonstriert. Kernaspekt war die Entwicklung einer offenen, produktneutralen Schnittstelle zwischen BIM-Modellen und Modelica-Teilmodellen, sowie zu etablierten Simulationstools [E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, 2018].

1.3 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel und einem zusätzlichen Anhang. Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden die Kapitel Drei und Vier. Kapitel Drei bietet einen detaillierten Leitfaden zur Erstellung von BIM-Anwendungsfällen, die in Kapitel Vier am erwähnten BIM-Anwendungsfall angewendet und umfassend dargestellt werden.

Kapitel Zwei beschreibt den Stand der Technik und Forschung. Trotz des anhaltenden Interesses und der Relevanz der IDM- und MVD-Methode existieren nur wenig Forschungsprojekte mit praxistauglichen Anleitungen. Es werden die notwendigen Grundlagen zur Entwicklung eines BIM-Anwendungsfalls und eines Integrationsansatzes für mehrere Datenmodelle erläutert. Der erste Teil des Kapitels beschreibt allgemein die BIM-Methode und zusätzlich das interoperable IFC-Datenmodell. Im zweiten Teil des Kapitels wird konkret auf die harmonisierte IDM- und MVD-Methode eingegangen, um darauf aufbauend die LOD-Methode zu erläutern.

Um das vorgegebene Ziel zu erreichen, wird in Kapitel Drei ein ausführlicher Leitfaden zur Entwicklung von BIM-Anwendungsfällen und den optionalen Beziehungsgefügen von Datenmodellen dargelegt. Am Ende des Kapitels wird ein übersichtliches Flussdiagramm geboten, das dem Leser die einzelnen Schritte zur Definition von BIM-Anwendungsfällen visualisiert. Das Flussdiagramm zusammen mit den ausführlichen Erläuterungen erlauben es dem Leser, BIM-Anwendungsfälle gemäß der harmonisierten IDM- und MVD-Methode zu entwickeln.

Das Vierte Kapitel befasst sich mit der Anwendung der Methoden zur Entwicklung eines BIM-Anwendungsfalls am Beispiel der thermisch-energetischen Simulation von gebäudetechnischen Anlagen. Durch den vorgestellten Ansatz wird ein Simulationstool in die BIM-Umgebung integriert. Die entwickelte MVD wird zudem mit speziell für diesen Fall entwickelten Anwendungsbeispielen validiert und es wird ein ausführliches Beispiel einer Transformation gegeben.

Das Fünfte und letzte Kapitel fasst die Arbeit zusammen und bewertet die Ergebnisse. Dadurch werden noch offene Problemstellungen angesprochen, die einen möglichen Ausblick auf weitere Aufgaben geben.

1.4 Hinweise für den Leser

Der Begriff BIM wird gemäß der nationalen Definition (siehe Seite 1) synonym für die Methode, das Datenmodell und das eigentliche 3D-Modell, inklusive Informationen verwendet. Damit keine Missverständnisse beim Lesen dieser Arbeit entstehen, wird bei jeder Verwendung des Akronyms BIM eine weiterführende Erläuterung gegeben, welche Funktion damit gemeint ist (BIM-Methode, BIM-Datenmodell, BIM-Modell).

Des Weiteren werden zur besseren Lesbarkeit die Entitäten, Attribute und Typen des IFC-Datenmodells jeweils mit einer anderen Formatierung hervorgehoben. Die Entitäten werden *kursiv*, die Attribute werden mit KAPITÄLCHEN und die Typdefinitionen werden mit GROSS-Buchstaben geschrieben.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Building Information Modeling (BIM)-Methode eingegangen, um danach auf die technologische Umsetzung dieser in Form von Datenmodellen einzugehen. Diese Herangehensweise ermöglicht eine zunächst formal-theoretische Überleitung zu den BIM-Anwendungsfällen, dann eine konkret-anwendungsbezogene Erläuterung mit der harmonisierten „Information Delivery Manual“- und „Model View Definition“-Methode. Ein zu Grunde liegendes interoperables Datenmodell wird umfassend erläutert, um daraufhin die Fertigstellungsgrade im Kapitel „Level of Development“ darzulegen. Abschließend sollen die BIM relevanten ISO-, CEN-, DIN-Normen sowie VDI-Richtlinien als Teil des Stand der Technik aufgeführt und deren Bezug zu dieser Arbeit hergestellt werden.

2.1 BIM-Methode

In den 70er Jahren wurden in universitären Forschungsarbeiten erste grafische Modelle mit semantischen Modellen verknüpft; gleichzeitig entstanden erste Grundlagen zur parametrischen Beschreibung von Bauteilen. Diese Modelle wurden als Produktmodelle bezeichnet (engl. Product Information Model oder Product Model) und wurden zunächst für die verarbeitende Industrie eingesetzt [Liebich u. Hausknecht, 2016; Eastman u. a., 2008; van Treeck u. a., 2018]. Der Begriff „Building Information Model“ erschien erstmalig in einem Papier von van Nederveen [van Nederveen u. Tolman, 1992]. Das Unternehmen Autodesk übernahm den Begriff und hat diesen für den Paradigmenwechsel in der Bauindustrie und somit als Schlagwort für die Digitalisierung verwendet. Die aus diesen Entwicklungen stammenden Datenmodelle ermöglichen es zweckmäßige, digitale Abbildungen der Realität mit inhärenter Funktionalität zu modellieren und werden in sogenannten Autorensystemen der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Eine BIM-Plattform ist ein Autorensystem, wodurch die digitale Modellierung eines Bauprojekts durch die Verwendung des integralen Datenmodells und Darstellung ermöglicht wird. Als solches fungiert es als Schnittstelle zwischen den einzelnen Gewerken und deren Verantwortlichen. Damit wird allen Beteiligten die ganzheitliche Integration von Prozessen und den dazugehörigen BIM-Werkzeugen ermöglicht. Diese interoperable Bearbeitung von Projekten durch die BIM-Methode, greift die Probleme konventioneller, seriell gestalteter und semi-integraler Planung auf. Sie ermöglicht durch das Zusammenarbeiten aller Beteiligten eine Parallelisierung der Arbeiten und folglich eine Reduktion der chronologisch bedingten Dissonanz in

deren Schnittstellen. Gleichzeitig steht allen Beteiligten der aktuelle Planstand zur Verfügung, womit eine optimale Grundlage zur Bearbeitung eines Projektes geschaffen wird.

Bauprojekte vereinen unterschiedliche Disziplinen und sind von Natur aus einzigartig und sehr komplex. In der Projektabwicklung müssen verschiedene Aufgaben von vielfältigen Expertenteams gemeinsam bearbeitet werden. Entgegen der traditionellen Realisierung von Bauprojekten soll insbesondere in der Bearbeitung von BIM-Projekten die Kollaboration der zahlreichen Projektpartner simultan koordiniert werden können. Abbildung 2.1 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

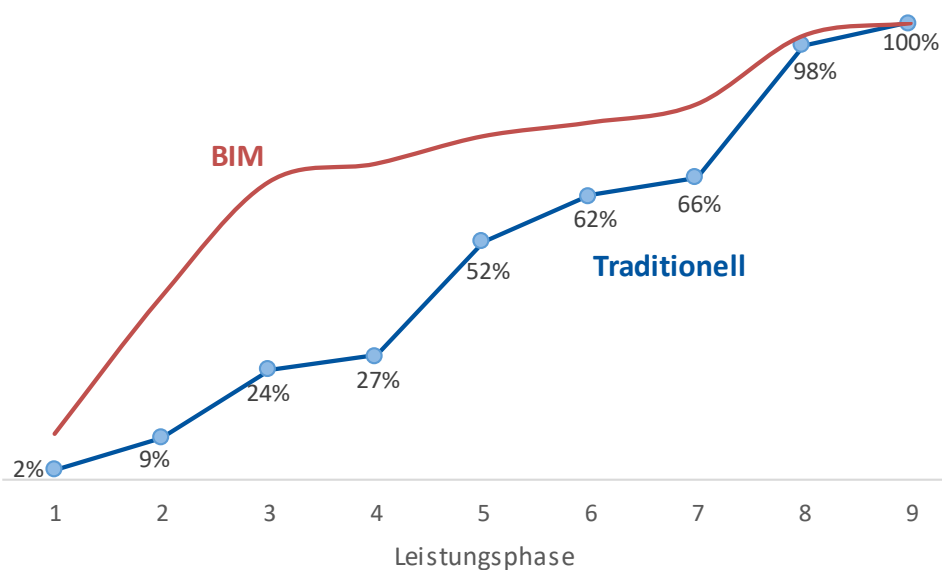


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung des Aufwands bei der traditionellen Arbeitsweise, basierend auf den Honoraren für die Objektplanung der HOAI 2013 und der BIM-optimierten Arbeitsweise (qualitativ) in einem Bauprojekt, kumulativ aufgeführt [i. A. a. van Treeck, 2016b; Egger u. a., 2013; Bundesrat, 2013].

Abbildung 2.1 illustriert den kumulativen Aufwand zur Planung eines Bauprojekts. Die traditionelle Planungsweise wird der BIM-Methode gegenübergestellt. Die Prozentsätze des Aufwands des traditionellen Projektverlaufs in Abbildung 2.1 ergeben sich aus den Honoraren für das Leistungsbild der Objektplanung der HOAI 2013 für den Abschnitt „Gebäude und Innenräume“ [Bundesrat, 2013]. Die Honorare kongruieren mit dem Leistungsumfang der jeweiligen Leistungsphase (Lph) [Albrecht, 2014]. Tabelle 2.1 listet einen Ausschnitt der Grundlagen im Leistungsbild der einzelnen Lph auf, die im Bauprojekt gemäß der HOAI zu erfüllen sind.

Tabelle 2.1: Ausschnitt aus dem Leistungsbild der HOAI [Bundesrat, 2013].

Lph 1: Grundlagenermittlung
Klären der Aufgabenstellung und des Leistungsumfangs
Beratung zum gesamten Leistungs- und Untersuchungsbedarfs
Lph 2: Vorplanung
Zielkatalog
Planungskonzept
Erstellen eines Terminplans
Kostenschätzung nach DIN 276 [DIN 276, 2008]
Lph 3: Entwurfsplanung
System- und Integrationsplanung
Fortschreiben des Terminplans
Kostenberechnung nach DIN 276 [DIN 276, 2008]
Lph 4: Genehmigungsplanung
Zusammenstellen und einreichen der Unterlagen für Bauantrag
Begleitung des Genehmigungsverfahrens
Lph 5: Ausführungsplanung
Erstellen der ausführungsreifen Planunterlagen
Erstellen von Detail- und Konstruktionszeichnungen
Fortschreiben des Terminplans
Einarbeitung von Fachplanungen
Lph 6: Vorbereitung der Vergabe
Mengenermittlung
Erstellen von Leistungsverzeichnissen
Abstimmen und Koordinieren der Leistungsbeschreibungen aller Gewerke
Lph 7: Mitwirkung bei der Vergabe
Einholen, prüfen und werten von Angeboten
Mitwirken bei der Auftragserteilung
Lph 8: Objektüberwachung und Dokumentation
Überwachen und begleiten der Bauausführung
Kostenfeststellung, zum Beispiel nach DIN 276 [DIN 276, 2008]
Übergabe des Objekts
Lph 9: Objektbetreuung und Dokumentation
Betreuung des fertigen Gebäudes während der Mängelverjährungsfristen
Mitwirken bei der Freigabe von Sicherheitsleistungen

Abbildung 2.1 zeigt, dass durch die BIM-Methode der Planungsaufwand von der Ausführungsphase (grundsätzlich ab Lph 7 „Mitwirkung bei der Vergabe“) in die eigentliche Planungsphase vorverlegt wird. Dieser Aufwandsverschub in die Planungsphase ergibt sich aus der frühzeitigen Integration aller am Bau Beteiligten [van Treeck, 2016b; Egger u. a., 2013]. Ziel ist es, das Gebäude zunächst virtuell zu konzipieren und erst nach einer ausreichenden Güte der Planung die eigentliche Bauphase zu initiieren. BIM ist eine Querschnittsdisziplin der Zusammenarbeit und Risikobewältigung, Bedarfsplanung und der Planung in den frühen Planungsphasen [Steinmann, 2015] und somit als Bestandteil der integralen Planungsmethode zu betrachten. Dieses Ausmaß erfordert eine harmonisierte Kollaboration der beteiligten Parteien, die gemeinschaftlich, firmenübergreifend und vertikal erfolgen muss.

Eine grundlegende Herausforderung in der Bearbeitung von Bauprojekten liegt im Grad der Kontrolle der kollaborativen Prozesse. Die internen Prozesse der einzelnen Unternehmen verfügen über ein hohes Maß an Kontrolle, durch firmeninterne Standards, bewährte Prozesse oder etablierte Vorgehensweisen [DIN EN ISO 9001, 2015]. Die externen Prozesse hingegen bedürfen der Schnittstellen mit weiteren Unternehmen, wodurch meist ein hoher Kontrollverlust bedingt ist, der sich auf den Zeitplan, die Qualität der Planung und Ausführung, sowie die Kosten auswirkt. Aufgrund diesem Umstand sind kollaborative Vereinbarungen von großer Wichtigkeit. Diese Vereinbarungen gilt es vorab, unter Zuhilfenahme von sogenannten BIM-Anwendungsfällen, partnerschaftlich zu entwickeln. Der Einsatz der BIM-Methode ermöglicht den frühzeitigen Zugriff auf umfangreichere Datenmengen, wodurch die Prozesse bereits in einem frühen Stadium detaillierter geplant werden können [Schoch, 2015]. Darüber hinaus sorgt ein zentrales Datenmanagement dafür, dass der Informationsverlust innerhalb des Projekts gering, sowie transparent bleibt und dass die Aufbereitung der Daten und Informationen unter Verwendung von ausgearbeiteten Schnittstellen wegfällt und dadurch kontrollierbar wird [Bayer, 2015; DIN ISO 31000, 2011]. Dementsprechend kann die Methode BIM nur ermöglicht werden, wenn es entsprechende softwaretechnische Konstrukte erlauben [Tuschy, 2014].

Damit die angestrebte Umsetzungsform funktioniert, muss Interoperabilität grundsätzlich gewährleistet sein. Interoperabilität ist definiert als „Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten“ [Wissenschaftlicher Rat Dudenredaktion, 2006]. Folglich müssen die Schnittstellen den Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Beteiligten nicht nur auf der Anwenderebene, sondern ebenfalls auf der technologischen Ebene einwandfrei ermöglichen. Dies ist insbesondere in der Bauindustrie eine Herausforderung. Die Leistungsphasen in einem Bauprojekt werden meist nicht von einem einzelnen Unternehmen vollzogen, sondern es müssen mehrere Unternehmen zur Integration notwendiger Kompetenzen in einem Projekt eingebunden werden. Dies geschieht bereits in der Planungsphase und ist ebenfalls in der Bau- und Betriebsphase als Standard angesehen. Zusätzlich ist die Bauindustrie in Deutschland stark fragmentiert [Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009], wodurch sich unterschiedliche Leistungsprofile der

Unternehmen und folglich heterogene Anforderungsprofile an die technologischen Werkzeuge jedes einzelnen Unternehmens ergeben.

Damit die fragmentierte, von unterschiedlichen Software-Werkzeugen dominierte Bauindustrie in Deutschland die BIM-Methode erfolgreich umsetzen kann, müssen zwei Punkte beachtet werden:

1. Die Kollaboration der Projektbeteiligten muss strukturiert werden, damit die Parallelisierung der Leistungserbringung ermöglicht wird:
 - a) Die Aufgabe und das Ziel der Leistungserbringung muss identifiziert und spezifiziert werden;
 - b) Die zur Zielverwirklichung an der Aufgabe beteiligten Akteure, deren Rollen, einzelne Arbeitsschritte und deren Schnittstellen müssen identifiziert und formuliert werden.
2. Zur Erfüllung der geforderten Leistungen in einem Bauprojekt müssen die Schnittstellen zwischen allen Parteien verlustfrei gestaltet werden:
 - a) Der in den Schnittstellen stattfindende Austauschprozess muss standardisiert werden;
 - b) Der technologische Austauschprozess muss interoperabel und offen gestaltet werden.

Zur Umsetzung der BIM-Methode müssen die Kollaboration und die zu nutzenden Werkzeuge entsprechend definiert werden. Dies ist nur möglich, wenn die in den einzelnen HOAI-Leistungsphasen eines Bauprojekts aufgeführten Leistungsbilder für die jeweiligen Bauprojekte individuell analysiert, formuliert und entsprechend angepasst werden. Diese Thematik wird in der internationalen Norm ISO 19650 standardisiert [DIN EN ISO 19650-1, 2018]. Bereits in dem von der Regierung verabschiedeten Stufenplan wird die notwendige Anpassung der Abwicklung von Bauprojekten beschrieben und es wird ein grundsätzlicher Referenzprozess, basierend auf der ISO 19650, aufgezeigt [BMVI u. Dobrindt, 2015]. Diese gestalteten Strukturen sind als generelle Konstitution für die BIM-Methode anzusehen.

Abbildung 2.2 zeigt die Struktur des BIM-Referenzprozesses. Zu erkennen sind die Lph der HOAI und darüber hinaus ausgearbeitete Leistungsphasen zur Verwirklichung der Methode BIM. Zusätzlich werden die Auftraggeber Informationsanforderungen (AIA)s, Kompetenzabfragen und der BIM-Abwicklungsplan (BAP) (in der Abbildung wird der BAP synonym als BIM-Ausführungsplan bezeichnet) zu den gewohnten Lph der HOAI aufgeführt, die in Gänze als grundlegendes Konzept zur Bearbeitung von BIM-Projekten der Öffentlichkeit präsentiert ist [BMVI u. Dobrindt, 2015].

AIAs definieren die auftraggeberseitigen Datenanforderungen für das gesamte Projekt. Es soll definiert werden, wann, in welcher Detailtiefe und in welchem Format die Daten und Informationen geliefert werden sollen und was die Ziele der Verwendung der BIM-Methodik sind.

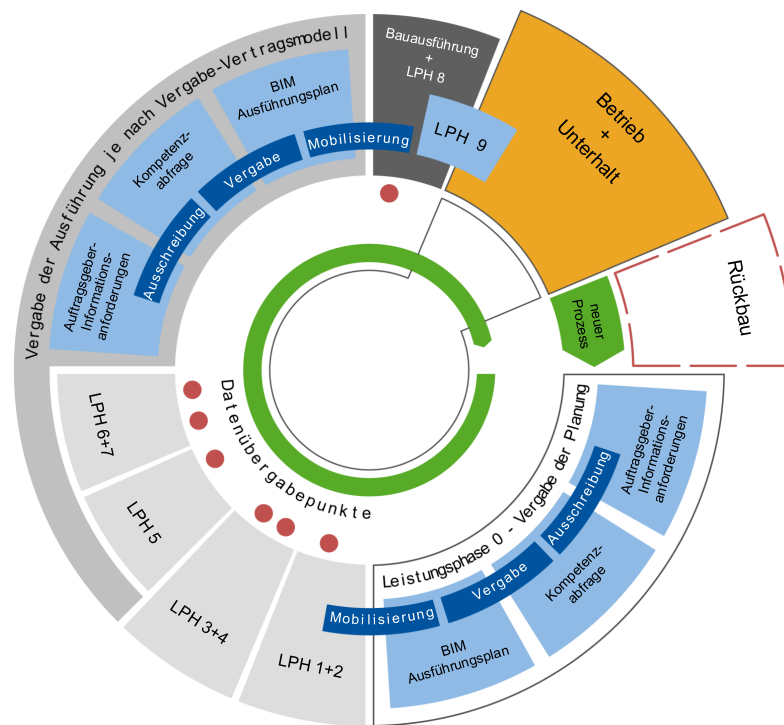


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des BIM-Referenzprozesses [i. A. a. BMVI u. Dobrindt, 2015].

Die Kompetenzabfragen stehen im Zusammenhang mit den Anforderungen des Auftraggebers, womit auftragnehmerseitig kommuniziert wird welche Kompetenzen bestehen und worauf die Pflichtenhefte basieren. Sogenannte Datenübergabepunkte beschreiben die terminierten Austausche zwischen dem Projektteam und dem Auftraggeber. Die Übergabepunkte sind in Abbildung 2.2 als rote Punkte markiert und werden projektabhängig definiert [BMVI u. Dobrindt, 2015; Bodden u. a., 2017].

Der BAP beschreibt, wie die geforderten Daten und Informationen im Verlauf des Projekts erstellt und geliefert werden sollen. Es werden die dafür notwendigen Rollen, Funktionen, Prozesse, Schnittstellen, Interaktionen, Protokolle, Konventionen, Vereinbarungen sowie die Softwarearchitektur im BAP definiert [BMVI u. Dobrindt, 2015; Bodden u. a., 2017].

Die in der ISO 19650 gestalteten Strukturen sind als generelle Konstitution für die BIM-Methode anzusehen. Es werden neben grundsätzlichen Definitionen auch Strukturen, Rollen, Aufgabenpakete und Abfolgen für die BIM-Methode eingeführt. Der darin beschriebene Informationsmanagementprozess besteht aus den folgenden acht Tätigkeiten [DIN EN ISO 19650-2, 2018]:

1. Bewertung und Bedarf;
2. Ausschreibung;
3. Angebot auf Ausschreibung;
4. Beauftragung;
5. Mobilisierung;
6. Kollaboratives Erstellen von Informationen;
7. Liefern des Informationsmodells;
8. Projektabschluss.

Die definierten Tätigkeiten werden in der ISO noch detaillierter aufgeschlüsselt und beschreiben den gesamten Managementprozess. Die Auftraggeber Informationsanforderung (AIA) wird in der „Ausschreibung“ definiert, daraufhin wird in der Tätigkeit „Angebot auf Ausschreibung“ der BAP entwickelt. Die darauffolgenden Tätigkeiten werden sukzessive durchlaufen und beschreiben das Entwickeln, Fortschreiben und Kontrollieren der Erstellung der digitalen Abbildung des Bauprojekts [DIN EN ISO 19650-2, 2018].

Dieser gesamte Prozess wird in einer kooperativen Datenumgebung (Common Data Environment (CDE)) durchgeführt. In dieser Datenumgebung sollen alle für das Projekt relevanten Daten, Informationen und Modelle von allen Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt werden. CDEs werden bereits von verschiedenen Herstellern online angeboten und finden ihren Einsatz in diversen Projekten. Dabei sollten diese Systeme diverse Eigenschaften, welche die parallele Zusammenarbeit von unterschiedlichen Projektpartnern an unterschiedlichen Standorten ermöglichen, aufweisen [Borrmann u. a., 2015a; van Treeck, 2016b]. Die Nebenläufigkeit von parallel zu bearbeitenden Daten und Informationen muss geregelt sein. Erst wenn entschieden wurde, welche Strategie (pessimistisch versus optimistisch) erlaubt ist, können gemeinsame Abstimmungen zur parallelen Bearbeitung getroffen werden [Schmidt, 2002]. Zudem regeln Rollen, mit dazugehörigen Rechten, welche Daten und Informationen eingesehen und in welchem Umfang eingesehen und bearbeitet werden können. Neben diesen beiden Randbedingungen muss eine Versionierung der Daten vorhanden sein. Dabei sind insbesondere die Granularität der Versionierung und wie weitreichend die Historie verwaltet werden kann relevant [Baerisch, 2005]. Als weitere wichtige Eigenschaft eines CDEs gilt die Freigabe und Archivierung. Offizielle Dokumente müssen signiert freigegeben werden können und auch über einen längeren Zeitraum lesbar zur Verfügung stehen. Insbesondere im Bauwesen ist die Archivierung von Daten und Informationen aufgrund der langen Dauer der Projekte eine Herausforderung.

Zur Verwirklichung der Kollaboration aller relevanten Disziplinen in frühen Projektphasen müssen die Schnittstellen zwischen den einzelnen Beteiligten für den Informations- und Datenaustausch

reibungslos funktionieren. Dadurch wird einerseits die Zusammenarbeit ermöglicht und andererseits gemeinsam an der Erstellung des digitalen Gebäudemodells gearbeitet. Somit wird eine durchgängige Nutzung von Gebäudemodellen über verschiedene Disziplinen und Lebenszyklusphasen hinweg zwischen allen Beteiligten ermöglicht. Man spricht in diesem Fall von einem sogenannten „BIG-open“-BIM. Das „BIG“ bezieht sich hierbei auf die Integration von mehr als einer Disziplin und das „open“ bezieht sich auf die Interoperabilität unter Verwendung von publizierten Datenmodellen. Diese und die weiteren möglichen BIM-Einsatzformen sind in Abbildung 2.3 dargestellt:

- ▷ little-closed-BIM: Proprietäre Formate & Bearbeitung einer einzigen Disziplin;
- ▷ little-open-BIM: Publierte Formate & Bearbeitung einer einzigen Disziplin;
- ▷ BIG-closed-BIM: Proprietäre Formate & Integrale Planung;
- ▷ BIG-open-BIM: Publierte Formate & Integrale Planung.

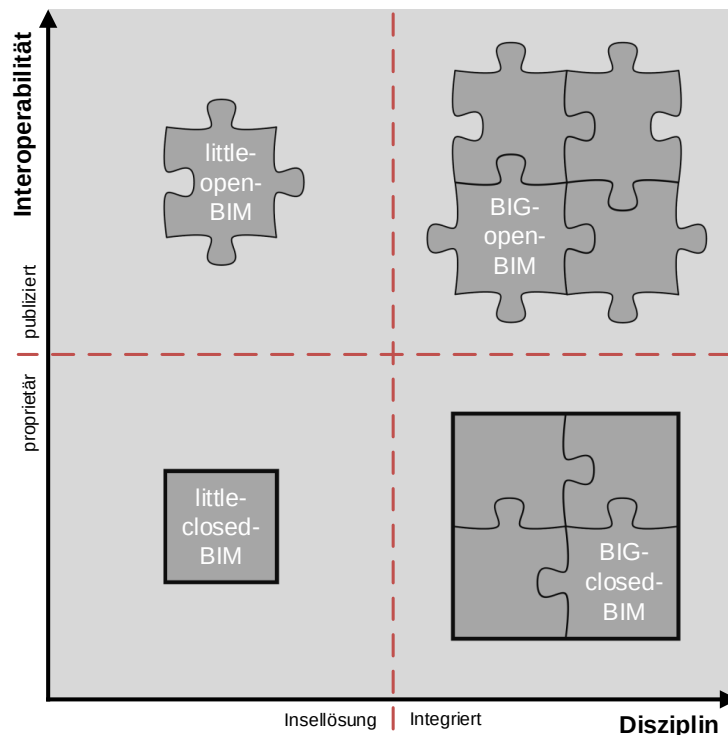


Abbildung 2.3: Abgrenzung von BIM-Einsatzformen hinsichtlich der Verwendung von publizierten oder proprietären Formaten und einer integralen oder isolierten Planung [i. A. a. van Treeck, 2016b].

Die Definition von BIM gemäß BMVI u. Dobrindt [2015] schreibt eine Lebenszyklusorientierung vor, wodurch ein Vorgehen gemäß einer integralen Planung unumgänglich ist [Kovacic u. a., 2016]. Die Integration mehrerer Disziplinen kongruiert mit der Zahl der entstehenden Schnittstellen. Durch die Vernetzung unterschiedlicher Disziplinen müssen mehrere Expertisen und somit Softwareapplikationen integral verwendet werden. Dieser Sachverhalt wird anhand der Abbildung 2.4 verdeutlicht.

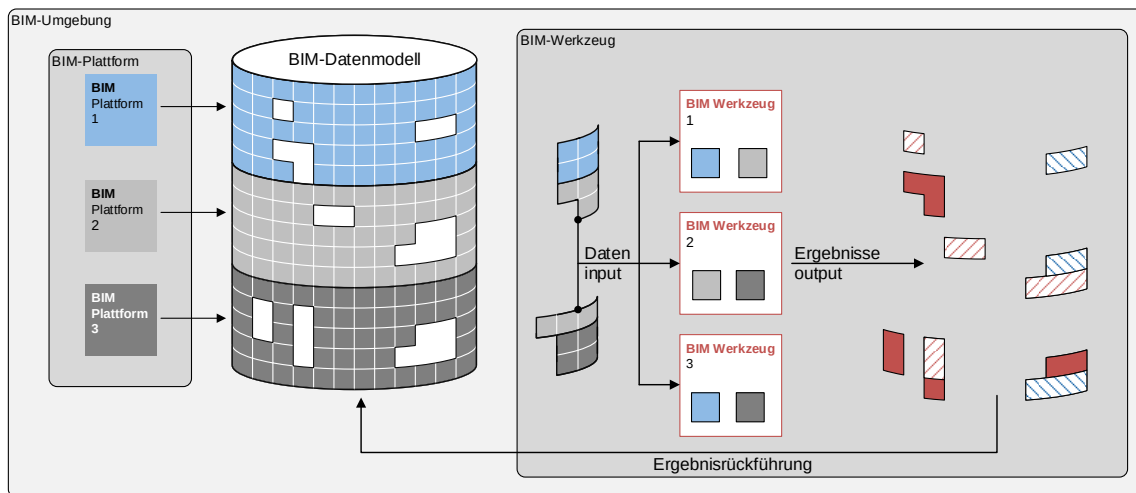


Abbildung 2.4: BIM-Umgebung zur Instanziierung des BIM-Datenmodells [i. A. a. Bazjanac].

Das Datenmanagement anhand einer BIG-BIM-Einsatzform in einer BIM-Umgebung ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Eastman u. a. [2008] definierten eine BIM-Umgebung als Datenmanagement, in der BIM-Plattformen mit BIM-Werkzeugen über offene Schnittstellen Daten austauschen. Dabei sind BIM-Plattformen Applikationen, die zwecks Datenerstellung und Datenaustausch zwischen verschiedenen Personen Anwendung finden und sämtliche Daten in einem offenen digitalen Datenmodell speichern. BIM-Werkzeuge sind hingegen spezialisierte Softwareapplikationen, welche Output generieren und über eine Schnittstelle mit den BIM-Plattformen Daten austauschen [Eastman u. a., 2008]. Der in Abbildung 2.4 dargestellte Datenaustausch wird anhand eines BIM-Datenmodells (bspw. IFC, siehe Abschnitt 2.3) erläutert. Die drei BIM-Plattformen (bspw. Plattformen für die Disziplinen TGA, Tragwerksplanung und Objektplanung) modellieren das BIM-Modell und bereichern somit dessen Datenmodell mit Daten an. Jedoch sind die unterschiedlichen Plattformen nicht darauf ausgelegt, alle notwendigen Daten zur Definition aller relevanten Informationen des kompletten Lebenszyklus eines Gebäudes zu erzeugen. Um diese Lücken im Datenmodell zu füllen, werden BIM-Werkzeuge verwendet. Das unvollständige Datenmodell fungiert als Input für die BIM-Werkzeuge, dessen Output die Lücken füllen. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein BIM-Datenmodell, welches die Daten zur Abbildung aller Informationen des kompletten Lebenszyklus des Gebäudes beinhaltet. Das nächste

Kapitel befasst sich mit der Untersuchung der relevanten Datenmodelle.

2.2 BIM-Datenmodelle

Der Einsatz von computergestützten Methoden im Bauwesen basiert auf Datenmodellen [Borrmann u. a., 2015a; Weise, 2006; Eastman u. a., 2008; Liebich u. Hausknecht, 2016; van Treeck, 2004]. Die Datenmodelle repräsentieren digitale Abbildungen der geplanten Realität und stellen somit reale Sachverhalte unter gleichzeitiger Ausblendung irrelevanter Informationen dar [Weise, 2006; Wimmer u. Wimmer, 2017; Kastens u. Büning, 2014]. Diese digitalen Bauwerksmodelle bestehen aus einer Ansammlung von Modellelementen, die physikalische und funktionale Eigenschaften eines realen Bauteils abbilden, bspw. Wände, Türen, Rohre, etc. [Egger u. a., 2013]. Sie werden funktionspezifisch entworfen und verfolgen den Zweck, eine integrale Planung zu verwirklichen. Alle notwendigen Daten und Informationen werden im BIM-Modell erarbeitet, gespeichert und zur Verfügung gestellt [van Treeck, 2004; Eastman u. a., 2008; Borrmann u. a., 2015a].

BIM-Modelle werden oftmals als „nD-Modelle“ bezeichnet. Diese Bezeichnung lässt sich aus der geometrischen Definition von 2D- zu 3D-Modellen ableiten. Während 2D-Modelle lediglich abstrakte Schnitte und Ansichten von Bauwerken oder Bauteilen darstellen, bilden 3D-Modelle bereits intuitiv nachvollziehbare Ansichten. Darüber hinaus gibt es 4D-Modelle, welche die zeitliche Komponente an die Bauteile anknüpfen und somit sogenannte „Analyse-“ oder „Simulations-Modelle“ darstellen. Die zeitliche Komponente ist bspw. in der Planung des Bauablaufs von großer Relevanz. Hierbei wird das physische Erstellungsdatum dem modellierten Bauteil angehängt, um somit den Bauablauf planen zu können. 5D-Modelle wiederum beziehen sich auf die Kosten. Die Summe der Daten und Informationen erlaubt die Kalkulation für das Projekt [Liebich u. Hausknecht, 2016; VBI, 2016; Wimmer u. Wimmer, 2017].

Das BIM-Datenmodell umfasst laut Definition des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (siehe Abschnitt 1.1) alle notwendigen Daten zur Beschreibung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Aus diesem Ziel leiten sich Randbedingungen ab, die eine Abbildung aller Produktinformationen verlangt. Dies ermöglicht einen neutralen und standardisierten Austausch und die Verwaltung von Daten und Informationen [Planen-Bauen 4.0, 2015; BMVI u. Do-brindt, 2015]. Dieser Ansatz ist in der Praxis wegen der großen Vielfalt an Informationen bisher nicht umsetzbar, so dass ein einzelnes zentrales Datenmodell nicht alle notwendigen Strukturvorgaben zur Beschreibung aller notwendigen expertisenspezifischen Informationen beinhalten kann. Das Ergebnis ist die Integration mehrerer fachspezifischer Modelle zur Verwirklichung der angestrebten integralen Datenkonsistenz. Datenmodelle sind somit ein Kompromiss zwischen geforderter und realistisch umsetzbarer Datenstruktur. Beim Entwurf eines Datenmodells rückt der Anwendungsbezug in den Vordergrund der Betrachtung [Weise, 2006; Liebich u. Hausknecht, 2016; Gadatsch, 2017;

Fuchs, 2014; Scherer u. Schapke, 2014a,b].

Zwei Modellansätze lassen sich daraus ableiten [Weise, 2006]:

1. Integration fachübergreifend benötigter Bauwerksinformationen in einem Modell;
2. Abbildung fachspezifischer Details in spezialisierten Fachmodellen.

Die Integration wesentlicher Bauwerksinformationen in einem einzelnen BIM-Modell findet Anwendung im Austausch von Informationen der unterschiedlichen Fachbereiche. Durch die Arbeit an einem gemeinsamen, einheitlich definierten Gesamtmodell werden Inkonsistenzen leichter erkannt und somit vermieden. Auch wenn an einem Gesamtmodell gearbeitet wird, werden die Gesamtdaten in Fachmodelle zerlegt. Dies erfordert eine hohe Qualität in der Implementierung der integral zusammengeführten Planungsdaten [Weise, 2006; Faschingbauer, 2011]. Dieser Ansatz ist jedoch, aufgrund der Komplexität und der begrenzten Leistung der bestehenden informationstechnischen Systeme, bisher in der Praxis nicht umsetzbar [Liebich u. Hausknecht, 2016].

Die Verwendung von fachspezifischen Modellen wirkt sich auf die Integration der Informationen aus. Die Übertragung der Informationen unterschiedlicher Fachmodelle ist nur mit einer ergänzenden Definition des Beziehungsgefüges der einzelnen Modelle untereinander und der dazwischen geschalteten Verknüpfungs- bzw. Transformationsregeln möglich [Weise, 2006; Faschingbauer, 2011; Scherer u. Schapke, 2014c]. Zur Gliederung der Fachmodelle werden projektabhängig zweckmäßige Klassifikationen wie Domäne, Zone, Detaillierungsgrad und Phase festgelegt. Die Domäne wird wesentlich durch die Perspektive des Fachplaners bestimmt, bspw. Architekt, Tragwerksplaner oder Technische Gebäudeausrüstung (TGA)-Ingenieur. Grundsätzlich bilden die technischen, wirtschaftlichen und funktionalen Eigenschaften des BIM-Modells die Grundlage für die Entscheidungsfindung. Darüber hinaus kann auch die Erstellung und Nutzung, durch die anvisierte Modellverwendung und durch die Disziplin und Software des Modellerstellers, Einfluss auf die Modellbildung haben. Abhängig von der Softwarearchitektur und der Projektorganisation können die Fachmodelle erstellt, bearbeitet und koordiniert werden. Die Zone beschreibt die räumlichen Abgrenzungen, die anhand der Stockwerke, Bauabschnitte und spezialisierter Teilaufgaben gebildet werden. Durch diese Randbedingungen kann ebenfalls eine weitere Unterteilung von Fachmodellen in sogenannte Teilmodelle erforderlich werden. Jedoch sind dies keine starren Vorgaben, vielmehr ändern sich Zonen im Laufe der Bearbeitung. Teilmodelle differenzieren Fachmodelle weiter, so dass diese nutzbar bleiben und zielgerichtet bearbeitet werden können. Der Detaillierungsgrad und die Phase beziehen sich auf den Fortschritt der Planung und somit auf den Grad der Fertigstellung des Modells (siehe hierzu Kapitel 2.6) [van Treeck, 2016b]. Ein Koordinationsmodell fasst mehrere Fachmodelle zusammen und stellt die zentrale Ressource der modellbasierten Zusammenarbeit und Qualitätssicherung des Gesamtprojekts dar. Das Koordinationsmodell gibt insbesondere Aufschluss über die Konsistenz; etwaige geometrische Kollisionen oder fachliche Konflikte zwischen den einzelnen Modellen können

frühzeitig gelöst werden. Neben diesen allgemeinen Fehlern dient das Koordinationsmodell auch zur Prüfung der vereinbarten Projektstandards wie Modellierungsfehler, falsche Elementtypen, etc. Koordinationsmodelle haben das Ziel der Qualitätssicherung aller Modelle in der jeweiligen Bearbeitungsphase. Die unterschiedlichen Modelle werden zusammengeführt und integral korrigiert, dabei wird kein eigenständiges Modell erzeugt. Durch eine solche zentrale Koordination werden frühzeitig interdisziplinäre Fehler vermieden, die in der konventionellen Planung erst in der Bauausführung auffallen würden [Liebich u. Hausknecht, 2016; van Treeck, 2016b].

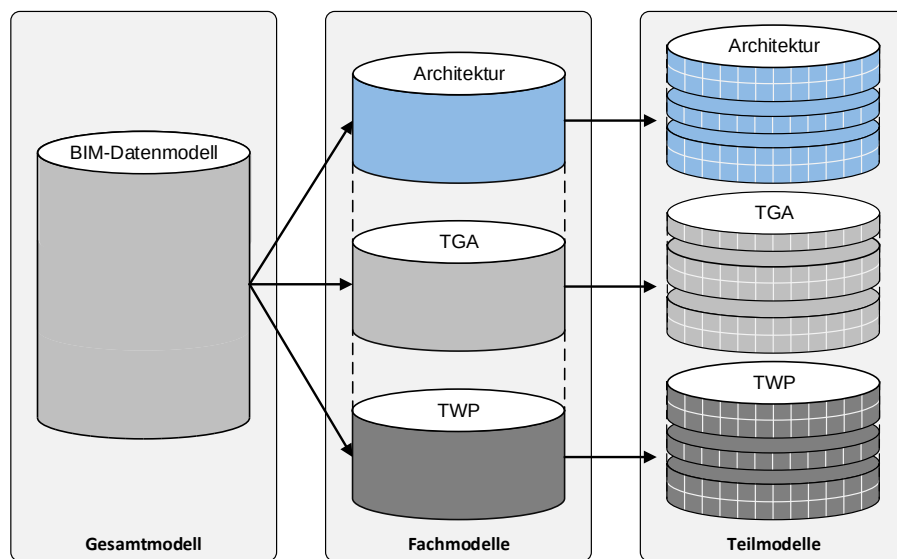


Abbildung 2.5: Veranschaulichung des Sachverhalts der Modellbildung Gesamtmodell, Fachmodelle, Teilmodelle.

Abbildung 2.5 veranschaulicht den Sachverhalt der Modellbildung. Aus einem Gesamtmodell werden bspw. domänenspezifische (TGA, TWP, Architektur) Fachmodelle abgeleitet. Diese werden wieder funktionspezifisch unterteilt zu Teilmodellen.

Modelle können zusätzlich in sogenannte Anforderungs-, Bearbeitungs- und Auswertungsmodelle unterschieden werden [Egger u. a., 2013]. Anforderungsmodelle beinhalten alle notwendigen Informationen des Auftraggebers und bilden die Grundlage für die Planung. Bearbeitungsmodelle hingegen entsprechen den Fachmodellen, die mit den BIM-Plattformen bearbeitet werden. Daraus werden wiederum Auswertungsmodelle abgeleitet. Auswertungsmodelle werden für die ausschließliche Beantwortung spezialisierter Fragestellungen generiert [Liebich u. Hausknecht, 2016].

In der Modellvielfalt müssen die Schnittstellen derart gestaltet sein, dass die Kommunikation ohne Verlust oder Fehlinterpretation von Daten und Informationen stattfindet. Damit diese Anforderung

ebenfalls für Datenmodelle erfüllt ist, die nicht für die jeweilige Schnittstelle standardisiert sind, muss die Zuordnungslogik im Beziehungsgefüge zusätzlich definiert werden. Die Grundlage dieser Transformation sind jeweils die nativen Formate des exportierenden Programms. Nutzt dieses Programm ein offenes und somit standardisiertes Format, können die Beziehungsgefüge der Schnittstellen allgemeingültig formuliert werden. Im nächsten Kapitel wird auf das Industry Foundation Classes (IFC)-Format eingegangen, dass genau diese Eigenschaft aufweist.

2.3 Industry Foundation Classes

Das grundlegende Datenmodell im Kontext der open-BIM-Einsatzformen ist IFC [ISO EN 16739, 2013]. IFC stellt einen herstellerunabhängigen, umfassenden Standard zur Beschreibung von digitalen Bauprojekten dar. Die Version 1.0 wurde 1997 von buildingSMART International (bSI) (damals Industrieallianz für Interoperabilität IAI e.V.) veröffentlicht. Dieses Datenformat entstand aus dem Bestreben unterschiedliche CAD-Tools über deren proprietäre Grenzen hinaus miteinander zu verknüpfen [van Treeck, 2004]. Die Idee, ein Basismodell zur gemeinsamen Datennutzung zu verwenden, fand zunächst in industriellen Forschungskreisen Zuspruch. Das IFC-Datenmodell wurde fortan kontinuierlich weiterentwickelt und befindet sich bereits in der Version 4 mit zwei Addenda (siehe Abbildung 2.6).

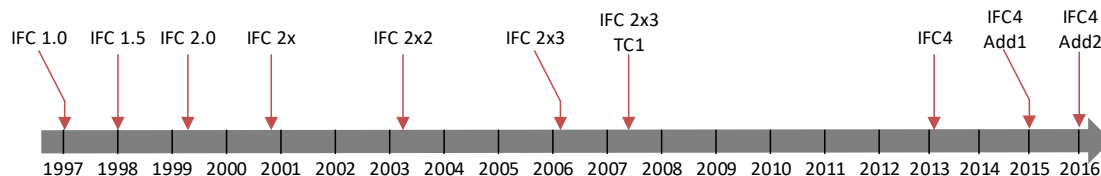


Abbildung 2.6: IFC Versionsverlauf [i. A. a. Liebich u. Hausknecht, 2016].

Die ISO-standardisierte deklarative Sprache EXPRESS [ISO 10303-11, 2004] wird genutzt, um das Datenmodell zu spezifizieren und ISO 10303 Teil 21 [ISO 10303-21, 2016] definiert die Syntax für den dateibasierten Datenaustausch EXPRESS-basierter Modelle (Standard for the exchange of product model data (STEP)). Damit komplexe Zusammenhänge visualisiert und somit intuitiv verständlicher dargestellt werden können, existiert neben der textuellen EXPRESS Notation eine graphische Variante, die sogenannte EXPRESS-G. EXPRESS-G stellt eine Teilmenge der EXPRESS Beschreibungssprache dar [ISO 10303-11, 2004]. Neben der EXPRESS-Repräsentation des IFC-Schemas wurde ein weiteres

etabliertes Format gewählt. IfcXML basiert auf der Extensible Markup Language (XML) [W3C, 2012] und erweitert die Dokumentation des IFC-Schemas [ISO 10303-28, 2007].

Anfangs wurde der Standardisierungsprozess als hemmend angesehen und die Entwicklung zunächst unabhängig von der ISO vorangetrieben. Derart unabhängig konnten rasch neue Versionen erstellt werden, deren Verlauf in Abbildung 2.6 ersichtlich ist. Im Jahr 2013 fand eine ISO-Standardisierung des IFC-Datenmodells mit der Nummer 16739 statt. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation wurde bereits an der Übertragung in eine nationale DIN-Norm gearbeitet. Somit soll ermöglicht werden, dass das IFC-Datenmodell vertraglich in deutschen Bauprojekten gefordert werden kann. Eine Standardisierung des Datenformats ist insbesondere für die Baubranche von großer Relevanz. Standardisierte Formate müssen rückwärtskompatibel sein, so dass davon ausgegangen werden kann, dass ältere Versionen auch in Zukunft weiterhin lesbar sind. Aufgrund der Langlebigkeit von Bauwerken ist diese Eigenschaft ein unabdingbares Element um den Zugang zu den Modellen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg zu garantieren.

Das IFC-Datenmodell ist ein Objektmodell und bildet mehr als 700 Klassen ab. Die Klassen sind eindeutig fachlich definiert und werden über objektifizierte Relationen zu anderen Klassen, zusätzlich zu den Vererbungsrelationen, formal abgebildet. Diese Definitionen werden im IFC-Datenmodell generell durch sogenannte Entitäten (Entity), Funktionen (Functions), Regeln (Rules), Attribute (Attributes) sowie Relationen (Relations) konkretisiert. Zusätzlich existieren die Funktionen der Mengenlisten (Quantity Sets) und der Property Set (PSet), wodurch dynamisch erweiterbare Eigenschaftssätze modular definiert werden können.

Diese Eigenschaftssätze sind teilweise bereits in der Schemadokumentation, welche das Datenmodell definiert, aufgeführt. Dadurch können den einzelnen Klassen spezifikationsunabhängig, über die Schemadefinition hinausgehende Eigenschaftssätze zugeordnet werden, die eine individualisierte semantische Erweiterungsfunktion erlauben. PSets sind ein wichtiges Instrument in der Definition der objektinhärenten Informationen. Datentypen und Wertebereiche bilden die Zustandsmerkmale der Klassen und können durch Aufzählungslisten (Enumerations) und Relationen zu anderen Objekten weiter spezifiziert werden.

Attribute sind im Vergleich zu Properties Eigenschaftssätze, die obligatorische objektspezifische Bestandteile des IFC-Datenmodells darstellen und somit globale Eigenschaften abbilden. Dadurch werden grundlegende Informationen und Beziehungen einheitlich abgebildet.

Abbildung 2.7 zeigt die EXPRESS Definition der Entität *IfcObject*. Hervorgehoben sind die einzelnen Elemente des Datenschemas, mit der Entitäten definiert werden. Entitäten besitzen Beziehungen untereinander, die deren Attribute definieren. Die Beziehungen und Attribute werden an die Subtypen weitervererbt. Bspw. wird das Attribut zur Festschreibung der Globally Unique Identifier (GUID) immer von der Superklasse *IfcRoot* vererbt. In dem aufgeführten Beispiel ist *IfcObjectDefinition* ein

direkter Subtyp von *IfcRoot* und die Superklasse von *IfcObject*.

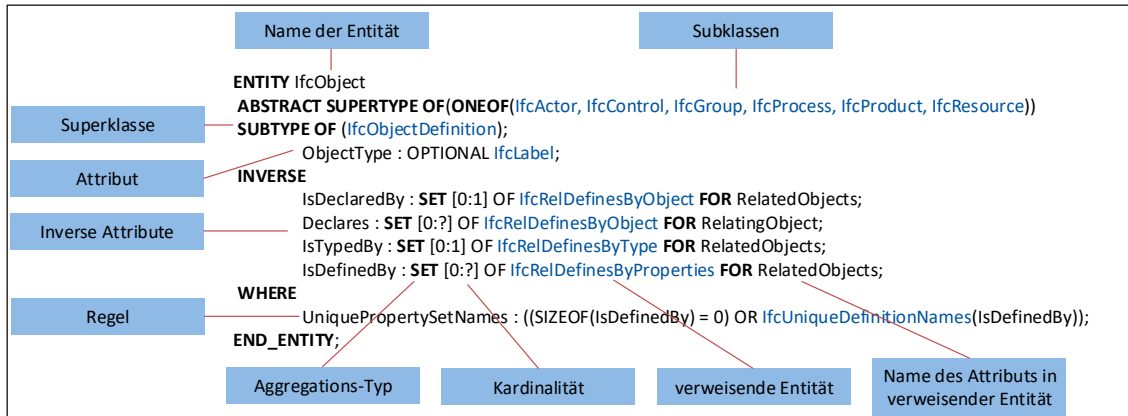


Abbildung 2.7: Definition von *IfcObject* mit der Datenmodellierungssprache EXPRESS [i. A. a. Borrmann u. a., 2015b].

Beziehungen (Assoziationen) zwischen unterschiedlichen Typen von Objekten (Instanz einer Klasse, bzw. Entität) werden durch eine gegenseitige Abbildung der Attribute dargestellt. Die Beziehungen weisen nicht nur auf den Subtypen, sondern dieser verweist auch invers auf den in der Hierarchie übergeordneten Typen (Oberklassen). Somit werden die Beziehungen eindeutig festgelegt. Im aufgeführten Beispiel gehört das Attribut `OBJECTTYPE` zur Entität *IfcObject*. *IfcObject* kann vier verschiedene inverse Attribute von anderen Entitäten beinhalten.

Für die Attribute werden ebenfalls die Aggregations-Datentypen wie List, Array, Bag oder Set mit den jeweiligen Kardinalitäten festgelegt. Die Kardinalitäten sind entweder durch exakte Werte (bspw. [1:1]) oder durch einen Wertebereich angegeben ([min:max], bspw. [0:?]). Set und Bag sind ungeordnete, wohingegen List und Array geordnete Aggregations-Datentypen sind. Ein Bag kann einen Wert, im Gegensatz zu einem Set, mehrmals enthalten. Ein Array hat eine fixierte Anzahl an Werten, dies gilt nicht für den List Datentyp. Diese einfachen Aggregations-Datentypen können auch miteinander kombiniert werden, um komplexere Datentypen zu definieren.

Ein wesentlicher Bestandteil zur Beschreibung der Datenkonsistenz ist der Where-Block. Damit werden algorithmische Regeln festgelegt, die einen booleschen Ausdruck bilden. Dieser muss als „Wahr“ ausgewertet werden, damit die jeweilige Instanz Gültigkeit besitzt. In der Abbildung 2.7 wird die Bezeichnung der PSets überprüft, dabei dürfen keine Bezeichnungen mehrfach vergeben werden (`UniquePropertySetNames`).

Selektionstypen und Aufzählungstypen sind ebenfalls relevante Besonderheiten der EXPRESS-Spra-

che. Selektionstypen dienen als Platzhalter für noch nicht festgelegte Typen eines Attributs (bspw. für den Heizkessel: WATER oder STEAM). Aufzählungstypen erlauben eine Auswahl von vordefinierten Attributen, bspw. aus einer Liste [Liebich u. Hausknecht, 2016]. Abbildung 2.8 zeigt eine Instanz, in welcher der Aufzählungstyp für den vordefinierten Typen als WATER definiert wurde.

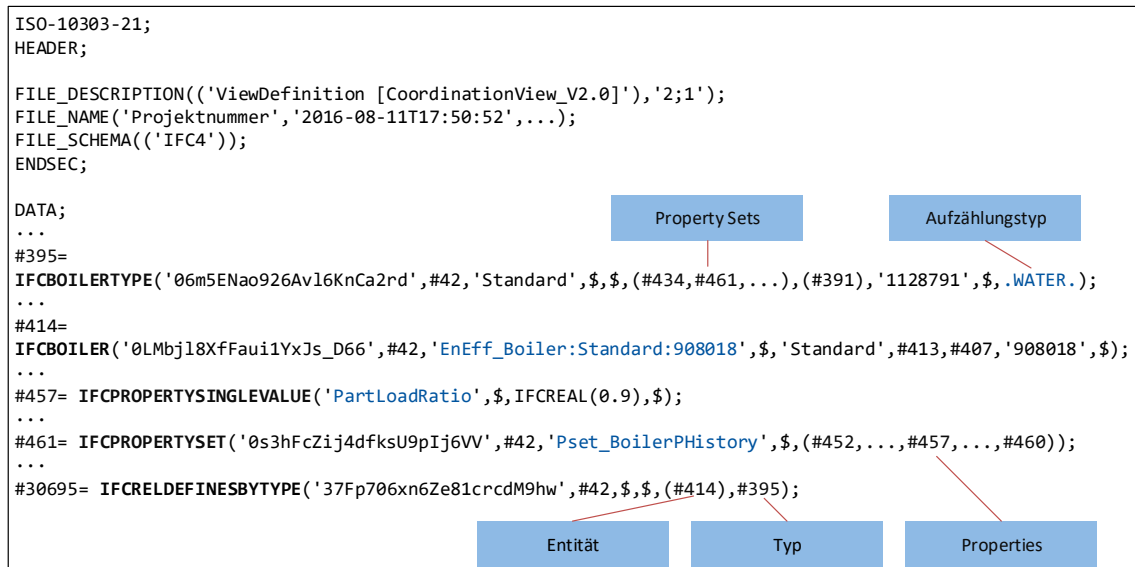


Abbildung 2.8: Ausschnitt aus einer IFC-Datei.

Abbildung 2.8 zeigt den Header und die Typisierung eines Heizkessels (*IcfcBoiler*) in einer IFC-Datei. Jede IFC-Datei beginnt mit der Referenz zum STEP-Standard ISO 10303-21 [ISO 10303-21, 2016]. Der Header gibt Aufschluss darüber welche Model View Definition (MVD) und welches Schema zur Erstellung der IFC-Datei verwendet wurde. Eine MVD beschreibt eine Untermenge des IFC-Datenmodells, mit der die IFC-Datei instanziiert wird (siehe Abschnitt 2.5.2). Des Weiteren werden projektspezifische Informationen aufgeführt. Nach dem Header folgen die eigentlichen Daten der Datei. In diesem Beispiel ist eine semantische Typisierung eines Heizkessels dargestellt. Der Typ *IcfcBoilerType* wird mittels der *IcfcRelDefinesByType*-Beziehung dem Objekt *IcfcBoiler* zugeordnet. Zusätzlich werden dem Typ Properties angehängt.

Das hier aufgeführte Beispiel gibt Aufschluss über die Objektbeziehungen im IFC-Datenmodell. Beziehungen werden nicht über direkte Assoziationen abgebildet, sondern über objektfizierte Beziehungen. Das bedeutet, dass die Beziehungen selbst über ein dazwischengeschaltetes Objekt realisiert werden (hier *IcfcRelDefinesByType*), welche zusätzlich eine Beschreibung des Zwecks dieser Verbindung beinhalten können.

Das IFC-Datenmodell ist ein fachübergreifender BIM-Standard und verfügt, im Vergleich zu den anderen frei verfügbaren Modellen (bspw. gbXML [Green Building XML Schema Inc., 2016] oder SimModel, mehr Informationen zu diesen Formaten am Ende dieses Kapitels, ab Seite 26), das breiteste Anwendungsspektrum.

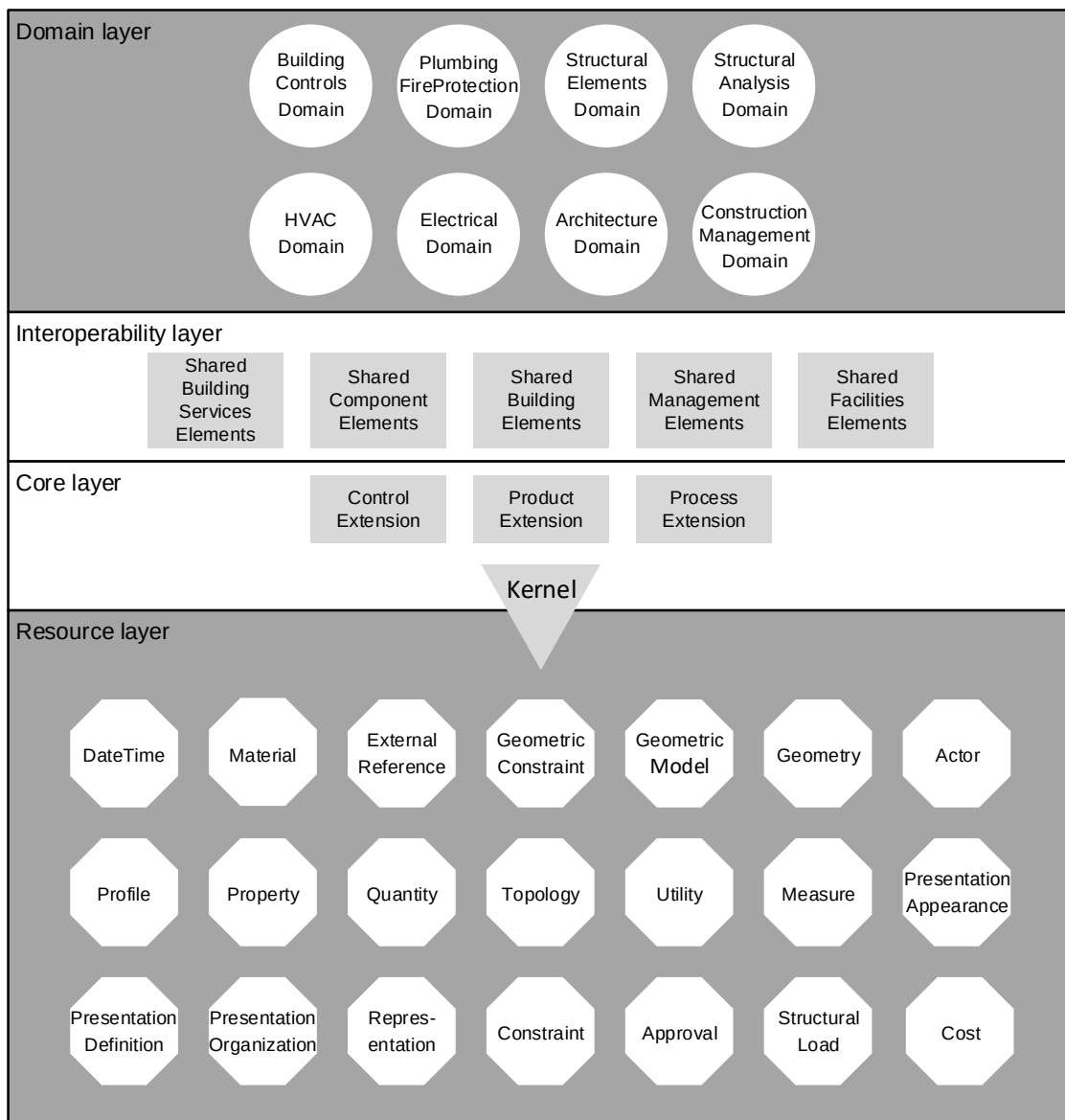


Abbildung 2.9: IFC4-Datenmodell (BuildingSMART International [2016d]).

Das IFC-Schema ist hierarchisch aufgebaut und gliedert sich in vier Ebenen (engl. Layer) (siehe Abbildung 2.9). Die oberste Ebene bildet der sogenannte Domain-Layer. Dieser Layer wird anhand der einzelnen Bereiche des Bauwesens strukturiert (Architektur, TGA, Konstruktiv, usw.). Darunter positioniert ist der Interoperability-Layer, wodurch Informationen zwischen verschiedenen Domänen und dem sogenannten Core-Layer ausgetauscht werden. Diese Referenzierung ist nicht bidirektional, sondern streng hierarchisch, wodurch der Domain-Layer auf den Interoperability-Layer verweisen kann, aber nicht umgekehrt. Die allgemeine Struktur des Datenmodells wird im sogenannten Core-Layer definiert. Dort werden allgemeingültige Relationen und Attribute wie Gruppierung, Aggregation, Identifikation etc. in abstrakten Klassen vereinbart. *IfcRoot* bildet den Ursprung aller darüberliegenden Klassen. Die zusätzlichen Elemente im Core-Layer dienen der Beschreibung der Steuerung (*IfcControlExtension*), der physischen Objekte (*IfcProductExtension*) und der Abbildung der Prozesse (*IfcProcessExtension*). Die unterste Ebene des IFC-Datenmodells stellt der Resource-Layer dar. Auf diesen wird von allen Klassen direkt oder indirekt referenziert. Allgemeine Definitionen wie die Geometrie (*IfcGeometryResource*) oder die Beschreibung von Materialien (*IfcMaterialResource*) werden dort vorgenommen. Die Elemente des untersten Layers können nicht unabhängig existieren, da sie über keine eigene Identität, gewährleistet durch den GUID, verfügen.

Abbildung 2.10 zeigt die im IFC-Datenmodell vorgegebene bidirektionale Verbindungshierarchie der Objekte am Beispiel des Heizkessels *IfcBoiler*. Der Heizkessel ist der Klasse *IfcEnergyConversionDevice* für Energiewandler als Unterklasse zugeordnet. *IfcEnergyConversionDevice* ist wiederum *IfcDistributionFlowElement* für allgemeine Komponenten der TGA und *IfcDistributionElement* für allgemeine haustechnische Komponenten zugeschrieben. *IfcElement*, als allgemeines Element, ist *IfcProduct* untergeordnet. Diese Hierarchie kann als die IFC-inhärente Klassifikation angesehen werden, für welche auf der untersten Ebene noch spezialisierte Typen definiert sind [Liebich u. Hausknecht, 2016].

Die nach *IfcRoot* aufgeführten Entitäten befinden sich in der Verbindungshierarchie alle in der Entität *IfcObject*. Diese Entität ist eine von drei fundamentalen Entitäten, die zur Abbildung von relevanten Funktionen im IFC-Datenmodell definiert sind. *IfcObject*, *IfcRelationship* und *IfcPropertyDefinition* sind die drei abstrakten Entitäten die gemeinsam alle Grundfunktionen beherbergen und die in direkter Verbindung mit der abstrakten *IfcRoot* Klasse stehen:

- ▷ *IfcObject*: Abbildung aller Objekte;
- ▷ *IfcRelationship*: Abbildung aller Entitäten die für die objektifizierte Verbindung benötigt werden;
- ▷ *IfcPropertyDefinition*: Abbildung aller Merkmalseigenschaften für Entitäten.

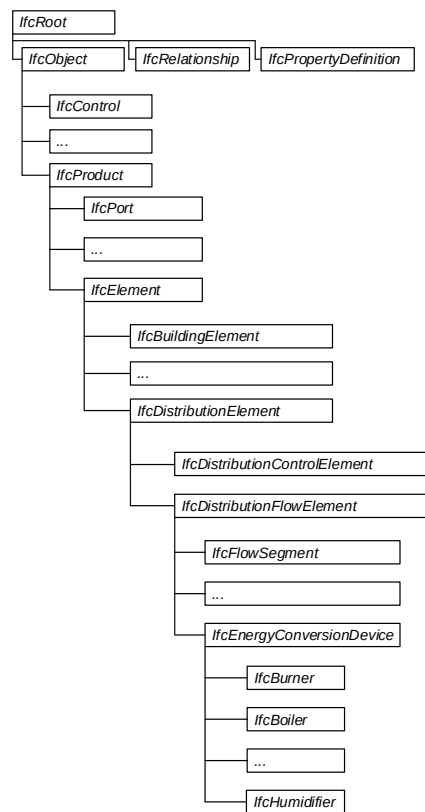


Abbildung 2.10: Auszug der bidirektionalen Vererbung für gebäudetechnische Komponenten im IFC Datenmodell.

Eine ausführliche Dokumentation des IFC-Datenmodells steht für die Allgemeinheit zugänglich, online zur Verfügung [BuildingSMART International, 2016d].

Die Dokumentation verwendet zur vollständigen Definition vier unterschiedliche Spezifikationen. Die erste Spezifikation besteht aus einer maschinenlesbaren Schemadefinition in EXPRESS und XML. Diese textuelle Notation wird ergänzt durch die grafische EXPRESS-G-Notation. Des weiteren werden multilinguale Beschreibungen und Erläuterungen aller Entitäten, Attribute, Properties und Referenzen in natürlicher Sprache gegeben. Um die Dokumentation zu vervollständigen, werden zusätzlich Restriktionen definiert, die eine zielgerichtete Verwendung zulassen. Die Dokumentation wird von Softwareentwicklern verwendet und vermittelt ein vollumfängliches Verständnis vom IFC-Datenmodell, um darauf basierend bspw. kompatible Softwareschnittstellen zu implementieren.

Die Tabellen A.1, A.2 und A.3 (siehe Anhang A.1, ab Seite 190) geben einen Überblick über die gebäudetechnischen Komponenten des IFC-Datenmodells in der Version 4 Addendum 2. Zu erkennen

ist die große Bandbreite an Objekten. Jedoch fällt ebenfalls auf, dass nicht alle Komponenten in der gewünschten Detaillierung verfügbar sind. Es fehlt bspw. die Wärmepumpe oder das Blockheizkraftwerk, die dann über allgemeinere Klassen wie *IfcUnitaryEquipment* abgebildet werden müssen (siehe im Anhang Kapitel A.2 *IfcUnitaryEquipment*).

Dieses Beispiel macht deutlich, dass das IFC-Datenmodell nicht alle möglichen Elemente abbilden kann. Vielmehr fungiert es als allgemeine Datenbasis für den Austausch von Informationen. Die Möglichkeit der erweiterbaren Parameter sowie die Modellierung allgemeiner Klassen mittels Proxys, ohne Veränderung des Schemas, verdeutlichen jedoch die Dynamik des IFC-Datenmodells. Hinzu kommt die Möglichkeit der Integration von externen Quellen. Spezialisierte Daten, die nicht vom IFC-Datenmodell abgebildet werden, können durch eine Verlinkung zu Produktdaten, Datenmodellen, Klassifizierungssystemen oder/ und Standards abgebildet werden.

Abbildung 2.11 veranschaulicht die primäre Funktion des IFC-Datenmodells. Dargestellt ist eine Schnittstelle mit zwei Softwaretools und dazwischen befindet sich ein Datenmodell für den Austausch von Daten. Software A erstellt die Daten in einem Prozess und speichert diese im nativen Format (bspw. die BIM-Plattform Revit mit dem proprietären Format *.rvt). Diese Daten werden für den Export verarbeitet und in ein anderes, integrales Datenformat transformiert (bspw. IFC). Software B empfängt diese Daten und transformiert diese für die interne Verarbeitung. Damit Software B die notwendigen Prozesse ausführen kann, müssen in diesem Beispiel von Software A minimale Datenanforderungen (engl.: Useful Minimum) erfüllt werden. Darüber hinaus gibt es Daten, die für den Prozess vorteilhaft sein können oder eine Erweiterung darstellen. Dieses Spektrum an Daten sollte, nachdem die Schnittstelle etabliert wurde, in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich wird damit veranschaulicht, dass in einer Schnittstelle gewisse Daten kommuniziert werden müssen und dass ein interoperables Datenformat die Schnittstelle verwirklicht.

Diese Eigenschaften machen das IFC-Datenmodell zur zentralen, erweiterbaren Kommunikationsplattform, wobei das BIM-Datenmodell als sogenannte „single source of truth“ fungiert und somit als Datendrehscheibe zur Generierung der Informationen für alle Beteiligten verwendet wird.

Weitere Datenmodelle In diesem Zusammenhang werden im Folgenden weitere Formate erläutert, die für die Untersuchung dieser Arbeit und somit für die Entwicklung eines entsprechenden BIM-Anwendungsfalls benötigt werden.

Das nicht-proprietäre Datenformat Green Building XML (gbXML) wird primär zum Datenaustausch von Geometriedaten zur Energiesimulation genutzt. Es ist ein Gebäudebeschreibungsformat, das entwickelt wurde „um die Planung umweltschonender und energieeffizienter Gebäude zu optimieren“ [Green Building XML Schema Inc., 2016].

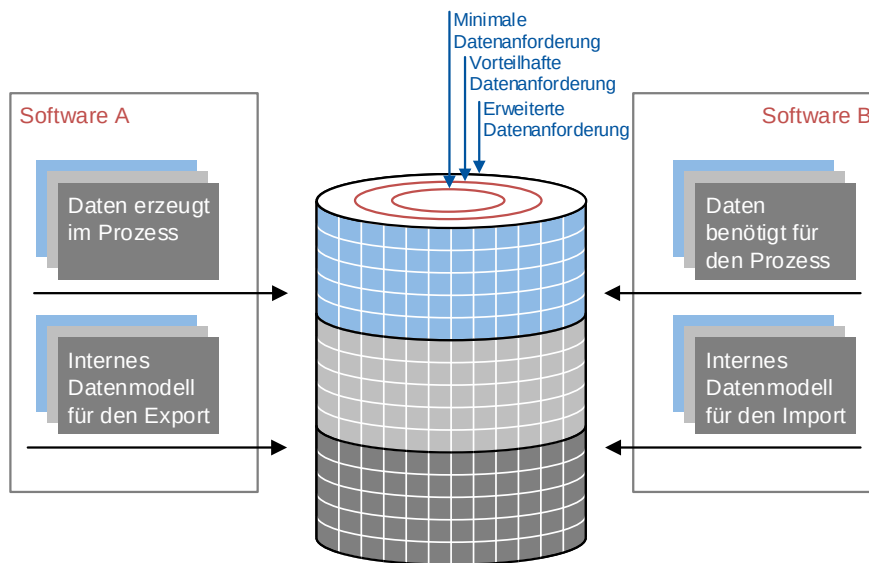


Abbildung 2.11: Die primäre Funktion eines interoperablen Datenmodells in einer Schnittstelle zwischen zwei Softwaretools [i. A. a. Hietanen u. Lehtinen, 2006].

Dieses Format wird von diversen Berechnungsprogrammen unterstützt, wie zum Beispiel dem Green Building Studio, das auf dem vom US Department of Energy entwickelten DOE-2 aufbaut, besteht aus 500 Elementen. Dabei definiert gbXML die TGA auf der systemischen Ebene (bspw. Heizungs- oder Lüftungssystem). Folgende Daten werden beispielsweise abgebildet:

- Informationen über die Baustelle;
- Erweiterung der energiespezifischen Daten;
- Einfache Profile für Nutzungen (Personen, Licht, Maschinen);
- Materialeigenschaften;
- Erweiterung für Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR).

Basierend auf der Unterteilung von Gebäuden in thermische Zonen, werden Methoden ausgeführt, die für die Berechnung der Heiz- und Kühllast benötigt werden.

Ein weiteres relevantes Datenformat ist das Simulation Model (SimModel). SimModel ist ein spezialisiertes Datenmodell für den Einsatz im Anlagen- und Gebäudesimulationsbereich. SimModel wurde am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) entwickelt [LBNL, 2013] und wird vom Unternehmen Digital Alchemy [See u. a., 2011] für die dynamische Gebäude- und Anlagensimulation

angewendet. SimModel fungiert primär als ganzheitliches Input-Datenmodell für Simulationsumgebungen, bspw. EnergyPlus [Rose u. Bazjanac, 2013], bei einer gleichzeitigen flexiblen Abbildung von weiteren Datenmodellen, wie bspw. dem IFC-Datenmodell [Bazjanac u. a., 2011]. SimModel ist ein domänenspezifisches Datenmodell und bietet den Vorteil einer weitreichenden IFC-Konformität. Das Datenmodell wurde auf dem BIM-Datenmodell aufbauend entwickelt, um dieses mit zusätzlichen Informationen für die Simulation zu erweitern.

Des weiteren wurde vom VDI ein Format speziell zur Beschreibung der TGA entwickelt. Die VDI 3805 wird zur Zeit in die ISO-Ebene überführt [DIN ISO 16757-1, 2015]. Ziel der Richtlinie ist die Regelung des Produktdatenaustauschs im rechnergestützten Planungsprozess innerhalb der TGA. Die Produktdaten bieten dabei unterschiedliche Detailtiefen zur Abbildung der gebäudetechnischen Komponenten, deren Definition herstellerabhängig ist und individuell mittels einer noch zu definierenden Skriptsprache gegeben sein wird. Dieser Standard befindet sich jedoch noch in der Entwicklung. Darin ist vorgesehen, dass Informationen von den Herstellern in das BIM-Datenmodell eingebracht werden. Insgesamt können somit technische Informationen sowie Daten zur Wartung und Instandhaltung abgebildet werden. Dabei werden herstellerseitig Daten der gebäudetechnischen Komponenten kommuniziert, welche die Summe der Parameter in digitalen Gebäudemodellen ([VDI 3805, 2011]) durch zusätzliche Daten ergänzen.

Diese weiteren Formate wurden im Projekt EnEff:BIM eingehend auf die folgenden Kriterien hin untersucht:

- ▷ Energierrelevante TGA-Daten: Das Datenformat hält Daten und Informationen für den zielführenden Einsatz des BIM-Anwendungsfalls vor;
- ▷ Erweiterungsmöglichkeit: Die Datenformate müssen angepasst und somit erweitert werden können;
- ▷ Offenheit: Das Datenformat muss gemäß einer open-BIM-Einsatzmethode interoperabel verwendbar sein;
- ▷ Objektorientiert: Das Datenformat ist objektorientiert, wodurch eine strukturelle Konformität der Daten und Informationen vorhanden ist;
- ▷ Simulationsspezifische Daten: Das Datenformat kann unterstützend simulationsrelevante Daten und Informationen vorhalten.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 2.2 die Gegenüberstellung der Datenmodelle anhand der genannten Kriterien. Das wichtigste Kriterium „Offenheit“ repräsentiert die Möglichkeit der Verwendung des Datenmodells in einem interoperablen Ansatz gemäß einer open-BIM-Einsatzmethode (siehe Abbildung 2.3, auf Seite 14). Die Modelle müssen dementsprechend frei zur Verfügung stehen und einsehbar sein. Dies trifft bei allen Datenmodellen, bis auf das der ISO 16757, zu. Dieses befindet

sich derzeit noch in der Ausarbeitung. Der Fokus der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Methode liegt ebenfalls auf der Abbildung von gebäudetechnischen Daten auf der Komponentenebene. Daher ist das Kriterium der „Energierrelevante TGA-Daten“ ebenfalls ausschlaggebend. Dieses Kriterium wird von allen Datenmodellen weitestgehend erfüllt, wobei unterschiedliche Informationstiefen vorliegen. GbXML ist aufgrund der geringen Anzahl von angebotenen Objekten aus dem Bereich der Gebäudetechnik nicht geeignet. GbXML definiert die TGA auf der systemischen Ebene (Existence Flags) und kann als ergänzendes Format angesehen werden.

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der im Projekt EnEff:BIM untersuchten Datenmodelle [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

	IFC	gbXML	ISO 16757	SimModel
Energierrelevante TGA-Daten	X	(X)	X	X
Erweiterungsmöglichkeit	(X)	X	–	X
Offenheit	X	X	–	X
Objektorientiert	X	X	X	X
Simulationsspezifische Daten	(X)	(X)	–	X

X Kriterium erfüllt, (X) Kriterium teilweise erfüllt, – Kriterium nicht erfüllt

Damit die verwendeten Datenmodelle für die gegebene Spezialisierung anpassbar sind, muss das Kriterium „Erweiterungsmöglichkeit“ ebenfalls erfüllt werden. Alle Datenmodelle sind grundsätzlich erweiterbar. Jedoch unterliegt das IFC-Datenmodell dem Zyklus der Normierung, so dass eine Erweiterbarkeit nur bedingt gegeben ist. Jede Änderung des in der Norm festgelegten IFC-Schemas erfordert eine zeitintensive internationale Normierungsarbeit. Zudem unterliegen Änderungsvorschläge einem definierten Prozess dessen Ausgang nicht immer genau vorhersehbar ist. Das IFC-Datenmodell wird in regelmäßigen Abständen neu gesichtet und ggf. modifiziert. Eine flexible Erweiterungsmöglichkeit ist jedoch auf der Ebene der Property und Quantity Sets gegeben, da diese nach Belieben erweitert werden können. Ebenfalls können durch generalisierte Objekte zweckmäßige Spezialisierungen vorgenommen werden (bswp. *IfcUnitaryEquipment*, *IfcProxyElement*). SimModel hingegen kann auf allen Ebenen zweckmäßig erweitert werden, so dass Objekte und deren Eigenschaften geändert oder dem Modell hinzugefügt werden können. Das Kriterium „Objektorientiert“ ist zur Abbildung der Struktur des BIM-Datenmodells relevant. Diese Eigenschaften sind relevant, damit im Sinne der Homogenität die Komplexität gering gehalten werden kann. SimModel orientiert sich am IFC-Datenmodell und weist entsprechende Eigenschaften auf. Das letzte Kriterium „Simulationsspezifische Daten“ wird in Ansätzen von fast allen Datenmodellen erfüllt, allerdings weist SimModel, durch die Nähe zu entsprechenden Simulationsumgebungen (Energyplus Engine), das breiteste und detaillierteste Spektrum an Simulationsdaten und Objekten auf [RWTH Aachen

University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

Das folgende Kapitel beschreibt, dass international bereits in mehreren BIM-Anwendungsfällen versucht wurde die Modellvielfalt zu beherrschen. Dabei fällt auf, dass keine einheitliche Form gewählt wurde. Darüber hinaus ist festzustellen, dass ebenfalls keine umfassende Definition zur Entwicklung von BIM-Anwendungsfällen existiert.

2.4 Recherche zu BIM-Anwendungsfällen

Dieses Kapitel führt die Ergebnisse einer umfassenden Recherche zu bestehenden Definitionen von BIM-Anwendungsfällen auf. Dabei gilt grundsätzlich, dass Bauvorhaben, in denen Bauwerke in der Regel als Unikate errichtet werden, Projektcharakter besitzen und individuelle Ziele vorweisen. Die unterschiedlichen Aufgaben und die damit einhergehenden Ziele werden in der konventionellen Planung mit den Leistungsphasen der HOAI strukturiert. Die durch die BIM-Methode ermöglichte Verlagerung des Aufwandes in die frühen Planungsphasen (siehe Abschnitt 2.1) verlangt das Aufstellen eines Zielkatalogs zur Bearbeitung mit der BIM-Methode. BIM-Ziele definieren die Projektziele, die mit der BIM-Methode verwirklicht werden und stellen den Ausgangspunkt für die Ableitung einzelner Aufgaben dar [van Treeck, 2016b; Liebich u. Hausknecht, 2016; Borrmann u. a., 2015a; Eastman u. a., 2008]. Beispielhaft sind in Tabelle 2.3 BIM-Ziele aufgeführt.

Tabelle 2.3: Beispielhafte Aufführung von BIM-Zielen in der Planung, Ausschreibung und Bauausführung [Liebich u. Hausknecht, 2016].

Planung	Ausschreibung	Bauausführung
Planungsbegleitendes FM	Baustellenorganisation	Bauablaufplanung
Nachhaltigkeitszertifizierung	Kostenberechnung	Logistik
Standortanalyse	Massenermittlung	Field BIM
Variantenvergleich	Montageplanung	Mangelmanagement
Energiesimulation	Lieferungsplanung	Inbetriebnahme
Betriebssimulation TGA	Visualisierungen	Übergabe ans FM
Kollisionsprüfung	Bauregelprüfung	Dokumentation

Die Festlegung der zu erreichenden Ziele muss mit dem Bauherrn, als eigentlichem Besteller der Leistungen, abgesprochen werden. Diese Anforderungen werden im AIA als für das Projekt relevante BIM-Ziele aufgeführt [DIN EN ISO 19650-2, 2018]. Je Projekt sollte nur ein AIA Bauherrnseitig kommuniziert werden, womit jedoch mehrere aufeinander abgestimmte Anforderungen zur Verwirklichung der BIM-Ziele definiert sind [VBI, 2016].

Aus den im AIA festgelegten BIM-Zielen werden sogenannte BIM-Anwendungsfälle abgeleitet, woraus wiederum ein BAP erstellt wird [Liebich u. Hausknecht, 2016; VBI, 2016; Egger u. a., 2013]. Ein komplementärer Zusammenhang stellt das Lasten- und Pflichtenheft dar. Das Pflichtenheft stellt die Antwort auf das Lastenheft dar, in der sich die Projektbeteiligten dazu verpflichten bestimmte projektspezifische Forderungen zu erfüllen. Der BAP ist die Antwort auf die AIA und beschreibt somit die integrale Erstellung des BIM-Modells. Der BAP stellt eine Richtlinie dar, die definiert, wie die BIM-Ziele erreicht werden sollen [BMVI u. Dobrindt, 2015]. BIM-Anwendungsfälle spielen eine zentrale Rolle und regulieren den prozessorientierten Daten- und Informationsfluss [DIN EN ISO 29481-1, 2016].

BIM-Anwendungsfälle werden für jedes Projekt speziell definiert und sind somit Teil eines Kompendiums. Das Kompendium fasst die einzelnen Aufgaben zusammen, die zur erfolgreichen Projektrealisierung bewältigt werden müssen. Es ergeben sich unterschiedliche Aufgaben, die kontinuierlich projektspezifisch weiterentwickelt und von den verschiedenen Expertisen bearbeitet werden. BIM-Anwendungsfälle werden dazu verwendet, die globale Aufgabe der Realisierung eines Bauprojekts über dessen gesamten Lebenszyklus in klar fixierte Teilaufgaben zu unterteilen. Dabei werden verschiedene Phasen empfohlen, die je nach Projektaufgaben und -größe angepasst werden können:

- ▷ Gather: Relevante Informationen für das Projekt, wie bspw. Ziele, Größe und Status, werden gesammelt;
- ▷ Generate: Basierend auf den bestehenden Informationen werden bereits erste Analysen und Berechnungen durchgeführt, die zur weiteren Entscheidungsfindung beitragen;
- ▷ Communicate: Der Status quo und die ersten Ergebnisse werden ausgearbeitet, visualisiert, dem Projektteam vorgestellt und letztendlich dokumentiert;
- ▷ Analyze: Auf Grundlage weiterer Untersuchungen und der integralen Ausarbeitung des Projektes werden Aufgaben koordiniert, Ergebnisse validiert und Entscheidungen zur Finalisierung getroffen;
- ▷ Realize: Das Projekt wird auf Grundlage der erarbeiteten Ergebnisse zielorientiert realisiert und gegebenenfalls weitere Systeme darauf aufgebaut (bspw. Monitoring-Konzept für das Facility Management).

Die Notwendigkeit von BIM-Anwendungsfällen wurde bereits mehrfach wissenschaftlich untersucht. Im Jahr 2006 wurden von „The Associated General Contractors of America“ erste BIM-Anwendungsfälle (engl. BIM Uses) identifiziert und allgemein beschrieben. Dieser Ansatz wurde zusammenfassend von Eastman, Teicholz, Sacks, u. Liston in der ersten Version ihres Buches „BIM Handbook - A Guide to Building Information Modeling“ übernommen und weiter ausgereift [Eastman u. a., 2008]. Dabei werden die BIM-Anwendungsfälle den einzelnen Rollen chronologisch zugeordnet.

Gleichzeitig werden erstmalig wissenschaftlich fundierte Fallstudien zu verschiedenen in der Praxis angewandten BIM-Anwendungsfällen präsentiert. Diese Methodik wurde in dem viel zitierten „BIM Execution Plan“, des „Computer Integrated Construction Research Program“ aus dem Jahr 2010 verfeinert [Pennsylvania State University, 2010]. Darin werden insgesamt 25 verschiedene, über den Lebenszyklus verteilte BIM-Anwendungsfälle formuliert, die in Abbildung 2.12 dargestellt sind. Die Lebenszyklusphasen beschränken sich in diesem Fall auf die Planung, den Entwurf, den Bau und zuletzt den Betrieb.

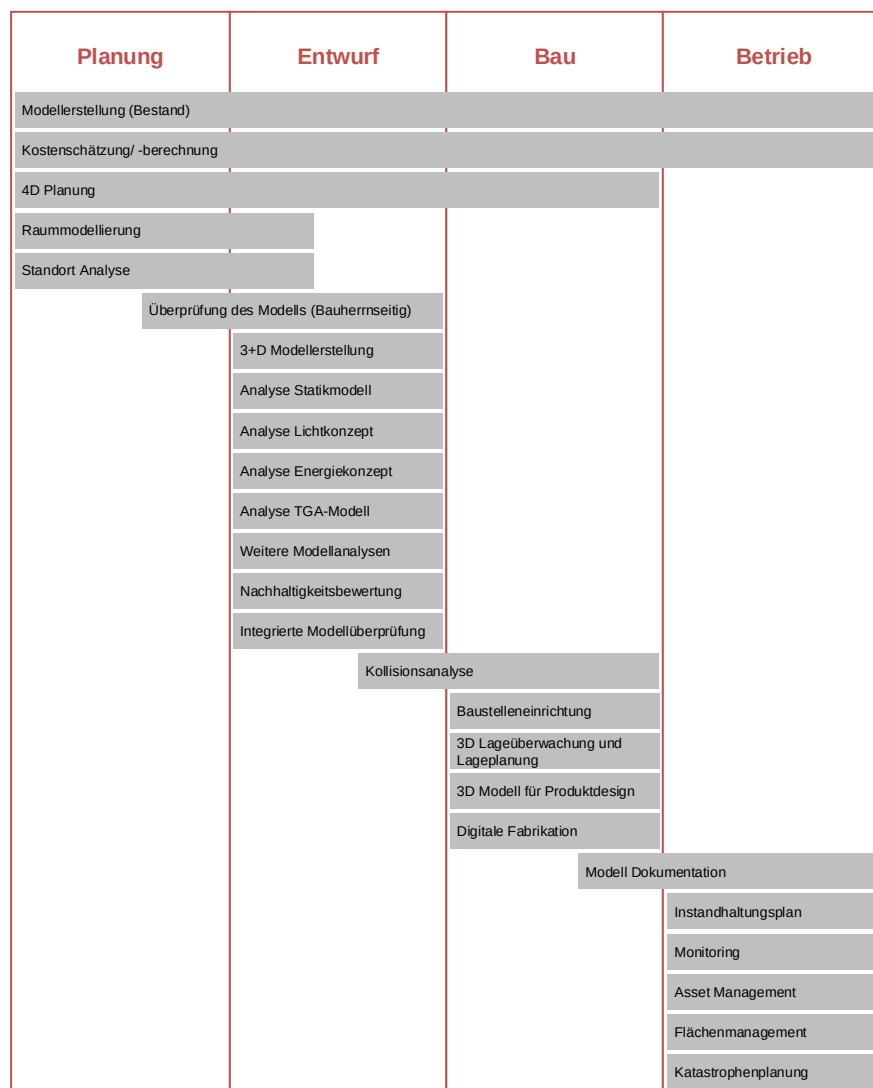


Abbildung 2.12: BIM-Anwendungsfälle des BIM Execution Plan [Pennsylvania State University, 2010].

Der BIM Execution Plan dient als Vorlage für hiesige BAPs und wurde entsprechend entwickelt, um als Handbuch für die BIM-Projektplanung zu fungieren. Ein Schema dient der Identifizierung der für das Projekt relevanten BIM-Anwendungsfälle. Anhand dessen werden für alle vorgesehenen Aufgaben eine einheitliche Struktur und jeweils ein Leitfaden geboten, um diese gemäß den Vorgaben entsprechender U.S.-amerikanischer BIM-Richtlinien zu erfüllen. Die dokumentierten BIM-Anwendungsfälle stellen den damaligen Status quo der in der amerikanischen Bauindustrie bearbeiteten BIM-Anwendungsfälle dar. Die Struktur der einzelnen Anwendungsfälle ist sehr einfach gehalten und geht nicht detailliert auf jedes einzelne Kriterium ein, so dass vom Anwender eine tiefer gehende Ausarbeitung verlangt wird. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der BIM Execution Plan allgemein anwendbar ist und als Grundlage für die ersten Schritte einer Projektrealisierung mit der BIM-Methodik verwendet werden kann.

Der im Jahr 2013 veröffentlichte vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Auftrag gegebene Forschungsbericht „BIM-Leitfaden für Deutschland“ greift diese Thematik auf und empfiehlt den BIM Execution Plan als Grundlage für eine deutsche Projektabwicklung zu verwenden: „Die Autoren empfehlen ebenfalls, diese Arbeit als Grundlage für eine deutsche Vorlage für den BIM-Projektabwicklungsplan heranzuziehen.“ [Egger u. a., 2013].

Einen Schritt weiter geht die „U.S. General Service Administration“ im Jahr 2015 mit dem „BIM Guide“ [General Service Administration, 2015]. Darin werden insgesamt fünf verschiedene BIM-Anwendungsfälle ausführlich definiert:

1. Räumliche Modellierungsrichtlinie;
2. 3D Darstellung;
3. 4D Planung;
4. Energieeffizienz;
5. Facility Management.

Grundsätzlich hat jeder beschriebene Anwendungsfall die gleiche Struktur. Nach einer Einleitung wird die Thematik unter Zuhilfenahme anschaulicher Fallbeispiele dahingehend eingegrenzt, welches Wissen mitgebracht und welche Software verwendet werden sollte. Dadurch wird dem Anwender ausführlich erläutert, wie die General Service Administration die Interoperabilität und Modellierung der Modelle effizient gestalten möchte. Jedoch beziehen sich die Ausführungen ausschließlich auf den U.S.-amerikanischen Raum und lässt nur selektiv Übertragungen auf den deutschen Markt zu. Bspw. sind die Prozessbeschreibungen auf die typischen Strukturen des amerikanischen Raums bezogen, die im deutschen Raum bisher nicht etablierbar sind. Die hier aufgeführten BIM-Anwendungsfälle dienen als Grundlage der Projektstrukturierung in der amerikanischen Bauindustrie.

In Deutschland wurde ebenfalls erkannt, dass BIM-Anwendungsfälle eine große Signifikanz bei der Realisierung von BIM-Projekten haben. Im Buch „Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis“ wird betont, dass BIM-Anwendungsfälle zu Beginn des Bauprojekts anhand der BIM-Ziele festgelegt werden müssen [Borrmann u. a., 2015c]. Darüber hinaus werden einige Anwendungsfälle erwähnt und auch erläutert, jedoch ohne einheitliche Struktur oder Anspruch auf Vollständigkeit [Borrmann u. a., 2015a]. Wesentlich strukturierter gehen Liebich u. Hausknecht in ihrem Buch „BIM-Kompendium - Building Information Modeling als neue Planungsmethode“ vor [Liebich u. Hausknecht, 2016]. Sie benennen eine große Menge an unterschiedlichen BIM-Anwendungsfällen und unterteilen diese entsprechend der little- oder BIG-BIM-Einsatzmethode. Diese werden zusätzlich getrennt, gemäß unterschiedlichen Disziplinen (TGA-/ Tragwerks-/ Objektplanung) zugeordnet und minimal beschrieben, um die jeweiligen BIM-Ziele zu verwirklichen.

Die individuell gestalteten Strukturen der BIM-Anwendungsfälle weichen stark voneinander ab, so dass für eine Zielverwirklichung unterschiedliche Voraussetzungen von den Projektbeteiligten erwartet werden. Diese Diskrepanz wurde bereits erkannt und von Kreider in seiner Dissertation thematisiert [Kreider, 2013]. Kreider entwickelte eine Vorlage zur Definition und Gestaltung von BIM-Anwendungsfällen. Dies erfolgt dabei in enger Zusammenarbeit mit den Hauptverantwortlichen für die internationale BIM Entwicklung [BuildingSMART International, 2015]. Kreiders Ontologie der BIM-Anwendungsfälle floss ebenfalls in die Entstehung des BIM Execution Plans ein. Die „BIM Use Ontology“ definiert die Struktur der BIM-Anwendungsfälle für den U.S.-amerikanischen Raum, damit eine einheitliche Anwendung stattfinden kann und eine gemeinsame Sprache verwendet wird. Dadurch soll die treibende Kraft der Interoperabilität gänzlich eingebunden werden. Die bis hierhin aufgeführten BIM-Anwendungsfälle folgen diesem einheitlichen Bestreben noch nicht und gehen zudem meist nur oberflächlich auf die Definitionen dieser ein.

Die Notwendigkeit von BIM-Anwendungsfällen und deren Standardisierung wurde ebenfalls im Endbericht des vom BBSR in Auftrag gegebenen „Konzept[s] zur schrittweisen Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken – Stufenplan zur Einführung von BIM“ hervorgehoben. Eine identifizierte Teilaufgabe ist die Entwicklung einheitlicher Vorlagen für BIM-Anwendungsfälle und eine Methode zur projektspezifischen Erfassung der Prozesse und Anforderungen mittels Information Delivery Manual (IDM) [Planen-Bauen 4.0, 2015]. Das nächste Kapitel beschreibt eine allgemein standardisierte Methode wie ein BIM-Anwendungsfall definiert werden sollte.

2.5 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik

Ein Information Delivery Manual ist ein von der Internationalen buildingSMART-Organisation [BuildingSMART International, 2016g] verwendeter ISO Standard [DIN EN ISO 29481-1, 2016; DIN EN ISO

29481-2, 2016; ISO/WD 29481-3, 2016] der die Informationsanforderungen im Kollaborationsprozess zwischen den unterschiedlichen Projektbeteiligten zweckgebunden formalisiert. Das Ziel der IDM ist es, Prozesse in der Bauindustrie zu erfassen und eine einheitliche Struktur für den Daten- und Informationsfluss in Form von BIM-Anwendungsfällen zu bieten [DIN EN ISO 29481-1, 2016; Eastman u. a., 2009; East, 2007]. Es wird spezifiziert wo und warum ein Prozess stattfindet, indem aufgeführt wird, wer daran beteiligt ist und welche Informationen wie erstellt und ausgetauscht werden. Daraus werden die Spezifikationen für eine Model View Definition abgeleitet, die eine softwaretechnische Implementierung von identifizierten Schnittstellen erlauben. Diese harmonisierte IDM- und MVD-Methodik erlaubt eine komponentenbasierte Formalisierung eines BIM-Anwendungsfalls von der Managementebene bis hin zur softwaretechnischen Umsetzung.

Mit einer IDM werden drei Anwendergruppen adressiert: Die Managementebene, die den BIM-Gesamtprozess anstößt, die BIM-Endnutzer im Bauprojekt und die BIM-Softwareentwickler, die die informationstechnische Umsetzung ermöglichen. Insgesamt müssen folgende Charakteristika der Anwendergruppen gegeben sein [Wix u. Karlshoej, 2010]:

▷ Die Managementebene:

- entscheidet über die einzusetzende BIM-Einsatzform, bspw. Verwendung der offenen IFC-Schnittstelle zur Verwirklichung des open-BIM-Ansatzes [BuildingSMART International, 2016b];
- kennt den eigentlichen Prozess, auf den sich der BIM-Anwendungsfall bezieht;
- überlässt die technischen Details zur Verwendung der auszutauschenden Informationen anderen Experten (BIM-Endnutzer und BIM-Softwareentwickler);
- integriert Software Spezialisten zur Realisierung der softwaretechnischen Umgebung.

▷ Die BIM-Endnutzer:

- verwenden das jeweilige Datenmodell in der praktischen Umsetzung eines Bauprojekts;
- müssen wissen, welche Informationen zu erwarten sind und wie diese verwendet werden können;
- überlassen den Softwareentwicklern die technologische Umsetzung der Schnittstelle.

▷ Die BIM-Softwareentwickler:

- definieren die Schnittstellen für den Ex- und Import der Daten;
- müssen den Prozess verstehen können, ohne diesen im Detail auszuarbeiten;
- sind Experten für das zu verwendende Datenmodell, bzw. sind in der Lage sich zügig darin einzuarbeiten.

Die verschiedenen Anwendergruppen arbeiten zusammen, um die IDM erfolgreich umzusetzen. Abbildung 2.13 stellt den Aufbau einer IDM vereinfacht dar.

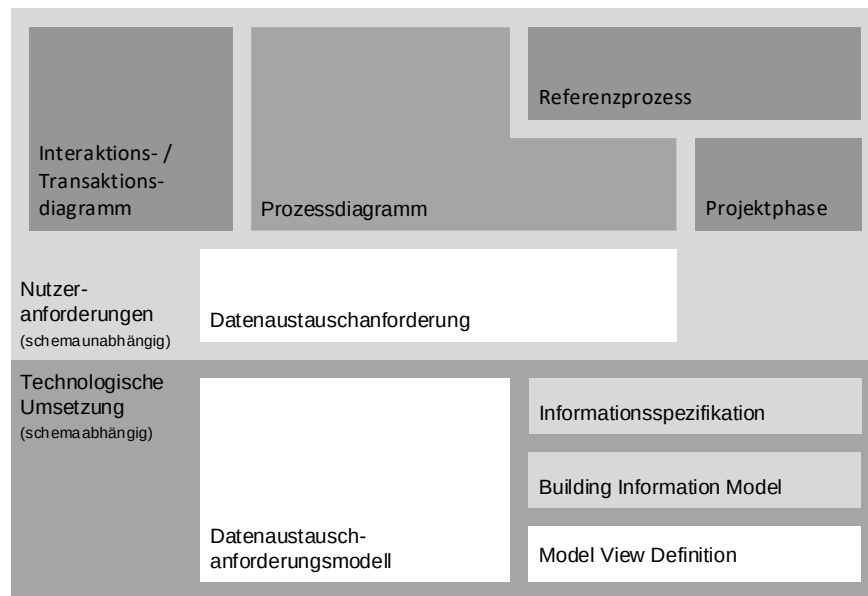


Abbildung 2.13: Vereinfachte IDM-Basisstruktur [i. A. a. ISO 29481-1, 2010].

Zu erkennen sind verschiedene Segmente, die die einzelnen Bausteine einer IDM darstellen. Grundsätzlich besteht eine IDM aus zwei Ebenen: Die nicht-technische Ebene zur Beschreibung der Nutzeranforderungen und die Ebene zur Definition der technologischen Umsetzung.

Die Nutzeranforderungen (Abbildung 2.13) stellen die Definition und Strukturierung des eigentlichen BIM-Bauprozesses dar. Diese Ebene wird vom Management und dem BIM-Endnutzer eingenommen, wobei Folgendes gilt: Der Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Projektbeteiligten löst bereits einen Bedarf an kollaborativen und vertraglichen Festlegungen sowie zur Formalisierung der bereitzustellenden Informationen aus. Die Datenaustauschanforderung wird aus dem zu definierenden Prozess abgeleitet. Bestandteile dieser Ebene sind das Prozessdiagramm, das Interaktions-/Transaktionsdiagramm zur Definition der Rollen und Transaktionen der einzelnen Akteure, die Anforderungen zur Beschreibung der relevanten Daten in den Schnittstellen, der Referenzprozess zur Abbildung etablierter Prozesse und die Projektphase [ISO 29481-1, 2010; Eastman u. a., 2009; East, 2007; Eastman u. Sacks, 2010].

Die technologische Umsetzung (siehe Abbildung 2.13) definiert die softwaretechnische Umsetzung des in der Nutzerebene beschriebenen Prozesses. Aus den beschriebenen Informationen wird ein

Datenaustauschanforderungsmodell abgeleitet. Dies bedeutet, dass die Definition der Applikationsschnittstellen zur Erstellung des BIM-Datenmodells mit dem zu verwendenden Datenschema zusammengefasst werden und in Form einer MVD formuliert wird [Venugopal u. a., 2012].

BIM-Softwareentwickler befassen sich ausschließlich mit der technologischen Ebene, so dass die in der Praxis angewendeten Bauprozesse und deren softwaretechnische Überführung klar definiert und voneinander getrennt sind. Diese thematische Trennung ermöglicht den Kollaborationsprozess der unterschiedlichen Expertisen zur Verwirklichung der gewollten BIM Vorgehensweisen und der dazugehörigen Werkzeuge. Die harmonisierte IDM- und MVD-Methodik beschreibt die Schnittstelle zwischen der Baupraxis und der Softwareentwicklung.

Bestehende Literatur zur Erstellung einer IDM verweist jeweils auf die Ausarbeitungen von Wix u. Karlshoej aus dem Jahr 2010 [Wix u. Karlshoej, 2010]. Auf Grundlage der engen Zusammenarbeit mit Eastman u. a. wurden zahlreiche IDMs entwickelt und veröffentlicht [Katranuschkov u. a., 2010; Huang u. a., 2012; Nawari, 2012; Chipman u. a., 2013; Wu u. Issa, 2014; Gigante-Barrera u. Ruikar, 2016; Pinheiro u. a., 2016]. Basierend darauf wurden einige Anwendungsfälle gemäß der daraus ableitbaren Spezifikation entwickelt, jedoch fehlt es gänzlich einer ausführlichen Erläuterung zu den einzelnen Segmenten einer IDM.

Abbildung 2.14 bietet eine aufgeschlüsselte IDM-Basistruktur, die eine Detaillierung der IDM (ggü. Abbildung 2.13) um mehrere Komponenten beinhaltet. Die Verbindung der einzelnen Komponenten spezifiziert die Assoziationen, wodurch die Beziehungen oder Relationen gekennzeichnet werden. Die Verbindung kombiniert mit der Kardinalität veranschaulicht den Grad der Notwendigkeit der Präsenz und der Häufigkeit einer anderen Komponente. Anhand der beiden folgenden Kapitel werden die einzelnen Bestandteile der IDM genauer erläutert.

Die folgenden Kapitel mit den jeweiligen Abschnitten gehen auf die einzelnen Bestandteile einer IDM ein und erläutern diese. Es werden zunächst die einzelnen Bestandteile der Nutzeranforderungen beschrieben um mit den Komponenten der Technologischen Umsetzung abzuschließen.

und als neue Berufsbilder anerkannt [van Treeck u. a., 2015; Bodden u. a., 2017; Egger u. a., 2013; Drees & Sommer u. Vrame, 2016; Liebich u. a., 2011]. Der BIM-Gesamtkoordinator fungiert als Koordinator des gesamten Projekts. In dieser Funktion arbeitet er eng mit dem Bauherrn zusammen und setzt dessen Anforderungen um. Außerdem werden durch den BIM-Gesamtkoordinator unter anderem die Prüfung der Arbeitsergebnisse und die Erstellung des Gesamtmodells durchgeführt. Der BIM-Koordinator übernimmt die Koordinierung und Überwachung seiner Fachdisziplin, erstellt die Fachmodelle und erteilt die Freigaben. Die ausführenden, am eigentlichen Modell arbeitenden Modellierer werden als BIM-Modellierer bezeichnet.

Interaktions- / Transaktionsdiagramm

Liegt der Fokus auf den Interaktionen zwischen den Akteuren und ist sicherzustellen, dass die vereinbarten Kommunikationsprotokolle zur Erreichung der Projektziele vorhanden sind, ist die Verwendung von Interaktions- / Transaktionsdiagrammen zweckmäßig. Hierbei sind die betreffenden Informationen mit einer Transaktion geknüpft.

Das Interaktionsdiagramm definiert die beteiligten Rollen und die Transaktionen zwischen diesen. Der Zweck eines Interaktionsdiagramms ist es, die (BIM-) relevanten Rollen und Transaktionen für eine bestimmte Aufgabe zu identifizieren. Für jede Transaktion nehmen Initiator und Ausführender jeweils eine Rolle ein. Jede Transaktion wird durch einen eindeutigen Indikator identifiziert [ISO 29481-1, 2010; Przybylo, 2017].

Abbildung 2.15 stellt eine beispielhafte Interaktion in einem Bauprojekt dar. Ein Planungsteam wird von einem Kunden beauftragt. Die Beauftragung wird als Transaktion (Raute T_1) dargestellt. In dieser Interaktion ist der Kunde der Initiator, der die Transaktion auslöst. Die Projektleitung fungiert dabei als Ausführender. Die Projektleitung wiederum initiiert Interaktionen mit weiteren Akteuren, wodurch weitere Transaktionen entstehen. Den Initiatoren und Ausführenden werden im Bauprozess unterschiedliche Rollen zu Teil (siehe Abbildung 2.14, Bereich Interaktions- / Transaktionsdiagramm) [Shearer, 2000].

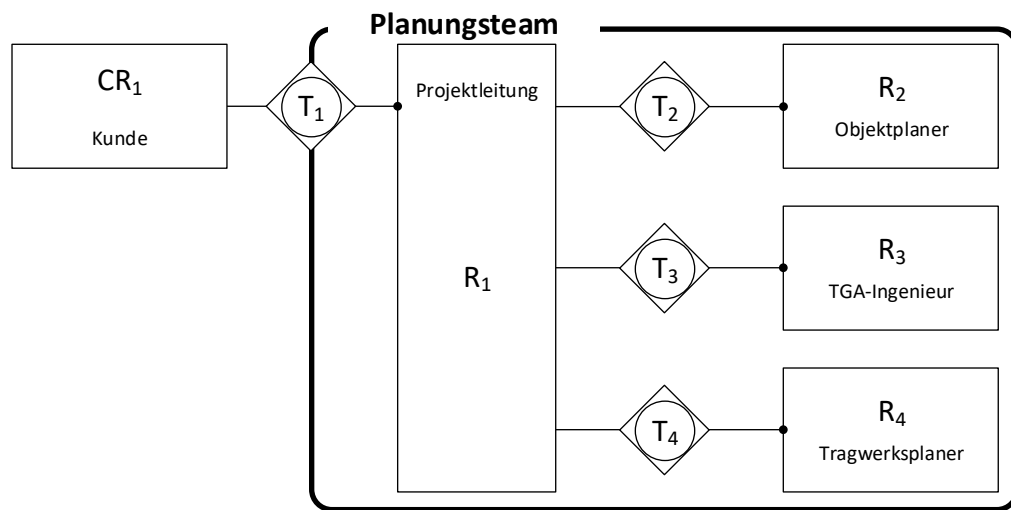


Abbildung 2.15: Beispiel für ein Interaktionsdiagramm als Crispianet-Diagramm [i. A. a. DIN EN ISO 29481-1, 2016; Shearer, 2000] (R_i : Rolle i, T_j : Transaktion j, CR_k : Kundenrolle k).

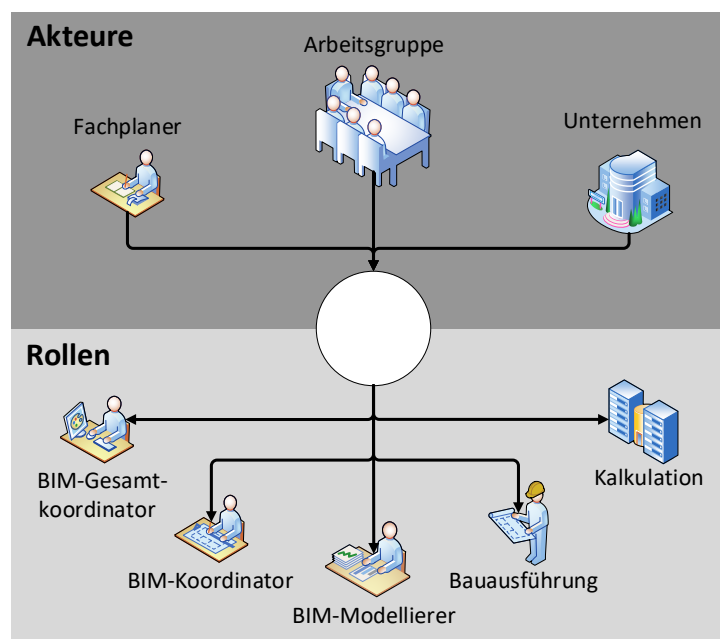


Abbildung 2.16: Gegenüberstellung von Rolle und Akteur [i. A. a. Wix u. Karlshøj, 2010].

Abbildung 2.16 verdeutlicht die eigentliche Trennung von Rolle und Akteur. Die Definition des Prozes-

ses verlangt eine konsistente und eindeutige Identifikation der Rollen. Dadurch wird gewährleistet, dass die Austauschforderungen mittels Transaktionen zielgerichtet formuliert werden können. In einem Bauprozess existieren verschiedene Akteure, die unterschiedliche Rollen einnehmen können. Ein Akteur ist als Ressource zu betrachten, der eine Aufgabe innerhalb eines Prozesses erfüllt. Dabei sind nicht die Art und der Umfang dieser Aufgabe relevant, sondern die daraus resultierende Fortschreibung des Prozesses. Jede einzelne Person oder Arbeitsgruppe und jedes Unternehmen ist als eigenständiger Akteur zu betrachten, sobald ihnen eine Aufgabe zugeteilt wird. Den Aufgaben können Rollen zugeteilt werden, wobei mehrere Rollen von einem Akteur übernommen werden können. Die Rollendefinition sowie deren eindeutige Zuweisung ist der relevante Input für die IDM, bzw. die darin enthaltene Prozessabbildung [Wix u. Karlshoej, 2010; Zeb u. Froese, 2011].

Die Identität eines einzelnen Akteurs ist für den Prozess von geringerer Bedeutung, als die Aufgabe, die er erfüllt. Ein zusammenhängender Aufgabenbereich (bspw. Management, Modellierung, Simulation, Fertigung) wird als Rolle bezeichnet. Jede Rolle muss von mindestens einem Akteur übernommen und erfüllt werden, um den Prozess weiterzuführen. Vor der Zuweisung der Akteure zu den verschiedenen Rollen müssen die Anforderungen, Rechte und Pflichten jeder Rolle definiert werden. Dabei wird zwischen funktionalen und professionellen Rollen unterschieden. Eine funktionale Rolle kann von verschiedenen Akteuren unabhängig von ihrer Fachdisziplin erfüllt werden (bspw. Modellierung), sofern die erforderlichen Kenntnisse vorhanden sind. Eine professionelle Rolle muss von einem speziellen Akteur übernommen werden, da besondere Kenntnisse oder Befugnisse erforderlich sind (bspw. Objektplaner, Simulation, ...) [Wix u. Karlshoej, 2010].

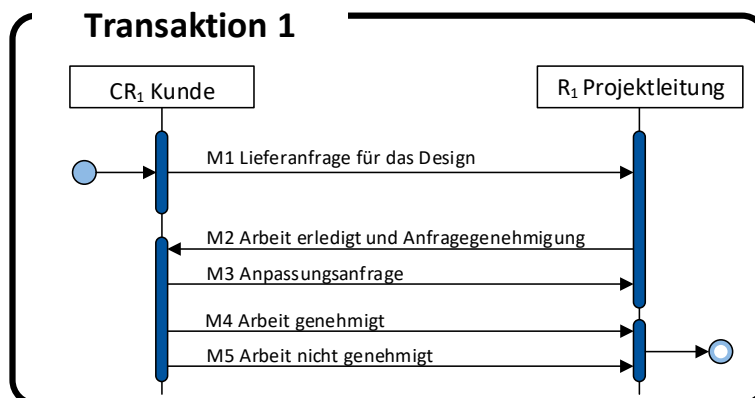


Abbildung 2.17: Beispiel für ein Transaktionsdiagramm als UML-Sequenzdiagramm (T1 – Lieferanfrage für ein Design)[i. A. a. DIN EN ISO 29481-1, 2016; Oldfield u. a., 2017].

Abbildung 2.17 zeigt beispielhaft das korrespondierende Transaktionsdiagramm in Form eines Se-

quenzdiagramms. Dieses definiert die Nachricht innerhalb einer Transaktion und die Regeln zur Ausführungssequenz. Sie zeigt die interne Struktur, mithin die Rollen, die möglichen Nachrichten und die vorgegebene Reihenfolge, in der die Nachrichten geliefert werden können. Mit einer Transaktion werden die Kooperations- und Kommunikationsanforderungen festgelegt, die ermöglichen, dass die Bereitstellung von relevanten Rollen kontrolliert werden kann. Den einzelnen Sequenzen können weitere Informationen zur Spezifikation hinzugefügt werden.

Prozessdiagramm

Wenn der Fokus auf der Lieferung von Dienstleistungen oder eines Endproduktes liegt, wird mit der Definition eines Prozessdiagramms begonnen. Das Prozessdiagramm stellt eine grafische Übersicht eines Prozessablaufs dar, die dazu genutzt wird um die zu durchlaufenden Prozesse zu strukturieren. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Rollen werden dadurch identifiziert. Der IDM Referenzprozess (siehe Abbildung 2.14) bietet Grundlagen für den abzubildenden Prozess. Dieser stellt eine allgemeingültige und nachvollziehbare Struktur eines Prozessteils dar, welche als Grundlage für den Anwendungsfall fungieren kann.

Das Prozessdiagramm wird mit der grafischen Notation Business Process Model and Notation (BPMN) erstellt. Das Diagramm grenzt einen Bereich für jede Rolle ab und definiert die von der jeweiligen Rolle auszuführenden relevanten Aktivitätssequenzen. Von unterschiedlichen Rollen ausgeführte Aktivitäten können Beziehungen zueinander haben, die einen Informationsaustausch notwendig machen. Diese korrespondieren mit den Informationen in einer Transaktion. Der Zweck des Prozessdiagramms ist es, den Ablauf der Aktivitäten innerhalb eines umgrenzten Anwendungsfalls, die dazugehörigen Rollen der Akteure und die benötigten, konsumierten und erzeugten Informationen einheitlich und eindeutig zu beschreiben. Innerhalb einer IDM werden durch das Prozessdiagramm die integrierten Informationen abgegrenzt, die Prozessaktivitäten implementiert und in eine logische Reihenfolge gebracht. Die Informationen hängen von dem Inhalt der prozesszugehörigen Austauschforderungen ab, dadurch enthält das Prozessdiagramm auch eine verständliche Definition des Gesamtprozesses. Ein wesentlicher Bestandteil der IDM ist die konsistente Definition der Austauschforderungen zwischen den unterschiedlichen Rollen und ihren Softwareapplikationen [Wix u. Karlshøj, 2010; Hyun u. a., 2016].

Für das Prozessdiagramm wird meist eine angepasste Version der BPMN verwendet [DIN EN ISO 29481-1, 2016; Lee u. a., 2013]. BPMN ist ein definierter Standard in der Object Management Group zur Formalisierung einer grafischen Notation von Prozessen [OMG, 2017; Silver, 2011; Dijkman u. a., 2008], der weltweit Anwendung findet. Die BPMN-Diagramme sind leicht verständlich und gleichzeitig detailliert genug, um ausführbar und automatisierbar zu sein. Abbildung 2.18 zeigt beispielhaft ein einfaches Prozessdiagramm.

Ein gewisses Ereignis innerhalb eines Prozesses macht die Kollaboration von mehreren Akteuren erforderlich. Das Ereignis verursacht Aktivitäten, die bestimmte Transaktionen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Prozess auslösen. Dargestellt sind in Abbildung 2.18 zwei verschiedene BIM-Dienstleister, die Planer A und Planer B, repräsentiert durch jeweils einen eigenen „Pool“ und „Schwimmbahn“. Insgesamt werden interne Daten ausgetauscht und externe Daten in den Prozess eingepflegt. Zusätzlich ist ein exklusives Gateway zur Entscheidungsfindung im Prozess abgebildet [Park u. a., 2011].

Grundsätzlich gilt es zu beachten, dass eine IDM immer die Komponenten „Transaktions-“ / „Interaktionsdiagramme“ und/ oder ein „Prozessdiagramm“ beinhaltet [ISO/DIS 29481-1, 2014]. Derart werden die BIM-Anwendungsfälle nachvollziehbar dargestellt und es können die Informationsanforderungen in den Schnittstellen abgeleitet werden.

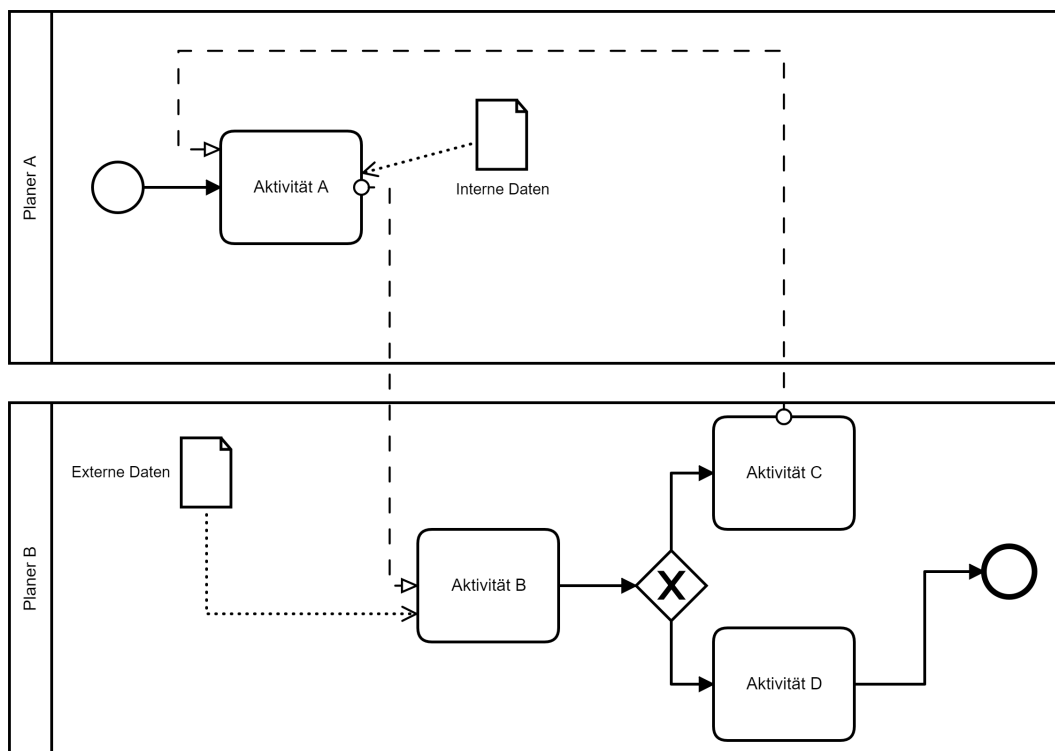


Abbildung 2.18: Beispiel für ein Prozessdiagramm gemäß BPMN-Darstellungsweise.

Datenaustauschanforderungen

Die von unterschiedlichen Rollen ausgeführten Aktivitäten können Beziehungen zueinander haben, die einen Informationsaustausch in Form von Datenübergaben in dafür identifizierten Datenübergabepunkten notwendig machen. Die Datenübergabepunkte werden im Prozessdiagramm durch

den Austausch von Informationen mittels eines Datenobjekts kenntlich gemacht. Eine korrespondierende, zu formulierende Datenaustauschanforderung definiert die Informationen, die ausgetauscht werden müssen, um diesen Prozess in seinem Projektstatus zu unterstützen.

Die für die Schnittstellen zu definierenden Datenaustauschanforderungen basieren, neben Dokumenten, auf den BIM-Datenmodellen (siehe Kapitel BIM-Datenmodelle ab Seite 16). Dazu wird das zu erstellende Produkt – das Bauwerk, mit all seinen Bestandteilen – in einzelne, zusammenhängende Teile zerlegt. Dadurch werden die einzelnen in der Realität vorzufindenden unterscheidbaren Objekte (bspw. Wand, Heizkessel, Raum, etc.) ebenfalls als solche behandelt und mit den notwendigen Beziehungen entsprechend definiert. Diese Objekte werden wiederum durch einzelne Attribute weiter spezifiziert. Die Datenaustauschanforderungen erlauben die Kontrolle des Informationsflusses in dem beschriebenen Prozess und dienen grundlegend als Pflichtenhefte für den identifizierten Datenübergabepunkt [Zeb u. a., 2012; Lee u. a., 2016; Borrmann u. a., 2015a].

Tabelle 2.4: Beispiel für Datenaustauschanforderungen.

Element	Attribut/ Information	Export	Verantwortlich	Einheit	Restriktion
Baustelle		M	Objektplaner		
	Längengrad	M	Objektplaner	WGS84	
	Breitengrad	M	Objektplaner	WGS84	
	...		...		
Gebäude		M	Objektplaner		
	Adresse	O	Objektplaner		
	Anzahl Stockwerke	M	Objektplaner	Integer	Abhangdecken sind kein eigenes Stockwerk
	...		...		

M Export obligatorisch, O Export optional, – Nicht exportieren

Tabelle 2.4 zeigt beispielhaft Datenaustauschanforderungen. Ersichtlich ist die Einfachheit durch die Beschreibung in eindeutigen, nachvollziehbaren Termen in natürlicher Sprache. Dadurch wird gewährleistet, dass jeder am Prozess Beteiligte in der Lage ist, die relevanten Informationen nachzuvollziehen. Grundsätzlich gilt, dass lediglich die am Datenübergabepunkt beteiligten Rollen in der Lage sein müssen, die zu liefernde bzw. geforderte Information zu verstehen. Jedoch müssen die in der IDM-Entwicklung nachgelagerten Prozessbeteiligten ebenfalls in der Lage sein die Datenaustauschanforderungen zu deuten. Um die Daten eindeutig zu formalisieren werden den Datenaustauschanforderungen zusätzlich Anforderungen für die verwendete Bibliothek und Informationsbeschränkungen hinzugefügt. Anhand derer wird das Szenario erläutert und es werden funktionelle

Beschreibungen zur Verfügung gestellt. Die Erfassung dieser Informationen muss strukturiert sein, damit die Verarbeitung standardisiert ist. Das Erstellen und Managen dieser Informationen geschieht meist noch analog und wird dementsprechend kommuniziert, jedoch werden zur effizienten Bewältigung der hohen Komplexität dieser Aufgabe bereits Datenbanken aufgebaut, welche die Prozesse unterstützen.

2.5.2 Technologische Umsetzung

Mit der Identifikation von Datenübergabepunkten und der Definition von Datenaustauschanforderungen können erste Ansätze erarbeitet werden, welche die softwaretechnische Umsetzung schemaabhängig ermöglichen. Es wird ein Datenaustauschanforderungsmodell entwickelt, welches als Grundlage für eine MVD fungiert.

Datenaustauschanforderungsmodell

Tabelle 2.5: Beispiel für ein Datenaustauschanforderungsmodell.

<i>Datenaustauschanforderung</i>		<i>Datenaustauschanforderungsmodell</i>			
Element	Attribut/ Information	Entität	Attribut	Pset Property	...
Baustelle	Längengrad	IfcSite	RefLongitude		
	Breitengrad		RefLatitude		
	...		...		
Gebäude	Adresse	IfcBuilding	BuildingAddress		
	Anzahl Stockwerke			PSet_BuildingCommon NumberOfStoreys	
	...		...		

Die Datenaustauschanforderungen werden verwendet, um eine MVD zu erstellen und repräsentieren die Verbindung zwischen Prozess und Daten. Sie beschreiben den Informationssatz eines Prozesses, der von einem Akteur in der Rolle eines Initiators durchgeführt wird, um einen Downstream-Prozess zu ermöglichen, der von einem anderen Akteur in der Rolle eines Ausführenden umgesetzt werden kann. Ein Satz von Informationen kann weiter in Informationseinheiten (nach Informationstypen)

und Informationseinschränkungen (Spezifikation von Datentyp, Kontext, Regeln) untergliedert werden. Es entsteht ein Datenaustauschanforderungsmodell, das eine Weiterführung des Pflichtenhefts mit Übertragung auf die Datenstruktur darstellt.

Tabelle 2.5 stellt einen Ausschnitt eines möglichen Datenaustauschanforderungsmodells dar. Auf der linken Seite die Definition der Datenaustauschanforderung aus der Nutzerebene und auf der rechten Seite das daraus resultierende Datenaustauschanforderungsmodell. Das Datenaustauschanforderungsmodell bezieht sich in diesem Beispiel auf das IFC-Datenmodell, damit wird der erwähnte open-BIM Ansatz verfolgt.

Model View Definition

Die Formalisierung der MVD hängt von dem anvisierten Prozess bzw. dem damit zu verknüpfenden BIM-Werkzeug ab. Somit ist das zu transformierende Wissen implizit in den Daten der MVD enthalten. Infolgedessen wäre eine Definition der MVD programmspezifisch und in der Anwendung eingeschränkt. Dem gegenüber kann eine konsolidierte MVD formalisiert werden, mit der mehrere Schnittstellen gebildet werden können. Eine konsolidierte MVD wird für die Unterstützung eines Prozesses und nicht einer speziellen Schnittstelle zwischen zwei Programmen entwickelt.

Der in dem IDM definierte Prozess wurde zielgerichtet von der Managementebene über die Anwenderebene bis hin zur Softwareebene charakterisiert. Der nächste Schritt in der Definition des BIM-Anwendungsfalls ist die Überführung der gesammelten Informationen in eine MVD. Eine MVD erlaubt die Spezialisierung der Daten und Informationen des Gebäudes für bestimmte Prozess- und Nutzungsphasen. Die MVD definiert und dokumentiert die Teilsicht des verwendeten BIM-Datenmodells. Dadurch werden bestimmte Teilbereiche im BIM-Datenmodell abgegrenzt (siehe Abbildung 2.19) sowie Mindestanforderungen für den Ex- und Import festgelegt. Diese Spezifizierung ermöglicht die Anwendung eines zielgerichteten Prozesses und versucht, Interpretationsspielräume weitestgehend zu eliminieren [Lee u. a., 2013; Shen u. a., 2009]. Der spezifizierte Teilbereich des IFC-Datenmodells wird mit der Identifizierung einzelner Properties sowie mit sogenannten Konzepten (engl.: concepts¹) bzw. neu zu definierender Konzeptvorlagen (engl.: concept templates) fixiert [Hietanen, 2008]. Die Properties werden einzeln identifiziert und für die zu definierende Schnittstelle entsprechend vorgeschrieben. Die Konzepte fassen die Modellierung von Relationen und die Verwendung von Attributen zusammen und erlauben damit eine allgemeingültige Festlegung von Strukturen. Diese allgemeinen Konzepte werden weiter mit sogenannten Konzeptregeln (engl.: concept rules) konfiguriert, damit diese weiter spezialisiert werden. MVDs werden im Allgemeinen dazu verwendet,

¹ Andere Begriffe sind ebenfalls gängig: „functional parts“ bei überholten IDM Definitionen oder „units of functionality“ bei der Implementer Support Group von buildingSMART.

eine maßgeschneiderte Implementierung des BIM-Datenmodells zu ermöglichen und vereinfachen so die Integration derart umfangreicher Formate [Shen u. a., 2009].

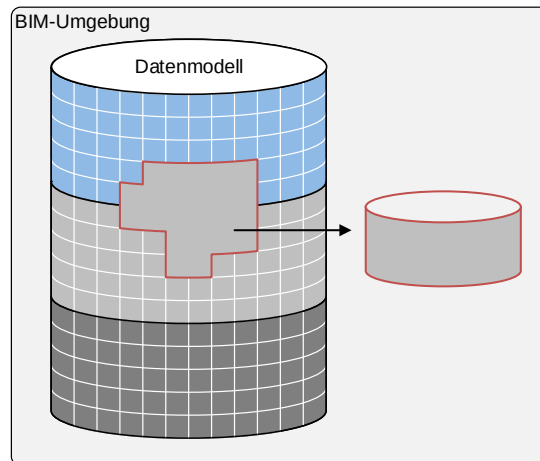


Abbildung 2.19: Funktionsweise einer MVD.

Abbildung 2.19 zeigt anschaulich die Verwendung einer MVD. Ersichtlich ist auf der linken Seite das gesamte BIM-Datenmodell, bspw. das IFC-Datenmodell. Hervorgehoben ist die Teilsicht, beschrieben durch eine MVD. Die MVD wird dazu verwendet, um eine spezialisierte Schnittstelle umzusetzen, indem sie die für eine Schnittstelle notwendigen Daten und Informationen dokumentiert. Exportiert wird nur der definierte Bereich des Gesamtmodells. Nachgelagerte, auf diese spezialisierten Daten aufbauende Prozesse werden so ermöglicht und in die BIM-Umgebung integriert.

MVDs werden darüber hinaus zur Definition und Validierung von Mindestanforderungen für den Ex- bzw. Import verwendet [Chipman u. a., 2016; Shen u. a., 2009]. Dazu werden Regeln definiert, welche die Datenvalidierung erlauben. Die Regeln und Anforderungen können konzeptbezogen sein und bis auf das feingranulierte Niveau der Properties bezogen werden. Damit eine automatisierte Verwendung einer MVD erfolgen kann, wurde zusätzlich das Format „mvdXML“ entwickelt [BuildingSMART International, 2016h]. Dieses Format ist eine computer-interpretierbare Definition einer MVD, die zusätzlich zur eigentlichen Dokumentation der MVD formuliert wird, um damit einen automatisierbaren Prozess für die Softwareentwicklung zu ermöglichen.

Bereits mehrere MVDs sind für das IFC-Datenmodell von bSI definiert und zum Download zur Verfügung gestellt [BuildingSMART International, 2017c]:

- MVDs für die IFC Version 2x3:
 - IFC2x3 Coordination View V2.0;

- IFC2x3 Coordination View;
 - IFC2x3 Structural Analysis View;
 - IFC2x3 Basic FM HandOver View.
- ▷ MVDs für die IFC Version 4 Addendum 2:
- IFC4 Reference View 1.0;
 - IFC4 Design Transfer View 1.0.

Für die aktuelle Version 4 des IFC-Datenmodells stehen zwei konsolidierte MVDs zur Verfügung. Zur Referenzierung von verschiedenen Fach- und Teilmodellen wurde die „Reference View“ definiert, mit der bspw. Kollisionserkennungen unterschiedlicher Disziplinen vollzogen werden können [BuildingSMART International, 2017d]. „Design Transfer View“ stellt eine Erweiterung der Reference View dar und erlaubt über die Referenzierung unterschiedlicher Modelle weitere Funktionalitäten, bspw. die Übergabe disziplinbezogener Daten an die jeweiligen Spezialisten [BuildingSMART International, 2017b]. Andere MVDs werden individuell für firmeninterne Zwecke außerhalb von bSI entwickelt. Sie unterliegen jedoch dem offiziellen Zertifikationsverfahren des „bSI certification center“, welches als zentrale Plattform zur Veröffentlichung der MVDs fungiert [BuildingSMART International, 2016a]. MVDs und die dazugehörige Dokumentation werden u. a. mit der Applikation IFC Documentation Generator (ifcDOC), die auf der bSI-Webseite zum Download frei zur Verfügung steht, erstellt [BuildingSMART International, 2016e].

Eine MVD besteht grundsätzlich aus den folgenden Elementen:

- ▷ Identifizierte, zu verwendende Entitäten, Attribute und Properties des BIM-Datenmodells;
- ▷ Validierungsregeln bzw. Restriktionen für Attribute, Properties und Datentypen;
- ▷ Wiederverwendbare Konzeptvorlagen zur Strukturvorgabe des in der Schnittstelle zu verwendenden Datenmodells;
- ▷ Konfigurierte Konzepte, welche die Informationen im Datenmodell durch Spezialisierung der Strukturen definieren;
- ▷ Austauschforderungen, welche erlauben Konzepte und die dazugehörigen Entitäten für das angestrebte Szenario als obligatorisch, optional oder ausgeschlossen für den Im- und/ oder Export zu definieren.

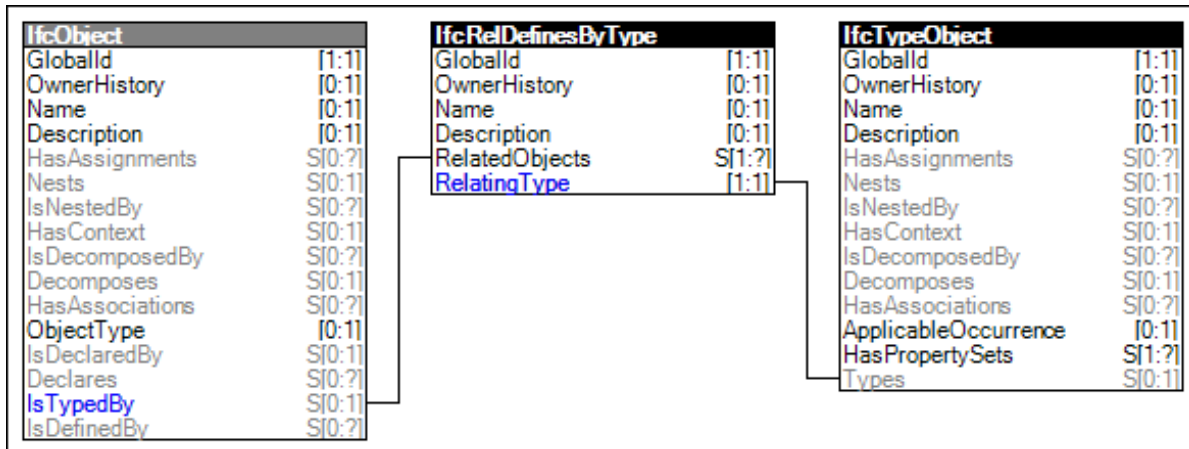


Abbildung 2.20: Konzeptvorlage in einem Instanzdiagramm: „Object Typing“ [BuildingSMART International, 2017a].

Abbildung 2.20 veranschaulicht beispielhaft eine Konzeptvorlage in einem Instanzdiagramm. Das Diagramm zeigt Ausprägungsspezifikationen ausgewählter Entitäten und deren Beziehungen untereinander. Dieses Konzept sieht die Definition von Typen der abstrakten Entität *IfcObject* vor. Dementsprechend werden Typisierungen der Subtypen von *IfcObject* (bspw. *IfcBoiler*) durch die objektifizierte Verbindungsrelation *IfcRelDefinesByType* ermöglicht.

Die in der IFC 4-Schemadokumentation zur Verfügung stehenden Konzepte bieten ein breites Spektrum an Spezifikationen. Die Konzepte sind in der Dokumentation hierarchisch geordnet. Es existieren „Parent“-Konzepte, die als allgemeine Vorlage fungieren und mit denen weiter spezialisierte Konzepte gebildet werden. Zudem existieren sogenannte „Partial templates“, die häufig verwendete Konzepte darstellen und in den Konzeptvorlagen integriert sind [BuildingSMART International, 2016c], aber alleine kein zur Anwendung nützliches Konzept darstellen (bspw. die Attributdefinition für Materialien, die in verschiedenen Konzepten verwendet werden).

Mit Hilfe der offiziell zur Verfügung stehenden MVDs werden in der Softwareentwicklung Zertifizierungen der Schnittstellen vollzogen. Die entwickelten MVDs stoßen einen Zertifizierungsprozess der Schnittstellen mit einem von buildingSMART entwickelten Prozess an. Es werden speziell definierte Anwendungsfälle bereitgestellt, die für eine Zertifizierung der Schnittstelle verwendet werden. Für eine erfolgreiche Zertifizierung müssen diese eine geforderte Qualität im Im- bzw. Export vorweisen. Die zertifizierten Schnittstellen signalisieren durch das jeweilige Zertifikat welche spezialisierten Subprozesse und somit Softwareapplikationen für diese Schnittstelle geeignet sind [BuildingSMART International, 2016a].

Damit auch in der Nutzerebene die Entwicklung der Modelle kollaboriert gewährleistet werden kann,

müssen unter Abstimmung, für jeden einzelnen BIM-Anwendungsfall, die Level of Development generisch und alphanumerisch spezifiziert werden. Das nächste Kapitel definiert zunächst allgemein die Level of Development, um im Anschluss diese auf die jeweiligen BIM-Anwendungsfälle zu beziehen.

2.6 Level of Development

Damit die in den BIM-Anwendungsfällen beschriebenen Datenaustauschprozesse zielgerichtet und phasenbezogen entwickelt werden können, muss die Informationstiefe der mit den Projektpartnern auszutauschenden BIM-Modelle nachvollziehbar sein. Die zunehmende Menge an zu verwaltenden Informationen unter gleichzeitiger Parallelisierung der Aufgaben fordert einen Abgleich der abzustimmenden Planungsdaten. Die daraus abzuleitenden Informationen sind komplex und basieren auf Daten unterschiedlicher Gewerke. Die einzelnen Modellelemente können eine große Menge an Parametern vorweisen, jedoch sind nicht alle Informationen relevant oder im Verlauf der Modellierung final verabschiedet. Der Umgang mit den großen Datenmengen kann nur bewältigt werden, wenn im Vorfeld die für die Zielverwirklichung notwendigen Informationen definiert werden.

In der konventionellen, nicht BIM gestützten Planung werden Pläne mit Maßstäben versehen, um die Informationstiefe darzustellen. Bspw. ist der Maßstab 1:200 meist nur für den Vorentwurf geeignet, mit dem erste konzeptionelle Pläne vermittelt werden. Demgegenüber sind die Maßstäbe 1:10 oder 1:1 zu nennen, womit Zeichnungen höchster Genauigkeit abgeliefert werden. Dementgegen werden BIM-Modelle im Maßstab 1:1 modelliert, obwohl nicht grundsätzlich von einer entsprechenden Informationstiefe ausgegangen werden kann. Um ein Verständnis der Zuverlässigkeit der Daten im Modell vermitteln zu können, wurde eine Methode entwickelt, die den Fertigstellungsgrad definiert und darstellt. Diese Methode wurde erstmalig im Jahr 2004 von der Firma „Vico Software“ (heute Teil des Unternehmens Trimble) unter dem Namen „Model Progression Specification“ veröffentlicht [Bolpagni, 2016]. Dieser Ansatz wurde von verschiedenen Institutionen aufgegriffen und weiter ausgearbeitet. Das „American Institute of Architects“ hat die ersten Ausführungen weiter bearbeitet und das erste Mal vom sogenannten Level of Development (LOD) gesprochen [American Institute of Architects, 2008], mit dem die Modellerstellung geometrisch als auch inhaltlich zeitlich koordiniert und geprüft werden kann. LODs beschreiben den für den jeweiligen Prozessschritt geforderten Modellinhalt, die Zuverlässigkeit, sowie die Reife der erstellten Informationen. Dieser Ansatz wurde wiederum mehrfach aufgegriffen, wobei mehrere Level für den jeweiligen Modellfortschritt entstanden. Diese Level werden zur Koordinierung meist mit Nummern von 100 bis 500 versehen. LOD 100 beschreibt dabei ein eher konzeptionelles Modell und LOD 500 alle notwendigen Informationen mit höchster Detaillierung für den jeweiligen Anwendungszweck im Modell darstellt.

Abbildung 2.21 veranschaulicht beispielhaft die unterschiedlichen geometrischen Darstellungen

in den einzelnen LODs für ein Heizsystem. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Fertigstellungsgrade, wobei anfangs lediglich ein konzeptionelles System modelliert wird. In den höheren Stufen werden diese Konzepte mit konkreten Inhalten gefüllt. Bspw. soll der LOD 400 ein Modell mit Ausführungsreife darstellen [Bolpagni, 2016] (man spricht dabei vom sogenannten „Build as to be built“ Ausführungsmodell [VDI 2552-3, 2017]).

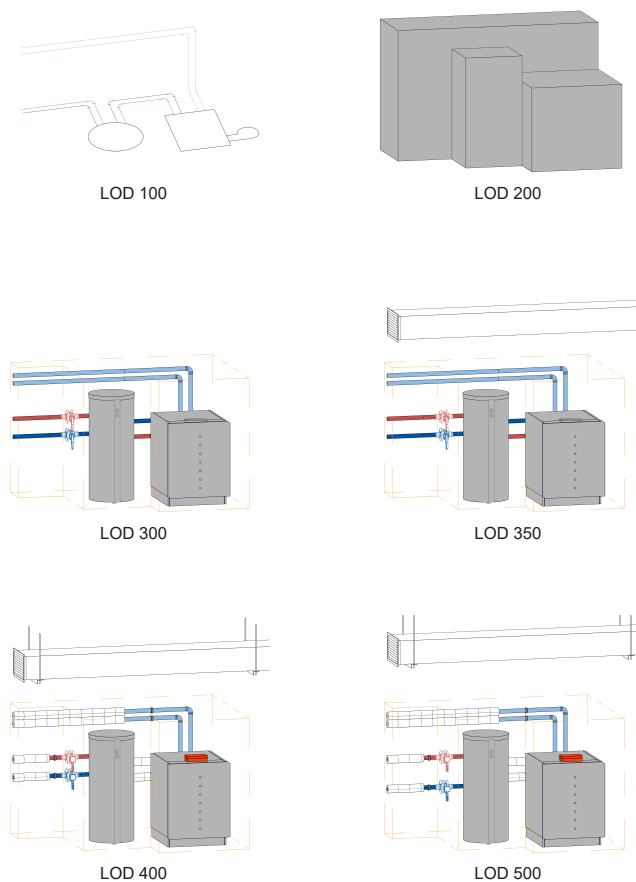


Abbildung 2.21: Veranschaulichung unterschiedlicher LOD-Level gemäß Beetz u. a. [2015] am Beispiel eines Heizungssystems.

Die vom American Institute of Architects generisch definierten LOD-Spezifikationen für die einzelnen Level sind in der folgenden Liste aufgeführt [Beetz u. a., 2015]:

- LOD 100: Das Modellelement wird im Modell durch ein Symbol oder eine andere generische

Repräsentation grafisch dargestellt. Elementbezogene Informationen (bspw. Kosten pro m^2) können von anderen Modellelementen abgeleitet werden.

- ▷ LOD 200: Das Modellelement wird im Modell durch ein generisches Objekt grafisch repräsentiert, das mit ungefähren Abmessungen, der Position und der Orientierung versehen ist.
- ▷ LOD 300: Das Modellelement wird im Modell durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessung, Form, Position und Orientierung grafisch repräsentiert.
- ▷ LOD 350: Das Modellelement wird im Modell durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessung, Form, Position und Orientierung sowie Schnittstellen zu anderen Gebäudesystemen grafisch repräsentiert.
- ▷ LOD 400: Das Modellelement wird im Modell durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessung, Form, Position und Orientierung sowie auf Informationen zur Herstellung, zum Zusammenbau und zur Installation grafisch repräsentiert.
- ▷ LOD 500: Das Modellelement wurde auf der Baustelle hinsichtlich seiner Größe, Abmessung, Form, Position und Orientierung überprüft.

Abbildung 2.21 zeigt beispielhaft die Fortschreibung der einzelnen LODs gemäß den aufgeführten Definitionen von Beetz u. a. [2015] über den Verlauf des Projekts. Zu erkennen sind die Unterschiede in den geometrischen Fertigstellungsgraden. Der LOD 100 beschreibt lediglich konzeptionell erste Entwürfe und LOD 200 reserviert entsprechend die Volumina zur Installation, Bedienung und Instandhaltung im Raum. Das im Projekt fortgeschriebene Modell wird mit Daten angereichert und die Geometrie wird weiter verfeinert. Ab LOD 350 werden unterschiedliche Gewerke miteinander referenziert und koordiniert, darauf aufbauend werden weitere Grade abgeleitet. Die Modellentwicklung für die Planung und Ausführung ist finalisiert, wenn der auf der Baustelle abgenommene Status quo ins BIM-Modell modelliert wird, im sogenannten „As built“-BIM [VDI 2552-3, 2017], im LOD 500. Die einzelnen Unterschiede, können dabei von minimalen Ausmaß sein. Bspw. sind in Abbildung 2.21 die einzigen Unterschiede zwischen LOD 400 und LOD 500 die aktualisierten Positionen des mit dem Ventil versehenen kalte Rücklaufrohrs und des Luftkanals. Damit die Unterschiede für jeden Projektteilnehmer direkt erkennbar werden, müssen aufgaben- und modellabhängige LODs entwickelt und definiert werden.

Die Anwendung der LOD-Methodik in der Praxis zeigte, dass eine rein geometrische Koordinierung eines BIM-Modells nicht ausreichend ist. Daraus werden zusätzlich noch die alphanumerischen Modellinformationen hinzugefügt, so dass sich folgende Formel ergibt [Liebich u. Hausknecht, 2016]:

$$LOD = \text{Level of Geometry (LOG)} + \text{Level of Information (LOI)}$$

Das LOD wird demnach aus der Kombination von geometrischen Informationen (LOG) und den alphanumerischen Daten (LOI) der einzelnen Objekte definiert. Diese Trennung verhalf dazu, die Attribuierung der Objekte im BIM-Modell von der Geometrie unabhängig zu definieren. Grundsätzlich soll damit die notwendige Informationstiefe zur Bearbeitung einer Aufgabe im Projekt festgelegt werden. Die Geometrie ist intuitiv nachvollziehbar, jedoch hängt der Grad der Informationen vom jeweiligen Verwendungszweck ab [Liebich u. Hausknecht, 2016]. Van Treeck definiert einen weiterführenden Ansatz, der über die bisherigen Definitionen hinausgeht und in der Praxis bereits Anwendung findet [2016b]. Die LODs werden mit dem „LoG-I-C-L-Modell“ beschrieben, die Abkürzung steht dabei für „Level of Geometry, Information, Coordination and Logistic“. Bei diesem Modell werden, neben den geometrischen und alphanumerischen Attributen der Objekte, Kategorien zur Spezifizierung der Modellqualität und Abstimmung im Projekt berücksichtigt. Die einzelnen Kriterien des Ansatzes von Van Treeck werden wie folgt definiert [van Treeck, 2016b,a]:

- „Geometrie (LoG): In Analogie zur Festlegung von Maßstäben, die nach der HOAI in einzelnen Leistungsphasen üblicherweise für die Darstellung in Plänen umzusetzen sind, betrifft dies einerseits die geometrische Darstellungsform von Objekten. Im einfachsten Fall kann dies ein Symbol oder ein z. B. quaderförmiger Störkörper (engl. Bounding Box) als Platzhalter sein; im Extremfall eine gerenderte, fotorealistische 3D-Darstellung eines herstellerspezifischen Objektes. Wesentlich dabei ist der Raumbedarf eines Objektes (und damit nicht die systemische Darstellung eines Ingenieurmodells).
- Informationsgehalt (LoI): Der Modellentwicklungsgrad betrifft andererseits den Informationsgehalt hinsichtlich der Tiefe der semantischen Attribuierung. Attribute beschreiben allgemeine charakteristische Eigenschaften eines Objektes, detaillierte herstellerspezifische Fachinformationen oder auch betriebstechnische Eigenschaften.
- Koordination (LoC): Mit dem Aspekt der Koordination wird ausgedrückt, ob die Objekte einzelner Fachmodelle ihrem jeweiligen Entwicklungsgrad entsprechend der Richtlinien zur Qualitätsüberprüfung auf ihre gegenseitige Wechselwirkung hin geprüft worden sind. Beispielsweise kann gefordert sein, dass bestehende Kollisionen gekennzeichnet sind oder dass Kollisionsfreiheit vorliegt.
- Logistik (LoL): Unter dem logistischen Entwicklungsgrad wird der Verknüpfungsgrad von Objekten mit der Rahmen- oder Feinterminplanung über den Lebenszyklus eines Bauwerks verstanden. Beispielsweise kann dies die Angabe von zeitlichen und räumlichen Korridoren für das Fertigen, Liefern, Montieren und Inbetriebnehmen von Komponenten betreffen (Just-in-Time, Just-in-Sequence).“

Mit dieser umfangreichen Erweiterung überschreitet van Treeck erstmals die Ebene der Modellinhalte und erlaubt somit eine ganzheitliche Sicht auf die relevanten modellbezogenen Abstimmungen in

einem BIM-Projekt. Die Ergänzung der Modellqualität für die Koordinierung und Logistik erlaubt insbesondere die Abstimmung der Terminierung und damit verbundenen Supply Chain Management Ansätzen.

Zeitgleich wurde im Jahr 2017 die BIM-Richtlinie „VDI 2552 Blatt 3“ der Öffentlichkeit präsentiert. In dieser Richtlinie wird die Anwendung von BIM-Modellen zur Erstellung von Leistungsmengen und Controllingstrukturen beschrieben. Darin werden vier verschiedene Fertigstellungsgrade definiert [VDI 2552-3, 2017]:

- ▷ Fertigstellungsgrad Kostenplan (FGK): Definition von verschiedenen Fertigstellungsgraden zur Abgrenzung unterschiedlicher Informationstiefen mit dem Ziel, Kostenermittlungen durchzuführen.
- ▷ Fertigstellungsgrad Terminplan (FGT): Definition von notwendigen Informationstiefen, um daraus Fertigstellungsgrade für Terminpläne ableiten zu können.
- ▷ Fertigstellungsgrad Geometrie (FGG): Definition von impliziten, expliziten und definierten/ nicht definierten Geometrien und deren Handhabbarkeit, um daraus Fertigstellungsgrade abzuleiten.
- ▷ Fertigstellungsgrad Bau (FGB): Fertigstellungsgrad zur Beschreibung des tatsächlich fertiggestellten physikalischen Bauprozesses auf der Baustelle.

Die LOD-Methodik verlangt, dass projekt- und aufgabenabhängig für jedes Fachmodell die LODs individuell entwickelt werden müssen [VBI, 2016]. Die Fortschreibung eines Modells über den Planungszyklus ist nicht nur eine Anreicherung von Parametern, sondern die zielgerichtete Modellierung für einen bestimmten Zweck. Da die unterschiedlichen Fach- und Teilmodelle aufeinander aufbauen, beeinflussen die individuellen LODs die gesamte Modellierung.

Abbildung 2.22 zeigt qualitativ die Fortschreibung von verschiedenen Fachmodellen und dem Koordinationsmodell im Projektverlauf über die Lebenszyklen der Planung. Zu erkennen ist, dass die Modelle zu den jeweiligen Planungsphasen durchaus unterschiedliche LODs aufweisen können. Jedoch sollten am Ende der Planung alle einzelnen Modelle für die Ausführungsreife das LOD 500 vorweisen. Die Entwicklung der LODs wird den Lph der HOAI gegenübergestellt. Die grauen Linien innerhalb des Graphs grenzen die einzelnen Lph voneinander ab. Es könnten bspw. in diesen Übergangsphasen projektabhängig Datenübergabepunkte definiert werden. Beim Erreichen dieser Zeitpunkte werden die vom Projektteam erarbeiteten Daten und Informationen dem Auftraggeber zur weiteren Entscheidung übergeben.

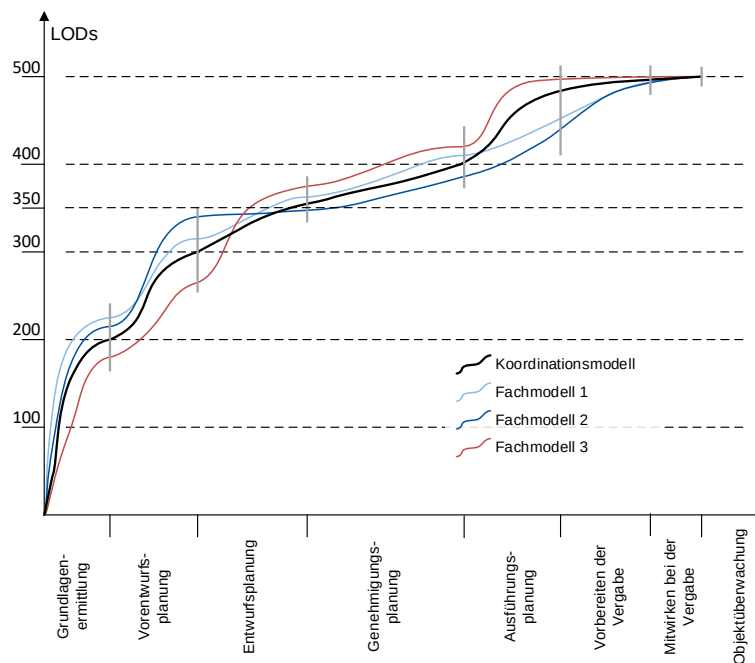


Abbildung 2.22: Fortschreibung der LODs über den Planungszyklus verschiedener Fachmodelle [i. A. a. van Treeck, 2016b].

Auch wenn die HOAI als Vergütungsgrundlage keine Aussagen zu den Leistungen und Planungsinhalten trifft, definiert sie doch die zu durchlaufenden Projektphasen und stellt Anforderungen an den Umfang von Planungsleistungen je Projektphase. Diese Anforderungen müssen auch die BIM-Modelle entsprechend umsetzen. Um dieses zu gewährleisten und prüfen zu können, müssen die Modellstände einer Leistungsphase gegenübergestellt werden können. Hieraus ergibt sich ein direkter Bezug zwischen den Leistungsphasen der HOAI und der Methode der LOD.

Die primären Ziele der LOD-Methodik sind die Definition der qualitativen Mindestanforderungen an ein BIM-Modell (Fachmodell/ Teilmodell) einer Planungsdisziplin in Bezug auf die Modellentwicklung zum Zeitpunkt der Datenübergabe und die damit verbundenen Prozesse. Dabei werden die Informationen über die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit bzw. deren Einschränkungen der Modellinhalte getroffen. Diese Methodik dient der Spezifizierung des Reifegrades der individuellen Arbeitsergebnisse. Darüber hinaus können damit Leistungs- und Vertragspflichten definiert und die Modellentwicklung kontrolliert werden. Projektspezifisch werden LODs individuell entwickelt und in einer sogenannten „Modellentwicklungsmatrix“ festgehalten, wie in Tabelle 2.6 beispielhaft dargestellt. Diese zeit- und inhaltsorientierte Modellentwicklungsmatrix basiert auf Meilensteinen, bspw. die Lph der HOAI, bezogen auf die Kostengruppe (KG)n der DIN 276-1 [DIN 276, 2008]. Es

werden für jeden Meilenstein die LODs entsprechend der Kostengruppen definiert.

Tabelle 2.6: Beispiele einer zeit- und inhaltsorientierten Modellentwicklungsmatrix für Modellinhalte.

	Meilenstein 1		Meilenstein 2		...
KG der DIN 276-1	LOG	LOI	LOG	LOI	...
420 Wärmeversorgungsanlagen	200	100	200	200	...
421 Wärmeerzeugungsanlage	100	100	200	200	...
422 Wärmeverteilnetze	200	100	200	200	...
...					

Eine solche zeit- und inhaltsorientierte Matrix kann noch, abhängig von der Projektgröße, mit einer prozessorientierten Matrix ergänzt werden. In dieser Matrix werden die LODs dem jeweiligen Prozessen zugeschrieben und die minimalen Datenanforderungen zur erfolgreichen Durchführung angegeben. Anstelle der Meilensteine werden die jeweiligen Prozesse aufgelistet, bspw. „Simulation der TGA“. Grundsätzlich gilt, dass die in der Modellentwicklungsmatrizen angegebenen LODs Mindestanforderungen darstellen, jedoch kann ein höherer Fertigstellungsgrad als gefordert modelliert werden.

2.7 Normen und Richtlinien

In diesem Kapitel werden die BIM relevanten internationalen Normen und somit die standardisierenden Rahmenbedingungen dargestellt, die für die Inhalte der vorliegenden Dissertation bedeutsam sind. Bezogen auf das Bauwesen haben Richtlinien und Normen eine große Relevanz, da die Vielzahl einflussnehmender Parameter die Komplexität eines Bauprojekts erhöht. Der Facettenreichtum eines Bauprojekts hat einen großen Informationsumfang und eine hohe Diversität der beteiligten Akteure zur Folge.

International existieren bereits ISO-Normen, die formgebend die BIM-Methode für alle anwendbar machen sollen und auszugsweise in Tabelle 2.7 dargestellt sind.

Tabelle 2.7: BIM-relevante ISO-Normen.

ISO-Norm	Titel
10303	Industrielle Automatisierungssysteme und Integration. Produktdatendarstellung und -austausch.
12911	Framework for building information modelling (BIM) guidance
16739	Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauindustrie und dem Anlagen-Management
16757	Datenstrukturen für elektronische Produktkataloge der Technischen Gebäudeausrüstung
29481	Bauwerksinformationsmodelle BIM - IDM
12006	Bauwesen - Organisation von Daten zu Bauwerken
16354	Guidelines for knowledge libraries and object libraries
19650	Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM
22263	Organisation des Austausches von Informationen über die Durchführung von Hoch- und Tiefbauten - Struktur für die Handhabung von Projektdaten

ISO 10303 ISO 10303 ist eine allgemeingültige Norm für die Festlegung, Erläuterung und den Gebrauch technischer Produktmodelle und beschreibt, wie digitale Produktinformationen repräsentiert und ausgetauscht werden. Teil 11 „Beschreibungsmethoden: Handbuch der Modellierungssprache EXPRESS“ spezifiziert die Datenmodellierungssprache EXPRESS und die grafische Notation EXPRESS-G zur Definition von Produktdaten, bspw. das IFC-Schema der ISO 16739 [ISO 10303-11, 2004]. Teil 21 „Implementierungsmethoden: Klartext-Kodierung der Austauschstruktur“ ist im Allgemeinen bekannt als STEP. Diese Art der Beschreibung macht die Norm nicht nur passend für einen neutralen Austausch von Dateien, sondern auch als eine Basis zur Einführung und Weitergabe von Produktdatenbanken und zur Archivierung [ISO 10303-21, 2016]. Teil 28 der ISO 10303 „Implementierungsmethoden: XML Darstellungen von EXPRESS Schemata und Daten unter Verwendung von XML Schemata“ definiert die XML Darstellung des STEP-Formats [ISO 10303-28, 2007].

ISO 12911 Diese technische Spezifikation gehört zu den BIM-Methodenstandards und führt eine Struktur für Spezifikationen zur Einführung und Übernahme von BIM ein. Dadurch dient sie als Vorlage für BIM-Anleitungen. Die Struktur der ISO 12911 erlaubt den Vergleich internationaler, nationaler und projektspezifischer BIM-Anleitungsdokumente und ermöglicht die Aufnahme der Praktiken und Erwartungen unterschiedlicher Projektpartner. Sie ergänzt internationale Standards bestimmter Bereiche, wie die Entwicklung neuer Anwendungsbereiche. Die Anforderungen innerhalb der Dokumente sollen durch einen festgelegten Stil und Inhalt anhand automatischer oder manueller

Überprüfung direkt messbar sein. Ein BIM-Anleitungsdokument kann auf oberster Ebene für Projekte oder Einrichtungen bereitgestellt werden, aber auch spezifischer für individuelle BIM-Subprozesse [ISO/TS 12911, 2012].

DIN EN ISO 16739 Hierbei handelt es sich um eine internationale Norm für die informationstechnische Darstellung von Bau- und Facility-Management-Informationen und ist für den Austausch von Gebäudedaten zuständig. Sie spezifiziert das IFC-Datenmodell und zielt darauf ab, (Bauteil-)Daten, die neben einer Beschreibung der Geometrie auch eine Darlegung der Eigenschaften der Materialien und technischen Daten zulässt, abzubilden [ISO EN 16739, 2013] (detaillierte Erläuterungen zum IFC-Format in Abschnitt 2.3).

ISO 16757 Diese Norm befindet sich derzeit in der Entwurfsphase und soll Datenstrukturen bereitstellen, die zu einer automatisierten Übertragung von Produktkatalogdaten der TGA in entsprechende Modelle befähigen. Die intentionierte Übertragung der Produktkatalogdaten soll mit Metamodellen erfolgen. Ein Metamodell dient dabei der Klassifikation der Produkte und Produktmerkmale, ein weiteres Metamodell dient dem Produktdatenaustausch. Entstehungsgrundlage dieser Norm ist die VDI 3805 [VDI 3805, 2011; DIN ISO 16757-1, 2015; DIN ISO 16757-2, 2016].

DIN EN ISO 29481 Im Fokus dieser Norm steht die Ermöglichung der Interoperabilität zwischen Softwareapplikationen in allen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks und Förderung der digitalen Zusammenarbeit aller am Bau Beteiligten. Durch die Bereitstellung einer gemeinsamen Basis für einen zuverlässigen Informationsaustausch und eine zuverlässige Weitergabe von Informationen soll Nutzern gewährleistet werden, dass die Informationen, die sie kommunizieren, präzise und für ihre auszuführenden Aktivitäten hinreichend sind. Die Normenreihe besteht aus drei Teilen und beschreibt die Methode zur Entwicklung von IDMs und der darin enthaltenen MVDs (siehe Kapitel 2.5) [ISO 29481-1, 2010; DIN EN ISO 29481-2, 2016; ISO/WD 29481-3, 2016].

ISO 12006 Die Normenreihe der ISO 12006 besteht aus den Teilen zwei und drei. Der zweite Teil gibt eine Struktur über die Entwicklung von Klassifikationssystemen der bebauten Umgebung und zeigt auf, wie die Objektklassen aus den Klassifikationstabellen in einer Folge von Systemen und Subsystemen miteinander zusammenhängen. Die Norm definiert eine Anleitung für empfohlene Klassifikationstabellen und ein Basisprozessmodell als grundlegende Struktur für die unterschiedlichen und wichtigsten Klassen. Der dritte Teil spezifiziert ein sprachunabhängiges Informationsmodell, das für die Entwicklung von Wörterbüchern benutzt werden kann und die Informationen über Bauwerke speichert oder bereitstellt. Die Norm ermöglicht eine Referenzierung von Klassifikationssystemen,

Informationsmodellen, Objektmodellen und Prozessmodellen [ISO 12006-2, 2015; E DIN EN ISO 12006-3, 2016].

ISO 16354 Diese Norm kategorisiert Wissens- und Objektbibliotheken und stellt Empfehlungen zur Erstellung auf. Es werden Anleitungen zur Vereinheitlichung von Informationen über Konzepte betrachtet, die als Basis zur Festlegung individueller Vereinbarungen zum Datenaustausch verwendet werden sollen. Der Fokus der Norm liegt auf der Bereitstellung von Anleitungen und Kriterien zur konformen Speicherung elektronischer Informationen über Konzepte und Beziehungstypen [ISO 16354, 2013].

ISO 19650 Die ersten beiden Teile der ISO 19650 wurden in die deutsche Normungsreihe überführt. Es sollen insgesamt drei Teile entstehen. Der erste Teil des Standards befasst sich mit den Konzepten und Prinzipien des BIM-basierten Informationsmanagements [DIN EN ISO 19650-1, 2018]. Der zweite Teil setzt sich mit der Übergabephase von Assets auseinander [DIN EN ISO 19650-2, 2018]. Ein weiterer geplanter Teil soll die Abstimmung zwischen einem Besteller und einem Lieferanten normieren. Dabei werden Bestimmungen zu den Rollen, Verantwortlichkeiten und dem Plan für den Datenaustausch festgelegt und dargestellt [ISO/DIS 19650, 2016].

ISO 22263 Dieser Standard spezifiziert eine Struktur für die Organisation von prozess- als auch produktorientierten Informationen in Bauprojekten. Die Struktur besteht aus einer Reihe von Parametern, die an Projekten unterschiedlicher Komplexität, Größenordnung und Projektdauer und auf internationale-, lokale- oder projektspezifische-Ebenen angepasst werden [ISO 22263, 2008].

Verschiedene Standardisierungsgremien haben sich national und international auf eine technische Zusammenarbeit verpflichtet. Dies verfolgt den Zweck, die Normierungsarbeiten nicht mehrmals individuell von jedem Land durchlaufen zu lassen. Dieser Zusammenschluss hat sich gemäß der „Wiener Vereinbarung“ darauf geeinigt, ISO-Standards auf die Ebene der European Committee for Standardization (CEN) zu überführen. Die Standards der CEN-Ebene müssen in nationale und somit DIN-Normen überführt werden. Abbildung 2.23 gibt eine Übersicht der BIM-Gremien. Aufgeführt sind vier Normungsgremien DIN, CEN, ISO und zusätzlich die Richtlinien vom VDI. Deutlich wird die enge Vernetzung aller Gremien, wodurch die in Tabelle 2.7 aufgeführten Normen ebenfalls in die deutsche Normen- und Richtlinienlandschaft aufgenommen werden bzw. aus ihr stammen. ISO und CEN sind internationale Normierungsrunden, wohingegen der DIN-Normenausschuss national einen Spiegelausschuss darstellt. Die VDI-Richtlinien haben die Aufgabe diese eher allgemein formulierten Regularien zu spezialisieren und zu ergänzen.

Die in der vorliegenden Dissertation aufgeführte Methodik, bezieht sich insbesondere auf die folgenden Normen:

- ▷ ISO 16739: Der IFC-Standard wird genutzt, um die Interoperabilität zu gewährleisten.
- ▷ ISO 29481: IDMs sind die Grundlage zur Definition des BIM-Anwendungsfalls, zusätzlich wird die dazugehörige MVD definiert.
- ▷ ISO 19650: Der Praxisbezug wird durch diese Norm gewährleistet, die zeitliche Einordnung basiert auf den definierten Phasen.

Aus der in Abbildung 2.23 aufgeführten engen Verzahnung der Normen und Richtlinien, ist abzuleiten, dass nicht nur ein Bezug auf die internationalen ISO- und CEN-Normen besteht, sondern ebenfalls auf die nationalen DIN-Normen sowie die VDI-Richtlinien.

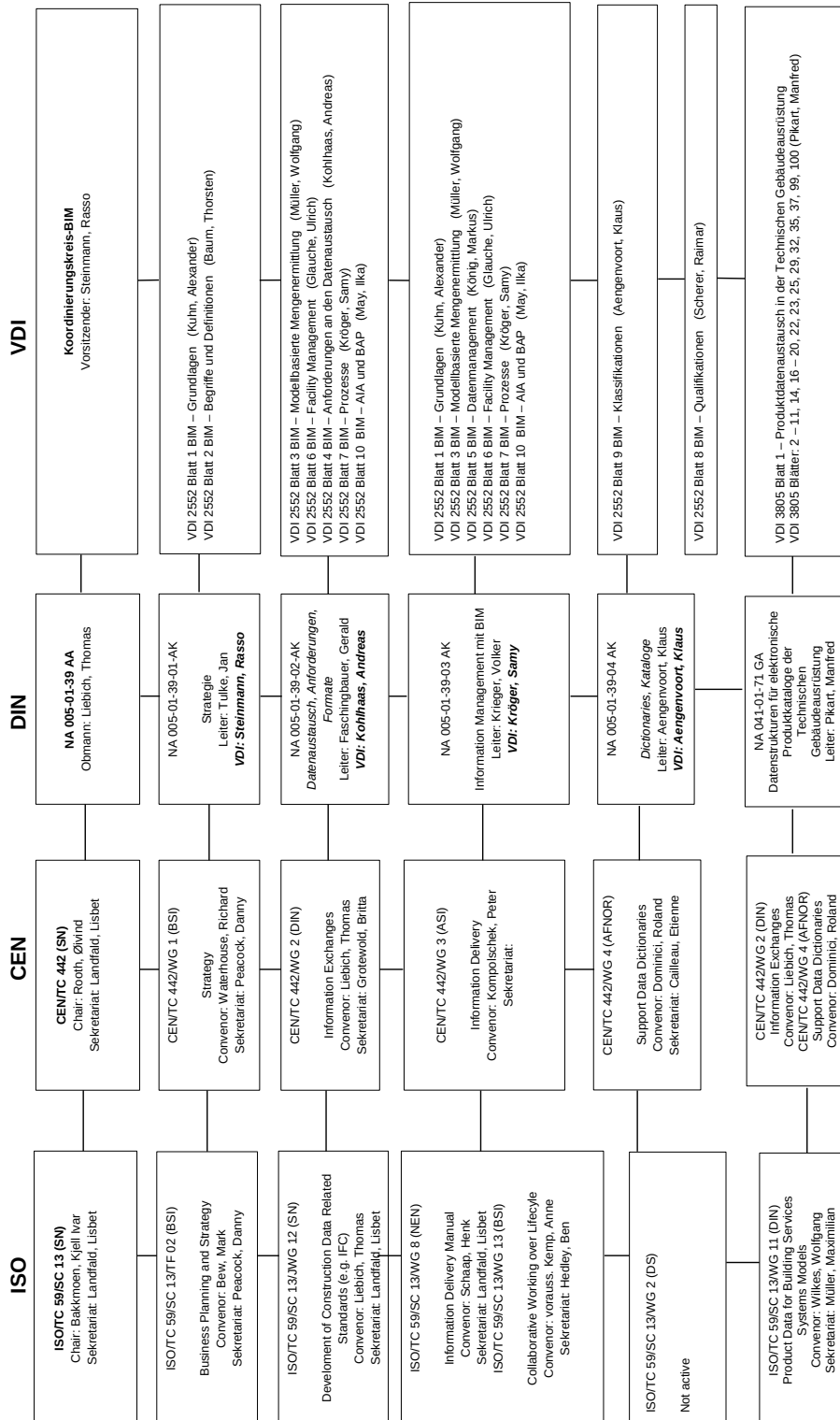


Abbildung 2.23: Übersicht und Zusammenhänge der BIM-Gremien - ISO, CEN, DIN und VDI [VDI, 2018].

2.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Stand der Technik und die allgemeinen Grundlagen für die weiteren Kapitel aufgeführt. Ausgehend von einer allgemeinen Erläuterung der Methode BIM als Teil der integralen Planungsmethodik wurde auf die technologische Umsetzung in Form von BIM-Datenmodellen eingegangen. Das integrale, standardisierte und somit offene IFC-Datenformat wurde ausführlich als Bestandteil der open-BIM-Einsatzform erläutert. Weitere Datenmodelle wurden aufgeführt, untersucht und erläutert. Diese stellen die technologische Grundlage zur Umsetzung von sogenannten BIM-Anwendungsfällen dar. Eine ausführliche Recherche zur Definition von BIM-Anwendungsfällen zeigt, dass noch keine einheitliche Struktur für diese besteht, es jedoch Bestrebungen dafür existieren. Die ISO-zertifizierte harmonisierte IDM- und MVD-Methode wird dazu genutzt eine einheitliche Struktur zur Definition von BIM-Anwendungsfällen herzustellen. Das IDM und die MVD wurden im Zuge dessen detailliert komponentenweise erläutert. Darauf aufbauend wurde die LOD-Methode als wichtiger Bestandteil erläutert und gezeigt wie diese aus den zuvor aufgeführten Methoden abgeleitet werden kann. Insbesondere ist das praxisorientierte „LoG-I-C-L-Modell“ hervorzuheben, welche über die Dateninhalte hinaus ebenfalls die Datenqualität beschreibt. Es wurden Beispiele gegeben, wie die Dateninhalte prozess- und zielorientiert entwickelt werden können. Dieses Kapitel schließt mit einer Übersicht der relevanten internationalen BIM-Normen und stellt den Bezug zu den nationalen Normen und Richtlinien sowie den Inhalten dieser Arbeit her. Das folgende Kapitel nutzt die in diesem Kapitel etablierten Grundlagen und bietet eine erste vollständige Anleitung von BIM-Anwendungsfällen, mit Bezug zum interoperablen IFC-Datenmodell und darüber hinausgehenden Integration des Beziehungsgefüges.

3 Entwicklung von BIM-Anwendungsfällen

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Definition von BIM-Anwendungsfällen mit der harmonisierten IDM- und MVD-Methode vorgestellt. Es wird schrittweise erläutert welche Komponenten für welchen Typ Anwendungsfall benötigt werden und wie diese definiert werden können. Der erste Schritt bei der Erstellung von BIM-Anwendungsfällen stellt die Charakterisierung dar, da für jeden Typ Anwendungsfall unterschiedliche Komponenten relevant sind. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, wird ein IDM in zwei Ebenen aufgeteilt, welche jeweils eigene Komponenten aufweisen. Auf Grundlage dessen, müssen anwendungsübergreifend folgende Komponenten entwickelt werden:

- ▷ Ebene der Nutzeranforderungen:
 - Interaktions-/ Transaktionsdiagramm;
 - Prozessdiagramm;
 - Datenaustauschanforderungen.
- ▷ Ebene der technologischen Umsetzung:
 - Datenaustauschanforderungsmodell;
 - MVD.

Diese Struktur wird in diesem Kapitel aufgegriffen und weiterentwickelt. Es werden Methoden zur Erarbeitung der einzelnen Bestandteile aufgeführt. Zusätzlich werden Vorgehensweisen zur Entwicklung der ergänzenden LODs und der optionalen Mapping Rules empfohlen. Das Kapitel schließt mit einem Flussdiagramm zur Entwicklung von BIM-Anwendungsfällen gemäß der detailliert erläuterten Methoden ab.

3.1 Rahmenbedingungen

Das Projekt EnEff:BIM¹ definiert als erstes Projekt eine vollständige IDM und eine MVD für die Simulation von gebäudetechnischen Systemen auf Basis des IFC4-Datenmodells. Die darin durchgeführten Arbeiten erlauben die Ableitung einer Beschreibung zur Anwendung der harmonisierten IDM- und MVD-Methode. Andere Projekte haben ebenfalls versucht diesen Ansatz zu verfolgen,

¹Github Repository: <https://github.com/EnEff-BIM>

haben jedoch nicht alle Bestandteile abbilden können. Im EU geförderten Projekt „Hesmos“ („ICT Platform for Holistic Energy Efficiency Simulation and Lifecycle Management of Public Use Facilities“) wurde das Thema der Energiesimulation im Kontext von BIM untersucht. Zur Definition dieses Anwendungsfalls wurde ein erster Überblick über die harmonisierte IDM- und MVD-Methode gegeben. Insgesamt ließen sich sechs Stufen für eine Entwicklung identifizieren und übersichtlich zusammenfassen (siehe Abbildung 3.1). Die im Hesmos-Projekt identifizierten sechs Schritte basieren auf der ISO 29481-1 [ISO 29481-1, 2010] und bilden den ersten Ansatz zur Entwicklung der IDM. Sie müssen jedoch detaillierter ausgearbeitet werden, damit dem Anwender ein ausreichender Leitfaden geboten wird. Zudem wurde das Ziel der Entwicklung einer MVD nicht erreicht, so dass nach der Erstellung des Datenaustauschanforderungsmodells keine weiteren Untersuchungen und somit Angaben zur weiterführenden Entwicklung geboten werden.

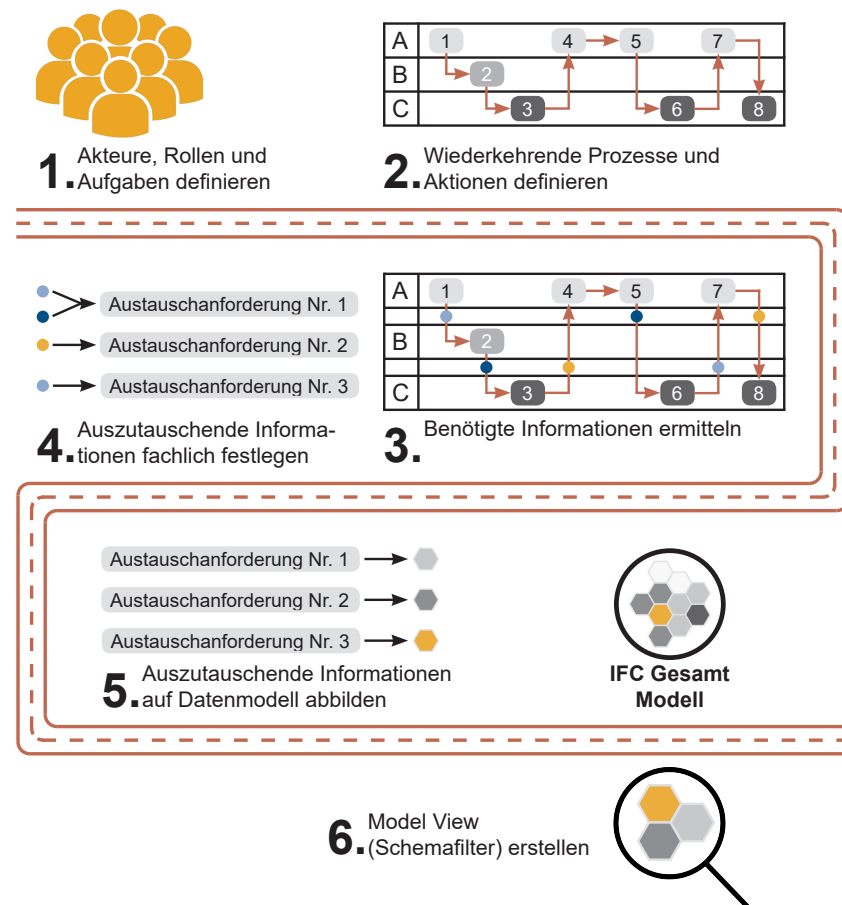


Abbildung 3.1: Überblick über die im Hesmos-Projekt identifizierten Schritte zur Entwicklung der IDM- und MVD-Methode [i. A. a. Beetz u. a., 2015].

3.2 Charakterisierung

Wie in Abschnitt 2.4 ab Seite 30 beschrieben, wird für jeden Anwendungsfall vom Management im ersten Schritt das jeweilige BIM-Ziel definiert. Hierfür müssen zunächst die Randbedingungen des Anwendungsfalls identifiziert werden. Damit eingeschätzt werden kann, ob die Entwicklung des Anwendungsfalls sinnvoll ist oder unrealistisch erscheint, sollten insgesamt die folgenden Fragen beantwortet werden [DIN EN ISO 29481-1, 2016; DIN EN ISO 29481-2, 2016; Wix u. Karlshoej, 2010; DIN EN ISO 19650-1, 2018; DIN EN ISO 19650-2, 2018]:

- ▷ Was sind die Geschäftsanforderungen?
- ▷ Welche Akteure werden benötigt und sind deren Ressourcen ausreichend?
- ▷ Welche Rollen müssen erfüllt werden und können diese von den Akteuren bewältigt werden?
- ▷ Wie wird der Informationsaustausch vorbereitet und gehandhabt?
- ▷ Welche Normen, Richtlinien und/ oder Vereinbarungen werden dem Anwendungsfall zu Grunde gelegt?

Die Geschäftsanforderungen legen den Zeitrahmen für die Bearbeitung des Anwendungsfalls fest sowie ob das Projekt für die Entwicklung des Anwendungsfalls geeignet ist.

Jede einzelne Person oder Arbeitsgruppe und jedes Unternehmen sind Akteure, die gewisse Ressourcen verfügen. Die Ressourcen im Anwendungsfall stellen die Akteure selbst dar, da sie den Prozess weiter fortschreiben. Folglich sollte beantwortet werden, ob die Akteure qualifiziert sind und die angedachten Aufgaben bewältigen können.

Diesen in diesem Schritt zunächst unscharf definierten Aufgaben werden Rollen zugeteilt, die wiederum von den Akteuren abgedeckt sein müssen. Können verschiedene Rollen nicht erfüllt werden, müssen weitere Akteure zur Erfüllung dieser in den Prozess eingebunden werden. Es können auch mehrere Rollen von einem Akteur übernommen werden (siehe Abbildung 2.16).

Der Informationsaustausch muss festlegen, ob das Projekt mit der open- oder closed- sowie little- oder BIG-BIM-Einsatzform (siehe Abbildung 2.3) bearbeitet wird. Dazu zählt ebenfalls die Architektur der Software und insbesondere deren Schnittstellen, die wiederum von den jeweiligen Akteuren und deren Fähigkeiten abhängig sind.

Die dem Anwendungsfall zu Grunde liegenden Normen, Richtlinien und Vereinbarungen definieren, welche Daten und Informationen zu erwarten sind sowie die notwendigen Prozessschritte. Zudem müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt sein.

Nachdem diese Fragen beantwortet sind, kann vom Management bewertet werden, ob das angestrebte BIM-Ziel realistisch ist und in Form eines BIM-Anwendungsfalls im Projekt eingebunden wird.

Falls die Bewertung negativ ausfällt, müssen die Ansätze neu evaluiert werden, bis ein positives Ergebnis erzielt wird. Ansonsten kann das BIM-Ziel nicht aufgenommen werden und der Anwendungsfall wird nicht entwickelt.

3.3 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik

Wie in Kapitel 2 beschrieben, definiert das IDM die Informationsanforderungen und den Informationsfluss zur Bedienung der optimalen Datenforderungen eines Zielprozesses unter Berücksichtigung der relevanten Akteure, der Definition der Rollen und der jeweiligen Prozessschritte. Das kongruierende Prozessdiagramm gibt Aufschluss über die korrespondierenden Schnittstellen und stellt die Basis für die Ableitung der relevanten Daten zur Durchführung der einzelnen Aufgaben. Auf der Ebene der Nutzeranforderung aufbauend werden auf der technologischen Ebene maßgeschneiderte Schnittstellen schemaabhängig in Form einer MVD spezifiziert und implementiert, wodurch der Informationsfluss ermöglicht und ebenfalls etabliert wird. Eine IDM kann darüber hinaus, abhängig von der Art und dem Kontext des Informationsaustauschs, den Schwerpunkt auf die Interaktion der kollaborierenden Parteien legen.

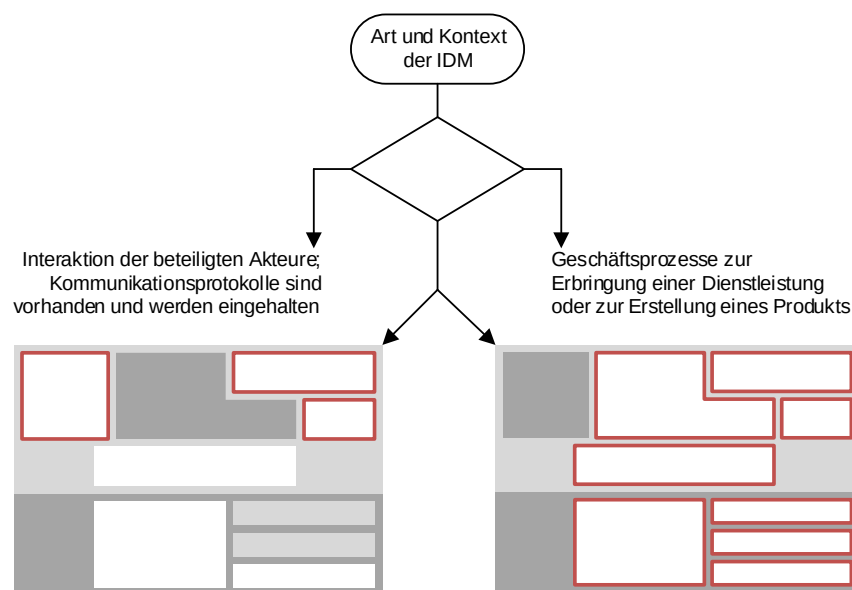


Abbildung 3.2: Optionen zur Definition einer IDM in Abhängigkeit von der Art und dem Kontext (Vergleiche hierzu Abbildung 2.13).

Abbildung 3.2 veranschaulicht die beiden Optionen, die bei der Entwicklung einer IDM grundsätzlich bestehen. Je nach Art und Kontext der zu definierenden IDM sind unterschiedliche Komponenten vorgesehen. Liegt der Schwerpunkt auf den Geschäftsprozessen zur Erbringung einer Dienstleistung oder zur Erstellung eines Produkts, kommen die folgenden Komponenten in Betracht:

- ▷ Prozessdiagramm;
- ▷ Datenaustauschanforderung;
- ▷ Datenaustauschanforderungsmodell;
- ▷ Informationsspezifikation;
- ▷ BIM-Datenmodelle;
- ▷ ggf. eine MVD.

Liegt der Fokus auf der Interaktion der beteiligten Akteure und soll gewährleistet werden, dass Kommunikationsprotokolle vorhanden sind und eingehalten werden, sind folgende Komponenten relevant:

- ▷ Interaktions- / Transaktionsdiagramm;
- ▷ ggf. Datenschema der Interaktionsstruktur.

Grundsätzlich wird zwischen den beiden Optionen zur Definition einer IDM unterschieden. Jedoch ist es ebenfalls möglich, beide Optionen auf einen Anwendungsfall zu integrieren, so dass alle Komponenten in Betracht gezogen werden. Dies hängt individuell von dessen Randbedingungen und dessen BIM-Ziel ab.

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten detailliert erläutert. Begonnen wird mit der Ebene der Nutzeranforderungen, um darauf aufbauend mit der technologischen Ebene fortzufahren.

3.3.1 Nutzeranforderungen

Auf der Ebene der Nutzeranforderungen werden das Management und die Anwender eingebunden. Es werden die folgenden drei Komponenten jeweils erläutert:

- ▷ Interaktions- / Transaktionsdiagramm;
- ▷ Prozessdiagramm;
- ▷ Datenaustauschanforderungen.

Interaktions- / Transaktionsdiagramm

Werden die Interaktionen der Beteiligten untersucht, wird zur Ermittlung der notwendigen Informationen eine Methode des Data-Minings empfohlen [DIN EN ISO 29481-1, 2016]. Cross-Industry Standard Process (CRISP) stellt einen Prozess dar, um Strukturen in Kommunikationsprofilen zu erkennen und zu standardisieren. Abbildung 3.3 zeigt das Referenzmodell des CRISP-Data-Mining. Das Referenzmodell veranschaulicht die wesentlichen sechs Schritte des CRISP zur Identifizierung der benötigten Informationen innerhalb der gegebenen Datenmengen. Die aufgezeigten sechs Schritte sind grundsätzlich alle zu dokumentieren und bestehen aus mehreren Teilaufgaben. Im ersten Schritt „Business Understanding“ geht es darum, das Geschäftsmodell und dessen Ziele – die Interaktion zwischen den Akteuren, gegeben durch Transaktionen und den dazugehörigen Nachrichten – zu verstehen. Dabei werden die Ressourcen, der Zeitrahmen und die zu erwartenden Risiken untersucht, um daraus Meilensteine sowie eine genaue Spezifikation des Ziels abzuleiten. Im zweiten Schritt „Data Understanding“ werden die eigentlichen Daten, deren Ursprung, die Metadaten und Datenqualität bspw. in Fallbeispielen untersucht und ggf. dargestellt. Der dritte Schritt „Data Preparation“ stellt den umfangreichsten Schritt dar und identifiziert die wichtigsten Variablen (bspw. das Vorhandensein eines Fachmodells zu einem bestimmten Prozessschritt). Daraus wird eine Datenqualität abgeleitet, indem Ausreißer oder fehlende Daten (Gewerke oder wichtige Objekte) erkannt und Verknüpfungen gebildet werden, welche evtl. eine Transformation erforderlich machen. Der darauffolgende vierte Schritt „Modelling“ wird zur Spezifizierung der Modellparameter verwendet. Es werden Parameter zur Identifizierung der Modellgüte erstellt, die die Basis für eine Bewertung der erstellten Modelle sind. Der fünfte Schritt sieht eine „Evaluation“ vor, bei der geprüft wird, ob die eingangs abgeleiteten Ziele erreicht wurden und ob alle Daten für zukünftige Anwendungen verwertbar sind. Im letzten Schritt „Deployment“ werden die erarbeiteten Inhalte in der Praxis angewendet, so dass die Interaktionen standardisiert werden und den geforderten Qualitätsansprüchen genügen.

Die benötigten Informationen für ein Interaktionsdiagramm (siehe Abbildung 2.15) stellen die relevanten Rollen und deren Transaktionen dar. Für jede Transaktion werden zwei Rollen benötigt: der Initiator als sendende Rolle und der Ausführende als empfangende, daraufhin tätig werdende Rolle. Durch diese Analyse wird die Identifikation und Analyse der einzelnen Elemente eines Prozesses möglich.

Die korrespondierenden Transaktionen werden detaillierter untersucht und in einem Transaktionsdiagramm (siehe Abbildung 2.17) zusammengefasst dargestellt.

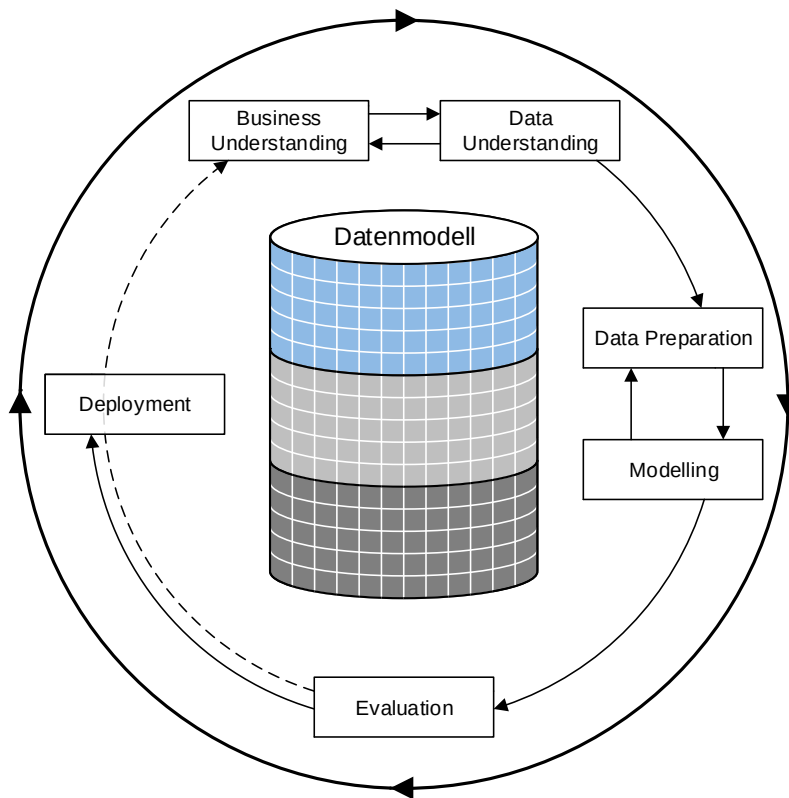


Abbildung 3.3: Das CRISP-Data-Mining-Referenzmodell [Smart Vision Europe 2015, 2016].

Die Entwicklung des Transaktionsdiagramms basiert auf einem Sequenzdiagramm (Teil der Unified Modeling Language (UML) [OMG, 2016; DIN EN ISO 29481-1, 2016]). Das Sequenzdiagramm stellt den Ablauf dar, in dem die Transaktionen getätigt werden können. In Form von Akteuren, Lebenslinien, Nachrichten und Aktivitätsbalken werden Kommunikationsprotokolle erstellt, die wiederum zur Qualitätssicherung verwendet werden können. Zur weiteren Spezifizierung können optionale Anhänge den Transaktionen hinzugefügt werden. Bspw. können die Datenaustauschanforderungen oder das dazugehörige Modell sowie Rechteverteilungen als weiterführende Informationsquelle angehängt werden, wodurch weitere Optionen zur Qualitätssicherung vorhanden sind.

Die definierten Interaktionen und Transaktionen können teilweise durch Einbindung einer Software-Architektur, die ein Datenschema der Interaktionsstruktur verwendet, automatisiert werden [DIN EN ISO 29481-2, 2016]. Die Verwendung einer solchen Struktur ermöglicht bspw. das Aufsetzen eines Projekt-Kommunikations-Management-Systems zur Unterstützung des Projektmanagements.

Prozessdiagramm

Falls, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, der Schwerpunkt auf den Geschäftsprozessen zur Erbringung einer Dienstleistung oder zur Ablieferung eines Produkts liegt, wird mit der Erstellung eines Prozessdiagramms begonnen. Die Erstellung eines solchen Diagramms ist sehr komplex und wird sukzessive gemeinsam von allen Akteuren erarbeitet. Die standardisierte Spezifikationssprache BPMN wird zur Abbildung komplexer Prozesse, wie sie im Bauprozess zu erwarten sind, verwendet [König, 2015]. BPMN verwendet eine Vielzahl an Symbolen zur Beschreibung der Prozesse und deren Elemente:

- ▷ Swimlanes/ Pools: Trennung und Unterscheidung von Rollen und Aufgaben;
- ▷ Flow Objects: Darstellung von Aktivitäten, Entscheidungs- bzw. Koordinierungspunkten und Ereignissen;
- ▷ Connecting Objects: Definition der Reihenfolge durch Verbindungen zwischen Objekten und Informationsflüssen;
- ▷ Artifacts: Regelung des Informationsflusses und zur Informationsanreicherung.

Für weiterführende Erläuterungen wird auf die einschlägige Literatur zu BPMN verwiesen (bspw. [König, 2015], [Allweyer, 2009] oder [Freund u. Rücker, 2014]).

Abbildung 3.4 zeigt das zuvor aufgeführte Prozessdiagramm (siehe Abbildung 2.18) in erweiterter Form. Zusätzlich wird hervorgehoben, welche Fragen zur Erstellung des Prozessdiagramms beantwortet werden müssen. Die hervorgehobenen Fragen können entweder direkt oder in der weiteren Ausführung durch zusätzliche Informationen beantwortet werden.

- ▷ Wer?: Welche Rollen müssen eingenommen werden und sind die Ressourcen dafür ausreichend?
- ▷ Welche Phase(n)?: Zu welcher/-n Phase/-n/ Leistungsphase/-n findet der dargestellte Prozess statt?
- ▷ Wie?: Welche Aufgaben auf Basis welcher Normen, Richtlinien, Vereinbarungen, etc. müssen bewältigt werden?
- ▷ Was?: Was für ein Output wird generiert?
- ▷ Womit?: Welches Datenmodell oder welche Dokumente werden über welche Schnittstelle ausgetauscht?
- ▷ Wann?: Wann wird der Output generiert bzw. erwartet?
- ▷ An wen?: Welche Rolle bzw. welcher Akteur empfängt mit welcher Software die kommunizierten Daten und Informationen?

▷ Wofür?: Der generierte Output dient als Input für welche Aufgabe?

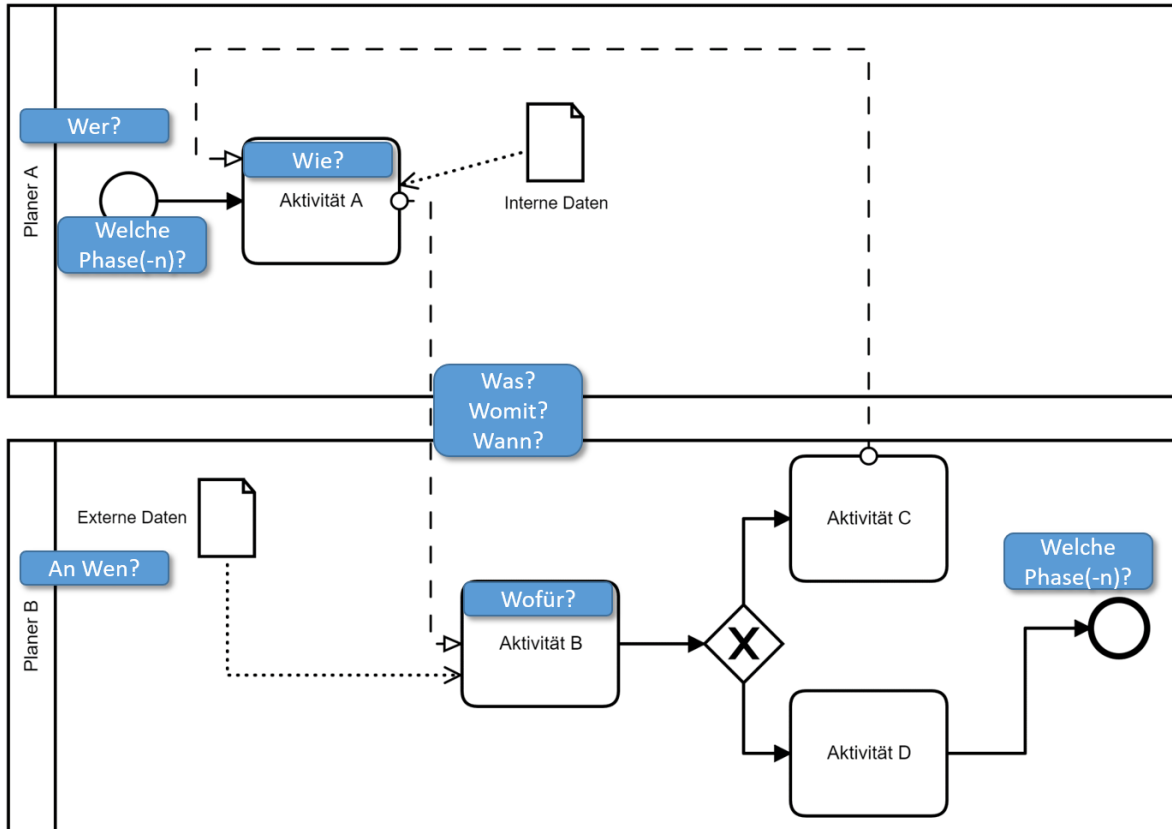


Abbildung 3.4: Die vom BPMN-Prozessdiagramm zu vermittelnden Informationen.

Die sukzessive Beantwortung der Fragen ermöglicht die Erstellung des Prozessdiagramms. Deutlich wird, dass nicht alle geforderten Informationen von dem Prozessdiagramm alleine dargestellt werden können. Daher gilt es, die weiteren Komponenten der IDM zu entwickeln. Die gesamte IDM in Kombination mit den LODs fasst dieses Kompendium an Daten und Informationen zur Beschreibung des gesamten BIM-Anwendungsfalls zusammen.

Die Erstellung des Prozessdiagramms kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Dies hängt vom Status quo der Informationen und von den Fähigkeiten der Akteure ab. Folgende Vorgehensweise kann empfohlen werden:

1. Den Pool schaffen, in dem die Swimlanes definiert werden;
2. Swimlanes mit den notwendigen Rollen besetzen, die je nach BIM-Ziel ebenfalls das Modell Setup ausmachen. Der Pool wird nur soweit unterteilt wie es der Prozess fordert;

3. Die Rollen den Akteuren zuordnen und prüfen, ob die Akteure den geforderten Qualitätsanforderungen entsprechen;
4. Start- und End-Events identifizieren, bspw. in Bezug auf Phasen, Leistungsphasen oder Meilensteinen;
5. Aktivitäten definieren und platzieren, bspw. in Bezug auf Standards, gängige Konventionen oder in direkter Absprache mit den jeweiligen Akteuren (entscheidend ist, dass der Detaillierungsgrad der Aktivitäten verständlich sowie ausreichend für den jeweiligen Zweck ist und gleichzeitig die Komplexität nicht durch zu kleinteilige Schritte unnötig erhöht wird);
6. Aktivitäten mit Connections verbinden, um die Reihenfolge festzulegen und die Schnittstellen zu identifizieren;
7. Transaktionen zwischen den Aktivitäten spezifizieren, indem festgelegt wird, was für Daten und Informationen kommuniziert werden und wie diese Kommunikation stattfindet, bspw. in (Teil-) Modellen oder Dokumenten;
8. Artifacts zur Spezialisierung der Aufgaben und Nachrichten.

Das sukzessive Entwickeln des Prozessdiagramms erfolgt in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten und unterliegt einer ständigen Kontrolle. Hervorzuheben ist die stufenweise Entwicklung. Zunächst werden die einzelnen Aktivitäten aufgeführt und in der jeweiligen Swimlane in der abzuarbeitenden Reihenfolge angeordnet. Danach werden die Schnittstellen zwischen den Akteuren definiert, um auf der Management- und Anwenderebene mit der Definition der Inhalte in den Schnittstellen abzuschließen. Die Datenaustauschanforderungen werden für jede Schnittstelle definiert.

Datenaustauschanforderungen

Da BIM-Datenmodelle objektorientiert konzipiert sind, sollte die Datenaustauschanforderung dementsprechend definiert sein. Um die Objekte mit den dazugehörigen Parametern zu beschreiben, muss von dem Sender und dem Empfänger in der Schnittstelle objektorientiert analysiert werden, welche Daten und Informationen in welcher Form kommuniziert werden müssen. Bspw. sind für die Simulation der TGA die Bauteile des jeweiligen Gewerks die erste Grundlage in der Definition der Objekte. Darüber hinaus benötigen die einzelnen Objekte genormte und programmabhängige Daten und Informationen, die wiederum den erwähnten Parametern entsprechen. Zusätzlich können Informationen in der Schnittstelle verlangt werden, die nicht einfach durch ein Objekt oder einen Parameter ausgedrückt werden können, sondern bspw. das Verhalten des Bauteils beschreiben (bspw. Orientierung eines Bauteils).

Die Daten und Informationen, die in Form einer Datenaustauschanforderung kommuniziert werden, sollten wie folgt strukturiert sein:

- Domäne/ Fachmodell: Welche Domäne wird durch welches Fachmodell beschrieben?
- Element: Welches Bauteil bzw. abstraktes Element wird untersucht?
- Parameter/ Information: Was für Parameter, Informationen oder Funktionen müssen abgebildet sein?
- Export: Ist der Export für diese Schnittstelle zwingend erforderlich (M: Mandatory), optional (O: Optional) oder ausgeschlossen (-)?
- Verantwortlich: Von wem wird der Wert des Parameters/ die Information definiert?
- Einheit/ Typ: Welche(r) Einheit/ Typ ist für den Parameter/ die Information definiert?
- Restriktionen: Was für zusätzliche Informationen/ Beschränkungen sind zur eindeutigen Definition des Parameters/ der Information notwendig?

Die Datenaustauschanforderungen werden nach Erstellung an die Softwareentwickler zur weiteren Bearbeitung und Ableitung der MVD übergeben.

3.3.2 Technologische Umsetzung

Auf der Ebene der technologischen Umsetzung arbeiten die Softwareentwickler schemaabhängig an der Umsetzung des BIM-Anwendungsfalls. Die in der Anwenderebene definierten Informationen bilden die Grundlage für die weitere Entwicklung des Datenaustauschanforderungsmodells und die daraus abzuleitende MVD. Zur vollständigen Definition des BIM-Anwendungsfalls werden zusätzlich die LODs bzw. die LOGs und LOIs aus den Austausch Anforderungsmodellen formuliert. Die Vorgehensweise zur schrittweisen Erarbeitung dieser Komponenten wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

Auf der technologischen Ebene werden die folgenden Komponenten erläutert:

- Datenaustauschanforderungsmodell;
- Model View Definition.

Datenaustauschanforderungsmodell

Je nachdem welche Programme für die jeweilige Schnittstelle verwendet werden, ergibt sich die Struktur der zu definierenden Daten und Informationen, die aus dem zu Grunde liegenden Datenmodell abgeleitet werden. Das in der Schnittstelle für den Transport verwendete Datenmodell bestimmt, wie die Daten und Informationen definiert sein müssen. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben und in Abbildung 3.5 ersichtlich, bestehen diese BIM-Modelle aus Objekten, die wiederum Instanzen

der Klassen des Informationsschemas darstellen. Dabei werden die Daten im Export entsprechend vom sendenden Programm modelliert und im Import vom empfangenden Programm interpretiert. Die gesendeten Daten müssen den Bedarf bedienen, der für die nachgelagerten Prozesse benötigt wird und sollten eine ausreichende Datengranularität vorweisen [Hietanen u. Lehtinen, 2006].

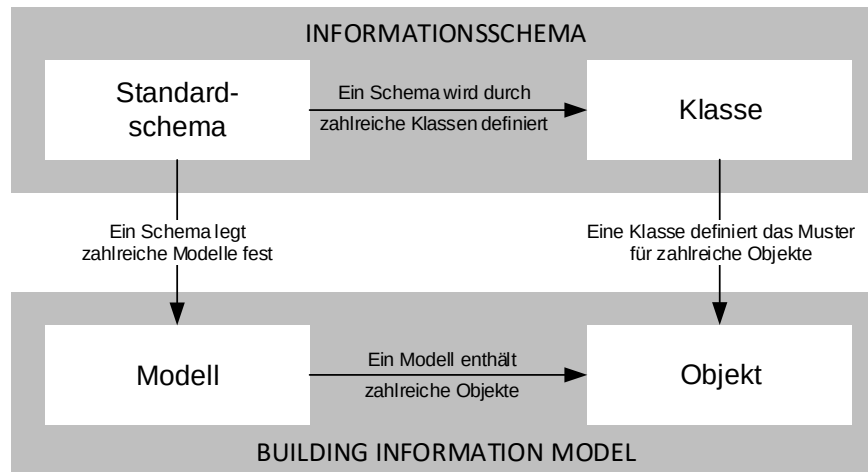


Abbildung 3.5: Das Datenmodell bestehend aus Klassen und das instanziierte BIM-Modell bestehend aus Objekten [DIN EN ISO 29481-1, 2016].

Die Entwicklung des Datenaustauschanforderungsmodells basiert auf der Zuordnung des in der Schnittstelle verwendeten Datenmodells zu den Objekten und Parametern des Austauschmodells. Die open BIM-Einsatzmethode basiert bspw. auf dem IFC-Datenmodell. Die Struktur des IFC4-Datenmodells ist, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, in vier Ebenen eingeteilt. Die oberste Ebene, der Domain Layer „Domain specific data schemas“, gruppiert die jeweiligen Objekte gewerke-weise in Domänen Schemata und dient somit als erste Orientierung für die Objekte des anvisierten Gewerks. Je nachdem welches Gewerk untersucht wird, kann sich an den folgenden Domänen orientiert werden:

- ▷ Architektur: *IfcArchitectureDomain*;
- ▷ MSR: *IfcBuildingControlsDomain*;
- ▷ Konstruktionsmanagement: *IfcConstructionMgmtDomain*;
- ▷ Elektrotechnik: *IfcElectricalDomain*;
- ▷ TGA: *IfcHvacDomain*;

- ▷ Wasser/ Abwasser/ Sanitär und Brandschutz: *IfcPlumbingFireProtectionDomain*;
- ▷ Statik, Dynamik und Tragwerksplanung: *IfcStructuralAnalysisDomain*; *IfcStructuralElementsDomain*.

Neben den domainspezifischen Entitäten des IFC4-Datenmodells, wie bspw. der Heizkessel (*IfcBoiler*), der Befeuchter (*IfcHumidifier*) oder der Ventilator (*IfcFan*), werden auch Entitäten von mehreren Domänen verwendet. Diese befinden sich im Interoperability Layer:

- ▷ Architektonische Bauteile: *IfcSharedBldgElements*;
- ▷ TGA, elektrotechnische Komponenten und Wasser-/ Abwasser-Komponenten: *IfcSharedBldgServiceElements*;
- ▷ Kleinere Bauteile: *IfcSharedComponentElements*;
- ▷ Facility Management: *IfcSharedFacilitiesElements*;
- ▷ Allgemeines Management der Immobilie: *IfcSharedMgmtElements*.

Die in diesem Layer definierten Entitäten werden von mehreren Domänen verwendet. Bspw. wird der Anschluss/ Port (*IfcDistributionPort*) für die luft- oder wasserbasierte Heizung aus der Domäne *IfcHvacDomain* und ebenfalls von den Domänen *IfcElectricalDomain* und *IfcBuildingControlsDomain* zur physischen Verbindung von Objekten und zur Bildung von Gewerken benötigt.

Des Weiteren sind grundlegende Entitäten, auf denen der Interoperability und Domain Layer aufbaut, im Core Layer definiert:

- ▷ (Abstrakte) Elemente zur Abbildung von elementaren Funktionen, wie bspw. Aggregation, Relation, Typisierung, PSets, etc.: *IfcKernel*;
- ▷ Definition für die MSR, deren Zuweisung und zusätzlich für Ressourcen: *IfcControlExtension*;
- ▷ Elemente für einen Prozess, wie bspw. eine Aufgabe, ein Ereignis oder einen Kalender: *IfcProcessExtension*;
- ▷ Hauptsächlich Elemente die physisch im BIM-Datenmodell modelliert werden, bspw. Gebäude, Raumvolumen oder Geschoss: *IfcProductExtension*.

Auf der untersten Ebene des IFC4-Datenmodells befindet sich der Resource Layer zur Definition von allgemeinen Elementen, wie bspw. den Materialien, Zeiteinheiten, Propertytypen oder geometrischen Bausteinen. Auf diese wird von den oberen Layern zugegriffen.

Die in den beschriebenen Layern organisierten Entitäten werden den identifizierten Bauteilen bzw. abstrakten Elementen im Datenaustauschanforderungsmodell zugeordnet. Um den Zuordnungsprozess zur Bildung des Datenaustauschanforderungsmodells abzuschließen, muss im letzten

Schritt das Datenmodell den identifizierten Parametern zugeordnet werden. Dafür werden die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Eigenschaftssätze in Form von Attributen, PSets, Quantity Set (QSet)s und Enumerations den Parametern zugeordnet.

Attribute werden zur Abbildung und Integration von Funktionen und für die Navigation von einer Entität zur nächsten Entität verwendet. Die Bildung der Strukturen erlaubt das Abbilden von komplexen Funktionen in Form von Konzepten. Darüber hinaus existieren verschiedene Attribute, die reine geometrische Daten abbilden. Bspw. wird die Dicke einer Wandschicht über das Attribut `LAYERTHICKNESS` der Entität *IfcMaterialLayer* beschrieben, die es gilt, bei der Definition des Datenaustauschanforderungsmodells zu berücksichtigen.

Bei den Properties und Quantities muss zwischen PSets und QSets unterschieden werden, die allgemein oder spezialisiert zugewiesen sind. Bspw. ist `PSet_Warranty` ein allgemeines PSet, das für den Betrieb relevante Properties beinhaltet. `PSet_Warranty` ist der Entität *IfcElement* zugewiesen. *IfcElement* fasst u.a. alle Entitäten zusammen, die physische Objekte darstellen und ist hierarchisch Entitäten wie *IfcWall* oder *IfcBoiler* übergeordnet. Entitäten, die in der Verbindungshierarchie an unterer Stelle angeordnet sind, können spezialisierte PSets vorweisen. Bspw. ist `PSet_BoilerTypeCommon` der Entität *IfcBoiler* zugewiesen, um Properties zu definieren, die nur für den Heizkessel relevant sind, gleiches gilt für die QSets. Die Properties Enumerations hingegen sind eindeutig zugewiesen und sind direkt mit der jeweiligen Entität verbunden. Als weitere Option für PSets, QSets und Enumerations können Properties, Quantities oder Property Constants (als Properties der Enumerations) individuell definiert werden. Diese sogenannten „user defined“ PSets, QSets oder Enumerations erlauben eine dynamische Erweiterung über die bereits in der Dokumentation vorgesehenen Eigenschaftssätze hinaus. Falls diese für das Projekt spezifiziert sind, müssen diese bei der Definition des Datenaustauschanforderungsmodells berücksichtigt werden. Evtl. wird bei der Erstellung des Datenaustauschanforderungsmodells die Notwendigkeit für eine ergänzende Definition solcher user defined PSets, QSets oder Enumerations deutlich, so dass eine Erweiterung als notwendig befunden wird.

Zur Abbildung von den im Austausch Anforderungsmodell benötigten Funktionalitäten können die Entitäten mit den jeweiligen Funktionen verwendet werden. Bspw. wird die Verwendung der Entität *IfcGroup* durch das Attribut `ISGROUPEDBY` möglich. `ISGROUPEDBY` verweist auf die objektifizierte Relation *IfcRelAssignsToGroup*, wodurch eine Eins-zu-Viele (1:n)-Gruppierungsfunktion abgebildet wird. Diese Integration von einfachen Funktionalitäten ist meist nicht zielführend, da, wie in diesem Beispiel gezeigt, alleine eine Gruppierungsfunktion keinen Zweck erfüllt. Jedoch ist die Gruppierungsfunktion in der Bildung von thermischen Zonen ein wichtiger Bestandteil. Zur Bildung von thermischen Zonen werden, entsprechend genormter Randbedingungen, mehrere Raumvolumina gruppiert. Diese Funktion wird in einer Konzeptvorlage abgebildet. Wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, sind Konzepte Strukturvorgaben des Datenmodells zur Abbildung komplexer Funktionen. Die Grup-

pierungsfunktion zur Bildung von thermischen Zonen wird mit der Entität *IfcZone* und dem Konzept „Group Assignment“ umgesetzt. Da *IfcZone* in der Hierarchie *IfcGroup* untergeordnet ist, kann auf die vererbten Attribute zugegriffen werden. Das Konzept ist derart gestaltet, dass das Attribut ISGROUPEDBY auf *IfcRelAssignsToGroup* verweist und mit dem Attribut RELATEDOBJECTS auf die abstrakte Entität *IfcProduct*. Die hierarchisch untergeordneten Entitäten von *IfcProduct* werden somit in die Verwendung eingebunden. Die Konfiguration dieser Konzeptvorlage erlaubt eine Spezialisierung für *IfcSpaces*, so dass speziell thermische Zonen gebildet werden können (siehe ebenfalls Code 4.1 ab Seite 156).

Damit das Datenaustauschanforderungsmodell eine ausreichende Grundlage zur Bildung der MVD darstellt, sollten zusätzlich die folgenden Daten und Informationen zu den bereits definierten Datenaustauschanforderungen kommuniziert werden:

- ▷ Model View: Bezeichnung der verwendeten MVD (falls vorhanden);
- ▷ Schema: Bezeichnung des verwendeten Datenschemas;
- ▷ Entity: Bezeichnung der Entität, bzw. Klasse des Datenmodells;
- ▷ Attribute: Bezeichnung des Attributs der Entität;
- ▷ PSet: Bezeichnung des PSets;
- ▷ Property: Bezeichnung der Properties;
- ▷ QSet: Bezeichnung des Quantity Sets;
- ▷ Quantity: Bezeichnung der Quantities;
- ▷ Enumeration: Bezeichnung der Property Enumeration;
- ▷ Property Enumeration: Bezeichnung des Property Constant;
- ▷ Concept: Bezeichnung der zu verwendenden Konzeptvorlage.

Zusätzliche Informationen, wie bspw. Autor, Status oder verwendete Software, sind hilfreich. Damit werden bei einer kollaborativen Bearbeitung Rückschlüsse auf Verantwortlichkeiten möglich.

Grundsätzlich sollte beachtet werden, dass das IFC-Datenmodell (gemäß der Schemadokumentation) evtl. nicht alle geforderten Daten und Informationen beinhalten kann, so dass die flexible Struktur zur Deckung des fehlenden Bedarfs genutzt werden muss. Zudem ist es nicht sinnvoll, alle plan-, bau- und betriebsbezogenen Daten und Informationen im IFC-Datenmodell alleine aufzunehmen, da somit der Zweck des Datenmodells verfehlt werden würde und diese ebenfalls anderweitig kommuniziert werden können. Darüber hinaus kann ein Ansatz gewählt werden, der harte und weiche Faktoren zulässt. Bspw. werden die Daten und Informationen in harte Faktoren gegliedert, da das IFC-Datenmodell die notwendige Struktur zur Abbildung dieser bietet. Demgegenüber gilt

es, die weichen Faktoren zu erkennen, die nicht vollständig im Datenmodell abbildbar sind und weiterführenden Daten und Informationen bedarf. Diese Unterteilung der zu kommunizierenden Informationen hilft bei der Erkennung des Beziehungsgefüges der Daten und Informationen innerhalb der Schnittstelle.

Die hier aufgeführten Informationen zur Beschreibung des Datenaustauschanforderungsmodells vermitteln das Verständnis, dass auf Grundlage des Austauschmodells eine Vorarbeit zur datentechnischen Verarbeitung durchgeführt werden muss. Das Datenaustauschanforderungsmodell ist das Ergebnis der Identifikation und Zuweisung des Datenmodells zu den einzelnen Datenanforderungen und stellt somit den Ausgangspunkt für die weiteren Arbeiten dar. Anhand dessen wird auch geprüft ob die Schnittstelle in der Lage ist die Daten vollständig zu übermitteln, bzw. welche Eigenschaften die Schnittstelle zur Übertragung dieser hat.

Model View Definition

Die Definition einer MVD gliedert sich in mehrere Teilschritte. Aber bevor mit der eigentliche Definition begonnen wird, muss überprüft werden, ob die bestehenden, öffentlich zur Verfügung stehenden MVDs evtl. bereits die benötigte Spezifizierung abdecken. Falls eine MVD existiert, die den Austausch in der untersuchten Schnittstelle abdecken würde, muss entschieden werden, ob diese MVD verwendet, erweitert oder im Zuge einer Spezialisierung weiter konfiguriert wird. Eine MVD wird erweitert, indem eine bestehende MVD als Basis (Base View) fungiert, bspw. könnte die MVD Reference View in der Funktion der Referenzierung durch hinzufügen weiterer Entitäten erweitert werden. Die Spezialisierung einer bestehenden MVD wird ebenfalls mit einer MVD als Basis verwirklicht. Die bestehende MVD wird mittels Konfiguration der Konzeptvorlagen weiter ausgearbeitet und somit für die Schnittstelle spezialisiert. Ist der Fall gegeben, dass keine bestehende MVD verwendet werden kann, muss eine neue MVD erstellt werden. Die Definition einer neuen MVD – basierend auf dem IFC4-Datenmodell – ist die umfangreichste Option und wird im Folgenden weiter erläutert.

Zur Definition der MVD wird das von bSI frei zur Verfügung stehende ifcDOC tool verwendet [BuildingSMART International, 2016e]. Dazu wird das IFC-Schema in der entsprechenden Version geladen. Das Schema stellt die Baseline zur Definition der MVD dar und legt das zu Grunde liegende Format fest. Im ersten Schritt werden allgemeine Informationen erzeugt, indem eine MVD mit einer Austauschforderung eingefügt und benannt wird. Die allgemeinen Information umfassen Daten wie Autor, Besitzer, Version, Copyright, BaseView, Status und für welche Art Schnittstelle die MVD definiert wird. Der Status legt die Phase im Zyklus der Erstellung der MVD fest. Folgende Phasen sind möglich [Hietanen, 2008]:

- ▷ Sample: Erste Definitionen einer Idee für eine MVD, welche als Grundlage für die ersten Ausarbeitungen fungiert;

- ▷ Draft: Erste klare zielorientierte Entwürfe für eine MVD, deren Ziel die Zertifizierung ist;
- ▷ Proposal: Version der MVD, die buildingSMART zum Prüfen vorgelegt wird;
- ▷ Candidate: Untersuchung der MVD durch buildingSMART. Es wird falls notwendig Feedback gegeben;
- ▷ Official: Eine MVD gilt als offizielle MVD, wenn mehr als eine Software-Applikation diese implementiert hat;
- ▷ Deprecated: MVDs erhalten den Status veraltet (engl.: „deprecated“), wenn neuere MVDs diese ersetzen.

Die Art der Schnittstelle legt fest, ob die MVD für den Import, Export oder beides ausgelegt ist. Zudem wird der Prozess mit Sender- und Empfängerrollen gemäß den Spezifikationen der Omniclass Klassifizierungssystemen (Tabellen 31 und 34) spezifiziert [Omniclass, 2017]. Diese allgemeinen Informationen dienen dazu, die MVD entsprechend einzuordnen, so dass der Anwender den Zweck der MVD einfach erfassen kann.

Nachdem die allgemeinen Daten festgelegt sind, kann mit der Definition der Inhalte der MVD begonnen werden. Der MVD werden die aus dem Datenaustauschanforderungsmodell abgeleiteten Entitäten des IFC-Datenmodells hinzugefügt. Der nächste Schritt umfasst die Einbindung der Funktionalitäten in Form von Konzeptvorlagen.

Wird das Konzept für PSets oder QSets eingebunden, muss gleichzeitig festgelegt werden, welche Properties bzw. Quantities für die jeweilige Entität relevant sind. Werden zusätzliche Properties oder Quantities definiert, müssen weitere Schritte unternommen werden. Die Definition von User Defined PSets setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

1. Definition eines Prefix und des Namens zur eindeutigen Identifikation;
2. Zuweisung des PSets zur jeweiligen Entität;
3. Definition der Properties:
 - a) Property dem PSet hinzufügen;
 - b) Eindeutigen Namen vergeben;
 - c) Funktion beschreiben;
 - d) Lese-/ Schreibeberechtigung definieren;
 - e) Property-Typen auswählen:
 - ▷ Single Value: Einzelwertzuweisung;
 - ▷ Bounded Value: Grenzwertzuweisung;

- ▷ List Value: Listenwertzuweisung;
 - ▷ Enumerated Value: Aufzählungswerte;
 - ▷ Table Value: Tabellenwerte;
 - ▷ Reference: Bezugswertzuweisung;
 - ▷ Complex: Komplexer Property.
- f) Definition der Einheit bzw. des Typen des Property als primären Datentyp (*IfcValue*);
- g) Definition des sekundären Datentyps (falls notwendig).
4. Auswahl der PSets mit den relevanten Properties bei der Konfiguration der Konzeptvorlagen „Property Sets for Objects“.

Die Werte der Enumerated Property Typen müssen separat spezifiziert werden, um bei der Definition auf diese zu verweisen. Die Definition der Quantities ist weniger komplex gestaltet; es wird anstelle von mehreren Typen lediglich auf den jeweiligen Quantity Typ verwiesen (*IfcPhysicalQuantity*).

Falls es erforderlich ist die Definition der bestehenden Konzeptvorlagen zur Abbildung von Funktionalitäten zu erweitern, muss darauf geachtet werden, bei welcher Entität die neue Konzeptvorlage ansetzt. Soll die Konzeptvorlage eine allgemeine Anwendung finden, sollte eine Entität gewählt werden, die in der Hierarchie entsprechend die relevanten Entitäten abdeckt (bspw. abstrakte Entitäten). Hingegen kann bei einer Konzeptvorlage, die bspw. speziell für eine Entität entwickelt wird und auch nur an dieser angewendet werden soll, genau diese den Ursprung ausmachen. Zusätzlich können Konditionen (engl. Conditions) und Bedingungen (engl. Constraints) als Parameter der Konfigurationsmöglichkeiten definiert und mit eindeutigen Namen versehen werden.

Falls es notwendig ist, die verwendeten Konzeptvorlagen weiter zu konfigurieren, kann dies durch die Wertevergabe erfolgen. Als Beispiel bietet sich die Konzeptvorlage „Object Typing“ an. Diese Vorlage definiert die Struktur der Typisierung von Entitäten. Bei einer Anwendung dieses Konzepts an einer TGA Komponente soll für die Typisierung dieser auch nur der entsprechende Typ definiert sein. Dies kann bei der Konfiguration der Konzeptvorlage durch Auswahl des Typen festgelegt werden.

Nachdem alle relevanten Entitäten ausgewählt, die geforderten Funktionalitäten durch die Konzeptvorlagen abgebildet und diese ebenfalls konfiguriert sind, müssen die Anforderungen für den Austausch (engl. Exchange Requirements) definiert werden. Die Relevanz der Konzeptvorlage muss für den Ex- bzw. Import der MVD festgelegt werden. Folgende Optionen sind möglich:

- ▷ Mandatory: Verpflichtend;
- ▷ Recommended: Empfohlen;
- ▷ Not relevant: Nicht weiter spezifiziert;

- ▷ Not recommended: Nicht empfohlen;
- ▷ Excluded: Ausgeschlossen.

Dies ist nötig, damit je nach Relevanz bei der Validierung durch die MVD entweder eine Warnung (Mandatory/ Excluded) oder ein Hinweis (Recommended/ Not recommended) wiedergegeben wird. Die MVD kann mit Hilfe verschiedener Exchange Requirements für unterschiedliche Schnittstellen spezialisiert werden.

Abschließend muss eine Dokumentation erzeugt werden, die zusätzliche Informationen zum besseren Verständnis der entwickelten MVD enthält. Es muss nachvollziehbar erläutert werden auf welcher Grundlage die jeweilige Spezifikation der MVD basiert und welches Ziel damit verfolgt wird. Mit der Dokumentation und durch eine enge Zusammenarbeit mit buildingSMART kann die Entwicklung und finale Veröffentlichung der MVD vorangetrieben werden.

3.4 Level of Development

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen von BIM-Anwendungsfällen müssen LODs entsprechend spezialisiert entwickelt werden. Entweder müssen die Ausarbeitungen ohne Grundlage neu erstellt oder bereits definierte LODs können teilweise übernommen werden. Darüber hinaus ist die Definition der LODs von mehreren Faktoren abhängig:

- ▷ Verwendete Softwareapplikation;
- ▷ Modellierungsart;
- ▷ Modellierungszweck.

Verschiedene Softwareapplikationen bauen auf unterschiedlichen Rechenkernen auf, die abhängig von der internen Architektur verschiedene Inputdaten benötigen und ebenfalls die Art der Modellierung beeinflussen. Zudem verlangen die verschiedenen ingenieurtechnischen Methoden im Berechnungsprozess unterschiedliche Daten und Informationen, die ebenfalls vom Ziel abhängen. Aufgrund dessen sollte die Definition der LODs auf generischer und zusätzlich auf der alphanumerischer Ebene stattfinden. Die generischen Definitionen sollten weitestgehend allgemein und unabhängig von den genannten Faktoren angewendet werden können und gemäß der den Prozessen zu Grunde liegenden Normen, Richtlinien und bewährten Vorgehensweisen ausgearbeitet werden. Die parametrischen Definitionen hingegen sind aus den einzelnen Objekten alphanumerisch ableitbar.

Die bisherige Ausarbeitung der für diesen Anwendungsfall relevanten Komponenten bilden die Grundlage bei der Spezifizierung der LODs. Folgende Komponenten müssen dafür in Betracht gezogen werden:

- Prozessdiagramm;
- Datenaustauschanforderungsmodell.

Das Prozessdiagramm in Kombination mit den Datenaustauschanforderungen stellt dar, welche Tätigkeiten wann zu erledigen sind und welche Daten und Informationen für die einzelnen Prozessschritte benötigt werden. Daraus lassen sich als erstes die generischen Definitionen für die LOGs und LOIs ableiten, um im Anschluss mit der alphanumerischen Definition abzuschließen [Gigante-Barrera u. a., 2017]. Tabelle 3.1 zeigt ein Beispiel für derartige Zuordnungen alphanumerischer LODs. In der ersten Spalte werden die relevanten Objekte benannt, die zweite Spalte führt die jeweiligen Parameter auf, die dritte Spalte gibt die Nummerierung des LODs wieder, um abschließend in der letzten Spalten den Hauptverantwortlichen für diesen Parameter zu benennen, den Modellelementautor (MEA).

Tabelle 3.1: Beispiel für eine alphanumerische Zuordnung von in der Schnittstelle definierten Parametern zum jeweiligen LOD und MEA.

Element	Attribut/ Information	LOD	MEA
Thermische Zone	Raum Typ	100	Objektplaner
	Temperaturbereich Heizfall	100	Objektplaner
	...		
Lüftungssystem	Hygieneanforderung	100	TGA-Ingenieur
	...		
Pumpe	Förderhöhe	200	TGA-Ingenieur
	...		
...			

Damit keine Interpretationsspielräume in der Modellierung und Parametrisierung der BIM-Modelle bestehen, werden die generisch definierten LODs weiterentwickelt. Die Daten und Informationen, die in den Schnittstellen zwischen den Arbeitsschritten (dokumentiert durch das Austausch Anforderungsmodell) ausgetauscht werden, repräsentieren LODs auf Parameterebene. Wenn jedes Objekt mit dessen inhärenten Parametern gemäß der LOD-Methode definiert wird, sind mögliche Interpretationsspielräume beseitigt und die Verantwortlichkeiten zur Lieferung von Daten und Informationen sind eindeutig geregelt.

Abbildung 3.6 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Hervorgehoben sind die Objekte und Parameter

des zur Kommunikation verwendeten Datenmodells. Damit die durch die LOD-Methode geplante Kommunikation in der Schnittstelle eindeutig ist, muss die Definition der LODs auf der Granularität der Objekt- und Parameterebene erfolgen. Da die Datenaustauschanforderungen objektorientiert entwickelt sind, fungieren diese als Grundlage zur Definition entsprechend granularer LODs.

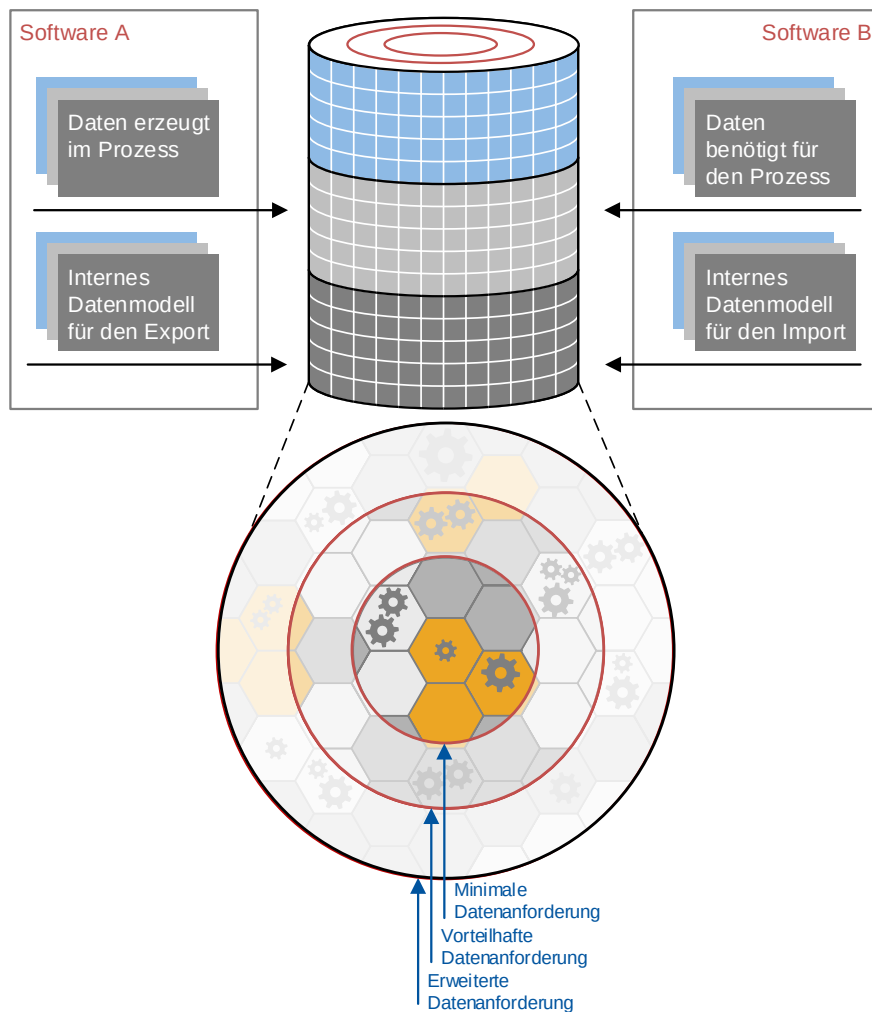


Abbildung 3.6: Veranschaulichung der Definition der minimalen Datenanforderungen und Erweiterung zur Definition der LODs.

Darauf aufbauend müssen die Modellentwicklungsmatrizen für den Anwendungsfall von allen Beteiligten ausgefüllt werden. Dazu werden die Phasen, Lph und/ oder Meilensteine bestimmt, die relevanten Objekte spezifiziert und die Parameter aufgelistet. Grundsätzlich muss beachtet

werden, dass LODs zu Projektbeginn einen hohen Diskussionsbedarf begründen. Die Erstellung der Modellentwicklungsmatrizen wird mit allen Beteiligten diskutiert bis ein Konsens gefunden wird. Die projektspezifische Gestaltung der erwähnten Faktoren macht eine entsprechende Anpassung oder Erweiterung der bestehenden LODs evtl. notwendig.

Damit alle Daten und Informationen verlustfrei verwendet werden können, muss das Beziehungsgefüge der unterschiedlichen Modelle in Form von Transformationen spezifiziert sein. Eine Anleitung für die speziell dafür entwickelten „Mapping Rules“ wird im folgenden Kapitels gegeben.

3.5 Mapping

Wie am Ende von Abschnitt 2.2 beschrieben, müssen die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Programmen derart gestaltet sein, dass die Daten und Informationen verlustfrei und ohne Fehlinterpretation übertragen werden. Damit dies gewährleistet werden kann, müssen die importierten Daten für das native Datenmodell transformiert werden. Etablierte Schnittstellen sind bereits in der Lage gängige Datenformate zu verarbeiten, jedoch wird bei neuen Datenmodellen und -formaten eine zusätzliche Definition der Transformationslogik benötigt. Dazu wurde speziell im EnEff:BIM Forschungsprojekt eine Zuordnungsmethodik entwickelt, die den Anwender in die Lage versetzt die Transformation datentechnisch umzusetzen. Es wurde dafür das Beziehungsgefüge der einzelnen Modelle untereinander analysiert und mit einer individuellen Transformationslogik spezifiziert. Diese Logik wird mit sogenannten „Mapping Rules“, mit dazugehörigen Schema implementiert und in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.5.1 Mapping Rules

Die Datenübertragung zwischen unterschiedlichen Datenmodellen wird innerhalb einer Software-schnittstelle verwirklicht. Einerseits bieten verschiedene Datenmodelle ein umfangreich ausformuliertes und vergleichsweise statisches Datenmodell, andererseits benötigen die verschiedenen, ständig in Umbruch befindlichen Softwarebibliotheken eine flexible Datengrundlage, wodurch die Schnittstelle beeinflusst wird. Zum Zweck der Definition dieses Beziehungsgefüges müssen die Daten und Informationen transformiert werden: Die Informationen vom Ursprungsdatenmodell werden derart umgeformt, dass diese im Zieldatenmodell verwendet werden können. Die für die Transformation zu definierenden Algorithmen werden auch „Mapping Rules“ genannt und beziehen sich auf die jeweiligen Objekte und Parameter der jeweiligen Datenmodelle [Wimmer u. a., 2015a, 2014]. Dabei werden diese miteinander verglichen und untersucht inwiefern eine Übertragen der Daten möglich ist.

Abbildung 3.7 veranschaulicht die Systematik von Mapping Rules. Zu erkennen sind zwei verschiedene Datenmodelle (A und B) und eine Zweiteilung zwischen der Objektebene (bspw. Heizkessel, Pumpen, Wände, etc.) und der Parameterebene (bspw. Länge, Effizienz, Rauigkeit, etc.). Die Objekte stellen bspw. Komponenten der Domäne TGA oder Architektur dar. Die Begriffe Objekt und Komponente können in diesem Zusammenhang synonym verwendet werden. Die Parameter sind als Element einzelner Teilmengen (in diesem Fall Objekte) der Gesamtmengen (die Datenmodelle A und B) zu verstehen. Die in der Abbildung dargestellten Hexagone stellen Objekte dar und die Zahnräder repräsentieren deren Parameter. Im Folgenden wird zunächst die Objektebene beschrieben, um danach auf die Parameterebene einzugehen.

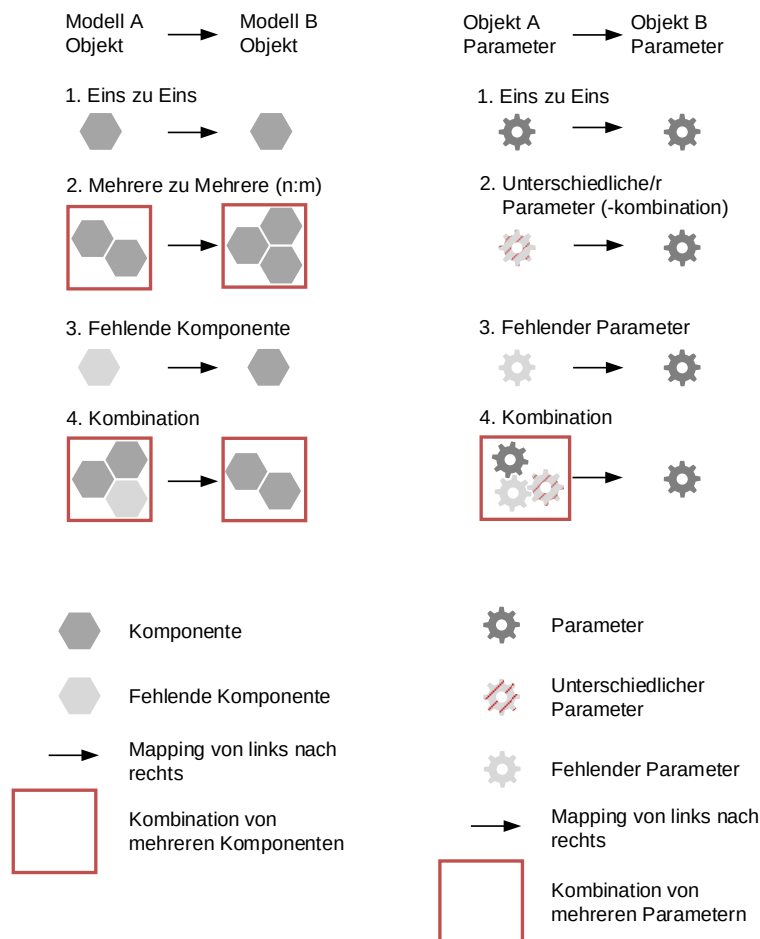


Abbildung 3.7: Mapping Rules [Wimmer u. a., 2015a, 2014].

Die erste Regel „Eins zu Eins“ findet Anwendung wenn die Komponenten der beiden Datenmodelle

identisch definiert sind. Die zweite Regel „Mehrere-zu-Mehrere (n:m)“ wird bei einer Kombination von mehreren Komponenten auf der einen Seite der Schnittstelle zu einer oder mehreren Komponente(n) auf der anderen Seite angewendet. Die dritte Regel erweitert den Datenfluss von Datenmodell A zu Datenmodell B, da das Datenmodell A nicht das benötigte Objekt beinhaltet und die fehlenden Informationen hinzugefügt werden muss. Die letzte Regel stellt eine Kombination der bereits beschriebenen Regeln dar.

Auf der Parameterebene sind verschiedene Mapping Rules vergleichsweise identisch, beziehen sich jedoch auf die Parameter. So gelten die Regeln Eins, Drei und Vier ebenfalls für die Parameter. Die Regel zur Kombination von mehreren Parametern unterscheidet sich von der Regel auf der Objektebene. Die Kombination von mehreren Parametern ist nur in Verbindung mit einer Transformation dieser möglich. Damit diese Information übertragen werden kann, müssen entsprechende Transformationsalgorithmen zur Überführung der Daten und Informationen formuliert werden.

Im Folgenden werden die Mapping Rules mit Hilfe der Mengenlehre eindeutig definiert [Pahl u. Damrath, 2000].

U stellt die Universalmenge der unterschiedlichen Datenmodelle innerhalb einer Schnittstelle dar. Die Schnittstelle erfüllt die Funktion der Verbindung zweier unterschiedlicher Datenmodelle – Datenmodell A und Datenmodell B (3.8).

Menge A repräsentiert eine Untermenge der Universalmenge U (3.1), worin unterschiedliche gebäudetechnische Objekte mit deren Parametern vorhanden sind (3.2),

$$A \subset U \quad (3.1)$$

$$A = A_1, A_2, \dots, A_n. \quad (3.2)$$

Menge A_e stellt die notwendige Erweiterung der Datenmenge A dar, um alle relevanten Daten für Zieldatenmodell B zu repräsentieren (3.3 + 3.4),

$$A \cup A_e \subseteq B \quad (3.3)$$

$$A_e = A_{n+1}, \dots \quad (3.4)$$

$A_i (i = 1 \dots n)$ stellt eine Untermenge von A dar und beinhaltet die relevanten Objekte und Parameter für Untermenge B_i (3.5 + 3.6),

$$A_i = z_1, z_2, \dots, z_m \quad (3.5)$$

$$A_i \subset A. \quad (3.6)$$

B_L ist eine Untermenge von U . B_L kann bspw. eine Bibliothek in der Schnittstelle zwischen dem IFC-

Datenmodell (siehe Abschnitt 2.3) und der Simulationsumgebung darstellen. In diesem Fall wäre der Index L ein Platzhalter für die Bezeichnung der unterschiedlichen Bibliotheken (3.7),

$$B_L = B_1, B_2, \dots, B_n \quad (3.7)$$

$$A \cup B_L \cup A_e = U. \quad (3.8)$$

$B_i (i = 1 \dots n)$ ist eine Untermenge von B_L , mit der Mengen von Objekten und Parametern repräsentiert werden (3.9 + 3.10),

$$B_i = z_1, z_2, \dots, z_m \quad (3.9)$$

$$B_i \subset B_L. \quad (3.10)$$

$z_i (i = 1 \dots m)$: Das Element z ist Teil der Menge U und repräsentiert einen einzelnen Parameter. Damit die Komplexität und somit der Transfer der Daten zwischen den beiden Datenmodellen gering und dadurch effizient gehalten wird, muss der Datenfluss minimal sein (3.11),

$$|A_i| \rightarrow \min. \quad (3.11)$$

Nach dieser Einleitung der mathematischen Umgebung des Beziehungsgefüges wird im Folgenden auf die eigentlichen Mapping Rules eingegangen. Im ersten Teil werden die Regeln für die Objektebene erläutert, woraufhin der zweite Teil der Parameterebene gewidmet wird.

Objekt Mapping

▷ Eins-zu-Eins:

Eine Überschneidung der Datenmodelle B_L und A (3.12) und deren identischen Untermengen, bezogen auf identische Objekte (3.13),

$$B_L \cap A \quad (3.12)$$

$$B_i = A_i. \quad (3.13)$$

▷ Mehrere-zu-Mehrere ($n:m$):

Mehrere Untermengen und somit Objekte von A_i stellen die benötigten Daten für ein einziges Objekt B_i dar und vice versa (3.14 + 3.15),

$$A \supseteq (A_1 \cup \dots \cup A_n) = B_i \subseteq B_L \quad (3.14)$$

$$A \supseteq A_i = (B_i \cup \dots \cup B_n) \subseteq B_L. \quad (3.15)$$

▷ *Fehlende Komponente:*

Das benötigte Objekt ist nicht in der Menge A definiert (3.16) und diese muss entsprechend erweitert werden (3.17). Die zusätzlichen Informationen werden für die Zuordnungen ins Datenmodell A manuell zurückgeschrieben, dadurch entspricht diese Zuordnung einer „Eins-zu-Eins“ Regel,

$$A \cap B_i = \emptyset \quad (3.16)$$

$$|B_i \cap (A \cup A_e)| > 0. \quad (3.17)$$

▷ *Kombination:*

Kombination der definierten Regeln.

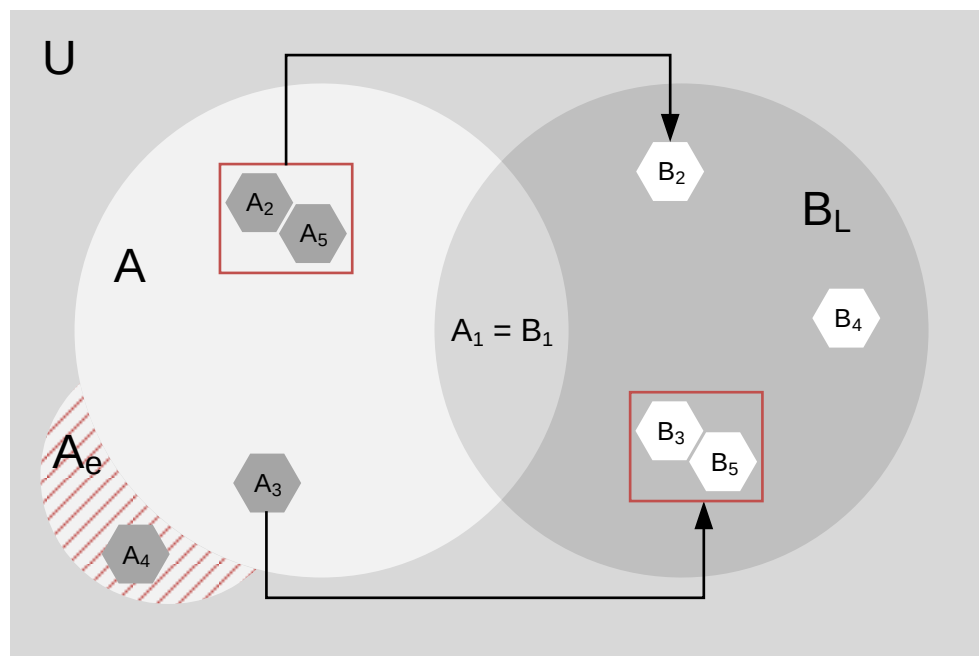


Abbildung 3.8: Beispielhafte Darstellung der Mapping Rules auf der Objektebene in einem Venn-Diagramm [Wimmer u. a., 2015a].

Abbildung 3.8 zeigt ein Venn-Diagramm, das die Anwendung der Mapping Rules auf der Objektebene veranschaulicht. Dargestellt sind mehrere Datenmengen, die universelle Menge U und die dazu gehörigen Untermengen A , B_L und A_e mit den jeweiligen Objekten in Form von Hexagonen. Die Untermengen A_1 und B_1 repräsentieren die „Eins-zu-Eins-Regel“. Die Regel „Mehrere-zu-Mehrere (n:m)“ ist veranschaulicht durch die Kombination von A_2 , A_5 und B_2 bzw. durch A_3 und B_3 , B_5 . A_4

stellt eine Erweiterung der Menge A dar, die das Ziel verfolgt auf B_4 zu mappen. Nachdem Objekt A_4 dem Datenmodell hinzugefügt wurde, wird es entsprechend der „Eins-zu-Eins-Regel“ übertragen.

Parameter Mapping

▷ *Eins-zu-Eins:*

Schnittmenge der beiden Untermengen A_i und B_i (3.18) mit identisch definierten Parametern (3.19),

$$B_i \cap A_i \quad (3.18)$$

$$B_i = z_1, \dots, z_m = A_i. \quad (3.19)$$

▷ *Unterschiedliche/ r Parameter (-kombination):*

Diese Regel beinhaltet eine Transformation von Parametern. Eine Transformation bedarf multipler Schritte, die im Folgenden genauer spezifiziert werden. Streng genommen stellt diese Regel das Fehlen eines Parameters dar, da dieser Parameter im Vergleich zur Zieldefinition in der Ursprungsmenge A_i keinen identisch definierten Parameter aufweist. In diesem Fall existiert ein Parameter, der der Zieldefinition ähnelt und dementsprechend transformiert werden muss. Durch die Transformation werden die Informationen für das Zieldatenmodell verwertbar verändert, jedoch so, dass sie dem Sinn der ursprünglichen Funktion weiterhin entsprechen.

Für diesen Zweck wird eine neue Untermenge mit der Bezeichnung σ gebildet. Die Untermenge σ repräsentiert die Parameter, die der Definition der Parameter in der Menge B_i ähneln (3.20),

$$\sigma \sim B_i. \quad (3.20)$$

Damit die beiden Mengen (3.20) eine identische Schnittmenge bilden, muss σ entsprechend transformiert werden. Die parameterspezifische Transformation wird durch einen individuell definierten Algorithmus vorgenommen (3.21),

$$f : \sigma \rightarrow B_i. \quad (3.21)$$

Um mehrere Parameter zu kombinieren und dem Zielparameter zuzuordnen, müssen ebenfalls parameterspezifische Algorithmen definiert werden (3.22 + 3.23),

$$f(\sigma_i = z_1, \dots, z_m) = B_i = z_1 \quad (3.22)$$

$$f(\sigma_i = z_i) = B_i = z_1, \dots, z_m. \quad (3.23)$$

➤ *Fehlender Parameter:*

Das Datenmodell A enthält nicht den geforderten Parameter (3.16), wodurch eine manuelle Erweiterung erforderlich wird (3.17). Der fehlende Parameter wird in das Erweiterungsmodell A_e ergänzt. Diese Erweiterung wird für weitere Zuordnungsprozesse ins Datenmodell A manuell zurückgeschrieben. Bezogen auf eine Modellinstanz kann der Parameter direkt in den Mapping Rules ergänzt werden, wodurch abermals die „Eins-zu-Eins“-Regel Anwendung findet.

➤ *Kombination:*

Kombination der definierten Regeln.

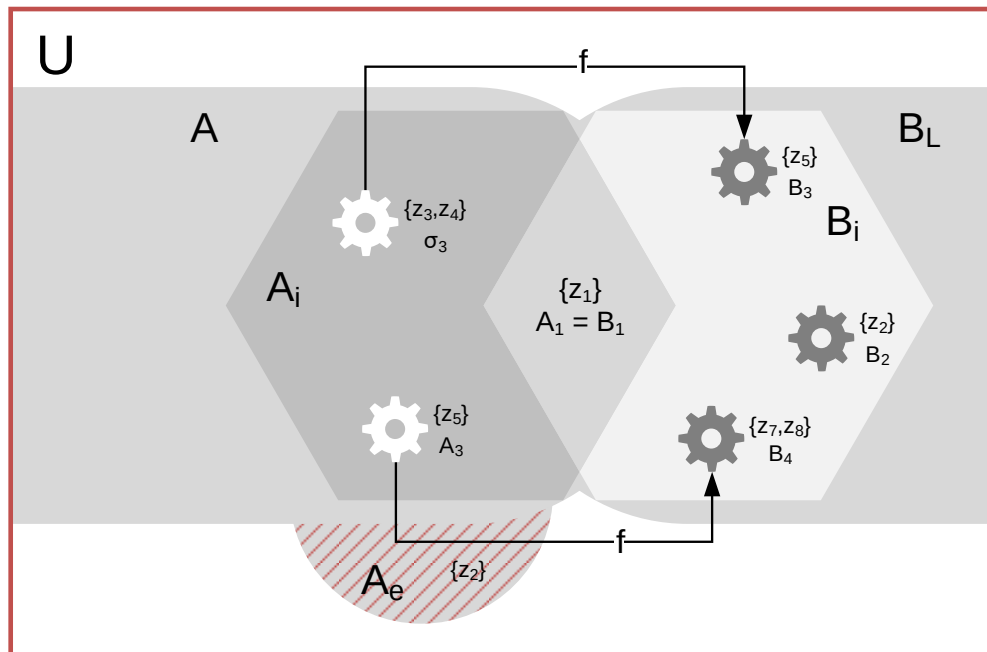


Abbildung 3.9: Beispielhafte Darstellung der Mapping Rules auf der Parameterebene in einem Venn-Diagramm (Wimmer u. a. [2015a]).

In Abbildung 3.9 wird in einem Venn-Diagramm die Zuordnung auf Parameterebene dargestellt. A_1 und B_1 visualisieren Regel Nummer Eins: identische Parameter werden in der Schnittmenge vereint und Eins-zu-Eins zugeordnet. B_2 stellt den fehlenden Parameter z_2 dar, der im Erweiterungsmodell A_e dem Datenmodell A_i hinzugefügt wird. σ_3 zeigt die Zuordnung von mehreren Parametern durch den zu definierenden Algorithmus f zu einem Parameter $B_3 = z_5$. B_4 verdeutlicht die Zuordnung von einem Parameter $A_3 = z_5$ zu mehreren Parametern $B_4 = z_7, z_8$.

3.5.2 Mapping Schema

Zur Formulierung der Mapping Rules eignet sich das offene Format XML, wozu speziell die XML Schema Definition (kurz: XSD) verwendet wurde [W3C, 2012]. Abbildung 3.10 zeigt die Inhalte der obersten Ebene des Schemas. Geboten sind die erzeugten Mapping Klassen zur Definition der Mapping Rules. Die einzelnen Elemente zur Formulierung der Mapping Rules werden im Folgenden erläutert.

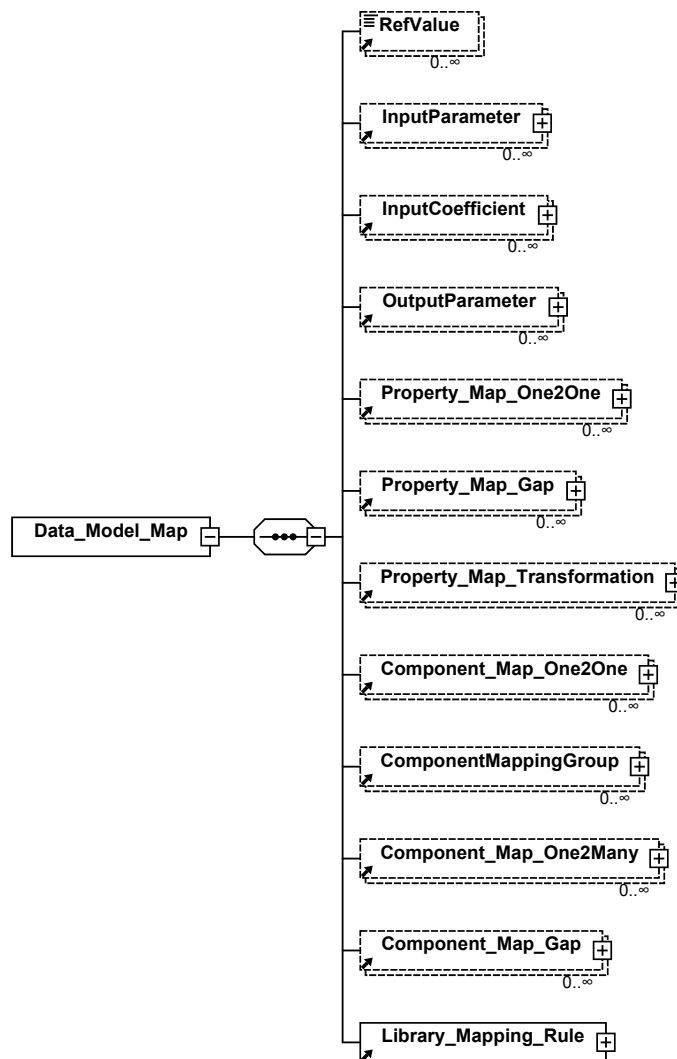


Abbildung 3.10: Oberste Ebene des Mapping XSD Schemas, dargestellt in der logischen Sichtweise.

Zunächst werden die eigentlichen Definitionen der Eingabe- bzw. Ausgabe-Parameter/ Koeffizienten

aufgeführt:

- ▷ *RefValue*: Kennung jedes einzelnen Tags in der instanziierten XML.
- ▷ *InputParameter*: Mapping des Inputparameters, inklusive nachvollziehbarer Definition. Name, Adresse, Typ, sowie Bereichsgrenzen (falls relevant) werden definiert.
- ▷ *InputCoefficient*: Entspricht dem *InputParameter*, jedoch ist dieser Tag speziell für die Koeffizienten einer Formel vorgesehen.
- ▷ *OutputParameter*: Dient der Ergebnisdarstellung der Mapping Rules auf der Parameterebene. Elemente wie Beschreibung, Bezeichnung und Typ sind Bestandteil.

Weiterhin wird nun die in Abbildung 3.10 ersichtliche Definition der Mapping Rules im XSD Schema für die Parameterebene erläutert. Für jede Mapping Rule auf der Parameterebene ist zusätzlich speziell der Bezug zum jeweils instanziierten Objekt gegeben:

- ▷ *Property_Map_One2One*: Dieser Tag ist reserviert für die erste Mapping Rule. Beschrieben wird das Mapping der identischen Parameter. Es wird jeweils auf die Adressen oder Verweise der Parameter verwiesen und ggf. werden Standardwerte definiert.
- ▷ *Property_Map_Gap*: Fehlende Parameter werden in diesem Tag definiert. Formuliert wird ein Wert, die Bezeichnung, die Adresse des Zielparameters und der Typ.
- ▷ *Property_Map_Transformation*: Die oben definierten Eingabe- und Ausgabe-Parameter/ Koeffizienten werden für die Definition des Transformationsalgorithmus verwendet. Darüber hinaus wird der eigentliche Algorithmus für die Transformation in diesem Tag festgelegt.

Zusätzlich wird die Formulierung der Mapping Rules auf der Objektebene im Schema aufgenommen. Jeder Tag der Objektebene enthält entsprechend der vorherigen Ausführungen gleichzeitig den Verweis auf die möglichen Mapping Rules der Parameterebene:

- ▷ *Component_Map_One2One*: Beschreibung der Adressen des Ursprungsobjekts und des Zielobjekts.
- ▷ *ComponentMappingGroup*: Verweise für die Zuordnung von mehreren Objekten zu mehreren Objekten (m:n).
- ▷ *Component_Map_One2Many*: Spezialisierter Tag zur Definition der Zuordnung von einer einzelnen Komponente zu mehreren Komponenten. Verweis auf das Ursprungsobjekt und auf die *ComponentMappingGroup*.
- ▷ *Component_Map_Gap*: Definition von neuen Objekten innerhalb des Ursprungsdatenmodells. Definition des Namens, Beschreibung und der Adresse.

Der letzte Tag im Schema (*Library_Mapping_Rule*) verweist auf die bezogenen Datenmodelle. Hier werden eindeutige Bezeichnungen der Datenmodelle und/ oder der Zielbibliotheken festgelegt.

Die Codezeilen 3.1 und 3.2 zeigen exemplarisch die Mapping Rules aus einer XML-Datei. Die Tags der einzelnen Elemente geben Aufschluss darüber, um welche Art Mapping es sich handelt. Ersichtlich ist, dass mehrere Informationen für die einzelnen Mapping Rules benötigt werden um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten. Codezeilen 3.1 zeigen das Mapping auf der Parameterebene. Die erste Mapping Rule, das Eins-zu-Eins Mapping (3.18 + 3.19), ist im Element mit dem Tag „Property_Map_One2one“ dargestellt. Fehlende Parameter (3.16) werden durch das Element „Property_Map_Gap“ ergänzt (3.17). Das Element mit dem Tag „Property_Map_Transformation“ repräsentiert die Transformationsregel (3.22 + 3.23) und benötigt Input Parameter („InputParameter“) und Koeffizienten („InputCoefficient“) (3.5 + 3.4), um den Output („OutputParameter“) zu generieren (3.9). Codezeilen 3.2 zeigen das Mapping auf der Objektebene. Das Mapping von identischen Objekten wird mit dem Element „Component_Map_One2one“ (3.18 + 3.19) und die Kombination von mehreren Objekten wird durch das Element „ComponentMappingGroup“ bewerkstelligt (3.14 + 3.15). Das Element „Library_Mapping_Rule“ fasst alle Elemente zusammen, die für die Transformation der anvisierten Bibliothek benötigt werden.

Werden zur Bedienung der Schnittstellen unterschiedliche Datenmodelle miteinander kombiniert, müssen die jeweiligen Daten und Informationen zugeordnet werden. Die Verwendung der Mapping Rules zur Definition des Beziehungsgefüges zwischen unterschiedlich definierten Datenmodellen basiert auf eigens dafür entwickelten Flussdiagrammen [Wetter u. van Treeck, 2017]. Die Entscheidungsfindung welche Mapping Rule auf der Objekt- und Parameterebene Anwendung findet, beginnt mit der Analyse der betrachteten Objekte. Anhand der Objekte wird eine Vorauswahl getroffen, die für die Transformation in der anvisierten Schnittstelle relevant ist.

```
<Property_Map_Gap RefId="ID0112">
  <Description>Initialization: temperature inside the CV in K</Description>
  <TargetPropertyName>T</TargetPropertyName>
  <TargetLocation>volume</TargetLocation>
  <DefaultValue>328.15</DefaultValue>
</Property_Map_Gap>
...
<Property_Map_One2one RefId="ID061">
  <Description>Pipe inside diameter [m]</Description>
  <RefValue>SimFlowSeg_PipesideDiam</RefValue>
  <TargetPropertyName>D</TargetPropertyName>
</Property_Map_One2one>
...
<InputParameter RefId="ID01141">
  <Description>Part load ratio</Description>
  <ParameterName>plr</ParameterName>
  <ValueType>range</ValueType>
  <IsReferenced>false</IsReferenced>
  <LowerBoundRef>SimFlowPlant_MinPartLoadRatio</LowerBoundRef>
  <UpperBoundRef>SimFlowPlant_MaxPartLoadRatio</UpperBoundRef>
</InputParameter>
...
<InputCoefficient RefId="ID01142">
  <Description>Coefficient a0</Description>
  <CoefficientName>a0</CoefficientName>
  <IsReferenced>true</IsReferenced>
  <RefValue>SimFlowPlant_NrmlizedBoilerEffCurveName
    SimPerformanceCurve_Mathematical_Quadratic SimPerfCurve_Coeff1Constant</RefValue>
</InputCoefficient>
...
<OutputParameter RefId="ID01145">
  <Description>Output values of the boiler efficiency curve</Description>
  <ParameterName>boilerEfficiency</ParameterName>
  <ValueType>matrix</ValueType>
  <ValueFormat>plr bec</ValueFormat>
</OutputParameter>
...
<Property_Map_Transformation RefId="ID0114">
  <Description>Boiler efficiency curve defintion</Description>
  <InputParameterName>ID01141</InputParameterName>
  <InputCoefficientName>ID01142</InputCoefficientName>
  <InputCoefficientName>ID01143</InputCoefficientName>
  <InputCoefficientName>ID01144</InputCoefficientName>
  <Function>bec = a0 + ( a1 * plr ) + ( a2 * plr * plr )</Function>
  <OutputParameterName>ID01145</OutputParameterName>
  <RecordInstance>boilerEfficiencyB</RecordInstance>
  <RecordLocation>AixLib.DataBase.Boiler.BoilerEfficiencyBaseDataDefinition</
    RecordLocation>
</Property_Map_Transformation>
```

Code 3.1: Exemplarische Definition von Mapping Rules auf der Parameterebene.

```

<Component_Map_One2one RefId="ID06">
  <Description>map a water pipe into AixLib</Description>
  <SourceComponentName>SimFlowSegment_Pipe_Indoor</SourceComponentName>
  <TargetComponentName>pipe_HeatTransfer</TargetComponentName>
  <TargetLocation>AixLib.HVAC.Pipes.Pipe</TargetLocation>
  <Property_Map_One2one_Name>ID061</Property_Map_One2one_Name>
  <Property_Map_One2one_Name>ID063</Property_Map_One2one_Name>
  <Property_Map_Gap_Name>ID062</Property_Map_Gap_Name>
  <Property_Map_Gap_Name>ID064</Property_Map_Gap_Name>
</Component_Map_One2one>
...
<ComponentMappingGroup RefId="ID011">
  <Description>Hot water boiler mapping</Description>
  <TargetComponentName>boiler</TargetComponentName>
  <TargetLocation>AixLib.HVAC.HeatGeneration.Boiler</TargetLocation>
  <Property_Map_One2one_Name>ID0111</Property_Map_One2one_Name>
  <Property_Map_Gap_Name>ID0112</Property_Map_Gap_Name>
  <Property_Map_Gap_Name>ID0113</Property_Map_Gap_Name>
  <Property_Map_Gap_Name>ID0114T</Property_Map_Gap_Name>
  <Property_Map_Transformation_Name>ID0114</Property_Map_Transformation_Name>
</ComponentMappingGroup>
...
<Component_Map_Gap RefId="ID04">
  <Description> Add an expansion vessel connecting to the radiator</Description>
  <TargetComponentName>boundary_p</TargetComponentName>
  <TargetLocation>AixLib.HVAC.Sources.Boundary_p</TargetLocation>
  <Property_Map_Gap_Name>ID041</Property_Map_Gap_Name>
</Component_Map_Gap>
...
<Library_Mapping_Rule>
  <Description>XML mapping rule instance between SimModel and AixLib</Description>
  <TargetLibraryName>AixLib</TargetLibraryName>
  <Component_Map_One2one_Name>ID02</Component_Map_One2one_Name>
  <Component_Map_One2Many_Name>ID01</Component_Map_One2Many_Name>
  <Component_Map_One2Many_Name>ID03</Component_Map_One2Many_Name>
  <Component_Map_Gap_Name>ID04</Component_Map_Gap_Name>
  <Component_Map_Gap_Name>ID05T</Component_Map_Gap_Name>
  <Component_Map_Gap_Name>ID06T</Component_Map_Gap_Name>
</Library_Mapping_Rule>

```

Code 3.2: Exemplarische Definition von Mapping Rules auf der Objektebene.

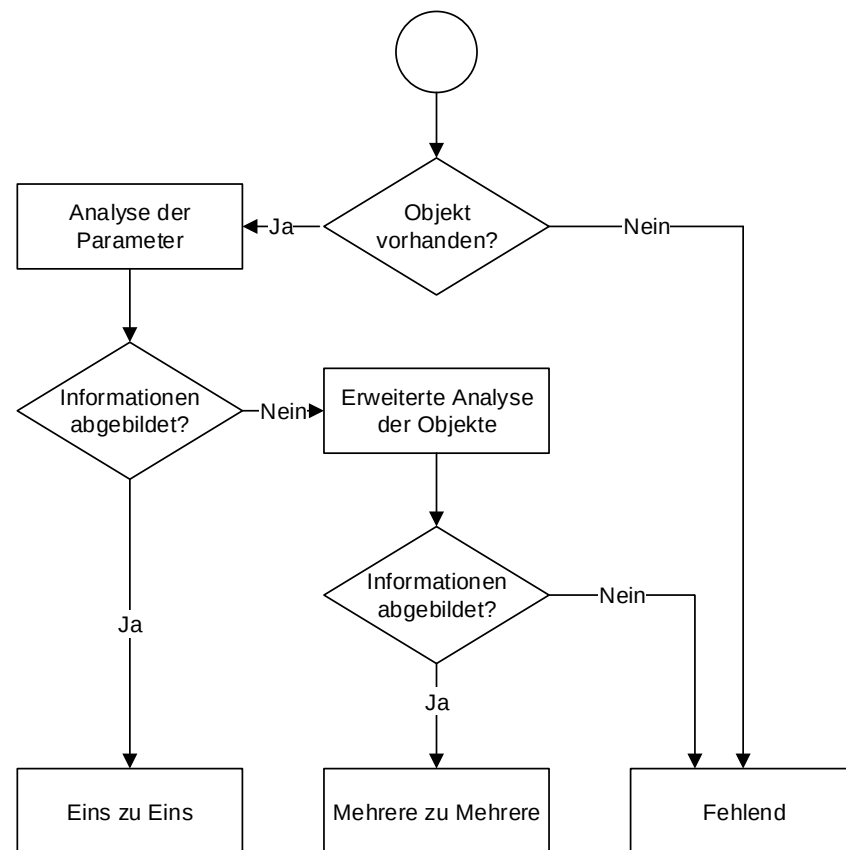


Abbildung 3.11: Flussdiagramm für das Objekt Mapping [Wetter u. van Treeck, 2017].

Abbildung 3.11 zeigt den Entscheidungsprozess für die Objektebene in Form eines Flussdiagramms. Durch eine Untersuchung der jeweiligen Objekte wird zunächst festgestellt ob die relevanten Objekte vorhanden sind. Falls diese fehlen muss die entsprechende Mapping Rule „fehlende Komponente“ (3.16) angewendet werden. Bei Vorhandensein werden die inhärenten Parameter weiter untersucht um herauszufinden ob alle notwendigen Daten und Informationen abbildbar sind. Ist dies der Fall, wird Mapping Rule „Eins-zu-Eins“ (3.12) angewendet. Falls weitere Objekte zur Abbildung der gewünschten Daten und Informationen eingebunden werden, muss die Mapping Rule „Mehrere-zu-Mehrere (n:m)“ (3.14 + 3.15) angewendet werden. Werden die minimalen Datenanforderungen mit der Integration von mehreren Objekten nicht erfüllt, wird zusätzlich die Mapping Rule für die fehlende Komponente angewendet.

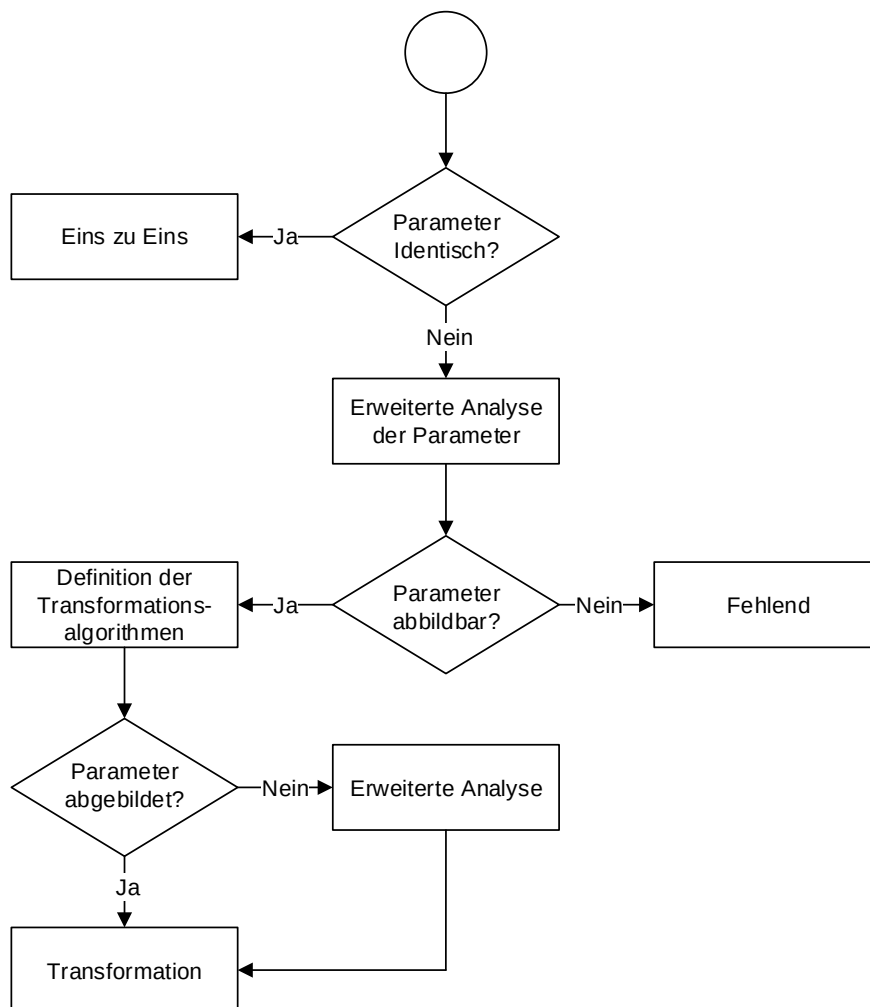


Abbildung 3.12: Flussdiagramm für das Parameter Mapping [Wetter u. van Treeck, 2017].

Abbildung 3.12 stellt das Flussdiagramm für das anschließende Mapping auf der Parameterebene dar. Begonnen wird mit einer detaillierten Untersuchung der potentiellen Parameter. Sind die relevanten Daten auf beiden Seiten identisch abgebildet, wird Mapping Rule „Eins-zu-Eins“ (3.19) angewendet. Ist dies nicht der Fall und es müssen mehrere Parameter kombiniert werden, dann muss die Mapping Rule für die Parameterkombination (3.22 + 3.23) angewendet werden. Dies wird ebenfalls für die Transformation bei ähnlich definierten Parametern angewendet. Die Definition der Transformationsalgorithmen ist von den spezifischen Parametern abhängig und wird individuell ausgearbeitet.

Grundsätzlich gilt, dass die minimalen Datenanforderungen in der jeweiligen Schnittstelle erfüllt sein müssen. Die Verwaltung und Transformation überschüssiger Daten ist nicht sinnvoll und würde die Prozesse unnötig komplex gestalten (siehe Abbildung 2.11).

3.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde komponentenweise die Entwicklung eines BIM-Anwendungsfalls beschrieben. Der BIM-Anwendungsfall wird mit der harmonisierten IDM- und MVD-Methode entwickelt. Zentrale Aufgabe ist es, den Informationsfluss zur Erreichung des BIM-Ziels zu identifizieren und zu definieren. Mit der IDM wird das Problem der koordinierten Erstellung von Daten und Informationen aufgegriffen. Bereits bei der Ausarbeitung des Anwendungsfalls werden alle Beteiligten dazu aufgefordert gemeinsam die Zusammenarbeit zu koordinieren und zielorientiert zu planen. Zusätzlich werden die Schnittstellen identifiziert sowie die zu generierenden Daten und Informationen strukturiert. Diese Strukturierung erlaubt die Definition der LODs, so dass die Zusammenarbeit ermöglicht wird. Auf der technologischen Ebene erlaubt die MVD die Dokumentation der Schnittstellen und die Validierung entsprechender Modelle. Die Dokumentation ermöglicht die Definition maßgeschneiderter Schnittstellen.

Durch die Ausarbeitung und detaillierte Erläuterung der einzelnen Schritte der harmonisierten IDM- und MVD-Methode wurde dem Anwender eine ausreichende Grundlage zur Entwicklung eines BIM-Anwendungsfalls geboten. Zusätzlich wurden Anleitungen zur Ausarbeitung der für die Kollaboration notwendigen LODs aufgeführt, um darüber hinaus ebenfalls optional das Beziehungsgefüge gemäß den Flussdiagrammen (Abbildungen 3.11 und 3.12) für die Mapping Rules zu spezifizieren.

Die Entwicklung des BIM-Anwendungsfalls wird nochmal übersichtlich in einem weiteren Flussdiagramm (aufgeteilt in die beiden Abbildungen 3.13 und 3.14) dargestellt; dabei werden die wichtigsten Schritte hervorgehoben. Das Flussdiagramm dient dem Entwicklerteam des BIM-Anwendungsfalls als Grundlage und wird durch die Angaben in dieser Arbeit detailliert erläutert.

Es existieren verschiedene Schritte, dargestellt durch Kreise und graue Boxen, sowie Entscheidungspunkte, dargestellt durch Rauten. Bei der Entwicklung des Anwendungsfalls sind insgesamt vier Entscheidungen zu treffen. Dabei muss zielorientiert entschieden werden, welche Komponenten relevant für die Ausarbeitung des Anwendungsfalls sind. Der erste Entscheidungspunkt bezieht sich auf die Randbedingungen. Sind die Randbedingungen ungünstig, muss entschieden werden ob neu evaluiert wird (hellblauer Pfad) oder ob die Randbedingungen zur Ausarbeitung eines Anwendungsfalls unrealistisch sind (siehe Kapitel 3.2). Falls die Randbedingungen zur Ausarbeitung des Anwendungsfalls günstig sind (dunkelblauer Pfad), müssen die Art und der Kontext der IDM entschieden werden. Diese Option wird detailliert in Abbildung 3.2 beschrieben. Ist das Ziel die Interaktion der beteiligten

Akteure in einem Anwendungsfall festzuhalten (gelber Pfad), werden vier weitere Schritte durchlaufen (siehe Kapitel 3.3.1). Liegt jedoch der Fokus darauf die Geschäftsprozesse festzulegen (orangener Pfad), werden im nächsten Schritt das Prozessdiagramm, die Datenaustauschanforderungen und das Datenaustauschanforderungsmodell spezifiziert (siehe hierzu Kapitel 3.3.1 bis Kapitel 3.3.2). Nachdem das Datenaustauschanforderungsmodell definiert wurde, muss geprüft werden, ob die verwendete Schnittstelle bereits die notwendigen Daten übertragen kann oder ob eine neue MVD entwickelt werden muss (dunkelroter Pfad und siehe hierzu Kapitel 3.3.2). Damit die praktische Handhabung der Modellentwicklung gewährleistet werden kann, müssen basierend auf den bisherigen Definitionen die LODs erstellt werden (siehe Kapitel 3.4). Falls zusätzlich unterschiedliche Datenformate in der Schnittstelle verbunden werden, muss als letzter Schritt der Zuordnungsprozess entwickelt werden, damit die Daten und Informationen ohne Verluste kommuniziert werden können (siehe Kapitel 3.5).

Dieses Kapitel bietet eine vollständige Definition von BIM-Anwendungsfällen und wird im folgenden Kapitel anhand von einem Anwendungsbeispiel anwendungsbezogen erläutert.

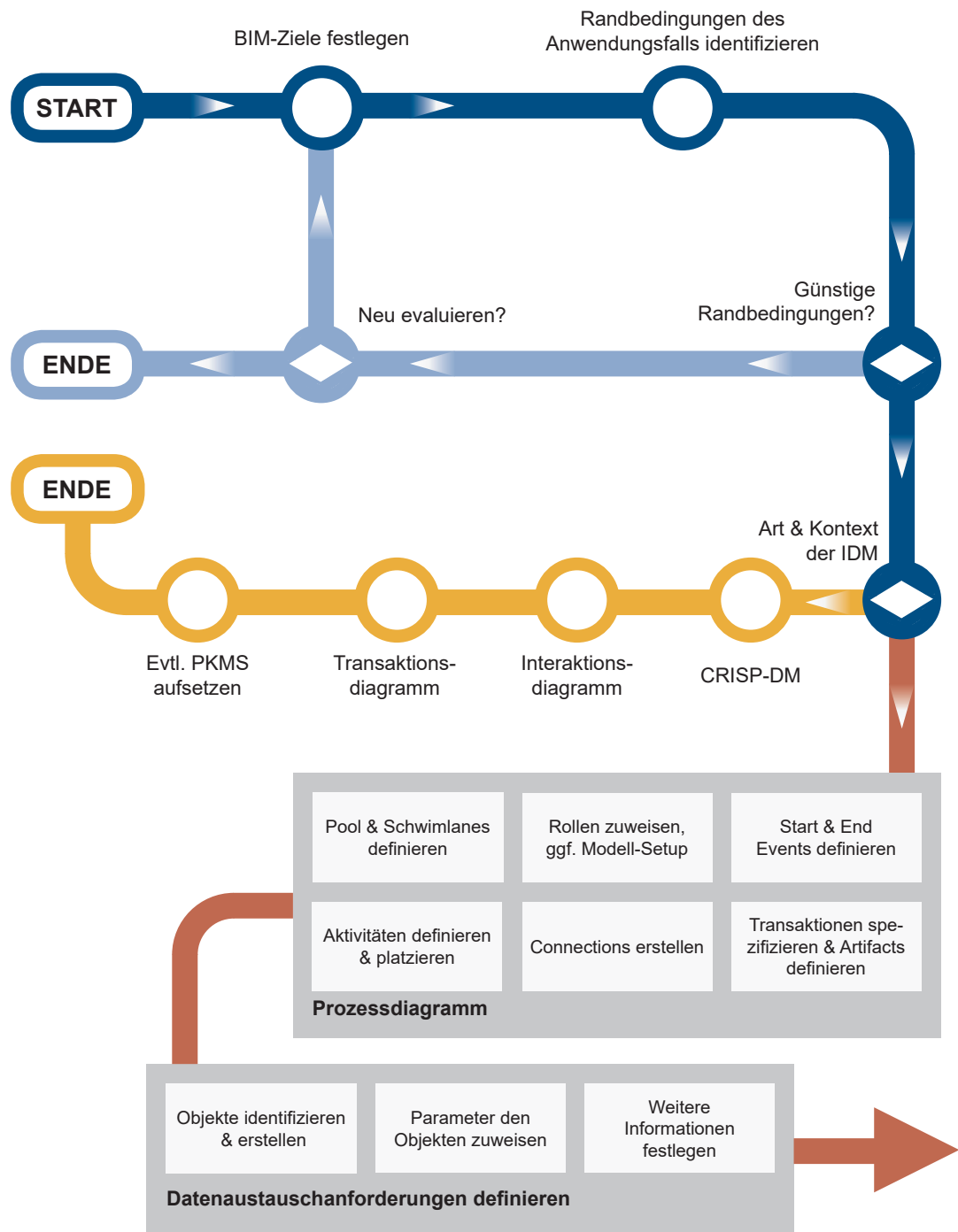


Abbildung 3.13: Flussdiagramm zur Entwicklung des BIM-Anwendungsfalls, Teil 1.

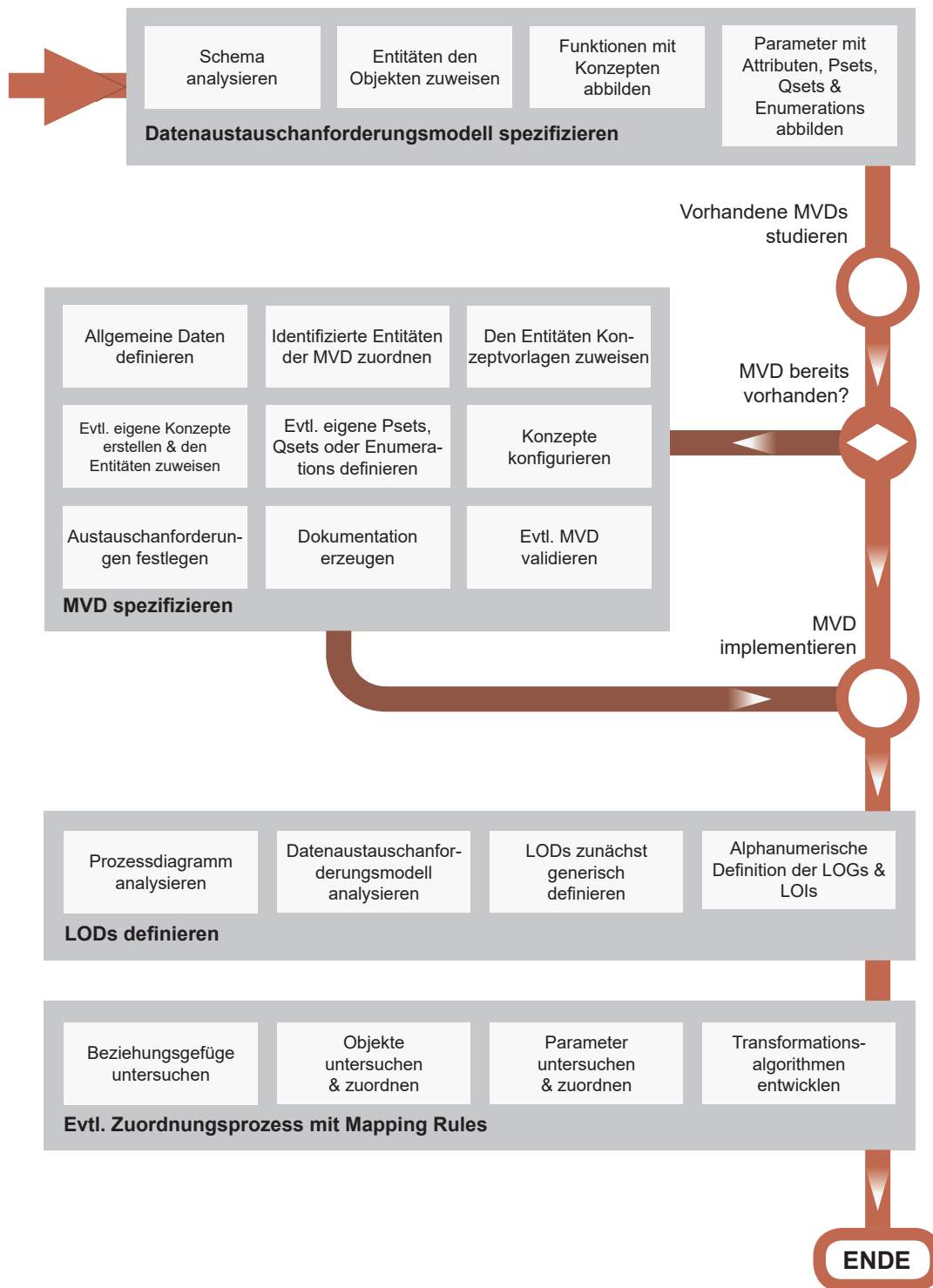


Abbildung 3.14: Flussdiagramm zur Entwicklung des BIM-Anwendungsfalls, Teil 2.

4 Erstellung des BIM-Anwendungsfalls

Dieses Kapitel zeigt die Entwicklung eines BIM-Anwendungsfalls durch die Anwendung der zuvor beschriebenen Anleitung. Die Ergebnisse flossen ebenfalls in das Forschungsprojekt EnEff:BIM und somit in das angeknüpfte internationale IEA EBC Annex 60 Projekt [Wetter u. van Treeck, 2017; RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017]. Der BIM-Anwendungsfall wird für ein umgrenztes BIM-Ziel entwickelt. Begonnen wird mit einer allgemeinen Erläuterung wie das Gewerk TGA in der deutschen Bauplanung geplant wird. Daraus wird komponentenweise die IDM und MVD abgeleitet und in eine bestehende Softwarearchitektur integriert, bevor der Anwendungsfall mit der Definition der dazugehörigen LODs abgeschlossen wird. Als letzter Schritt wird die MVD anhand speziell für diesen Fall entwickelter Anwendungsbeispiele validiert.

4.1 Rahmenbedingungen

Für die Entwicklung der IDM und der MVD wurden mehrere Anwendungsbeispiele entwickelt, die insgesamt mehrere Komponenten umfassen. Alle Anwendungsbeispiele sind im Anhang A.3 ab Seite 196 aufgeführt. Die entwickelten Beispiele stellen klar umgrenzte, realistische gebäudetechnische Systeme dar und flossen sukzessive in die Spezialisierung der Schnittstelle mit ein. Das Ergebnis wird beispielhaft in den folgenden Kapiteln erläutert.

Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zeigen die Software-Architektur des Forschungsprojekts. Insgesamt wurde ausgehend vom BIM-Modell – in Form des IFC-Datenmodells – die Schnittstelle zur Simulationsumgebung, welche die Modelica Anlagenbibliotheken zur Simulation verwendet, übertragen. Modelica ist eine objektorientierte, deklarative, gleichungsbasierte Modellierungssprache für physikalische Systeme [Modelica Association, 2016]. Die Daten sind mit dem Datenaustauschformat SimModel übertragen worden.

Die beiden Abbildungen zeigen, dass die Softwarekette, ausgehend vom IFC-Datenmodell, mehrere Applikationen zur Datenprüfung, -anreicherung, -übertragung und -transformation verwendet. Zur Überprüfung der Daten werden zwei Werkzeuge verwendet. Einerseits werden das Space Boundary Tool [LBNL, 2017] und Simergy [LBNL, 2013; Digital Alchemy, 2016] zur Überprüfung der Architektur und Generierung der 2nd Level Space Boundaries verwendet. Andererseits wurde ein zusätzliches Tool zur Validierung der Daten in der Gebäudetechnik entwickelt [Ebertshäuser u. von Both, 2016]. Zur Transformation und letztendlich Übertragung der Daten werden die aufgeführten Mapping Rules

(siehe Kapitel 3.5) verwendet. Das SimModel-Datenmodell wurde dazu genutzt, um die Daten für den Input in der Simulationsumgebung vorzubereiten.

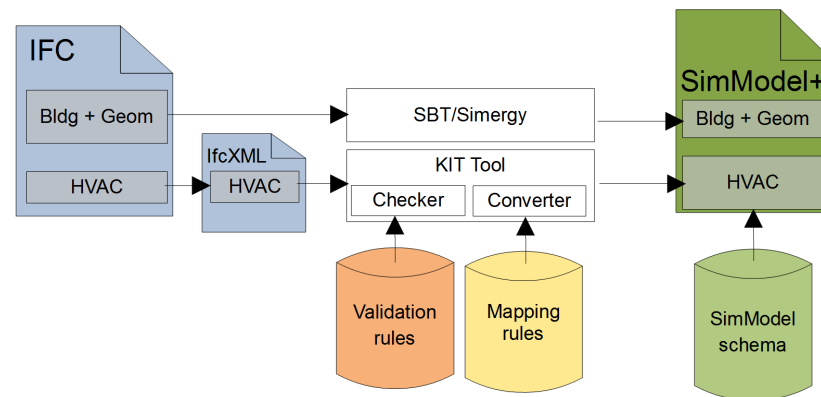


Abbildung 4.1: IFC-Datenmodell zur SimModel Toolkette [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

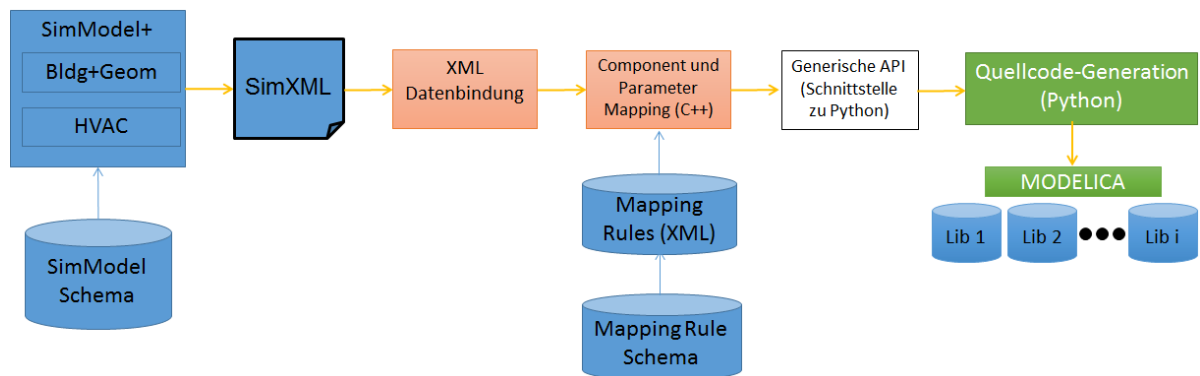


Abbildung 4.2: SimModel zur Modelica Toolkette [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

Dadurch wird insgesamt die Datenübertragung durch weitere simulationsrelevante Daten und Informationen angereichert. Die Simulationsumgebung nutzt verschiedene Modelica Anlagenbibliotheken, mit der die Simulationsmodelle modelliert werden. Abbildung 4.3 zeigt die Implementierung des in den folgenden Kapiteln im Detail erläuterten Anwendungsbeispiels in Modelica mit der „AixLib“ Modelica Anlagenbibliothek [Müller u. a., 2016] der RWTH Aachen University¹.

¹Git Repository: <https://github.com/RWTH-EBC/AixLib>.

Damit die zusätzlich angereicherten Daten und Informationen von der Simulationsumgebung verlustfrei interpretiert werden können, müssen diese mit den Mapping Rules transformiert (siehe Kapitel 3.5) werden. Das Datenmodell wird analysiert und als Ergebnis wird ein Anwendungsbeispiel in der Simulationsumgebung generiert (siehe Abbildung 4.3).

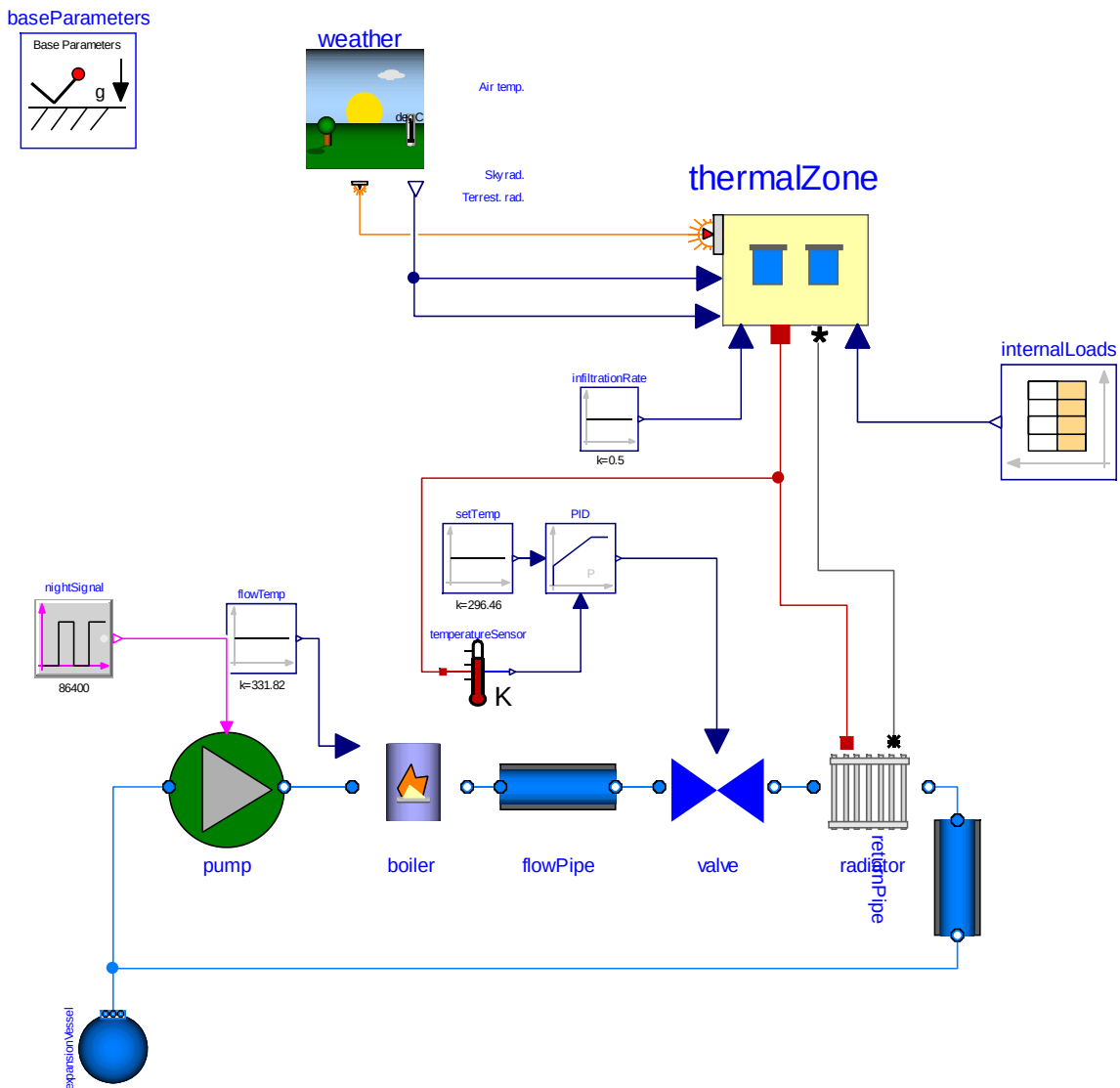


Abbildung 4.3: Beispielhafte Modelica Implementierung des Anwendungsbeispiels 1.1 [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

4.2 Charakterisierung

Zur Definition des BIM-Anwendungsfalls muss zunächst bestimmt werden welche BIM-Einsatzform für das Projekt verwendet wird. Im Sinne der Interoperabilität und in Anbetracht einer lebenszyklusübergreifenden Planung wird eine BIG-open-BIM-Umgebung zur Definition des BIM-Anwendungsfalls gewählt. Zudem muss das BIM-Ziel des Anwendungsfalls definiert werden. Das BIM-Ziel des zu definierenden Anwendungsfalls lautet:

Thermisch-energetische Simulation von gebäudetechnischen Anlagen.

Energieberechnungen dienen dazu, die Energieströme in komplexen Systemen zu erfassen und zu optimieren, wobei Energieströme im Speziellen bezüglich Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe zu berücksichtigen sind. Dazu werden überschlägige, meist auf einen Zeitpunkt bezogene und vereinfachte Verfahren zum Nachweis der energetischen Qualität verwendet [VDI 2078, 2015; DIN EN 12831, 2003; DIN EN 13779, 2007; DIN V 18599-1, 2016; DIN V 18599-10, 2016; DIN V 18599-11, 2016; DIN V 18599-2, 2016; DIN V 18599-3, 2016; DIN V 18599-4, 2016; DIN V 18599-5, 2016; DIN V 18599-6, 2016; DIN V 18599-7, 2016; DIN V 18599-8, 2016; DIN V 18599-9, 2016]. Dem gegenübergestellt werden dynamische Simulationswerkzeuge für eine ganzheitliche energetische Evaluation unter Berücksichtigung unterschiedlicher thermischer Zonen bei Verwendung numerischer Algorithmen [Wetter u. a., 2015; Wetter u. van Treeck, 2017; RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017; Wimmer u. a., 2015b, 2014, 2015a]. Diese Berechnungs- und Simulationswerkzeuge benötigen umfangreiche Eingabedaten von verschiedenen Personen, Fachgebieten und Gewerken. Es werden unter anderem geometrische, bauphysikalische und gebäudetechnische Daten benötigt.

Energieberechnungen und Simulationen innerhalb der BIM-Umgebung können nur durch integrale und fachübergreifende Prozesse erfolgreich durchgeführt werden. Es gibt mehrere Beteiligte, die diesen Prozess verwirklichen. Die für die verschiedenen Fachbereiche, wie bspw. Objektplanung, TGA, TWP, Dynamik, etc., verantwortlichen BIM-Koordinatoren – meist Ingenieure – arbeiten eng zusammen und erstellen gemeinsam den ersten Entwurf. Sobald das dazugehörige Datenmodell über eine für den jeweiligen Zweck erforderliche Datentiefe verfügt, kann dieses für die Energieberechnung oder Simulation durch einen verantwortlichen Spezialisten exportiert und simuliert werden. Dieser Spezialist kann ein Energieberater sein, der einen ersten Einblick in die energetische Qualität des Entwurfs haben möchte oder ein Ingenieur, der mittels thermisch-energetischer Simulation die Anlagentechnik unter Berücksichtigung von der Bauphysik, dem Nutzerverhalten und den gegebenen Randbedingungen optimieren möchte.

Das Ziel dieses Anwendungsfalls ist die zeitabhängige, instationäre und somit dynamische Simulation der TGA. Aus dem Bearbeitungsmodell wird ein Auswertungsmodell in Form von Simulationsmo-

dellen abgeleitet (siehe Kapitel 2.2). Die darin übermittelten Daten und Informationen werden vom Simulationswerkzeug verarbeitet und mit weiteren Daten, wie bspw. Simulationsergebnissen, angereichert. Derartige Modelle beschreiben das thermische und energetische Verhalten der modellierten Systeme, wodurch gegenüber der stationären Nachweisführung die sich verändernden Randbedingungen (Klimabedingungen, Anwesenheits- und Aktivitätsprofile von Personen, Emissionen von Maschinen und Licht) zur Auslegung und Dimensionierung hinzugezogen werden [Maile u. a., 2007].

Die zur Entwicklung des Anwendungsfalls zu Grunde liegenden allgemeinen Prozessschritte werden aus der HOAI, bzw. dem darauf aufbauenden BIM-Referenzprozess abgeleitet (siehe Kapitel 2.1 auf Seite 7). Eingangs dienen die vom Auftraggeber definierten AIAs als erste Referenz. Die VDI 6026 beschreibt welche Unterlagen (Pläne, Berechnungen, Nachweise, Simulationen) und somit Informationen in welcher Phase erstellt werden müssen [VDI 6026, 2008]. In dieser Richtlinie werden von den Leistungsphasen der HOAI sieben relevante Phasen abgeleitet. Jede Leistungsphase beinhaltet Aufgaben, die mit einem festgelegten Detailgrad erfüllt werden müssen. Eine Leistungsphase kann erst verlassen werden, wenn alle Ergebnisse durch den Auftraggeber geprüft und freigegeben wurden. Dazu wird in jeder Leistungsphase eine schriftliche Dokumentation und Erläuterung der Arbeitsschritte angefertigt. Im Folgenden werden die sieben Leistungsphasen gemäß der VDI 6026 aufgelistet:

1. Grundlagenermittlung: Ziele und Rahmenbedingungen des Projekts;
2. Vorplanung: Erste Darstellung und grobe Bemessung der zu errichtenden Anlage;
3. Entwurfsplanung: Verfeinerung der Berechnungen;
4. Genehmigungsplanung: Öffentlich-rechtliche Genehmigung;
5. Ausführungsplanung: Ausführungsreife Dimensionierung und Berechnung;
6. Montageplanung: Erstellen von Montageplänen;
7. Revisionsunterlagen: Übergabe der Dokumentation an den Betreiber.

Eine ausführliche Erläuterung zu den einzelnen Phasen der VDI 6026 befindet sich im Anhang (siehe im Anhang, Kapitel A.5 ab Seite 212).

Die AIAs dienen als erste Information für alle Projektbeteiligten. Darauf basierend wird der BAP entwickelt, der u. a. Grundlage für den Aufbau der Architektur-, TWP- und TGA-Fachmodelle darstellt. Wie und in welchem Umfang der Austausch zwischen den unterschiedlichen Modellen geschieht (siehe Kapitel 2.2) muss im BAP formuliert werden. Für die Auslegung der Versorgungssysteme müssen gemäß der VDI 6026 folgende Vorgänge, die im Rahmen der Planung für jedes Gebäude durchzuführen sind, erledigt werden: Die Bedarfsermittlung, der Systementwurf und die Systemplanung [Essig, 2015].

Die Bedarfsermittlung basiert auf der Berechnung des Lüftungsbedarfs gemäß DIN EN 13779 [DIN EN 13779, 2007]. Darüber hinaus muss der Wärmebedarf gemäß der DIN EN 12831 bestimmt werden [DIN EN 12831, 2003]. Zusätzlich gilt es den Kühlbedarf gemäß VDI 2078 zu ermitteln [VDI 2078, 2015]. Die DIN V 18599 dient als regulierende Grundlage zur Bildung von thermischen Zonen [DIN V 18599-10, 2016] und für den EnEV-Nachweis.

Die erarbeiteten Informationen stellen die Grundlage für erste Systementwürfe dar. Diese bauen auf Funktionsschemata auf und reservieren grob die Volumina für die Installationsräume und die weitere Planung im Modell. Es werden ingenieurwissenschaftlich-technische Prozessplanungen für einen Entwurf durchgeführt. Funktionale Einheiten werden gebildet und dimensioniert.

Die bisherigen Entwürfe münden in die Systemplanung. Die Systemplanung wird vor der Genehmigungsplanung durchgeführt um sicherzustellen, dass keine größeren Änderungen zu einer weiteren Genehmigungsplanung führen und damit die Ausschreibung verzögern. Dies macht es erforderlich, dass die geplanten Versorgungssysteme im Modell konstruiert und koordiniert sind. Die modellierten Teil- und Fachmodelle werden in einem Koordinationsmodell gegeneinander geprüft und koordiniert [Weise, 2006].

Die allgemein aufgeführten Prozessschritte benennen die Vorgänge, die für die Planung der Versorgungssysteme benötigt werden. Dabei geht es weniger darum, wie die Systeme geplant werden, sondern es geht darum, welche Daten und Informationen wann und durch welchen Prozessschritt ins Datenmodell eingepflegt werden. Das zu Grunde liegende Auswertungsmodell wird aus dem aus allen Fachmodellen koordinierten BIM-Modell generiert. Das vom BIM-Gesamtkoordinator verabschiedete Koordinationsmodell, weitere Projektinformationen und der BAP bilden die Grundlage für die Simulation. Die Simulation der Versorgungssysteme hat je nach Bedarf das Ziel, das thermische Verhalten und/ oder die Energie- sowie Stoffströme zu simulieren. Die Simulationsergebnisse beschreiben das Betriebsverhalten der geplanten gebäudetechnischen Anlage. Damit wird überprüft ob die bisherige Planung den geforderten Bedingungen gerecht wird. Falls dies nicht der Fall ist, muss aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Maßnahmenkatalog zur Einhaltung der geforderten Kriterien abgeleitet werden. Der beschriebene Vorgang wird in einem Prozessdiagramm in Abbildung 4.4 visualisiert. Zu erkennen sind vier Schwimmbahnen mit den jeweiligen Rollen. Der BIM-Gesamtkoordinator übernimmt die Modellkoordinierung der Teilmodelle jedes einzelnen BIM-Koordinators (Architektur, TWP und TGA). Nach einer ausreichenden Planungsgüte dient das koordinierte Zentralmodell als Grundlage für das Auswertungsmodell, womit die Simulation der TGA vollzogen wird. Die Planungsgüte wird mit verschiedenen Applikationen, sogenannten „Informationsmanagementtools“, nachgewiesen. Damit wird eine Kohärenzprüfung der verwendeten Datenmodelle vorgenommen. Bei Widersprüchen werden Änderungen durch das Management angewiesen. Bevor das Auswertungsmodell exportiert wird, muss das koordinierte Modell definierte Qualitätsanforderungen nachweisen. Bei einem ausreichenden Gütenachweis kann aus der BIM-Plattform oder

aus dem Informationsmanagementtool das Auswertungsmodell für das BIM-Werkzeug des BIM-Modellierers, durch die dafür entwickelte MVD, generiert werden.

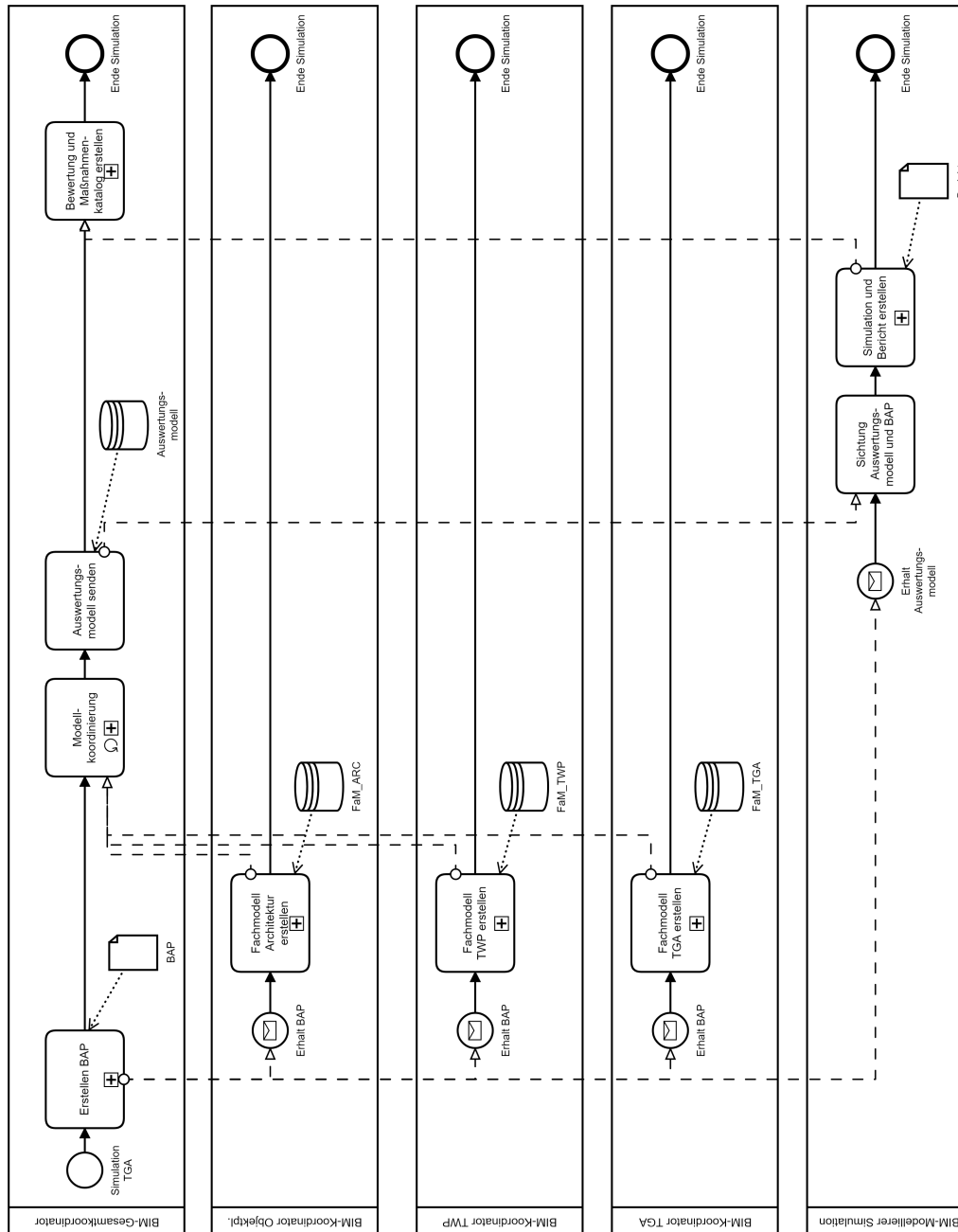


Abbildung 4.4: Beispielhaftes BPMN-Prozessdiagramm zur Erstellung des Auswertungsmodells für die Simulation der TGA, basierend auf der allgemeinen BIM-Prozesslandkarte des BIM-Praxisleitfadens [Drees & Sommer u. Vrame, 2016].

Zur Realisierung der open-BIM-Einsatzform wird in diesem Fall das IFC-Datenformat verwendet. Die BIM-Koordinatoren modellieren mithilfe der BIM-Plattformen individuell in den jeweiligen Datenformaten. IFC wird zur Integration der unterschiedlichen Applikationen sowie für den Austausch von Daten und Informationen zwischen den unterschiedlichen Applikationen verwendet [Hietanen u. Kohlhaas, 2016]. Die Schnittstelle zwischen der BIM-Plattform und des BIM-Werkzeugs für die Simulation ist in Abbildung 4.4 – ausgehend vom BIM-Gesamtkoordinator bis zum BIM-Modellierer – dargestellt. Nach erfolgreicher Koordinierung der einzelnen Gewerke Architektur, TWP und TGA muss das BIM-Datenmodell ausreichend Daten und Informationen als Grundlage für die weiteren Schritte der BIM-Modellierer vorweisen.

Nach erfolgreichem Export wird die Simulation in mehreren Schritten durchgeführt. Dazu werden zunächst die Daten gesichtet. Das Datenmodell dient als Input und der BAP definiert unter anderem, welche Fragen mit der Simulation beantwortet werden sollen. Bspw. kann überprüft werden, ob das entworfene System die thermische Behaglichkeit über das gesamte Jahr garantieren kann oder ob die Energieströme gewisse Rahmenbedingungen einhalten. Die Art der Simulation erfordert eine Spezialisierung der Eingangsdaten. Je nachdem welche Frage mit der Simulation beantwortet werden soll, werden unterschiedliche Daten und Informationen zur Durchführung benötigt. Grundsätzlich werden in dieser Schnittstelle aufgrund der vertraglichen Pflichten nur die aus den Normen und Richtlinien zu erwartenden Daten und Informationen aus ingenieurtechnischen bzw. architektonischen Berechnungen, Annahmen und Entwürfen abgebildet sein. Zu den Mindestanforderungen zählen unter anderem, dass die thermischen Zonen eindeutig definiert sind und die bauphysikalischen sowie gebäudetechnischen Daten in einer zweckmäßigen Datentiefe vorliegen.

Für den darauffolgenden Schritt kann es evtl. notwendig sein, das Datenformat des Modells in ein für das BIM-Werkzeug verwertbares Format zu konvertieren. Diese Konvertierung der Daten wird mit den speziell für diese Schnittstelle formulierten Mapping Rules durchgeführt. Nach der evtl. erforderlichen Datenkonvertierung muss das Datenmodell mit zusätzlichen, für den jeweiligen Zweck relevanten Informationen ergänzt werden. Dieser Schritt ist notwendig, da das BIM-Datenmodell nicht für solch spezialisierte Anwendungen geschaffen ist. Dadurch werden zusätzliche Daten und Informationen in einem verwertbaren Format implementiert. Sobald alle notwendigen Daten für die Simulation vorliegen, kann eine Simulation erfolgreich durchgeführt werden. Nach erfolgreicher Simulation gibt es drei Optionen der Ergebniserückführung. Entweder werden die Ergebnisse direkt in das Datenmodell hinterlegt oder es wird innerhalb des Datenmodells auf die Ergebnisse extern verwiesen, so dass diese bei Bedarf aufgerufen werden können. Die zweite Option ist bei großen, nicht für alle Disziplinen relevanten Datenmengen sinnvoll. Die dritte Option stellt die Erstellung eines detaillierten Berichts dar.

Die beschriebenen Rahmenbedingungen des zu definierenden BIM-Anwendungsfalls geben einen ersten Einblick in die Komplexität. In den folgenden Unterabschnitten wird komponentenweise der

BIM-Anwendungsfall gemäß der harmonisierten IDM- und MVD-Methode beschrieben. Dabei wird erläutert, welche Daten und Informationen in welchem Prozessschritt verlangt und erzeugt werden.

4.3 Harmonisierte IDM- und MVD-Methodik

Das Ziel des BIM-Anwendungsfalls ist die thermisch-energetische Simulation der TGA. Im eigentlichen Anwendungsbeispiel soll ein klar abgegrenzter Anwendungsfall mittels einer in der Modellierungssprache Modelica entwickelten Simulationsmodells mit der Simulationsumgebung „Dymola“, bzw. die dafür entwickelte Anlagenbibliothek „AixLib“ der RWTH Aachen University simuliert werden.

Das Beispiel für diesen Anwendungsfall wird in ein realistisches dreistöckiges Gebäude integriert. Modelliert wird das Bürogebäude des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen E3D der RWTH Aachen University. Das BIM-Modell besteht grundsätzlich aus zwei Fachmodellen. Zum einen wird die Architektur gemäß des Testbeispiels der VDI 6007-1 beschrieben und in das Bürogebäude integriert [VDI 6007-1, 2012] und zum anderen wird ein Heizungssystem auf Grundlage des Testbeispiels ingenieurtechnisch dimensioniert und ausgelegt. Die für die thermische Zone relevanten Daten werden aus den definierten Nutzungsprofilen für ein Einzelbüro der DIN V 18599-10 entnommen [DIN V 18599-10, 2016].

Architektur Die Architektur wird gemäß der VDI Richtlinie 6007-1 modelliert und ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Wesentliche Eigenschaften des Raumes sind im Folgenden gelistet und bilden die Grundlage für die Bedarfsplanung:

- ▷ Einzelner Raum mit Südfenster im zweiten Geschoss eines dreistöckigen Gebäudes;
- ▷ Angrenzende Räume sind ähnlich konditioniert, adiabater Zustand zu den Nachbarräumen;
- ▷ Grundfläche des Raumes: $17,50 \text{ m}^2$;
- ▷ Fläche der Außenwand: $3,50 \text{ m}^2$;
- ▷ Fläche des Fensters: $7,00 \text{ m}^2$;
- ▷ Fläche der Innenwände (inklusive Boden und Decke): $73,50 \text{ m}^2$;
- ▷ Fläche der Tür: $2,00 \text{ m}^2$;
- ▷ Raumtyp: S „schwer“;
- ▷ Interne Lasten: Anwesenheit, Maschinen und Beleuchtung für einen Büroraum (in Anlehnung an DIN 18599-10, Tabelle A.2 [DIN V 18599-10, 2016]);

- ▷ Wetterdaten: Test Reference Year Datensatz für Aachen, Deutschland (Zone 5);
- ▷ Bauphysikalische Kennwerte der einzelnen Bauteile (bspw. der Aufbau der Außenwand, Tabelle 4.1).

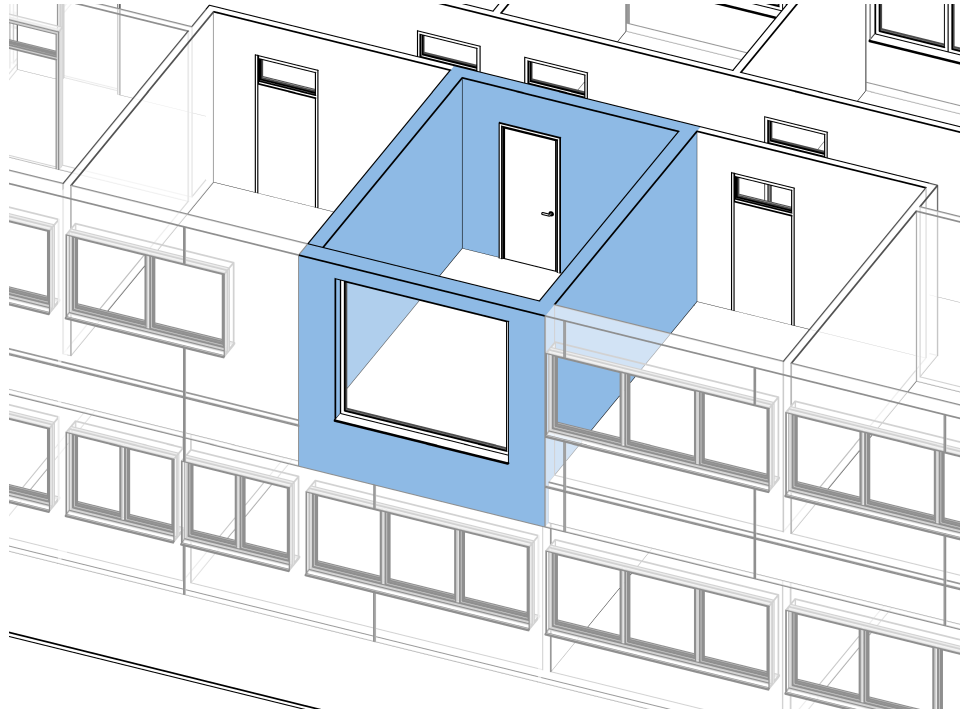


Abbildung 4.5: Architektur des Raums (in hellblau) gemäß VDI 6007-1.

Tabelle 4.1: Aufbau der Außenwand.

	Schichtdicke d in [m]	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(mK)]	Dichte ρ in [kg/m ³]	spez. Wärmekapazität c in [J/(kgK)]
Beton	0,024	2,035	2100	920
Dämmung	0,062	0,047	75	840
Fassadenplatte	0,025	0,45	1300	1050

TGA Auf Grundlage des Entwurfsmodells des Architekten, der bauphysikalischen Kenndaten, der Geometrie, der Nutzungsanforderungen und geographischer Angaben werden erste Bedarfsermittlungen zur Auslegung des Heizungssystems durchgeführt. Die bauphysikalischen Daten der einzelnen Wandaufbauten erlauben die Berechnung der Transmissionswärmeverluste durch die

Außenwand. Das Nutzungsprofil gibt Auskunft über die Raum-Soll-Temperatur und der Standort spezifiziert die Norm-Außentemperatur. Somit ergibt sich eine Norm-Heizlast gemäß DIN EN 12831 in Höhe von 993,04 W.

4.3.1 Nutzeranforderungen

Die einleitende Beschreibung dieses Kapitels erlaubt die Definition der Nutzeranforderungen für die IDM. Dieser BIM-Anwendungsfall soll die Erbringung einer Dienstleistung als Ziel haben (siehe Abbildung 3.2, so dass im nächsten Schritt zunächst das Prozessdiagramm spezifiziert wird. Für die im Prozessdiagramm identifizierten Schnittstellen werden weiterhin die relevanten Datenaustauschanforderungen spezifiziert.

4.3.1.1 Prozessdiagramm

Zur Definition des Prozessdiagramms werden zunächst die Rollen identifiziert, um daraus die einzelnen für den BIM-Anwendungsfall relevanten Arbeitspakete abzuleiten. Die in den einzelnen Schritten erstellten Informationen werden in den Schnittstellen ausgetauscht und dienen als Input für darauffolgende Prozessschritte. Der Fluss der Informationen muss derart gestaltet sein, dass das Ziel des BIM-Anwendungsfalls erreicht wird. Der Ablauf der Datengenerierung wird gemäß der dazugehörigen LODs vorgenommen.

Rollendefinition

Die beschriebenen Rollen in Kapitel 2.5.1 werden auch auf dieses Beispiel angewendet. Insgesamt soll für dieses Beispiel ein Auftraggeber als Bauherr auftreten und die AIAs in Zusammenarbeit mit dem BIM-Gesamtkoordinator definieren. Neben einem Architekten als BIM-Gesamtkoordinator für die Objektplanung, wird ein TGA-Ingenieur die Rolle des BIM-Koordinators für die gebäude-technische Anlage einnehmen. Ein Simulationsteam soll vor der eigentlichen Genehmigungsphase eine Simulation des Versorgungssystems durchführen. Dementsprechend wird der definierte BIM-Anwendungsfall in der Phase der Entwurfsplanung gemäß VDI 6026 angewendet: „Es dürfen aus der Tiefe der Berechnungen später keine grundsätzlichen Änderungen mehr resultieren“ [VDI 6026, 2008]. Das Ziel der Simulation ist der Nachweis, dass die Parameter der thermischen Behaglichkeit, insbesondere die Raumtemperatur, im Winterfall keine Grenzen unterschreiten. Erst nachdem die Systemplanung die definierten Ziele gemäß der Simulation erreicht, wird diese zur Genehmigung an die entsprechende Behörde weitergegeben.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich zunächst vier Rollen als Schwimmbahnen für den Aufbau des Prozessdiagramms:

- ▷ BIM-Gesamtkoordinator;
- ▷ BIM-Koordinator Objektplanung;
- ▷ BIM-Koordinator TGA-Ingenieur;
- ▷ BIM-Modellierer Simulationsteam.

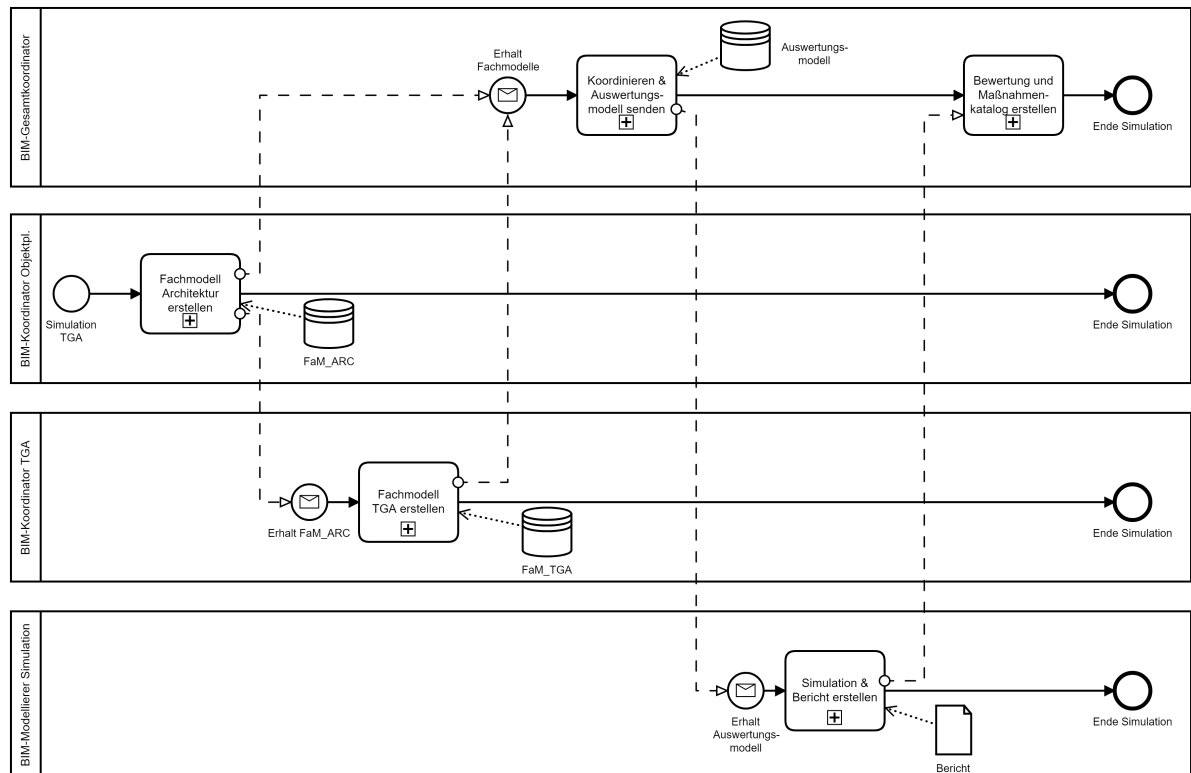


Abbildung 4.6: Übersicht über die Rollen und die ersten Arbeitspakete der Entwurfsplanung zur Zielerfüllung des BIM-Anwendungsfalls in einem Prozessdiagramm.

Abbildung 4.6 zeigt eine erste Übersicht des Prozessdiagramms. Zu erkennen sind die einzelnen Schwimmbahnen der zugewiesenen Rollen und deren unscharf zusammengefasste Arbeitspakete. Diese Arbeitspakete gilt es im nächsten Schritt zu definieren.

Definition der Arbeitspakete

Wie in Abbildung 4.6 ersichtlich, sind die inhaltlichen Vorarbeiten der Architekten und Ingenieure am BIM-Modell die Eingangsdaten für das Simulationsteam. Dabei sind das Architekturmodell und weitere Projektunterlagen die ersten Eingangsdaten für den TGA-Ingenieur. Das Modell des

Objektplaners liefert den architektonischen Entwurf; zusätzlich werden bauphysikalische Daten entweder direkt im Modell vorgehalten oder aus entsprechenden Normen entnommen. Damit das Architekturmodell für die Simulation geeignet ist, müssen sogenannte „Space Boundaries“ gebildet werden.

Space Boundaries sind thermische Begrenzungsflächen, die den Raum mit den umgebenen Gebäudeelementen verknüpfen. Somit definieren Space Boundaries die Schnittstelle zwischen den tatsächlichen Innenflächen der Bauelemente und dem Volumen des Raumes. Diese Definition entspricht den thermischen Begrenzungsflächen ersten Grades bzw. „1st level Space Boundaries“. Begrenzungsflächen zweiten Grades bzw. „2nd level Space Boundaries“ berücksichtigen nicht nur die Innenseite der Elemente, sondern ziehen in der Bildung auch die gegenüberliegende Seite hinzu. Dabei werden 2nd level Space Boundaries vom Typ 2a und 2b unterschieden. 2nd level Space Boundaries vom Typ 2a werden gebildet, wenn auf der gegenüber liegenden Seite ebenfalls ein Volumen (Raum- oder Außenvolumen) modelliert ist. 2nd level Space Boundaries vom Typ 2b hingegen werden gebildet, wenn sich auf der gegenüberliegenden Seite ein Bauelement befindet. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft die Definition von 2nd level Space Boundaries. Zu erkennen ist, dass die untere Wand des größeren Raumes in drei Space Boundaries aufgeteilt ist. Typ 2a definiert die Wandflächen zu den kleineren Räumen. Die übrige Fläche trennt den Bereich, der an die Innenwand grenzt, ab und ist somit vom Typ 2b [BuildingSMART International, 2016f].

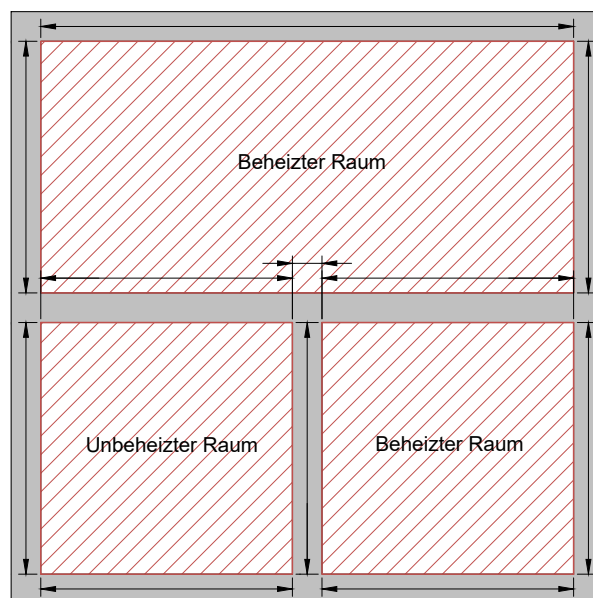


Abbildung 4.7: Darstellung von 2nd Level Space Boundaries [van Treeck u. a., 2015].

Space Boundaries können von den meisten BIM-Plattformen gebildet werden. Ist dies nicht der

Fall, dann können weitere BIM-Werkzeuge zur Kompensation genutzt werden. Bspw. wurde vom Lawrence Berkeley National Laboratory das sogenannte „Space Boundary Tool“ entwickelt. Mit Hilfe dieses Werkzeugs werden die exportierten IFC-Datenmodelle mit 2nd level Space Boundaries angereichert [Rose u. Bazjanac, 2013; LBNL, 2017]. Wie Space Boundaries im IFC-Modell abgebildet werden, wird in den folgenden Kapiteln zur Definition der MVD detailliert erläutert.

Aus den Daten und Informationen des Architekturmodells und weiterer Projektunterlagen müssen thermische Zonen und Versorgungsbereiche gebildet werden können [DIN V 18599-1, 2016]. Die Bildung von Zonen hat das Ziel, jene Bereiche des Gebäudes zusammenzufassen, für die sich ähnliche Wärmesenken und Wärmequellen ergeben und ist in mehrere Schritten unterteilt [DIN V 18599-1, 2016]:

1. Die Vorgaben des Bauherrn zu den Nutzungsanforderungen ermöglichen die Erstellung eines Raumbuchs, welches somit als Basis für den architektonischen Entwurf dient. Dadurch werden die Belegungen den einzelnen Räumen zugewiesen, Nutzungsprofile erstellt und erste Zonen gebildet.
2. Zonenteilungskriterien werden angewendet, wenn unterschiedliche Konditionierungsanforderungen bestehen oder eine unterschiedliche Ausstattung von lüftungs- und klimatechnischen Versorgungssystemen bzw. Anlagen zur Raumkühlung vorhanden sind, die eine kältetechnische Bilanzierung beeinflussen.
3. Kleinere Bereiche mit geringem Einfluss werden zu einzelnen Zonen zusammengefasst oder den bereits vorhandenen Zonen zugeteilt.

Abbildung 4.8 zeigt anhand eines Beispiels, wie gemäß DIN V 18599 die Zonierung vollzogen wird, um daraus die Versorgungsbereiche abzuleiten.

Die Daten und Informationen des Fachmodells des Objektplaners und die AIA bilden die Grundlage für Bedarfsermittlung, Systementwurf und -planung.

Abbildung 4.9 zeigt allgemein das Vorgehen des Ingenieurs für die Dimensionierung, den Entwurf und die Planung der TGA. Wie eingangs beschrieben geht es bei der Definition des BIM-Anwendungsfalls weniger darum, wie geplant wird, sondern vielmehr welche Daten und Informationen zur Zielerreichung benötigt werden. Im Folgenden werden im Allgemeinen die Daten und Informationen zur Auslegung von Versorgungssystemen beschrieben.

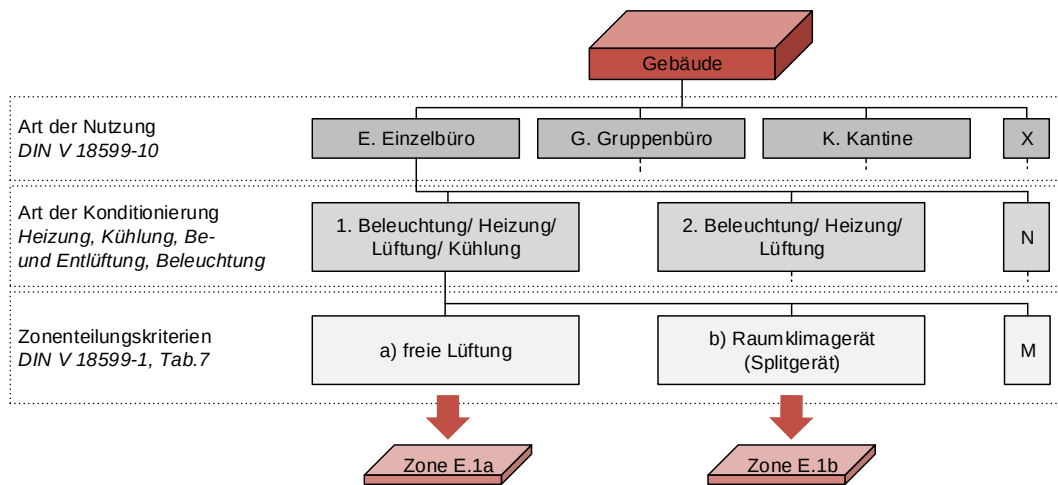


Abbildung 4.8: Beispielhafte Zonenbildung gemäß EnEV nach DIN V 18599 [i. A. a. DIN V 18599-1, 2016].

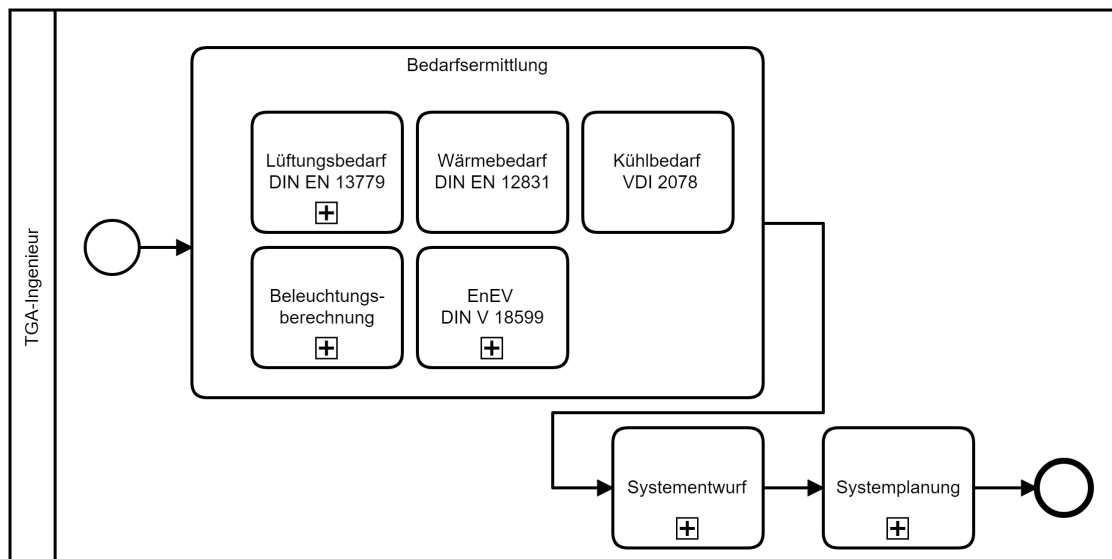


Abbildung 4.9: Detaillierte Betrachtung der allgemeinen Arbeitspakete des TGA-Ingenieurs zur Dimensionierung der TGA.

Bedarfsermittlung

Lüftungsbedarf [DIN EN 13779, 2007] Die europäische Norm für den Lüftungsbedarf dient als Leitlinie für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen für Nichtwohngebäude, um bei akzeptablen Kosten ein hygienisches und effizientes Innenraumklima zu schaffen. Für die Ermittlung der notwendigen Luftmengen bedarf es folgender Informationen:

- ▷ Angaben zur Lage des Gebäudes, zur Beschreibung der Umgebung und Außenbedingungen;
- ▷ Außenklimadaten für den Sommer- und Winterfall, wie bspw. Temperatur, Windgeschwindigkeit, -richtung, Feuchte und Strahlung;
- ▷ Belegungsprofil der Räume, Zonen oder des Gebäudes an typischen Tagen, Arbeitswochen, Urlaubstagen, bzw. tagsüber und nachts;
- ▷ Konstruktionsdaten, Bauart, Geometrie und Ausrichtung der Gebäudeteile;
- ▷ Innere sensible (aufgeteilt in Konvektion und Strahlung) und latente Lasten, die Verunreinigungs- und Feuchtequellen darstellen, als Tagesgang mit mindestens Stundenwerten;
- ▷ Raumbezogener, durch einen Prozess oder die Art der Ausstattung zwingend erforderlicher Zu- und Abluftvolumenstrom;
- ▷ Informationen zur Regelungsart auf der Raumebene: thermische Bedingungen, Feuchtebedingungen, personen- oder flächenbezogene Luftqualität sowie zulässige Geschwindigkeiten, Schalldruckpegel und notwendige elektrische Leistungen für die Beleuchtung.

Zu den notwendigen Informationen werden Ansätze in Form von tabellarischen Werten gegeben. Mit Hilfe dieser Norm werden die notwendigen Berechnungen aus anderen Normen wiederholt überprüft und gegebenenfalls optimiert.

Wärmebedarf [DIN EN 12831, 2003] Die raum-, zonen- und gebäudeweise Berechnung der Norm-Heizlast wird gemäß der DIN EN 12831 durchgeführt. Es wird die Wärmeleistung für eine Norm-Auslegungstemperatur kalkuliert. Es werden Norm-Transmissionswärmeverluste über die raumumgebenden Flächen und Norm-Lüftungswärmeverluste über Infiltration durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle berechnet. Die Ergebnisse geben Auskunft über die benötigte Wärmezufuhr zur Aufrechterhaltung der Temperatur bei Auslegungsbedingungen. Für die Berechnung werden folgende Informationen benötigt:

- ▷ Standort und Lage zur Bestimmung der Norm-Außentemperatur und der Wind-Abschirmklasse;

- ▷ Geometrie und bauphysikalische Materialkennwerte einzelner Schichten der Bauteile zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten und der wirksamen Speichermasse;
- ▷ Flächenkennwerte zur Ermittlung der Erdreich berührenden Grundflächen und Kellerwände;
- ▷ Nutzungsarten der einzelnen Räume zur Bestimmung der Soll-Innentemperatur;
- ▷ Raumvolumina, Lüftungsart und die Angabe der Lüftungsdurchlässigkeit.

Entgegen der Definition der Space Boundaries werden für die Berechnung der Norm-Heizlast komplexere Definitionen von Flächen vorgenommen. Abbildung 4.10 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Zu erkennen ist, dass der betrachtete Raum mit seinen umgebenen Bauteilen in Abhängigkeit von dessen Konditionierung zusammengefasst wird.

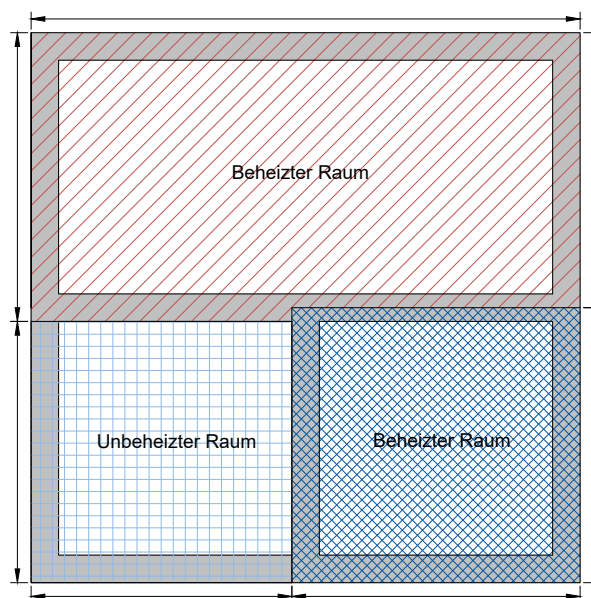


Abbildung 4.10: Definition der Begrenzungsflächen zur Berechnung der Norm-Heizlast [van Treeck u. a., 2015].

Kühlbedarf [VDI 2078, 2015] Die dem Raum abzuführende Wärmemenge – die Kühllast – wird mit der VDI 2078 berechnet und definiert somit die Übergabeleistung der Kühlanlage. Berechnet wird die Summe aller zeitgleichen Kühllasten zu einem kritischen Zeitpunkt. Die Bestimmung der Kühllast, der Raumlufttemperatur und der operativen Raumtemperatur für Räume jeglicher Art mit/ ohne Klimatisierung unter Berücksichtigung aller relevanten Parameter, die das thermische Raumverhalten beeinflussen, werden erfasst. Die für diese Richtlinie benötigten Informationen lauten wie folgt:

- ▷ Innere Lasten und Lastverläufe in Form von Personen, Maschinen und Beleuchtung, Wärmeeintrag durch Stoffdurchsatz, Wärme durch chemische Reaktionen und der Wärmestrom von Nachbarräumen;
- ▷ Äußere Lasten und Lastverläufe der Wärmeströme durch Außenwände und Dächer, Transmissionswärmeströme, sowie Strahlungswärme durch Fenster und der Wärmeeintrag durch Fugenlüftung;
- ▷ Die einzelnen Lasten werden als latente und sensible Wärme- und Kühllasten erfasst;
- ▷ Bauphysikalische Parameter jedes einzelnen Bauteils müssen eine Schichtsimulation ermöglichen. Parametrisierung der Bauteildaten des architektonischen Modells, bspw.:
 - Schichtdicke, d in [m];
 - Wärmeleitfähigkeit, λ in [W/(mK)];
 - Dichte, ρ in [kg/m³];
 - Spezifische Wärmekapazität, c in [J/(kgK)].

Abbildung 4.11 veranschaulicht die aufgeführten Informationsbedarfe. Die Berechnung der Kühllast kann als vereinfachtes Kurzverfahren oder als EDV-basiertes Verfahren erfolgen.

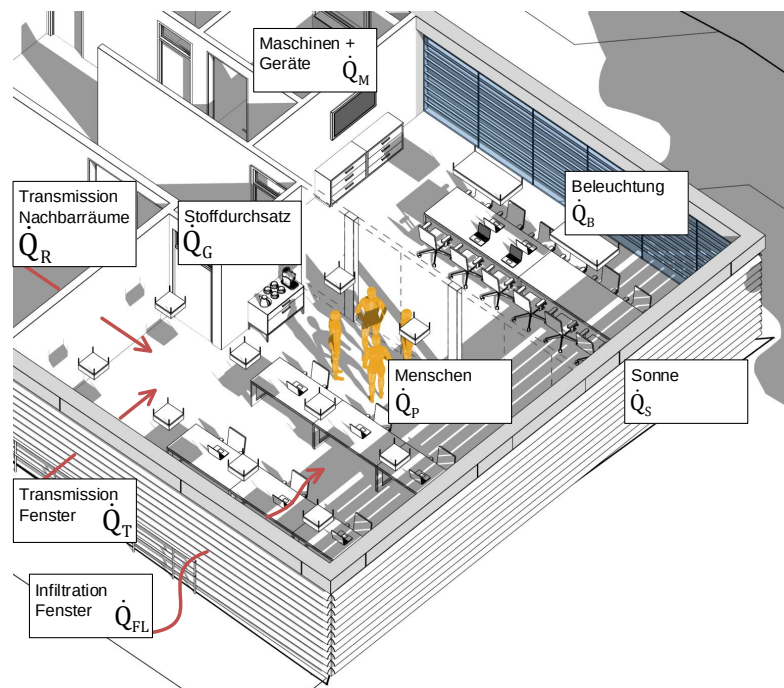


Abbildung 4.11: Illustration der relevanten Informationen für die Kühllastberechnung.

Beleuchtungsberechnung Grundlage zur Berechnung der erforderlichen Beleuchtungseinrichtungen sind die Raumgeometrie zur Ableitung der Tageslichtversorgung, die Beschaffenheit der lichtreflektierenden bzw. -absorbierenden Oberflächen und die Raumnutzungsanforderungen. Die Anforderungen werden vom Bauherrn oder bspw. durch technische Regeln der Arbeitsstättenrichtlinien vorgegeben [Ausschuss für Arbeitsstätten, 2014].

Energieeinsparverordnung [DIN V 18599-1 bis -11, 2016] Zur Reduktion des Endenergiebedarfs und -verbrauchs von Anlagensystemen für Wohn- und Nichtwohngebäude wurden insgesamt elf Teile der DIN V 18599 geschaffen:

- ▷ Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger [DIN V 18599-1, 2016];
- ▷ Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen [DIN V 18599-2, 2016];
- ▷ Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung [DIN V 18599-3, 2016];
- ▷ Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung [DIN V 18599-4, 2016];
- ▷ Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen [DIN V 18599-5, 2016];
- ▷ Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau [DIN V 18599-6, 2016];
- ▷ Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftheiz- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau [DIN V 18599-7, 2016];
- ▷ Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungsanlagen [DIN V 18599-8, 2016];
- ▷ Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen [DIN V 18599-9, 2016];
- ▷ Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten [DIN V 18599-10, 2016];
- ▷ Teil 11: Gebäudeautomation [DIN V 18599-11, 2016].

Bei der Festlegung der von dieser Norm bereitgestellten Nutzungsprofile (Teil 10) werden folgende Randbedingungen definiert und festgeschrieben:

- ▷ Nutzungszeiten;
- ▷ Raumkonditionierung;
- ▷ Solltemperaturen;
- ▷ Mindestluftvolumenstrom;

- Beleuchtung;
- Personenbelegung;
- interne Wärmequellen.

Zur Festlegung der Versorgungsbereiche muss eine Zonierung gemäß der genannten Zonenbildungskriterien durchgeführt werden (siehe Abbildung 4.8).

Unter Berücksichtigung der für die Versorgung benötigten TGA wird die Endenergie berechnet. Eingangsdaten zur Berechnung dieser sind:

- Wirkungsgrade der Anlage;
- Verluste der Verteilungen;
- Hilfsenergie zur Bereitstellung der Nutzenergie.

Systementwurf

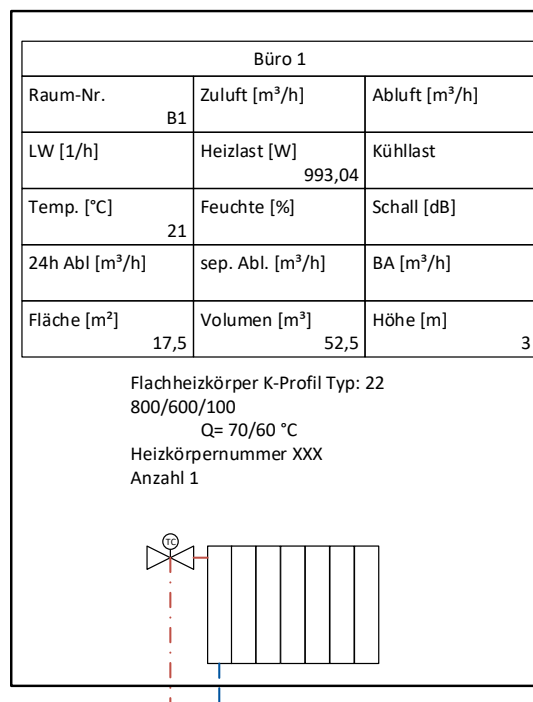


Abbildung 4.12: Wärmeversorgung des Anwendungsbeispiels 1.1.

Die beschriebenen Arbeitsschritte für die Bedarfsermittlung stellen die notwendigen Informationen für den Systementwurf dar. Das Versorgungssystem wird im folgenden Schritt zunächst funktional konzipiert. Das Anwendungsbeispiel soll Gasheizkessel (entsprechend der Versorgungsmöglichkeiten) und eine klassische Übergabe mit einem mit Regelventil versehenen Heizkörper darstellen. Abbildung 4.12 zeigt das Konzept des Versorgungssystems.

Nach Verabschiedung des Versorgungssystems wird das Funktionsschema entworfen. Abbildung 4.13 zeigt das Heizungssystem für die zu bedienende thermische Zone als Funktionsschema. Es werden ein Gasheizkessel für Wärmeerzeugung, Rohrleitungssysteme mit einer Pumpe, einem Ausdehnungsgefäß, Ventile für die Verteilung und ein Heizkörper für die Übergabe der Wärme in die thermische Zone verwendet.

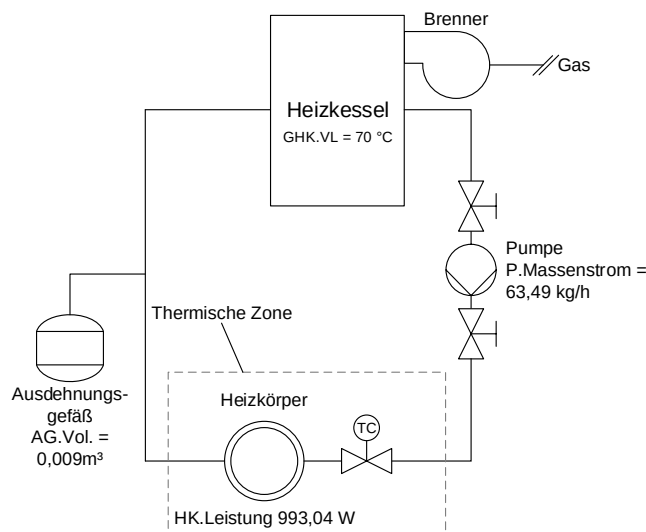


Abbildung 4.13: Funktionsschema des Heizungssystems für das Anwendungsbeispiel 1.1.

Systemplanung

Nach dem Entwurf und der Verabschiedung der Konzepte wird das Versorgungssystem modelliert. Das Architekturmodell dient als Grundlage und wird bspw. referenziert, wodurch der TGA-Ingenieur die gebäudetechnischen Komponenten entsprechend ingenieurwissenschaftlicher Methoden gestaltet. Die Modellierung muss entsprechend der für das Projekt speziell definierten Modellierungsrichtlinien – festgehalten im BAP – erstellt werden. Grundsätzlich werden die vereinbarten Einheiten, die Skalierung und Dimensionierung auf Plausibilität geprüft. Zudem gilt es, die für diesen

Anwendungsfall speziell definierten Fertigstellungsgrade einzuhalten. Durch die Koordinierung der beiden Fachmodelle werden die notwendigen Durchbrüche erkannt. Weitere Überprüfungen werden mit Informationsmanagementtools durchgeführt, die eine Regelprüfung der einzelnen Fachmodelle ermöglichen. Meist werden damit Kollisionsprüfungen durchgeführt, die in der Koordinierung geklärt werden müssen. Darüber hinaus können auch andere Fragestellungen wie bspw. das Einhalten von Brandschutzkriterien mit Hilfe der Informationsmanagementtools beantwortet werden.

Simulation

Die für die Simulation erforderlichen Schritte sind in Abbildung 4.14 detailliert aufgeführt. Der BIM-Modellierer erhält vom BIM-Gesamtkoordinator das Auswertungsmodell mit dem Ziel der Simulation. Das empfangene Modell wird mit den in den AIAs definierten Zielvorgaben der Simulation analysiert und ausgewertet. Es wird kontrolliert ob eine ausreichende Datentiefe vorhanden ist und welche Daten zusätzlich vom BIM-Modellierer in den Prozess eingebracht werden müssen.

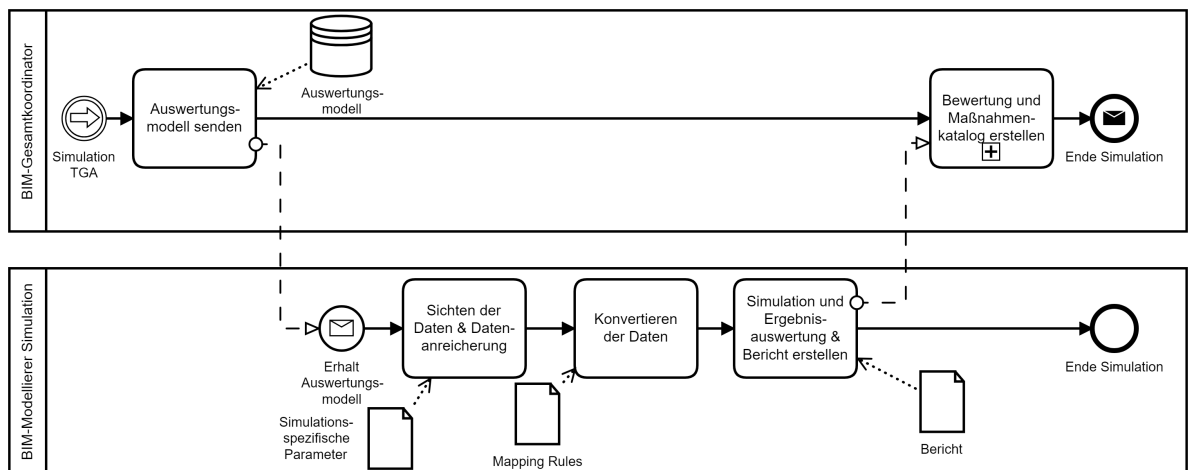


Abbildung 4.14: Arbeitsschritte zur Durchführung der Simulation.

Die in der Abbildung aufgeführten simulationsspezifischen Parameter fassen die für die Simulation zusätzlich relevanten Daten und Informationen zusammen. Das Auswertungsmodell muss vor der Simulation folgende Daten und Informationen beinhalten [Maile u. a., 2007]:

- ▷ Geometrie der Architektur;
- ▷ Klimadaten (mindestens Stundenwerte);
- ▷ Anwesenheits- und Aktivitätsprofile von Personen sowie Emissionen von Maschinen und Licht;

- ▷ Betriebsprofile der Versorgungssysteme;
- ▷ Parameter zur Auslegung und Dimensionierung der einzelnen Komponenten der TGA;
- ▷ Ggf. Energietarife, falls eine Kostenkalkulation mit der Simulation verbunden sein soll.

Damit das angereicherte Auswertungsmodell vom BIM-Werkzeug importiert werden kann, muss das zu Grunde liegende Datenmodell in einer für das Simulationsprogramm geeigneten Form vorliegen. Das IFC-basierende Auswertungsmodell muss entsprechend dem dazugehörigen Transformationsprozess, bspw. spezifiziert durch die Mapping Rules, transformiert werden. Nachdem alle Daten eingegeben und ebenfalls transformiert sind, kann die Simulation der TGA vollzogen werden. Die Simulationsergebnisse werden ausgewertet und bilden die Grundlage des Berichts. Der Bericht wird an die Entscheidungsträger (hier der BIM-Gesamtkoordinator) gesendet und zur Erstellung eines Maßnahmenkatalogs verwendet. Der Maßnahmenkatalog muss vor der Genehmigungsphase realisiert werden, damit keine großen Änderungen eine weitere Genehmigungsphase erforderlich machen.

Identifikation der Schnittstellen

Das in Abbildung 4.6 dargestellte Prozessdiagramm stellt die einzelnen Schritte zur Erstellung der Daten und Informationen dar. Es ist zu erkennen, dass zwischen den Schwimmbahnen des Architekten und TGA-Ingenieurs sowie des Simulationsteams ein Austausch von Daten stattfindet.

Zwischen dem Architekten und dem TGA-Ingenieur, in den Rollen der BIM-Koordinatoren, werden die jeweiligen Fachmodelle referenziert. Der TGA-Ingenieur referenziert das Modell des Architekten lediglich, wohingegen sein Fachmodell im Zuge der Koordinierung an den Architekten, bzw. BIM-Gesamtkoordinator, gesendet wird. Der BIM-Gesamtkoordinator koordiniert die verschiedenen Fachmodelle und generiert aus den verabschiedeten Versionen das Zentralmodell.

Die zweite Schnittstelle ergibt sich zwischen dem BIM-Gesamtkoordinator und dem Simulationsteam, bzw. BIM-Modellierer. Das Simulationsteam erhält ein aus dem Zentralmodell generiertes Auswertungsmodell zur Bewältigung der Aufgabe.

Die für den Austausch von Modellen relevanten Daten und Informationen werden mit der jeweiligen BIM-Plattform erstellt. Dazugehörige MVDs werden dazu genutzt, den jeweiligen Export der IFC4-Datei zielorientiert zu gestalten. In Abbildung 4.15 werden Phasen zur Identifikation der Schnittstellen in diesem Anwendungsbeispiel hervorgehoben. In der Phase der Koordinierung arbeiten die Fachplaner an der Erstellung der Fachmodelle mit ihren jeweiligen BIM-Plattformen und exportieren diese mit funktionsbezogenen MVDs. Die dafür relevanten MVDs sind die Folgenden:

- ▷ Export zur Referenzierung: Reference View;

- Export zur Erstellung des Zentralmodells: Design Transfer View;
- Export zur Erstellung des Auswertungsmodells: —.

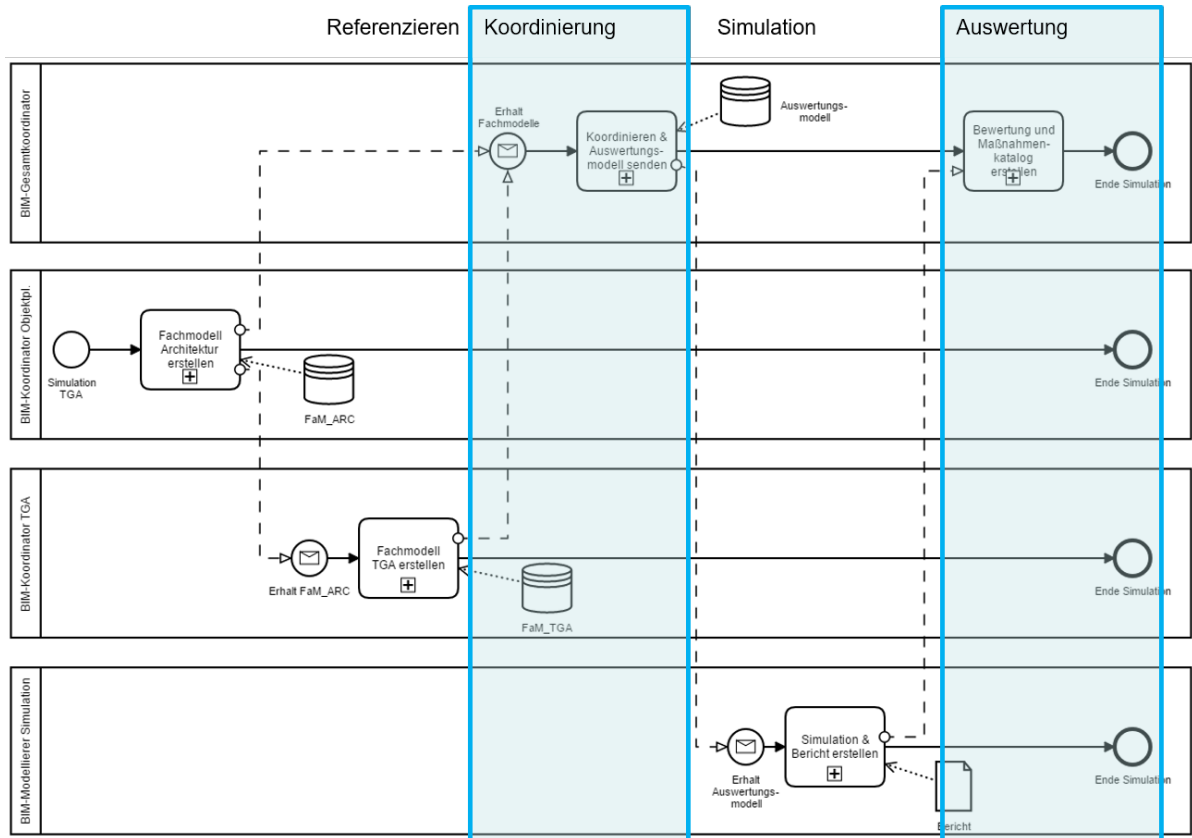


Abbildung 4.15: Identifikation der Schnittstellen des Anwendungsbeispiels 1.1.

Der TGA-Ingenieur referenziert für seine Arbeit das Modell des Architekten mit der von bSI speziell dafür entwickelten Reference View MVD [BuildingSMART International, 2017d]. Zur Koordinierung der Fachmodelle wird die für diesen Zweck entwickelte Design Transfer View MVD verwendet [BuildingSMART International, 2017b]. Die für die Simulation der TGA relevante, auf dem IFC4-Datenmodell basierende MVD existiert nicht und muss dementsprechend für diesen Anwendungsfall definiert werden. Das Projekt „Concept Design BIM“ hat eine MVD für die energetische Simulation auf Basis des IFC2x3 Datenmodells erstellt, die als erste Orientierung dient [Wetter u. van Treeck, 2017; See, 2010]. Darüber hinaus kann diese nicht weiter verwendet werden, da die identifizierte Schnittstelle aufgrund der Verwendung eines anderen BIM-Werkzeugs (Dymola) unterschiedliche Datenanforderungen vorgibt [Wetter u. van Treeck, 2017; RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017]. Der erste Schritt zur Entwicklung der MVD ist die Formulierung

der Datenaustauschanforderungen für die jeweilige Schnittstelle.

4.3.1.2 Datenaustauschanforderungen

Die Datenaustauschanforderungen werden entsprechend den Rollen in zwei Teile aufgeteilt. Der erste Teil betrifft das Architekturmodell. Der zweite Teil listet die die im Fachmodell der TGA zu definierenden Datenaustauschanforderungen.

Architektur Der für die Objektplanung verantwortliche Architekt bezieht sich auf die Objekte, Daten und Informationen, die zur Modellierung des Architekturmodells benötigt werden. Grundsätzlich sind hierfür Informationen wie die Geometrie und die bauphysikalischen Daten von Belang. Hinzu kommen Informationen die zur Definition des Standorts, der inneren/ äußeren Lasten und die thermischen Zonen relevant sind. Da die Modelle grundsätzlich objektorientiert modelliert werden, gilt es dementsprechend die Datenaustauschanforderungen zu definieren. Über die objektbezogenen Daten hinaus werden auch thematische Informationspakete geschnürt.

Tabelle 4.2: Ausschnitt aus den Datenaustauschanforderungen für das Architekturmodell des Anwendungsbeispiels.

Element	Attribut/ Information	Einheit/ Typ
Innere Lasten (Personen) im Raum	Zeitplan	Stundenbasiert
	Aktivitätsgrad	String
	Anzahl Personen	Integer
	Faktor Konvektion/ Strahlung	Real
Innenwand	Wärmewiderstand d. Schicht	K/W
	Wärmekapazität d. Wandschicht	J/K
	Innerer Wärmeübergangskoeffizient	W/K
	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
	spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
...	...	...

Tabelle 4.2 zeigt zwei Beispiele zur Definition von Datenaustauschanforderungen. Aufgeführt sind die benötigten Informationen zur Definition der inneren Lasten und einer Innenwand. Zu den aufgeführten Daten und Informationen werden weitere erläuternde Hinweise wie bspw. die Herkunft

der Daten im Modell verankert. Zum Beispiel wird der Aktivitätsgrad in drei Klassen unterteilt und in der VDI 2078 definiert. Diese weiterführenden, erläuternden Hinweise sind essentiell für die nachgelagerten Prozesse.

TGA Der TGA-Ingenieur modelliert das TGA-Modell unter anderem basierend auf dem Architekturmodell. Die Daten und Informationen für die neu zu definierende Schnittstelle werden ebenfalls in einer Datenaustauschanforderung objektorientiert festgehalten. Die einzelnen Komponenten der TGA des Anwendungsbeispiels und weitere allgemeine Daten werden verständlich formuliert.

Tabelle 4.3 zeigt einen Ausschnitt aus den Datenaustauschanforderungen, die in der Planung vom TGA-Ingenieur zu erwarten sind. Allgemein werden Versorgungssysteme und die notwendigen Daten und Informationen für die einzelnen Bestandteile des jeweiligen Gewerks definiert. Die aus der Nutzerebene hervorgehenden Datenaustauschanforderungen bilden die Grundlage für die technologische Umsetzung.

Tabelle 4.3: Ausschnitt aus den Datenaustauschanforderungen für das TGA-Modell des Anwendungsbeispiels.

Element	Attribut/ Information	Einheit/ Typ
Versorgungssysteme	Gewerke	String
	Energiequelle/ Brennstoff	String
	geforderte Raumlufthqualität	String
	Regelungsart	String
Pumpe	Förderhöhe	m
	Fördervolumenstrom	m ³ /s
	Leistungsbedarf	W
	Pumpenkennlinie	Funktion
	Durchmesser Laufrad	m
	Antrieb	String
...	...	...

4.3.2 Technologische Umsetzung

Die Datenaustauschanforderungen und das anvisierte Datenmodell bieten die notwendigen Informationen zur Definition des Datenaustauschanforderungsmodells und somit die eigentliche Definition

der zur Kopplung notwendigen MVD.

4.3.2.1 Datenaustauschanforderungsmodell

Die Umsetzung der MVD wird schemabhängig von Softwareentwicklern auf der technologischen Ebene im BIM-Bereich übernommen. Das zu Grunde liegende IFC4-Datenmodell wird den Datenaustauschanforderungen zugeschrieben. Die Softwareentwickler sind Experten für das Datenmodell und müssen im ersten Schritt die Daten und Informationen, definiert in den Datenaustauschanforderungen, verstehen. Diese Analyse und Ausarbeitung für den hier betrachteten Anwendungsfall wird im Folgenden genauer betrachtet. Für die Zuordnung kommen zunächst primär die *IfcSharedBldgElements* für die grundsätzlich verwendeten architektonischen Bauelemente und die *IfcHvacDomain* für die TGA in Frage. Zudem müssen weitere grundlegende Entitäten aus dem Core-Layer, wie *IfcSpace* für das Raumvolumen und *IfcBuilding* für das geplante Gebäude, einbezogen werden.

Architektur Notwendige architektonische Elemente sind Gebäude, Etagen, Decken, Böden, Wände, Türen und Fenster. Zusätzlich müssen die inneren und äußeren Lasten sowie die Randbedingungen für thermische Zonen im BIM-Modell festgehalten werden.

Den Objekten und Informationsgruppen werden die jeweiligen Entitäten zugeordnet:

- ▷ Gebäude: *IfcBuilding*;
- ▷ Thermische Zone: *IfcSpace*, *IfcZone*, *IfcSpatialZone*, *IfcBuilding*, *IfcBuildingStorey*;
- ▷ Äußere Lasten: *IfcBuilding*;
- ▷ Innere Lasten: *IfcSpace*;
- ▷ Opaque Bauelemente: *IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcMaterial*, *IfcMaterialLayer*, *IfcMaterialLayerSet*;
- ▷ Transparente Bauelemente: *IfcWindow*, *IfcMaterialConstituentSet*, *IfcMaterialConstituent*, *IfcMaterial*;
- ▷ Innenwand, Außenwand: *IfcWall*, *IfcMaterial*, *IfcMaterialLayer*, *IfcMaterialLayerSet*;
- ▷ Fenster: *IfcWindow*, *IfcMaterialConstituentSet*, *IfcMaterialConstituent*, *IfcMaterial*;
- ▷ Sonnenschutz: *IfcWindow*.

Zu erkennen ist, dass mehrere Objekte und Informationsgruppen mehrere Entitäten vorweisen, bspw. die thermische Zone. Die Mehrfachzuweisung ist mit der Informationsgenerierung durch die Kombination mehrerer Daten begründet. Wie bereits beschrieben werden zur Bildung von thermischen Zonen mehrere Parameter verlangt. Unter anderem sind dafür die inneren und äußeren Lasten relevant. Diese werden in *IfcSpace* und *IfcBuilding* definiert. *IfcSpace* dient als Container

für die Zeitpläne der Personen, Maschinen und dem Lichtbetrieb sowie der daraus resultierenden Emissionen. *IfcBuilding* beinhaltet Attribute, welche die Wetterdaten oder die geographische Referenzierung betreffen. Eine Kombination dieser und anderer Daten erlaubt eine erste Definition von thermischen Zonen aus architektonischer Sicht. Die einzelnen Raumvolumina bzw. *IfcSpaces* werden mit einer Gruppierungsfunktion der Entitäten *IfcZone* oder *IfcSpatialZone* zu einer thermischen Zone zusammengefasst.

Sobald die einzelnen Objekte bzw. Informationsgruppen den jeweiligen Entitäten zugewiesen wurden, müssen die inhärenten Attribute bzw. Properties identifiziert werden. Aus der Masse der möglichen Attribute und Properties müssen bereits bei der Definition der Datenaustauschanforderung das Ziel der Schnittstellendefinition und die damit verbundenen Daten und Informationen bekannt sein. Dementsprechend werden nur die Attribute und Properties für das Datenaustauschanforderungsmodell bzw. die MVD definiert, die zur Verwirklichung des Zielprozesses benötigt werden. Bspw. werden für die Definition der inneren Lasten folgende Properties von *IfcSpace* benötigt:

- ▷ Personen: Pset_SpaceThermalLoad/ People;
- ▷ Beleuchtung: Pset_SpaceThermalLoad/ Light;
- ▷ Maschinen: Pset_SpaceThermalLoad/ EquipmentSensible.

Diese Properties sind vom Typen *IfcPropertyBoundedValue* mit Datentyp *IfcPowerMeasure*. Damit wird der Wertebereich der einzelnen Properties mit einem Maximal-, Minimal- und mit einem Sollwert definiert.

Für die geographische Referenzierung kann die Entität *IfcSite* mit deren Attributen REFLATITUDE und REFLONGITUDE verwendet werden. Diese Attribute ermöglichen eine Georeferenzierung mittels Längen- und Breitengrad vom Typen WGS 84 (bspw. für Aachen, Mathieustraße 30: REFLATITUDE: N 50° 47' 21.7372", REFLONGITUDE: E 6° 2' 57.562"). Jedoch muss bei größeren Baustellen mit mehreren Gebäuden ebenfalls das Gebäude separat georeferenziert werden, so dass dafür eigens definierte Properties benötigt werden. Zur Definition dieser Properties muss gemäß der bSI Namenskonvention ein eigener Prefix anstelle von PSet gewählt werden. Für diese MVD wurde das Prefix PSim als Property für die Simulation gewählt. Die zur Referenzierung des Gebäudes notwendigen Properties wurden durch das PSet PSim_Building mit den Properties LONGITUDEBUILDING und LATITUDEBUILDING hinzugefügt. Diese sind vom Typen *IfcPropertySingleValue* mit dem primären Datentyp *IfcCompoundPlaneAngleMeasure*, wodurch eine derartige Referenzierung in Grad, Minuten, Sekunden und optional Millisekunden ermöglicht wird.

TGA Die TGA wird ebenfalls entsprechend den in Frage kommenden Entitäten zugeordnet. Es werden allgemeine und direkte auf die Anlagenkomponenten bezogene Relationen gebildet:

- ▷ Versorgungssystem: *IfcDistributionSystem, IfcSpace, IfcBoiler*;
- ▷ Wasserbasiertes Heizungssystem: *IfcBoiler, IfcSpace, IfcPipeSegment, IfcPipeFitting, IfcSpaceHeater*;
- ▷ Heizkessel: *IfcBoiler*;
- ▷ Pumpe: *IfcPump*;
- ▷ Geschlossenes Ausdehnungsgefäß: *IfcDistributionSystem, IfcTank, IfcBoiler*;
- ▷ Heizkörper: *IfcSpaceHeater*;
- ▷ Ventil: *IfcValve*;
- ▷ Rohre: *IfcPipeSegment*;
- ▷ Rohrteile: *IfcPipeFitting*.

Die Mehrfachzuweisungen sind notwendig, um die geforderten Informationen abbilden zu können. Bspw. wird ein Ausdehnungsgefäß anhand des Wasservolumens und der thermischen Heizmittelspreizung dimensioniert. Das Wasservolumen muss aus der gesamten Anlage abgeleitet werden und die Heizmittelspreizung wird anhand der Auslegungsvor- und Rücklauftemperatur am Heizkessel berechnet.

Die den jeweiligen Entitäten zugehörigen Attribute und PSets müssen im nächsten Schritt untersucht und ggf. der MVD zugeordnet werden. Bspw. werden für die Simulation des Heizkessels die folgenden Parameter verlangt:

- ▷ Heizkesseltyp;
- ▷ Beschreibung des Teillastverhaltens des Heizkessels in Form einer zweidimensionalen Matrix (Teillast in [%], Effizienz in [%]);
- ▷ Maximale Leistung in [W];
- ▷ Wasservolumen im Heizkessel in [m³];
- ▷ Heizmedium;
- ▷ Vorlauftemperatur in [K].

Ausgehend vom IFC4-Modell werden laut Dokumentation folgende spezialisierte PSets dem Heizkessel zugeordnet:

- ▷ PSet_BoilerTypeCommon: Allgemeine Properties für Heizkessel;
- ▷ PSet_BoilerTypeSteam: Allgemeine Properties für einen Dampfheizkessel;

- ▷ PSet_BoilerTypeWater: Allgemeine Properties für einen Wasserheizkessel;
- ▷ PSet_BoilerPhistory: Leistungshistorie allgemeiner Properties.

Alle PSets, mit Ausnahme von PSet_BoilerTypeSteam und PSet_BoilerPHistory, sind für das Anwendungsbeispiel von Belang. Im nächsten Schritt werden die von der IFC4-Dokumentation vorgegebenen Properties untersucht und den benötigten Properties zugeordnet:

- ▷ Beschreibung des Teillastverhaltens des Heizkessels: PSet_BoilerTypeCommon/ PartialLoadEfficiencyCurves;
- ▷ Maximale Leistung: PSet_BoilerTypeWater/ HeatOutput;
- ▷ Wasservolumen im Heizkessel: PSet_BoilerTypeCommon/ WaterStorageCapacity;
- ▷ Heizmedium: PredefinedType.WATER;
- ▷ Vorlauftemperatur: PSet_BoilerTypeCommon/ OutletTemperatureRange.

Zu erkennen ist, dass zu allen notwendigen Parametern Properties zugeordnet werden können; jedoch muss dabei beachtet werden, dass die Definition der Properties und Parameter identisch sein müssen. Identisch sind die Definitionen für:

- ▷ Beschreibung des Teillastverhaltens des Heizkessels: PSet_BoilerTypeCommon/ PartialLoadEfficiencyCurves;
- ▷ Maximale Leistung: PSet_BoilerTypeWater/ HeatOutput;
- ▷ Wasservolumen im Heizkessel: PSet_BoilerTypeCommon/ WaterStorageCapacity.

Für die abweichenden Definitionen müssen zusätzliche Spezifikationen vorgenommen werden. Das Heizmedium wird im IFC-Schema unter anderem mit dem Heizkesseltyp definiert. IFC4 bietet die folgenden Optionen zur Festlegung des Typen:

- ▷ WATER;
- ▷ STEAM;
- ▷ USERDEFINED;
- ▷ NOTDEFINED.

Dementsprechend muss bei der Überführung der Information vom BIM-Modell zum BIM-Werkzeug die Typdefinition zur Parametrisierung hinzugezogen werden. Jedoch ist es ebenfalls möglich eigens definierte Properties dafür zu nutzen, um die Komplexität bei der Überführung gering zu halten.

Zudem ist die Definition der Vorlauftemperatur nicht direkt aus dem Property PSet_BoilerTypeCommon/ OutletTemperatureRange auslesbar. Dieses Property ist vom Typ *IfcPropertyBoundedValue/ IfcThermodynamicTemperatureMeasure* und hat folgende Attribute:

- ▷ UPPERBOUNDVALUE: Oberer Wert eines Wertegrenzbereichs;
- ▷ LOWERBOUNDVALUE: Unterer Wert eines Wertegrenzbereichs;
- ▷ SETPOINTVALUE: Sollwert.

Mit diesem Property werden primär die möglichen Temperaturspreizungen im Vorlauf mit den Attributen UPPERBOUNDVALUE und LOWERBOUNDVALUE definiert, jedoch erlaubt das Attribut SETPOINTVALUE einen zusätzlichen Sollwert. Dieser Sollwert muss per Definition in der Auslegung des Anlagensystems derart entsprechend verwendet werden.

Weitere Erweiterungen sind im Anhang A.3 ab Seite 196 aufgeführt. Es wird je Anwendungsfall aufgelistet, welche semantischen Erweiterungen notwendig waren, damit das Ziel der Implementierung des Anwendungsbeispiels in die Simulationsumgebung möglich ist.

4.3.2.2 Model View Definition

Zur Finalisierung der Definition des Anwendungsfalls muss ebenfalls die für den Datenaustausch relevante MVD identifiziert oder definiert werden. In diesem Anwendungsfall kann auf keine existierende MVD zurückgegriffen werden, so dass eine neue MVD erstellt wird. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die MVD zur Verwirklichung der Schnittstelle zwischen BIM-Plattformen und des anvisierten Simulationstools. Die Grundlage hierfür bildet das im vorherigen Kapitel beschriebene Datenaustauschanforderungsmodell. Die vollständige, mit dem ifcDOC tool Version 11.4 generierte MVD inklusive dazugehöriger Dokumentation kann auf einem offen zur Verfügung stehenden Github repository gefunden werden ². Abbildung 4.16 zeigt das Interface des ifcDOC-Tools. Auf der linken Seite ist die Hierarchie der zu Grunde liegenden Daten vorzufinden; in diesem Fall die EXPRESS-Spezifikation des IFC4-Datenmodells, der dazugehörigen MVDs und die darauf basierende MVD, erstellt im Projekt EnEff:BIM. Auf der rechten Seite ist eine Übersicht über die Austauschforderungen gegeben. Auf die Inhalte dieser wird im Folgenden eingegangen.

Wie bereits beschrieben, spezifiziert das Schema eines Datenmodells allgemein vorhandene Datenstrukturen und -typen. Eine MVD hingegen beschreibt speziell für ein bestimmtes Szenario entwickelte Graphen, die diese Strukturen abbilden und dazugehörige Bedingungen ermöglichen.

²Github Repository der MVD, inklusive Dokumentation <https://github.com/EnEff-BIM/IFCtoSimModel/tree/master/ifcDoc>.

4 Erstellung des BIM-Anwendungsfalls

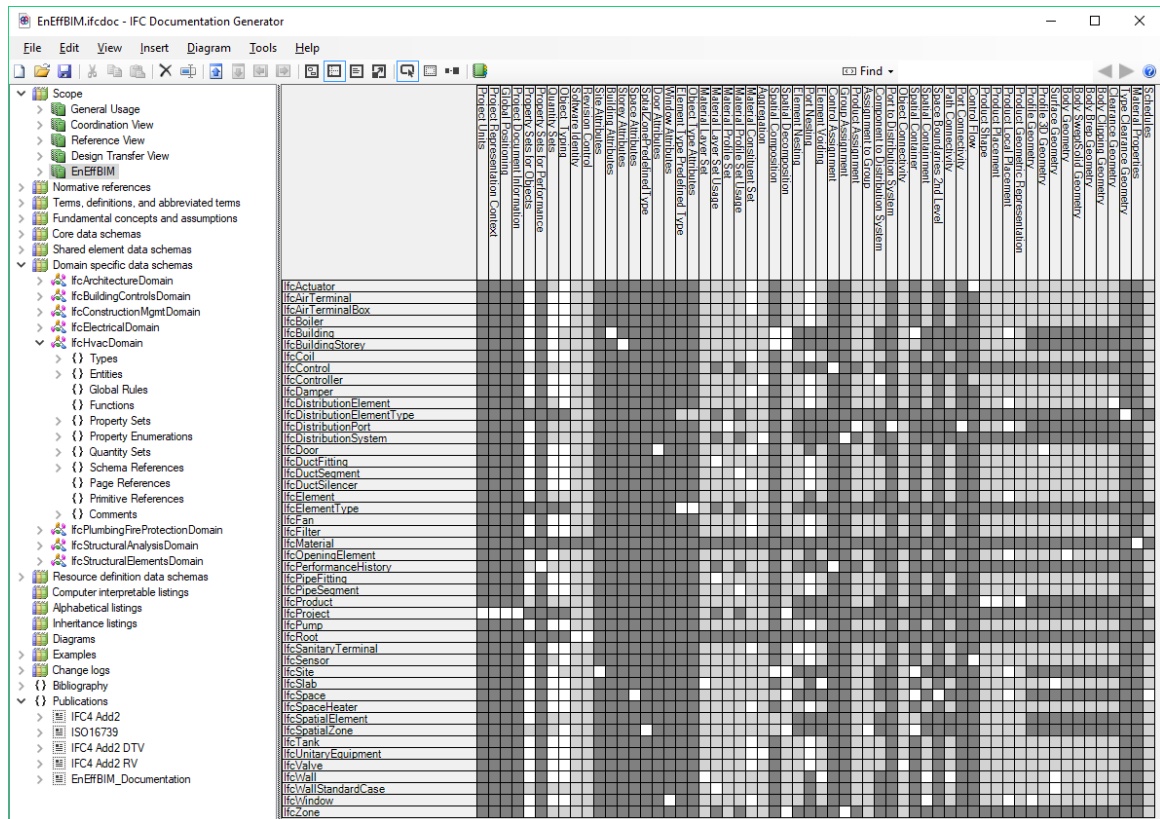
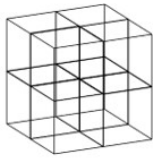


Abbildung 4.16: Interface des ifcDOC-Tools Version 11.4 zur Generierung der MVD.

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Konzepte zur Abbildung der energierelevanten Daten und Informationen vorgestellt, um mit der Anforderung für den Austausch abzuschließen. Die für die Simulation der gebäudetechnischen Anlage relevanten Daten lassen sich in acht wesentliche Gruppen zusammenfassen (veranschaulicht in Abbildung 4.17):

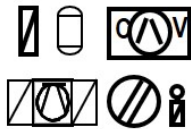
- ▷ Geometrie;
- ▷ Bauphysik;
- ▷ TGA-Komponenten;
- ▷ Äußere Lasten;
- ▷ Interne Lasten;
- ▷ Thermische Zone;
- ▷ Versorgungssysteme;
- ▷ Mess-, Steuer- und Regeleinrichtung.



Geometrie



Bauphysik



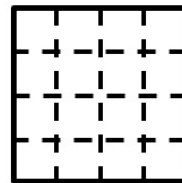
Komponenten



Äußere Lasten



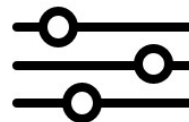
Interne Lasten



Thermische Zone



Topologie



MSR

Abbildung 4.17: Inhalte der MVD.

Geometrie Die Geometrie der Räume wird, wie bereits beschrieben, in Form von Space Boundaries, bzw. thermischen Begrenzungsflächen definiert [van Treeck u. a., 2015; Bazjanac, 2010; Maile u. a., 2013; Rose u. Bazjanac, 2013]. Diese Flächen umschließen das Volumen des Raumes (*IfcSpace*) und bilden somit die Flächen, die den Wärmetransfer durch die Bauteile, bspw. Wände, Decken, Böden, Fenster, etc. zu anderen Volumina darstellen. Grundsätzlich gilt, dass Space Boundaries nur gebildet werden können wenn die inneren Volumina endlich sind und somit eine geschlossene Hülle vorweisen. Die Hülle kann von physischen oder virtuellen Elementen (*IfcVirtualElement*) gebildet werden. Dabei wird zwischen Konzepten für 1st Level Space Boundaries und 2nd Level Space Boundaries unterschieden.

1st Level Space Boundaries umschließen das innere Volumen, ohne die umschließenden Bauteile zu berücksichtigen. Folglich werden weder Materialdaten, noch die gegenüberliegende Seite der Bauteile berücksichtigt. Abbildung 4.18 zeigt mittels eines Explosionsdiagramms die Abgrenzung von zwei Räumen mit einer hellgrau eingefärbten Innenwand (*IfcWallStandardCase*). Um die Space Boundaries darzustellen, sind die Außenwände der beiden Räume von den inneren Volumina (*IfcSpaces*) abgehoben. Die 1st Level Space Boundaries werden entsprechend der Geometrie der Oberfläche gebildet und sind in dieser Abbildung als orangene Flächen dargestellt. Aus Darstellungsgründen wurden die Decken und Böden ausgeblendet. Die relevanten Entitäten und die in diesem Fall verwendeten Attribute sind unterhalb der Abbildung angeordnet. Das Attribut *RELATINGSPACE* verbindet *IfcSpace* mit *IfcRelSpaceBoundary1stLevel* und *RELATEDBUILDINGELEMENT* stellt die Verbindung zum *IfcElement*, in diesem Fall *IfcWallStandardCase*, dar. Die graphische 2D-Darstellung der planaren Flächen wird durch *IfcConnectionGeometry* mit dem Attribut *CONNECTIONGEOMETRY* ermöglicht.

2nd Level Space Boundaries bauen auf der Definition der 1st Level Space Boundaries auf. Diese Definition wird um zwei wesentliche, für die energetische Simulation relevante Funktionalitäten erweitert. Die 2nd Level Space Boundaries berücksichtigen die bauphysikalische und somit auch geometrische Struktur der umschließenden Bauteile. Zudem werden die dem Bauteil gegenüberliegenden Seiten in der Bildung der Space Boundaries einbezogen. Ändert sich die bauphysikalische Struktur des umschließenden Bauteils wird für jeden homogenen Bereich des Bauteils eine eigene Space Boundary gebildet. Darüber hinaus werden zwei verschiedene Typen von 2nd Level Space Boundaries unterschieden, Typ a und b. Der Typ 2a wird gebildet wenn auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls Space Boundaries definiert sind bzw. sich ein Volumen befindet. Typ 2b wird gebildet, wenn kein Space Boundary aufgrund des Vorhandenseins eines Subtyps von *IfcElements* auf der gegenüberliegenden Seite vorhanden ist.

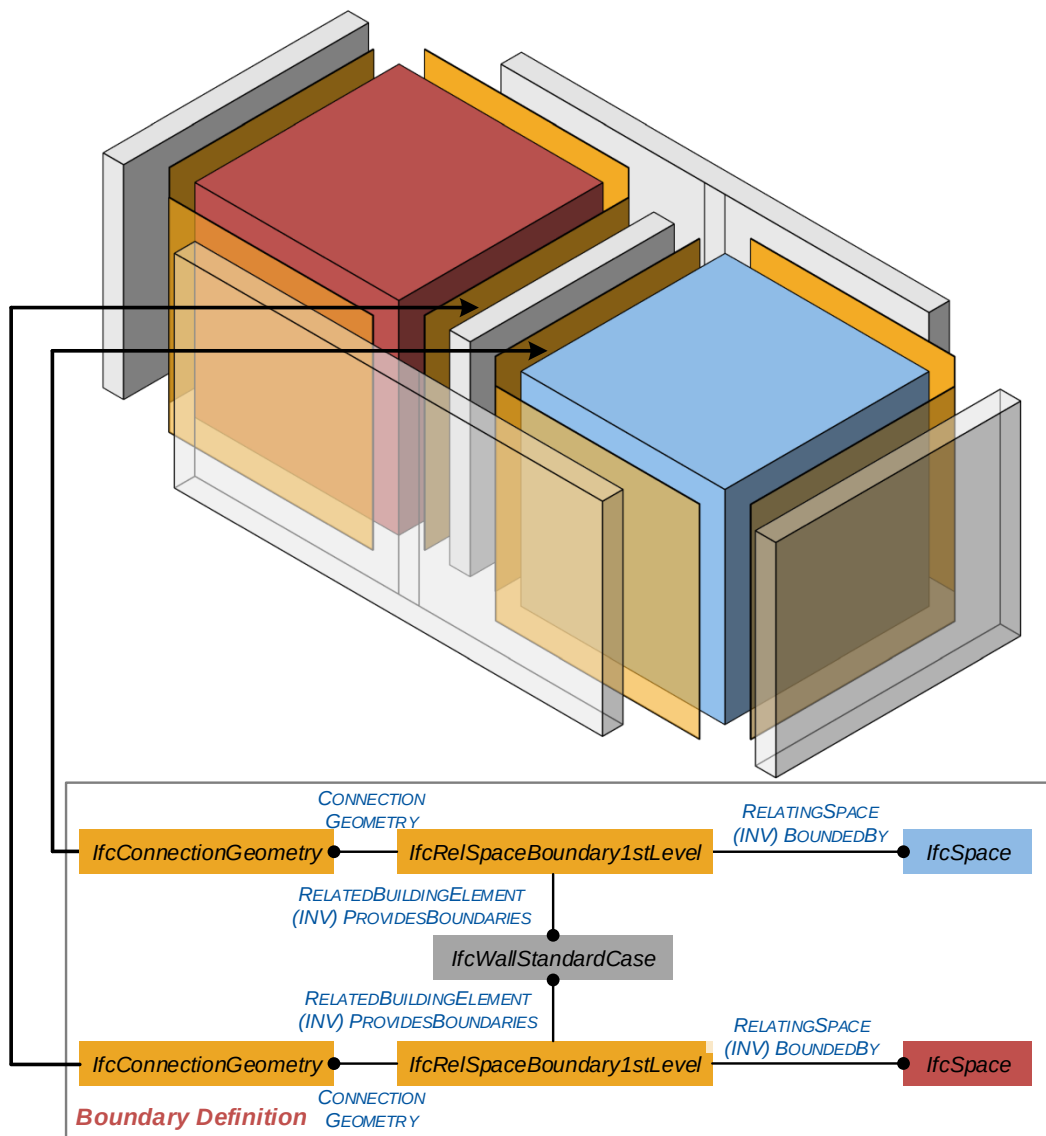


Abbildung 4.18: 1st Level Space Boundaries für zwei Räume, getrennt mit einer *IfcWallStandardCase*.

Das Konzept „Space Boundaries 2nd Level“ ist der Entität *IfcSpace* zugewiesen. Abbildung 4.19 zeigt den semantischen Teil des Konzepts als Instanzdiagramm. Zu erkennen sind die Verbindungen von *IfcSpace* mit einem *IfcElement* mittels *IfcRelSpaceBoundary2ndLevel*. Zwei weitere *IfcRelSpaceBoundary2ndLevel* Entitäten werden zur Definition von Beziehungen zwischen überlagernden Space Boundaries und zur eigentlichen Definition von 2nd Level Space Boundaries benötigt. Die Attribute

PARENTBOUNDARY mit dem inversen Attribut INNERBOUNDARIES sind für die Kopplung von Space Boundaries für Fenster, Türen und Öffnungen zu Space Boundaries von Wänden und Decken erforderlich. Die Attribute CORRESPONDINGBOUNDARY und CORRESPONDS werden zur Verbindung von gegenüberliegenden Space Boundaries verwendet.

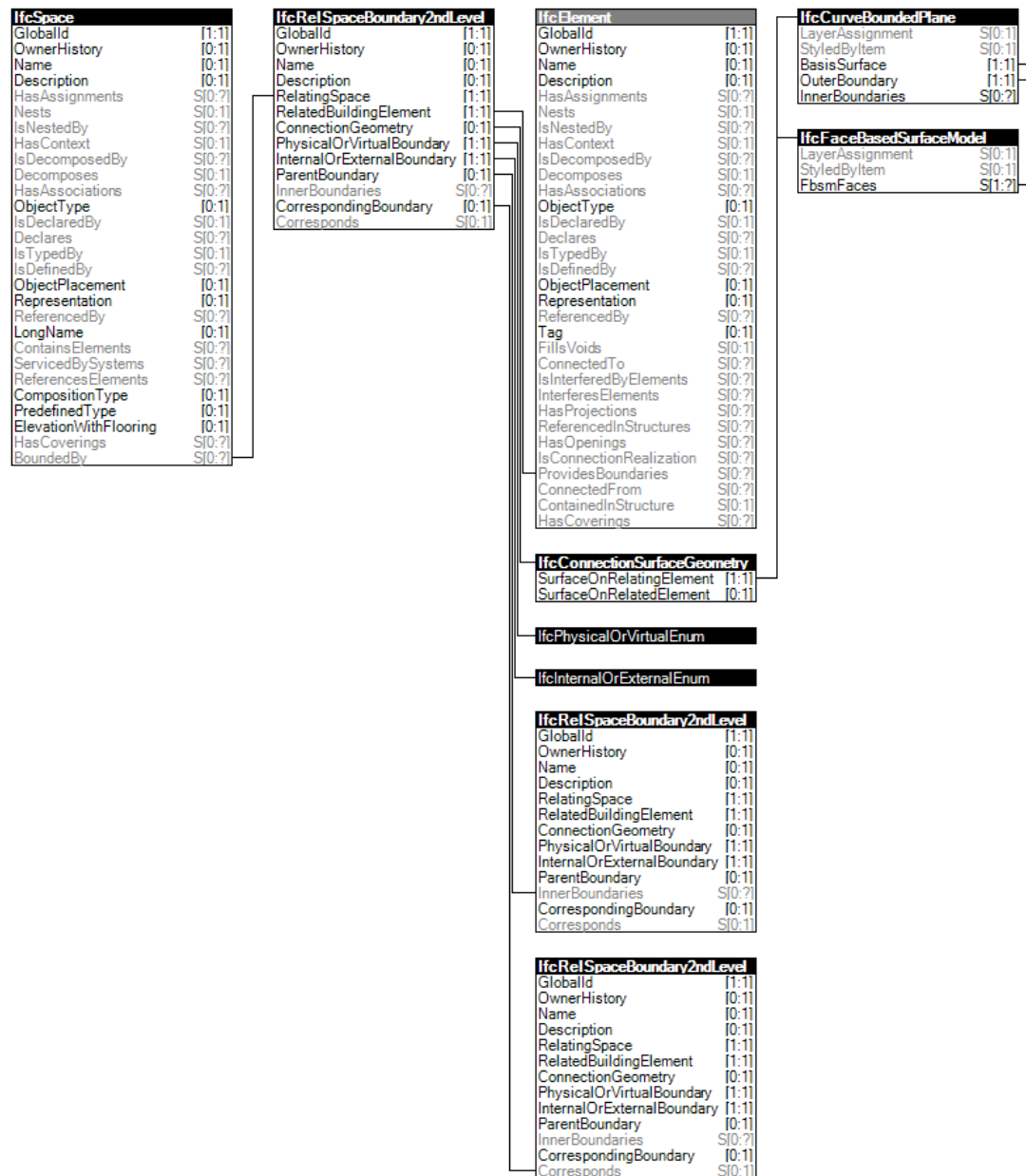


Abbildung 4.19: Instanzdiagramm des Konzepts zur Definition der 2nd Level Space Boundaries für *IfcSpace*.

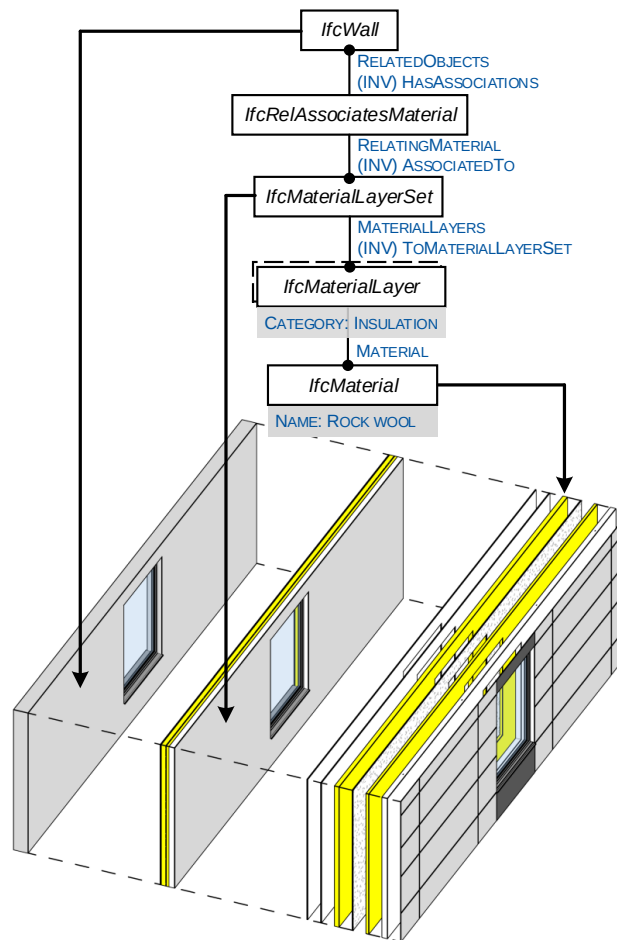


Abbildung 4.21: Aufbau einer Wand im IFC-Datenmodell zur Spezifizierung der Materialeigenschaften. Dargestellt ist die Assoziation der einzelnen Wandschichten (*IfcMaterialLayer*).

Die einzelnen Schichten geben die Schichtdicke wieder und darüber hinaus wird auf die Definition der eigentlichen Materialien mittels PSets von *IfcMaterial* verwiesen. Für die Simulation einer Wand relevante PSets sind:

- ▷ PSet_MaterialCommon/ MassDensity: Dichte in $[\text{kg}/\text{m}^3]$ / *IfcMassDensityMeasure*];
- ▷ PSet_MaterialThermal/ SpecificHeatCapacity: spezifische Wärmekapazität in $[\text{J}/(\text{kgK})]$ / *IfcSpecificHeatcapacityMeasure*];
- ▷ PSet_MaterialThermal/ ThermalConductivity: Wärmeleitfähigkeit in $[\text{W}/(\text{mK})]$ / *IfcThermalConductivityMeasure*];

- ▷ PSim_Material/ Emissivity: Emissionsgrad in $[- / IfcReal]$;
- ▷ PSim_Material/ CoefficientOfHeatTransfer: Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung in $[W/(m^2 K) / IfcThermalTransmittanceMeasure]$.

Die Struktur der Materialeigenschaften werden im Konzept „Material Layer Set“ für Wände und im Konzept „Material Constituent Set“ für bspw. Fenster oder Türen definiert. Eine Instanziierung des Konzepts befindet sich in Abbildung 4.21. Das Konzept wird in diesem Fall speziell für *IfcWall* angewandt. Damit das Konzept allgemein Anwendung findet, wird anstelle von *IfcWall* die abstrakte Superklasse *IfcObjectDefinition* für die Definition verwendet.

TGA-Komponenten Die verschiedenen TGA-Komponenten sind jeweils durch eigene Entitäten im IFC-Modell repräsentiert. Ist dies nicht der Fall, da die jeweilige Komponente nicht im IFC-Datenmodell definiert ist, kann die Entität *IfcUnitaryEquipment* als allgemeine TGA-Komponente verwendet werden (Siehe im Anhang A.2, ab Seite 193).

Die benötigten TGA-Komponenten sind Subtypen von *IfcDistributionFlowElement* und weisen dementsprechend identische Attribute auf. Darüber hinaus sind individuelle Regeln und spezialisierte PSets sowie QSets definiert.

Die Methode der PSets und QSets ist die zentrale Funktion für die Speicherung und den Transport der relevanten Parameter für die Simulation. Nachfolgend wird die Notwendigkeit der dynamisch erweiterbaren Properties am Beispiel der *IfcPump* veranschaulicht.

Für die Simulation der Pumpe sind die folgenden Parameter relevant:

- ▷ Förderhöhe in [m];
- ▷ Fördervolumenstrom in $[m^3/s]$;
- ▷ Leistungsbedarf in [W];
- ▷ Wirkungsgrad in [%];
- ▷ Pumpenkennlinie als Funktion;
- ▷ Durchmesser Laufrad in [m];
- ▷ Antrieb als String (direkt/ indirekt);
- ▷ Umdrehungszahl in [Hz];
- ▷ Betriebsart als String (variabel/ konstant).

Die folgenden Properties sind nicht vom IFC4-Datenmodell standardisiert vorgegeben, so dass eigens definierte Properties in Form von *IfcPropertySingleValue* mit dem jeweiligen primären Datentyp hinzugefügt werden müssen:

- ▷ Förderhöhe in [m/ *IfcPressureMeasure*];
- ▷ Fördervolumenstrom in [m³/s/ *IfcVolumetricFlowRateMeasure*];
- ▷ Leistungsbedarf in [W/ *IfcPowerMeasure*];
- ▷ Wirkungsgrad in [%/ *IfcReal*].

Darüber hinaus werden Properties für die Betriebsart und Pumpenkennlinie benötigt. Die Betriebsart gibt an, ob der Druck konstant gehalten oder variabel reguliert wird. Dementsprechend ist dieses PSet in Form eines *IfcPropertyEnumeratedValue* formuliert. Die Abbildung der Pumpenkennlinie, eine Funktion mit mehreren Parametern, wird durch – *IfcComplexProperty* – ermöglicht. Dieser Property Typ erlaubt das Nesten von Properties jeglicher Art, ebenfalls *IfcComplexProperty*. Diese Flexibilität ermöglicht die Definition einer Funktion. Die Variablen und Parameter der Funktionsgleichung sind einzeln beschrieben und werden *IfcComplexProperty* zugeschrieben. Das Konzept „Property Sets for Performance“ erlaubt die Integration dieser Funktion.

Alle Properties zur Darstellung der notwendigen Parameter sind mittels des Konzepts „Property Sets for Objects“ der jeweiligen Entität zugeordnet. Weitere Konzepte sind zur korrekten Abbildung aller benötigten Funktionalitäten spezifiziert.

Die Typisierung erfolgt entsprechend dem Konzept „Object Typing“. Die jeweilige Entität ist mit *IfcTypeObject* und dem Attribut *ISTYPEDBY* mittels *IfcRelDefinesByType* verbunden, bspw. *IfcPumpType*.

Damit die TGA-Komponenten miteinander im Modell verbunden werden können, müssen Ports spezifiziert sein; dies erfolgt mit dem Konzept „Port Nesting“. Dieses Konzept erlaubt die Definition von möglichen Verbindungen gemäß des jeweiligen Systemtyps, der Fließrichtung und Properties für die jeweilige Verbindung. Darüber hinaus wird mit diesem Konzept die geometrische Repräsentation der jeweiligen TGA-Komponente dargestellt. Die Ports enthalten die Attribute: *PORTNAME*, *FLOW* und *SYSTEMTYPE*. *PORTNAME* wird zur Definition des Ein- (Inlet) oder Ausgangs (Outlet) verwendet. *FLOW* gibt an, ob dieser Port in Flussrichtung abwärts (SINK) oder aufwärts (SOURCE) liegt. *SYSTEMTYPE* definiert, ob dieser Port für Heizsysteme (HEATING), Lüftungssysteme (AIRCONDITIONING), etc. verwendet wird. Tabelle 4.4 zeigt beispielhaft die Definition des Konzepts für eine Pumpe. Definiert sind der Stromanschluss und der Ein- und Ausgang zum Anschluss an das System. Der Systemtyp ist für In- und Outlet „NOTDEFINED“, da die Pumpe bspw. für ein Heizungssystem (HEATING) oder Warmwassersystem (WATERSUPPLY) verwendet werden kann.

Tabelle 4.4: Definition der Properties des Konzepts „Port Nesting“ zur Spezifikation der Ports einer Pumpe.

PORTNAME	FLOW	SYSTEMTYPE
Power	SINK	ELECTRICAL
Inlet	SINK	NOTDEFINED
Outlet	SOURCE	NOTDEFINED

Abbildung 4.22 zeigt beispielhaft die Verbindung zwei instanziierten TGA-Komponenten eines Abluftsystems (EXHAUST). *IfcRelConnectsPorts* verweist auf die jeweils verbundenen *IfcDistributionPorts*. Hingegen Abbildung 4.23 zeigt auf, wie ein gesamtes Heizungssystem entsprechend verbunden im IFC-Modell aufgebaut wird.

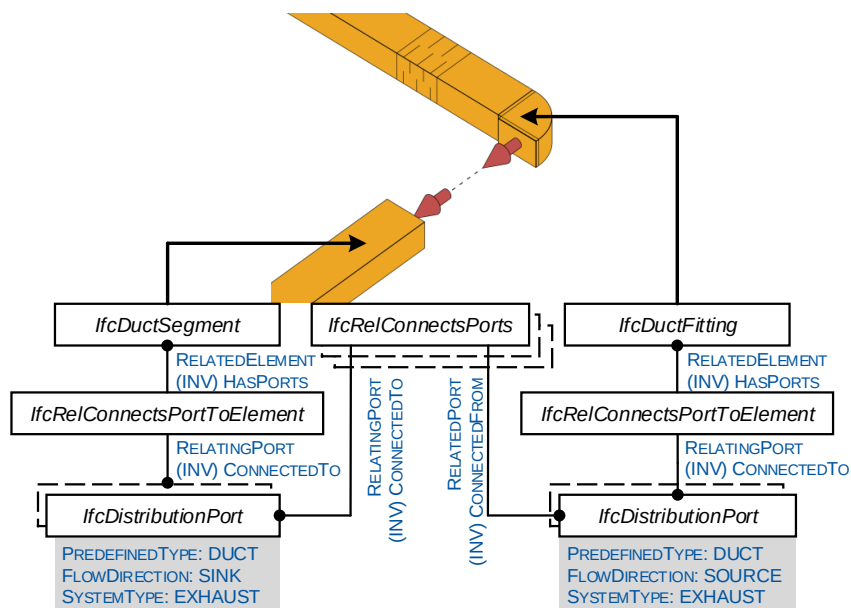


Abbildung 4.22: Verbindung von TGA-Komponenten *IfcDuctSegment* und *IfcDuctFitting* im IFC-Modell.

Die hier aufgeführten Konzepte „Property Sets for Objects“, „Object Typing“ und „Port Nesting“ stellen die Konzepte dar, die für die TGA-Komponenten definiert sind. Zusätzlich sind spezialisierte, simulationsrelevante Properties mittels dem Prefix PSim den jeweiligen TGA-Komponenten zugeordnet.

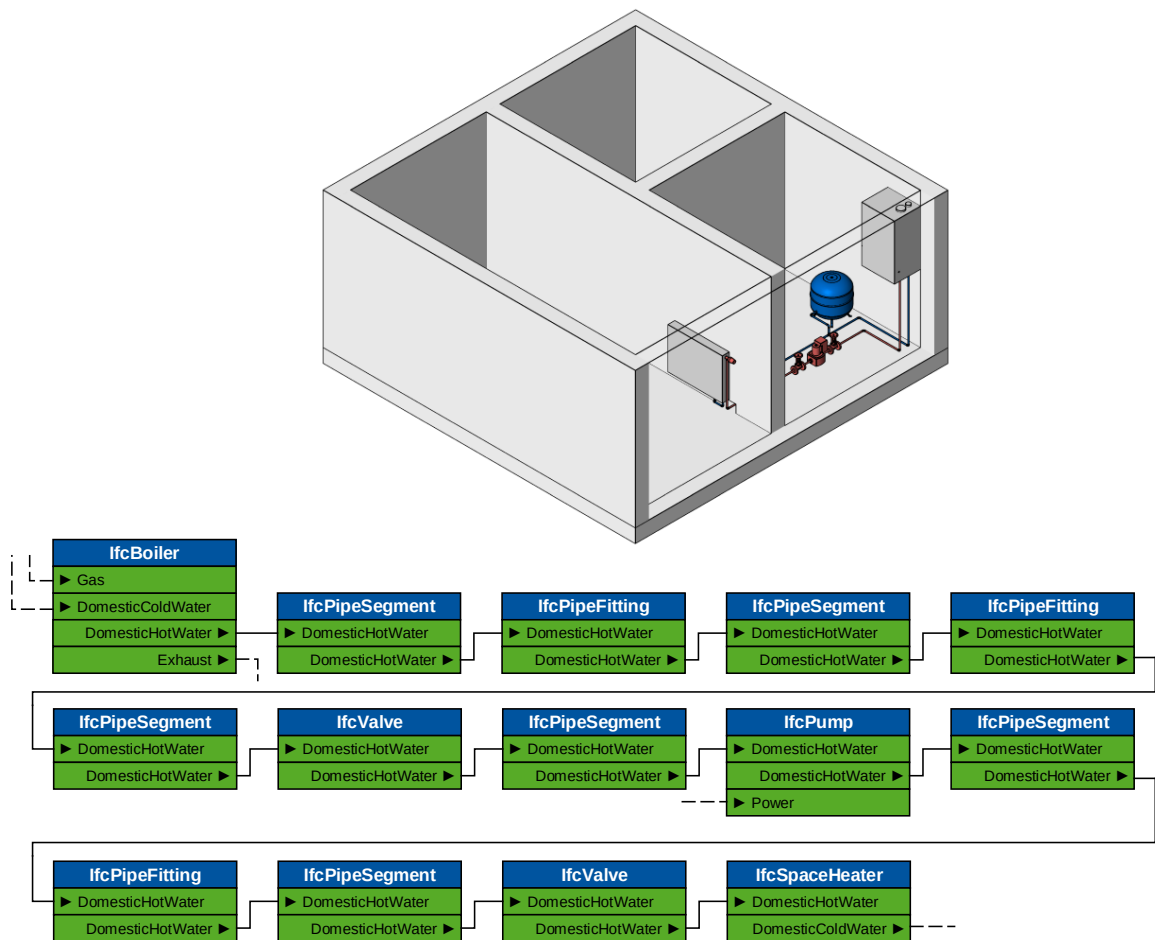


Abbildung 4.23: Verbindung von TGA-Komponenten eines beispielhaften Heizungssystems im IFC-Modell.

Äußere Lasten Standortbezogene Wetterdaten stellen die äußeren Lasten dar, die für die Simulation benötigt werden. Die relevanten Daten sind in einem Testreferenzjahr (Test Reference Year (TRY))-Wetterdatensatz gespeichert. Diese Datensätze sind für Regionen definiert; bspw. befindet sich die Stadt Aachen in der Region Nummer fünf von insgesamt 15 verschiedenen Regionen. Zusätzlich existieren verschiedene Typen von TRY-Datensätzen, die für bestimmte Szenarios entwickelt wurden (heißer Sommer, kalter Winter, mittleres Jahr, etc.). Die TRY-Datensätze werden jährlich aktualisiert und aus historischen Daten gebildet, so dass ein Bezugszeitraum für jeden Datensatz angegeben ist.

Die beschriebenen Daten müssen dem Modell hinterlegt werden, damit eindeutig ist, welche äußeren Lasten der Simulation zu Grunde liegen. Teilweise sind die notwendigen Charakteristika

bereits im IFC-Modell auf der Gebäudeebene (*IfcBuilding*) dokumentiert. Das spezialisierte PSet *Pset_OutsideDesignCriteria* bietet das Property *WeatherDataStation*, womit die Wetterstation referenziert wird. Die in diesem PSet zusätzlich definierten Properties beziehen sich ebenfalls auf Wetterdaten, jedoch nur für zeitpunktbezogene Daten wie Wetterdatenzeitpunkt, Cooling Design Day, etc. Die für die dynamische Simulation relevanten zeitraumbezogenen Daten sind in dem TRY-Wetterdatensatz gespeichert.

Zur eindeutigen Definition der äußeren Lasten bzw. des TRY-Wetterdatensatzes müssen zwei weitere Properties definiert sein, die auf der Gebäudeebene dem PSet *PSim_Building* zugeordnet sind:

- ▷ TRYTYPE als *IfcPropertySingleValue* mit dem primären Datentyp *IfcLabel*;
- ▷ TRYPERIOD als *IfcPropertyBoundedValue* mit dem primären Datentyp *IfcDateTime*.

Durch die aufgeführten Properties kann der TRY-Wetterdatensatz eindeutig definiert werden. Die Lokalisierung des extern gespeicherten Datensatzes wird durch eine Ergänzung des Konzepts „Document Association“ um einen Uniform Resource Identifier (URI) mittels *IfcURIReference* ermöglicht.

Weiterhin muss von dem Simulationstool für die eigentliche Simulation eine Höhenkorrektur der Wetterdaten zu dem betrachteten Gebäude vorgenommen werden. Die Information über die Höhe des zu betrachtenden Gebäudes bzw. der Etage wird dem Attribut *ELEVATIONOFREFHEIGHT* der Entität *IfcBuilding* entnommen. Zugang zu diesem Attribut wird durch das Konzept „Building Attributes“ gewährleistet.

Interne Lasten Die für die Emission von sensiblen und latenten Lasten relevanten Quellen sind Personen, Maschinen und Beleuchtung. Diese Emissionen müssen über den gesamten Betrachtungszeitraum simuliert werden, damit Randbedingungen geschaffen werden, welche die thermische Behaglichkeit durch passive oder aktive Maßnahmen garantieren.

Die internen Lasten werden im IFC4-Schema als Properties von *IfcSpace* definiert; bspw. sind die folgenden Properties bereits enthalten:

- ▷ *Pset_SpaceOccupancyRequirements/OccupancyNumberPeak*: Maximale Anzahl Personen in [–/ *IfcCountMeasure*];
- ▷ *Pset_SpaceThermalLoadPHistory/TotalSensibleLoad*: Gesamte sensible Lasten oder Energiegewinne in [W/ *IfcPowerMeasure*];
- ▷ *Pset_ThermalLoadDesignCriteria/AppliancePercentLoadToRadiant*: Prozentualer Anteil der sensiblen Lasten an der Strahlungswärme in [%/ *IfcPositiveRatioMeasure*];
- ▷ *Pset_SpaceThermalLoadPHistory/Lighting*: Beleuchtungslasten in [W/ *IfcPowerMeasure*].

Die aufgeführten Properties sind jedoch zeitpunktbezogen und somit nicht für eine dynamische, zeitraumbezogene Simulation geeignet. Demzufolge müssen die Properties der internen Lasten für geplante bzw. vorhergesagte Lasten spezifiziert werden.

Die für die internen Lasten benötigten Parameter sind aufgeteilt in Emissions- bzw. Aktivitätsgrad in W, maximale Anzahl an Personen und Maschinen sowie die spezifische Wärmeleistung der Beleuchtung in W/m^2 . Zusätzlich wird jeweils für Personen, Maschinen und Beleuchtung der konvektive Anteil an der gesamten Wärmelast benötigt. Diese Parameter stellen im Simulationsprogramm Maximalwerte dar, so dass diese zur Abbildung der zeitlichen Variabilität mit entsprechenden sekundenbasierten Prozentwerten multipliziert werden. Diese wechselnden Randbedingungen zur Definition der internen Lasten sind einer der Hauptcharakteristika der dynamischen Simulation. Detaillierte Zeitpläne definieren in Form von Prozentwerten die verändernden Wärmeeinträge oder -verluste. Der variierende Aufenthalt von Personen in einem Büro an einem Wochentag, das Profil der Beleuchtung an einem Sommertag oder die Wärmeleistung der sich im Standby befindlichen elektrischen Geräte am Wochenende sind Beispiele für Informationen, die aus den Zeitplänen abgeleitet werden. Die Zeitpläne können sekunden-/ minuten-/ stunden-/ wochen-/ monats-/ ...oder saisonbasiert sein. Die Möglichkeit von sich wiederholenden Mustern hat hierbei eine große Relevanz. Bspw. werden Profile von Arbeits- oder Urlaubswochen über einen Betrachtungszeitraum mehrfach benötigt, so dass zur Reduktion der Datenerfassung identisch definierte Zeitpläne lediglich einmal erfasst werden müssen.

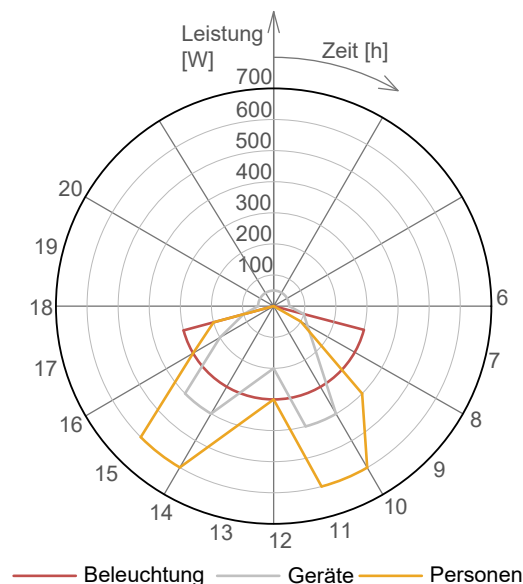


Abbildung 4.24: Stundenbasiertes Profil für interne Lasten in W an einem beispielhaften Arbeitstag.

Abbildung 4.24 zeigt beispielhaft ein stundenbasiertes Profil für interne Lasten an einem Arbeitstag. Skizziert in einem Netzdiagramm sind beispielhaft Profile für die eingetragene Leistung von Beleuchtung, Geräte und Personen in W über einen stundenbasierten Arbeitstag.

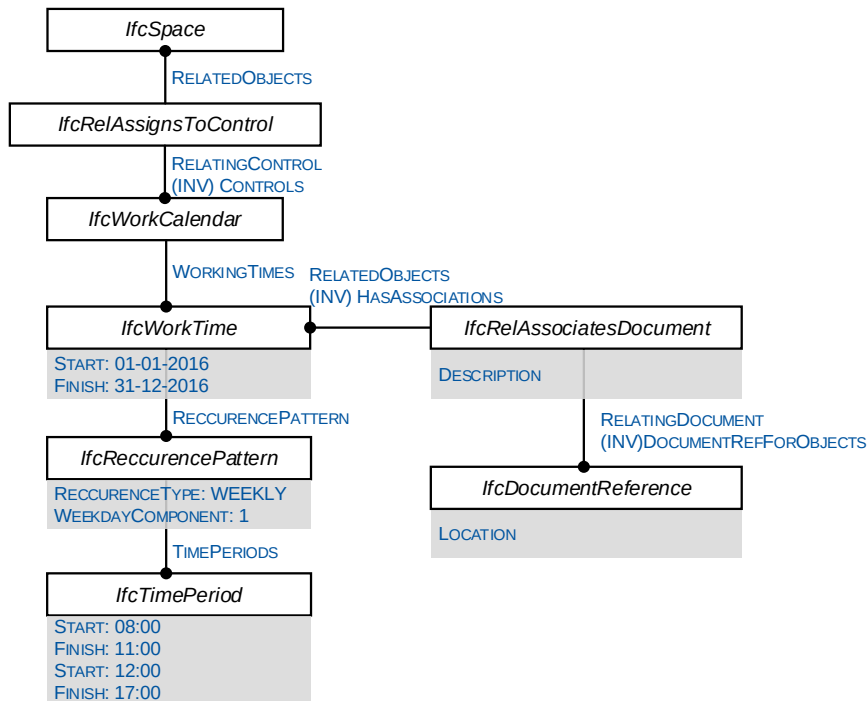


Abbildung 4.25: Definition von Anwesenheitsprofilen für Montage im Jahr 2016, in IFC.

Damit diese Funktionalität abgebildet werden kann, muss ein neues Konzept für die MVD entwickelt werden. Aufgrund einer allgemeinen Anwendbarkeit stellt *IfcObject* das Wurzelement des neuen Konzepts dar. Es werden Funktionalitäten von *IfcPerformanceHistory* mittels der Relation zur Einschränkung, Steuerungs- und Regelungsweisung *IfcRelAssignsToControl* eingebunden. *IfcPerformanceHistory* wird grundsätzlich dazu genutzt, die Leistung einer Instanz aufzuzeichnen oder vorzugeben. Mit dieser Entität können Daten einer MSR aufgezeichnet oder Profile von bspw. internen Lasten vorgegeben werden. Damit die in den Properties definierten internen Lasten ein Profil abbilden können, werden mit dem Attribut *ISDEFINEDBY* und der Entität *IfcRelDefinesByProperties* Properties vom Typ *IfcPropertyReferenceValue* angebunden. Diese referenzieren mit dem Attribut *PROPERTYREFERENCE* auf die Entitäten *IfcRegularTimeSeries* und *IfcIrregularTimeSeries*. Diese beiden Entitäten sind Subtypen von *IfcTimeSeries*, womit Zeiträume mit den Attributen *STARTTIME* und *ENDTIME* festgelegt werden können. Eine weitere wichtige Funktionalität wird durch die objektivi-

zierte Relation *IfcExternalReferenceRelationship* geboten. Die für die Simulation relevanten Profile werden bspw. in einer externen TXT-Datei sekundenbasiert gespeichert. Das Attribut *LOCATION* wird dazu genutzt, die externe Referenz anzugeben, um somit auf die in der TXT-Datei vorhandenen Daten zu verweisen. Abbildung 4.25 zeigt beispielhaft eine Konfiguration des Konzepts.

Grundsätzlich können damit den Properties für bestimmte Zeiträume Profile, welche in der Simulationsumgebung definiert sind, angehängt werden.

Thermische Zone Die thermische Zone wird in Form einer Gruppierung von Räumen bzw. *IfcSpaces* gebildet. Gruppierungsfunktionen dieser Art sind durch die Entitäten *IfcZone* und *IfcSpatialZone* möglich.

Die Entität *IfcZone* ist ein Subtyp der Entität *IfcGroup*, dessen Attribut *ISGROUPEDBY* mit dem Konzept „Group Assignment“ auf die Verbindungsrelation *IfcRelAssignsToGroup* verweist. Zusätzlich wird eine Regel angegeben, die vorgibt, dass nur die folgenden Entitäten mit der dadurch gegebenen Gruppierungsfunktion zusammengefasst werden dürfen:

- ▷ *IfcSpace*;
- ▷ *IfcZone*;
- ▷ *IfcSpatialZone*.

Durch diese Spezialisierung von *IfcZone* wird somit eine Gruppierung von *IfcSpaces* bzw. *IfcSpatialZones* möglich.

Die Entität *IfcSpatialZone* ist eine räumliche Darstellung, die mittels inverser Attribute ebenfalls eine Gruppierungsfunktion beinhaltet. Die Gruppierungsfunktion ist dabei nicht nur auf *IfcSpaces* spezialisiert, sondern auch auf weitere Objekte, wie bspw. TGA-Komponenten oder architektonische Elemente, welche mit dem Konzept „Spatial Container“ zusammengefasst werden. Dieses Konzept bindet die Entität *IfcRelReferencedInSpatialStructure* mit ein, deren Attribut *RELATEDELEMENTS* auf den abstrakten Supertyp *IfcProduct* zeigt.

Da *IfcSpatialZone* ebenfalls ein Subtyp von *IfcProduct* ist, sind grafische Repräsentationen möglich. Das Attribut *REPRESENTATION* verweist auf die Entität *IfcProductRepresentation*, womit die geometrischen und topologischen Darstellungsmöglichkeiten von IFC4 eingebunden wird.

Abbildung 4.26 veranschaulicht die Funktionsweise der Entität *IfcSpatialZone*. Der obere Teil der Abbildung zeigt zwei unterschiedliche Darstellungen von identischen drei Räumen: Raum Nummer 1 (hellblau), 2 (rot) und 3 (dunkelblau). Im unteren Teil der Abbildung ist das entsprechende Konzept instantiiert.

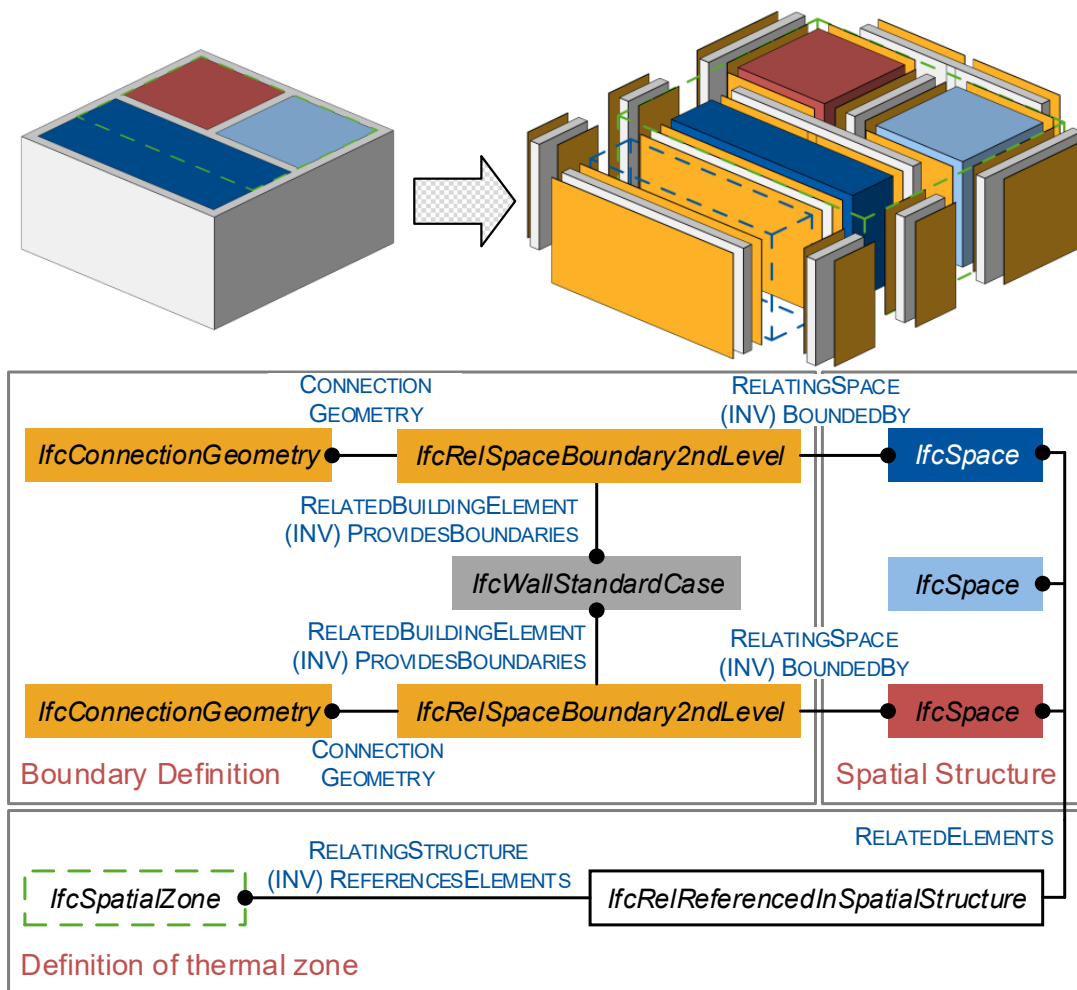


Abbildung 4.26: Darstellung der Funktion einer *IfcSpatialZone* (grün) anhand dreier Räume, die zwei verschiedene thermische Zonen darstellen sollen. Oben, links: Die drei Räume im Modell.

In der Abbildung ist ein Szenario dargestellt, in dem der große, dunkelblaue Raum zwei unterschiedliche thermische Zonen vorweist (bspw. Trennung der Süd- und Nordseite eines großen Raumes). Der untere Teil des Raumes bildet eine eigene thermische Zone, wohingegen der obere Teil des Raumes mit den beiden kleineren Räumen zu einer thermischen Zone zusammengefasst wird. Das mit dem grünen Rahmen abgegrenzte Volumen stellt die grafische Darstellung der *IfcSpatialZone* im Explosionsdiagramm dar. Sie umfasst die entsprechend *IfcSpaces* und wird durch *IfcProductRepresentation*

umgesetzt. Die *IfcSpace* des großen Raums muss entsprechend in zwei unterschiedliche *IfcSpaces* aufgeteilt werden damit die Raumvolumina mit der geometrischen Repräsentation übereinstimmen und darüber hinaus die Space Boundaries korrekt sind. Die Trennung wird durch die Modellierung von zwei entsprechenden *IfcSpaces* realisiert. Diese sind mit einem virtuellen Element, gegeben durch *IfcVirtualElement*, voneinander getrennt. Das Explosionsdiagramm veranschaulicht die Komplexität des Themas, die dadurch begründet wird, dass mehrere Sachverhalte bei der Bildung der Zone beachtet werden müssen. Zum einen müssen die Geometrien der *IfcSpaces* mit der Geometrie der *IfcSpatialZone* einander entsprechen, da ansonsten die Space Boundaries nicht mit der grafischen Darstellung der *IfcSpatialZone* übereinstimmen. Zum anderen müssen *IfcSpaces* entsprechend für die finale thermische Zone gebildet werden, die wiederum eine Trennung beider *IfcSpaces* durch ein *IfcVirtualElement* verlangt.

Versorgungssysteme Die Versorgungssysteme werden von den verschiedenen Gewerken gebildet, welche die jeweiligen Räume bzw. thermischen Zonen bedienen. Wird eine thermische Zone bspw. von einem Heizungssystem versorgt, dann stellt dieses das Versorgungssystem der thermischen Zone dar.

Die einzelnen gebäudetechnischen Komponenten, welche das Versorgungssystem prägen, sind Subtypen der Entität *IfcDistributionFlowElement*. Das Versorgungssystem wird im IFC-Schema durch die Entität *IfcDistributionSystem* repräsentiert und mit dem Konzept „Group Assignment“ werden die einzelnen TGA-Komponenten dem Versorgungssystem zugeteilt. Das Attribut *ISGROUPEDBY* erlaubt den Verweis auf *IfcRelAssignsToGroup*, womit der Supertyp *IfcDistributionFlowElement* eingebunden wird.

Mess-, Steuer- und Regeleinrichtung Die MSR wird im IFC-Schema durch mehrere Entitäten dargestellt. Abbildung 4.27 zeigt im unteren Teil den theoretischen Regelkreis der MSR als Blockdiagramm. Der obere Teil der Abbildung veranschaulicht eine beispielhafte Umsetzung in IFC4. Die in diesem Fall verwendeten Entitäten sind mit blauen Kästen dargestellt, deren Verbindungen untereinander sind durch die Pfeile ersichtlich. Die grünen Kästen in Kombination mit den Pfeilen geben Informationen darüber, welche Signale bzw. Daten zu welchem Port weitergegeben werden. Der Sollwert in Abhängigkeit von der Zeit wird vom Wert $r(t)$ dargestellt, wohingegen der Wert $y(t)$ die Regelgröße darstellt. Die Regelstrecke ist in diesem Fall durch einen Schalter (*IfcSwitchingDevice*) repräsentiert.

IFC4 bietet zusätzlich noch die Möglichkeit, die hier dargestellte Regelstrecke mit einer Entität zusammenzufassen. Die entsprechenden Funktionen *IfcUnitaryControlElement* ähneln den Funktionen der Entität *IfcUnitaryEquipment* (siehe Kapitel A.2 *IfcUnitaryEquipment* im Anhang A.2 auf Seite

193). Dadurch können solche komplexe Konstrukte einfacher gehandhabt werden und fungieren als Vorlage.

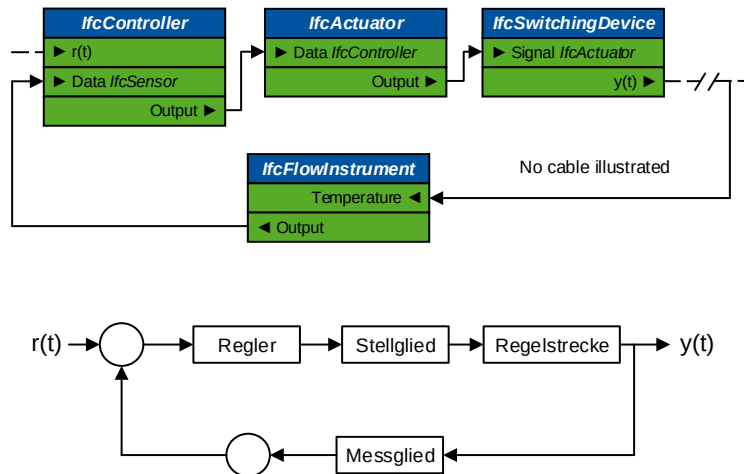


Abbildung 4.27: Beispielhafte Umsetzung eines Standard-Regelkreises gemäß IFC4-Schema.

Abbildung 4.28 zeigt beispielhaft einen proportionalen Regler (*IfcController*) für einen Schalter (*IfcSwitchingDevice*) und deren Verbindungen. Die Verbindung ist in diesem Fall nicht nur durch die Ports gegeben, es wird ebenfalls eine Ebene speziell für die MSR durch die Entität *IfcRelFlowControlElements* gegeben. Zusätzlich ist ein Ausschnitt aus den Properties des proportionalen Reglers aufgelistet. Dargestellt sind die Properties zur Definition der Konstanten eines PID-Reglers und des Reglertyps (in diesem Fall: proportional).

Die für die internen Lasten beschriebenen Zeitpläne zur Abbildung von dynamischen Profilen gelten ebenfalls für die TGA und bilden die Grundlage zur Auslegung der MSR. Die Abbildung der dynamischen Profile von bspw. Ventilen, Pumpen oder Heizkesseln werden ebenfalls mit den definierten Konzepten der internen Lasten (siehe Seite 145), bezogen auf die jeweilige gebäudetechnische Komponente, umgesetzt.

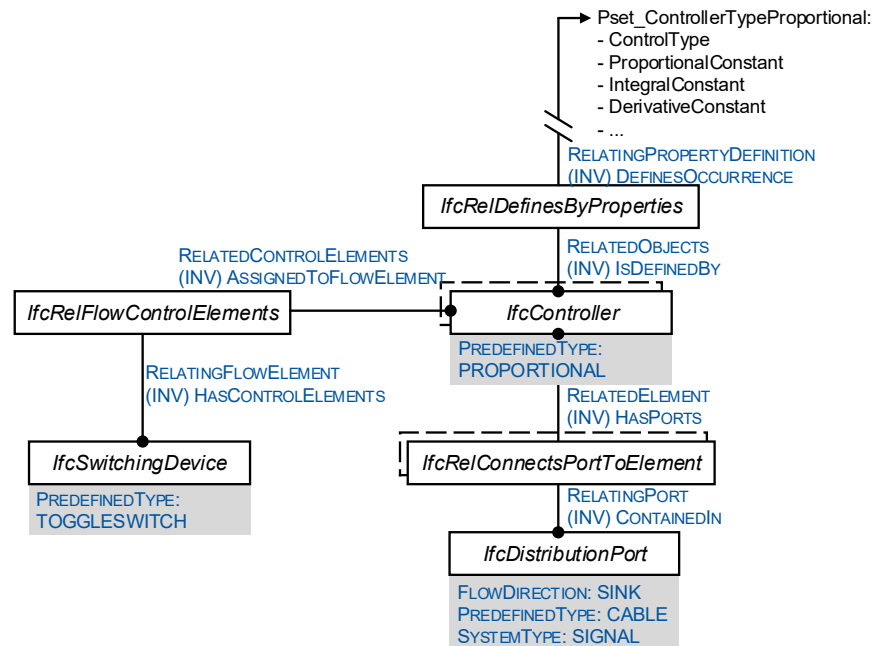


Abbildung 4.28: Beispielhafte Umsetzung eines Reglers gemäß IFC4-Schema.

Exchange Definition der MVD Im Zuge der Entwicklung der MVD sind die einzelnen Entitäten abgegrenzt und die Informationen als Konzepte den jeweiligen Entitäten in den Definitionen für den Austausch (engl.: Exchange Definition) zugeordnet. Die MVD, bzw. die Verwendung der Konzepte aller Entitäten, muss im letzten Schritt für den Ex- und/ oder Import spezifiziert werden. Die Konzepte können für die Schnittstelle Anforderungen vorweisen. In Abhängigkeit von der Anforderung ergeben sich bei der Validierung der Schnittstelle unterschiedliche Ergebnisse, indem entweder Fehler oder Warnungen ausgegeben werden oder keine Überprüfung vorgenommen wird:

- ▷ Obligatorisch (engl.: mandatory): Fehler, falls nicht wahr;
- ▷ Empfohlen (engl.: recommended): Warnung, falls nicht wahr;
- ▷ Nicht relevant (engl.: not-relevant): Keine Überprüfung;
- ▷ Nicht empfohlen (engl.: not-recommended): Warnung, falls wahr;
- ▷ Ausgeschlossen (engl.: excluded): Fehler, falls wahr.

Für die Spezifizierung des Austauschs muss beachtet werden, dass grundlegende Konzepte als obligatorisch für den Austausch angesehen werden. Solche obligatorischen Konzepte stellen die Informationen dar, die von der BIM-Plattform exportiert werden müssen und auch von dem BIM-

Werkzeug in jedem Fall verlangt werden. Darüber hinaus können empfohlene oder nicht empfohlene Anforderungen für bspw. unterschiedliche Gewerke festgelegt werden. Je nachdem welche Zielbibliothek des BIM-Werkzeugs für die Simulation verwendet wird, werden unterschiedliche TGA-Komponenten verlangt. Darüber hinaus können auch Informationen ausgeschlossen werden, wenn von einer Verwendung dieser abzuraten ist.

All diese Randbedingungen müssen für jedes angewendete Konzept und jede Entität bedacht und in der Exchange Definition entsprechend spezifiziert werden. Mit dem ifcDOC tool wird eine Übersicht in Form einer Matrix erstellt, die in der Dokumentation eingesehen werden kann.

Tabelle 4.5 gibt einen Einblick wie sich die Exchange Definition der MVD darstellt. Beispiele verschiedener Entitäten mit ausgewählten Konzepten und Anforderungen für die Schnittstelle sind aufgelistet. Zu erkennen ist, dass sich hinsichtlich der Konzepte Unterschiede hinsichtlich der Anforderung ergeben. Obligatorisch sind bspw. allgemeine Informationen zur Identifikation der BIM-Plattform durch das Konzept „Software Identity“, sowie die Definition der 2nd Level Space Boundaries, der Schichtaufbau einer Wand durch „Material Layer Set“ oder die Verwendung von Elementen zur Anbindung der MSR mittels dem Konzept „Control Assignment“. Abweichungen bei obligatorischen Anforderungen verursachen Fehlermeldungen. Das Konzept „Object Typing“ ist jeder gebäudetechnischen Komponente angehängt, da eine Typisierung in Frage kommt, aber nicht zwingend erforderlich ist. Das Konzept „Port Nesting“ ist ebenfalls empfohlen, da die Ports individuell definiert sein können und somit Abweichungen möglich sind. Abweichungen bei empfohlenen Anforderungen verursachen lediglich eine Warnung die aber keinen eigentlichen Fehler darstellen. Nicht relevant sind bspw. die PSets für allgemeine Entitäten wie *IfcDistributionSystem*. Diese PSets sind allgemein und werden deswegen auf einer detaillierteren Ebene bspw. einer Typ-Ebene überschrieben. Entsprechend findet eine Überprüfung der Erfüllung dieser Anforderungen nicht statt. Die Anforderung derart zu formulieren, dass ein Konzept nicht empfohlen oder ausgeschlossen wird, kann zwei Gründe haben: Entweder gibt es verschiedene Möglichkeiten eine Funktionalität abzubilden und es wird eine Option über der anderen präferiert oder es ist eine Funktionalität in IFC nicht korrekt abgebildet. Bspw. fasst die Entität *IfcSpatialZone* – ähnlich wie *IfcZone* – *IfcSpaces* zusammen und wird zur Bildung von Zonen (bspw. thermische Zonen) verwendet. Darüber hinaus bietet *IfcSpatialZone* ebenfalls die Option, diese Zone als eigenes Element grafisch darzustellen. Jedoch ist diese grafische Darstellung nicht ausgereift, so dass diese von den zusammengefassten *IfcSpaces* abweichen kann und sich Unterschiede hinsichtlich der Space Boundaries der *IfcSpaces* ergeben. Dadurch können in den nachgelagerten Prozessen Fehlkalkulationen entstehen. Aus diesem Grund wird in dieser MVD davon abgeraten die Entität *IfcSpatialZone* bzw. die entsprechenden Konzepte zu verwenden. Stattdessen soll die Entität *IfcZone* zur Bildung von thermischen Zonen verwendet werden (siehe hierzu die Erläuterung zu den thermischen Zonen auf Seite 148).

Tabelle 4.5: Beispielhafter Ausschnitt aus der Exchange Definition der MVD [i. A. a. Wimmer u. a., 2017].

Entität	Konzept	Anforderung	Farbe
<i>IfcRoot</i>	Software Identity	Obligatorisch	Grün
<i>IfcSpace</i>	Space Boundaries 2nd Level	Obligatorisch	Grün
<i>IfcWall</i>	Material Layer Set	Obligatorisch	Grün
<i>IfcControl</i>	Control Assignment	Obligatorisch	Grün
<i>IfcBoiler</i>	Object Typing	Empfohlen	Blau
<i>IfcPump</i>	Port Nesting	Empfohlen	Blau
<i>IfcDistributionSystem</i>	Property Sets for Objects	Nicht relevant	Hellgrau
<i>IfcSpatialZone</i>	Assignment to Group	Nicht empfohlen	Gelb
<i>IfcSpatialZone</i>	Spatial Container	Ausgeschlossen	Rot

Abbildung 4.29 zeigt eine Übersicht der gesamten Exchange Definition für die maßgeschneiderte MVD, in Form einer Matrix, erstellt im ifcDOC-Tool. Diese Übersicht zeigt auf der linken Seite die Entitäten, denen die in den Spalten gezeigten Konzepte zugeordnet sind. Die Anforderungen für diese Exchange Definition sind farblich gekennzeichnet:

- ▷ Obligatorisch: Grün;
- ▷ Empfohlen: Blau;
- ▷ Nicht relevant: Hellgrau;
- ▷ Nicht empfohlen: Gelb;
- ▷ Ausgeschlossen: Rot;
- ▷ Nicht anwendbar auf diese Entität: Dunkelgrau;
- ▷ Nicht für den Im- oder Export spezifiziert: Weiß.

Die Definition der Anforderungen muss für jedes Konzept für die angedachte Schnittstelle bestimmt werden. Die resultierende MVD wird in Form einer mvdXML-Datei zur Verfügung gestellt. Code 4.1 auf Seite 156 zeigt einen Ausschnitt aus der mvdXML-Datei einer entwickelten MVD. Das Format ist derart aufgebaut, das eingangs alle Konzeptvorlagen (ConceptTemplates) mit der erwähnten Hierarchie (Templates und Subtemplates) beschrieben sind. Jedes Konzept wird durch eine Universally Unique Identifier (UUID) eindeutig identifiziert. Dazu werden Regeln für die verwendeten Entitäten (EntityRules) und Attribute (AttributeRule) hierarchisch strukturiert. Nach den Konzeptvorlagen wird die eigentliche MVD definiert. Zunächst werden die allgemeinen Informationen wie Autor, Status, etc. gegeben um danach die Anwendung der Konzepte auf die jeweiligen Entitäten aufzulisten und diese


```

<mvdXML>
  <Templates>
    ...
    <ConceptTemplate uuid="3b8e69d9-..." name="Object Assignment" status="sample"
      applicableSchema="IFC4" applicableEntity="IfcObjectDefinition">
      <Definitions> ... </Definitions>
    </ConceptTemplate>
    <SubTemplates>
      <ConceptTemplate uuid="f567967f-..." name="Group Assignment" status="sample"
        applicableSchema="IFC4" applicableEntity="IfcGroup">
        <Definitions> ... </Definitions>
        <Rules>
          <AttributeRule RuleID="IsGrouped" AttributeName="IsGroupedBy">
            <EntityRules>
              <EntityRule EntityName="IfcRelAssignsToGroup">
                <AttributeRules>
                  <AttributeRule RuleID="RelatedObjects" AttributeName="
                    RelatedObjects">
                    <EntityRules>
                      <EntityRule EntityName="IfcProduct" />
                    </EntityRules>
                  </AttributeRule>
                </AttributeRules>
              </EntityRule>
            </EntityRules>
          </AttributeRule>
        </Rules>
      </ConceptTemplate>
    </SubTemplates>
  </Templates>
  ...
  <Views>
    <ModelView uuid="beabde7e-..." name="EnEffBIM" version="1.0" status="mandatory"
      author="Reinhard Wimmer" owner="RWTH...">
      <Definitions> ... </Definitions>
      <Roots>
        <ConceptRoot uuid="03cb54e5-..." name="IfcZone" status="sample"
          applicableRootEntity="IfcZone">
          <Definitions> ... </Definitions>
        </ConceptRoot>
        <Concepts>
          <Concept uuid="2a7f5c9a-..." name="Group Assignment" status="sample"
            override="false">
            <Definitions>
              <Definition> ... </Definitions>
            </Definitions>
          </Concept>
          <Template ref="f567967f-..." />
          <Requirements>
            <Requirement applicability="export" requirement="mandatory"
              exchangeRequirement="906a9022-..." />
          </Requirements>
          <TemplateRules operator="and">
            <TemplateRule Description="Group mechanism for spaces, to define
              thermal zones." Parameters="IsGrouped[Value]='IfcRelAssignsToGroup'
              AND RelatedObjects[Value]='IfcSpace'" />
          </TemplateRules>
        </Concepts>
      </Roots>
    </ModelView>
  </Views>
</mvdXML>

```

Code 4.1: Auszug aus der mvdXML einer entwickelten MVD (angepasst zur besseren Darstellung).

4.4 Level of Development

Die für diesen BIM-Anwendungsfall notwendigen LODs müssen den Daten- und Informationsfluss definieren, der das Ziel des Anwendungsfalls – die Simulation – ermöglicht. Grundsätzlich müssen die mindestens notwendigen Daten und Informationen in der Schnittstelle zwischen dem BIM-Gesamtkoordinator und dem BIM-Modellierer für die Simulation (siehe Abbildung 4.15) bedient werden [Hietanen u. Lehtinen, 2006]. Die Daten und Informationen werden in den dem Prozess zu Grunde liegenden Arbeitspaketen (siehe ab Seite 114) erzeugt. Es werden in der TGA Planung ganz allgemein die einzelnen Phasen der VDI 6026 durchlaufen (siehe im Anhang A.5 ab Seite 212), die wiederum auf den allgemeinen Lph der HOAI basieren. Da die Methode BIM den gesamten Lebenszyklus umspannt, müssen in der Definition der LODs nicht nur die Lph der HOAI betrachtet werden, sondern darüber hinaus ebenfalls die Betriebsphase.

Die LODs sind wie in Kapitel 3.4 umfassend erläutert für diesen Anwendungsfall auf die Modellinhalte bezogen und sind somit aus geometrischen und alphanumerischen Informationen zusammengesetzt, sie werden im Folgenden zur allgemeinen Modellbildung für das Gewerk der TGA generisch definiert.

Tabelle 4.6: Beispielhafte Zuordnung der LOD-Levels zu den Lph der HOAI und die Betriebsphase.

Lph/ Phase	LOD
1, Grundlagenermittlung:	100
2, Vorentwurfsplanung:	100
3, Entwurfsplanung:	200
4, Genehmigungsplanung:	210
5, Ausführungsplanung WP 1:	310
5, Ausführungsplanung WP 2:	320
5, Ausführungsplanung WP 3:	350
6, Vorbereitung der Vergabe:	ohne Bezug
7, Mitwirken bei der Vergabe:	ohne Bezug
8, Ausführung:	410
8, Ausführung:	450
9, Dokumentation, Erfassung:	500
Betrieb, FM	600

Tabelle 4.6³ konsolidiert die gängige Nummerierung der LODs, um einen beispielhaften Bezug zu den Lph der HOAI herzustellen. Die Lph 5 ist zusätzlich in die unterschiedlichen Werkpakete 1 bis 3 (WP 1:

³Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI Richtlinie 2552 Blatt 4: BIM – Anforderungen an den Datenaustausch.

Planungsbasis zur Abstimmung Rohbau, WP2: Planungsbasis Ausbau, WP3: Ausbauplanung) gemäß des Merkblatts „Qualität der Planung“ des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins unterteilt [DBV, 2015]. Die Lph 6 und Lph 7 haben keinen Bezug zu den LODs, da in diesen Phasen lediglich Subprozesse für den Vergabeprozess mit Daten und Informationen aus dem BIM-Modell abgeleitet werden. Die Ausführungsphase (Lph 8) setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Der erste Input stellt die Übernahme der Ausschreibungsergebnisse durch die beauftragten Firmen dar. Der zweite Input sind die Korrekturangaben des Bauherrn bzw. durchgeführte Veränderungen. Erst nachdem alle Korrekturen ins Modell eingepflegt sind und der Bestand aufgenommen ist, hat das Modell den „As built-Status“ und somit LOD 500. Für den Betrieb bzw. das Facility Management ist der LOD 600 vorgesehen.

Die Tabellen im Anhang A.16 bis A.23⁴ ab Seite 222 zeigen ausführlich wie beispielhaft generische LOD-Definitionen für die TGA, angelehnt an die Nummerierung der Tabelle 4.6 projektspezifisch ausformuliert werden können. Gemäß der VDI 6026 haben verschiedene Phasen der HOAI keine Planungsleistung für die TGA [VDI 6026, 2008] und dementsprechend wird für diese Phasen auch keine LOD-Definition spezifiziert.

Die für diesen BIM-Anwendungsfall benötigten Informationen werden in der Modellentwicklungsmatrix festgehalten (siehe hierzu die Erläuterungen zur Tabelle 2.6 auf Seite 56). Damit eine zielgerechte Modellierung der Fachmodelle garantiert ist und eine Simulation durchgeführt werden kann, müssen die notwendigen Parameter in der Schnittstelle zwischen dem BIM-Gesamtkoordinator und dem BIM-Modellierer für die Simulation kommuniziert werden. Das Datenaustauschanforderungsmodell stellt die Daten und Informationen dar, die bis zu diesem Datenaustausch im Modell eingepflegt und somit in den LODs erfasst sein müssen. Das Auswertungsmodell wird vor der Lph 4 (Genehmigungsplanung) erstellt und somit gelten die zu Grunde liegenden generischen Definitionen. Einen Einblick in die für die TGA relevanten generischen Definitionen gibt Tabelle 4.7. Diese Tabelle wurde im ersten Schritt aus den Anforderungen der VDI 6026 abgeleitet (siehe Anhang A.5 auf Seite 212) und den LOD Phasen zugeordnet. In Zusammenarbeit mit der Industrie wurde die Entwicklung der generischen LODs weiter ausgearbeitet um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten.

⁴Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI Richtlinie 2552 Blatt 4: BIM – Anforderungen an den Datenaustausch.

Tabelle 4.7: Ausschnitt aus den generischen Definition der TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 [VDI 6026, 2008].

LOD	Generische LODs
100	Modellierung des Flächenbedarfs in Zentralen, Schächten und abgehängten Decken auch im Vergleich zu alternativen Lösungsmöglichkeiten. ...
200	Modellierung aller Ver- und Entsorgungsnetze mit den wesentlichen Funktionsgruppen und Funktionselementen. ...
210	Funktionsschemata zur Darstellung der Funktionen der geplanten Anlagen mit den relevanten Anlagenbauteilen sowie alle für das Brandschutzkonzept notwendigen Darstellungen. ...

Tabelle 4.8 zeigt einen Ausschnitt aus der prozessorientierten Modellentwicklungsmatrix für das Anwendungsbeispiel. LODs beschreiben das jeweilige benötigte Level des Attributs/ der Information das für den Datenaustausch zwischen dem BIM-Gesamtkoordinator und dem BIM-Modellierer benötigt wird. Der MEA spezifiziert die Rolle, die für die Lieferung des Attributs in dem angegebenen Level verantwortlich ist.

Tabelle 4.8: Ausschnitt aus der prozessorientierten Modellentwicklungsmatrix für das Anwendungsbeispiel in der Schnittstelle zwischen BIM-Gesamtkoordinator und BIM-Modellierer.

Element	Attribut/ Information	LOD	MEA
Äußere Lasten	Klimaregion	100	TGA-Ingenieur
	Art des TRY	100	TGA-Ingenieur
	...		
Innenwand	Wärmewiderstand	200	Objektplaner
	...		
Heizkessel	Volumenstrom	200	TGA-Ingenieur
	...		
...			

4.5 Mapping

Nachdem die beschriebene MVD in der BIM-Plattform für den Export implementiert ist, kann das Auswertungsmodell exportiert werden. Jedoch ist das Datenmodell im BIM-Werkzeug meist nicht mit der Struktur des zentralen Datenmodells der BIM-Plattform zu vergleichen. Die Planungsdaten sind der programminternen Datenstruktur entsprechend zu überführen. Diese Verknüpfung von verschiedenen Datenmodellen ist meist nicht nur strukturell, sondern ebenfalls semantisch. Die Qualität der überführten Planungsdaten ist abhängig von diesem Prozess und beeinflusst das Ergebnis („garbage in – garbage out“). Meist ergeben sich Redundanzen zwischen den verschiedenen Datenmodellen, die unterschiedlich dargestellt sind. Eine Überführung der beiden Sichtweisen sollte grundsätzlich möglich sein, ist jedoch meist sehr komplex. Erst eine erfolgreiche Überführung der Daten ermöglicht eine Kopplung unterschiedlicher Modelle und somit deren Programme.

Die für die Simulation umgesetzte Softwarearchitektur basiert auf dem im Kapitel 4.1 erläuterten EnEff-BIM-Projekt. Dieses Projekt hat das Ziel, auf Basis von BIM-Datenmodellen eine thermisch-energetische Simulation der gebäudetechnischen Anlage mit dem objektorientierten Modellierungsansatz Modelica zu ermöglichen. Zur Verwirklichung der Schnittstelle zwischen den BIM-Plattformen und der Modelica Simulationsumgebung wird ein Datenaustauschmodell zur weiteren Datenanreicherung und weiterführenden Transformation zwischengeschaltet.

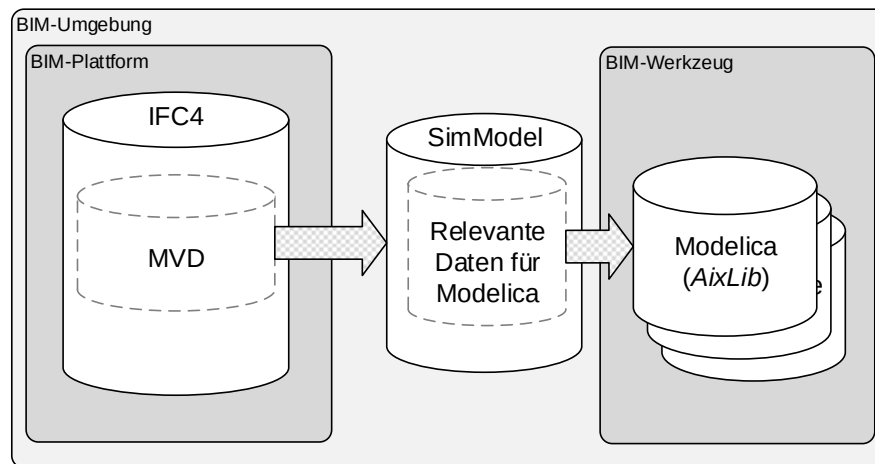


Abbildung 4.30: Zusammenfassung der im Projekt EnEff-BIM verwendeten Datenmodelle in der Schnittstelle zwischen der BIM-Plattform und dem BIM-Werkzeug Modelica [i. A. a. RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

Abbildung 4.30 veranschaulicht die Verwendung der Datenmodelle in der im Projekt entwickelten

Toolkette (siehe Abbildungen 4.1 und 4.2). Dargestellt ist die BIM-Umgebung, in der die entwickelten Tools die Kopplung des IFC4-Datenmodells an das BIM-Werkzeug verwirklichen. Das BIM-Werkzeug ist eine Simulationsumgebung, die zur Abbildung von Funktionen (bspw. Dymola) die Modelica-Modellierungssprache verwendet. Modelica ist eine objektorientierte, deklarative, gleichungsbasierte Modellierungssprache für physikalische Systeme.

Das Projekt EnEff-BIM hat verschiedene Vorteile zur flexiblen Gestaltung der Schnittstelle zwischen der BIM-Plattform und dem BIM-Werkzeug Modelica genutzt. Es wurden verschiedene Modelica-Anlagenbibliotheken untersucht und in die Schnittstelle integriert. Sie bilden die Grundlage für die Simulation und beinhalten u.a. die TGA-Komponenten zur Modellierung des Simulationsmodells. Die Mapping Rules finden in beiden Schnittstellen Anwendung und ermöglichen eine flexible Kopplung mit mehreren Modelica-Bibliotheken. Bei Änderungen der Datenbasis ist eine Aktualisierung ohne größeren Aufwand möglich. Das IFC4-Datenmodell wird von der BIM-Plattform ausgeschrieben. Das Simulation Modell (SimModel)-Datenmodell ist domänenspezifisch und bietet den Vorteil einer weitreichenden IFC-Konformität (siehe Abschnitt 2.3).

Folgendes Beispiel veranschaulicht die Anwendung der Mapping Rules zur Transformation eines Parameters unter Verwendung der Transformationsalgorithmen.

Für den Heizkessel wird im Ursprungsmodell eine Funktion zur Definition des Teillastverhaltens des Boilers verwendet. Auf der Seite des Zieldatenmodells wird diese Funktion mit einer Matrix beschrieben. Die Informationen der Funktion müssen in die Form der Matrix transformiert werden. Die relevanten Tags für dieses Mapping sind:

- ▷ *InputParameter*: Definition Funktionsparameter;
- ▷ *InputCoefficient*: Definition Funktionskoeffizienten;
- ▷ *OutputParameter*: Ausgabewert der definierten Funktion;
- ▷ *Property_Map_Transformation*: Definition des Transformationsalgorithmus.

Die Kurve zur Beschreibung des Teillastverhaltens wird durch die Funktion, den Koeffizienten und den Parameter definiert. Auf der Seite des Zieldatenmodells kann das Ergebnis der Funktion unter Festlegung der Parameter ausgelesen werden. Der Parameter ist abhängig vom Wertebereich der Matrix.

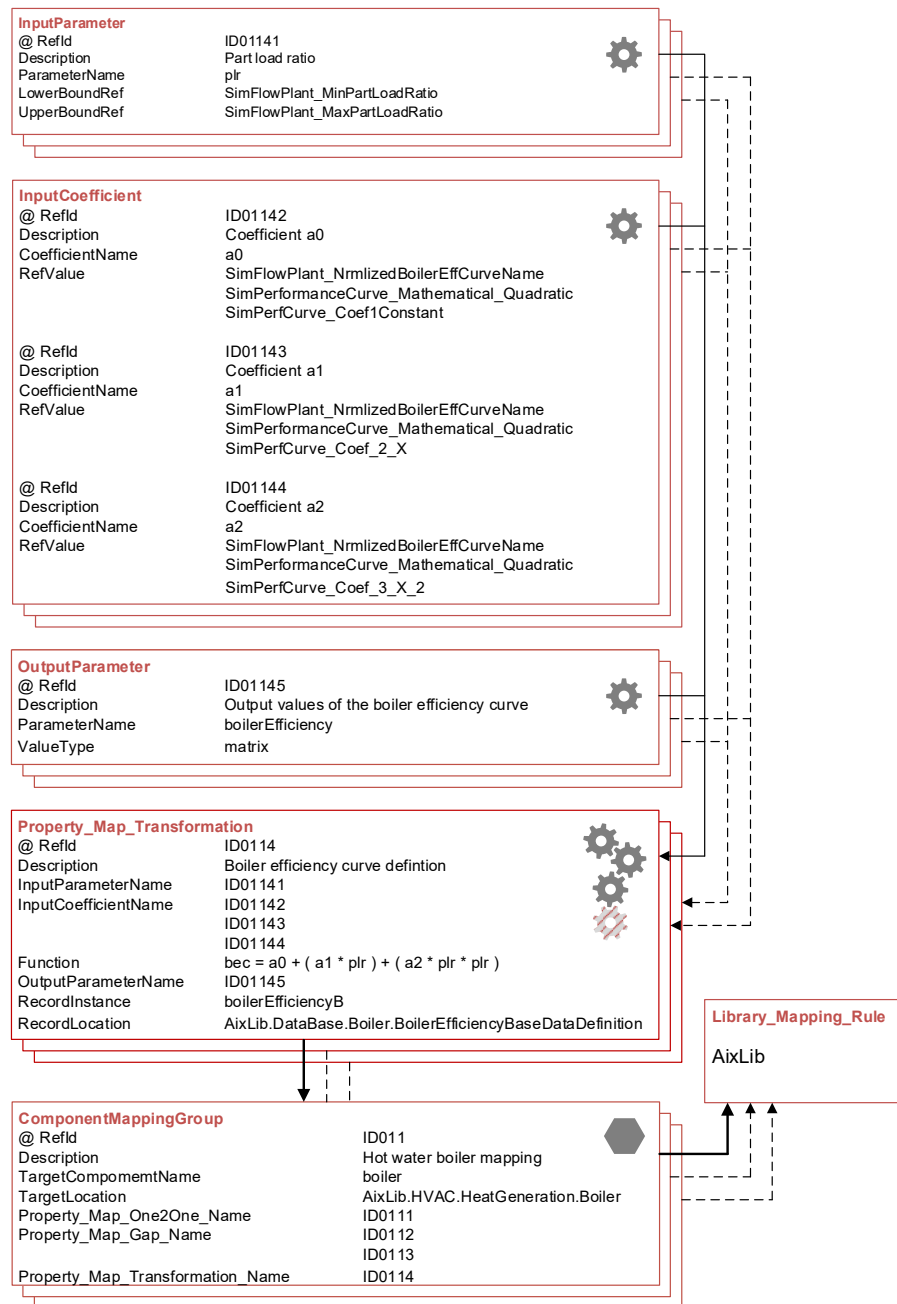


Abbildung 4.31: Veranschaulichung eines Mappingprozess am Beispiel eines Heizkessels.

Abbildung 4.31 veranschaulicht den Mappingprozess (Die entsprechenden Codezeilen sind in den Codes 3.1 und 3.2 ab Seite 94). Zu erkennen sind die Elemente der Mapping XML (*InputParameter*,

InputCoefficient, *OutputParameter*, *Property_Map_Transformation*, *ComponentMappingGroup* und *Library_Mapping_Rule*). Die Koeffizienten und Parameter werden aus dem instanziierten Datenmodell ausgelesen und sind Bestandteile des Transformationsalgorithmus. Neben der Transformation sind ebenfalls andere Mappings notwendig um, wie in Abbildung 4.31 dargestellt, den Heizkessel zu mappen. In der *ComponentMappingGroup* ist ersichtlich, dass ebenfalls ein identischer Parameter durch die Mapping Rule „Eins zu Eins“ sowie zwei Parameter durch die Mapping Rule „Fehlender Parameter“ abgebildet sind. Durch die Kombination der aufgeführten Mapping Rules kann der Heizkessel vollständig transformiert werden. Das Element *LibraryMappingRule* beinhaltet die Information, dass diese Mapping Rules für die Modelica Anlagenbibliothek AixLib formuliert sind.

4.6 Validierung der MVD

Die Validierung der MVD wird mit verschiedenen im Annex 60 Projekt bzw. EnEff-BIM-Projekt entworfenen IFC-Dateien durchgeführt. Die IFC-Dateien sind Anwendungsbeispiele, die realistische Anlagensysteme darstellen und Daten und Informationen zur Simulation in der entwickelten Softwareumgebung vorhalten (siehe im Anhang A.3 ab Seite 196). Die MVD muss die dazugehörigen Daten und Informationen basierend auf dem IFC4-Datenmodell abgrenzen und ebenfalls Anforderungen für die zu Grunde liegende Schnittstelle spezifizieren.

Die Anwendungsbeispiele mit den jeweils modellierten TGA-Komponenten sind in Tabelle 4.9 aufgelistet. Es wurden gängige TGA-Komponenten untersucht und abgebildet. Weitere Komponenten, wie bspw. die Wärmepumpe oder die Kraft-Wärme-Kopplung, wurden ebenfalls untersucht. Diese konnten jedoch aufgrund der mangelnden Funktionalität von BIM-Plattformen zur Abbildung von *IfcUnitaryEquipment* (siehe im Anhang A.2 Abbildung A.1) nicht abgebildet werden.

Tabelle 4.9: Anwendungsbeispiele des EnEff-BIM-Projekts zur Definition der Schnittstelle zwischen BIM-Plattformen und der Modelica Simulationsumgebung.

Nummer und Name:	TGA-Komponenten:
1.1 Boiler and radiator	Gas-Heizkessel, Pumpe, Ausdehnungsgefäß, Heizkörper, Rohre, Ventile
1.2 Boiler and radiator and domestic hot water	1.1 + TWW-Speicher, Zapfstelle
3.1 AHU for heating	Ventilator, Heizaggregat, Filter, Kanäle, Luftaus- und -einlass, Schalldämpfer, Luftklappen
3.2 AHU for cooling	4.1 Heating + Kühlaggregat
5.0 Multi Zone	1.1 Boiler mit größeren Dimensionen und mehreren thermischen Zonen

Der im EnEff-BIM-Projekt durchgeführte Prozess ist in Abbildung 4.32 veranschaulicht. Die im Pro-

jekt durchnummerierten (1.1 bis 5.0) Anwendungsbeispiele sind mit der IDM-Methode erfasst und definieren klar umgrenzte gebäudetechnische Anlagensysteme. Die modellierten IFC-Dateien beinhalten die Datenanforderungen für die Simulation der TGA. Die relevanten Daten und Informationen sind teils mit den vom IFC-Schema dokumentierten PSets und teils mit user defined PSets in den Dateien abgebildet. Zum Zeitpunkt der Modellierung der Anwendungsbeispiele basierte der Export der BIM-Plattform auf der „Coordination View 2.0“ des IFC 2x3 Formats, so dass das Datenformat manuell auf IFC4 aktualisiert wurde und ebenfalls einige von IFC4 abbildbare Funktionen zusätzlich programmiert wurden.

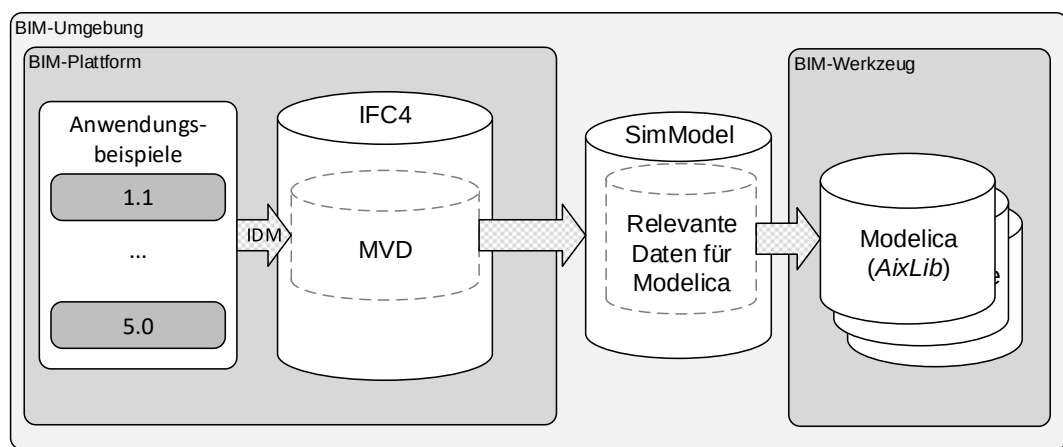


Abbildung 4.32: Veranschaulichung der Integration von Anwendungsbeispielen im Projekt EnEff-BIM zur Definition der IDM und MVD [i. A. a. Pinheiro u. a., 2017].

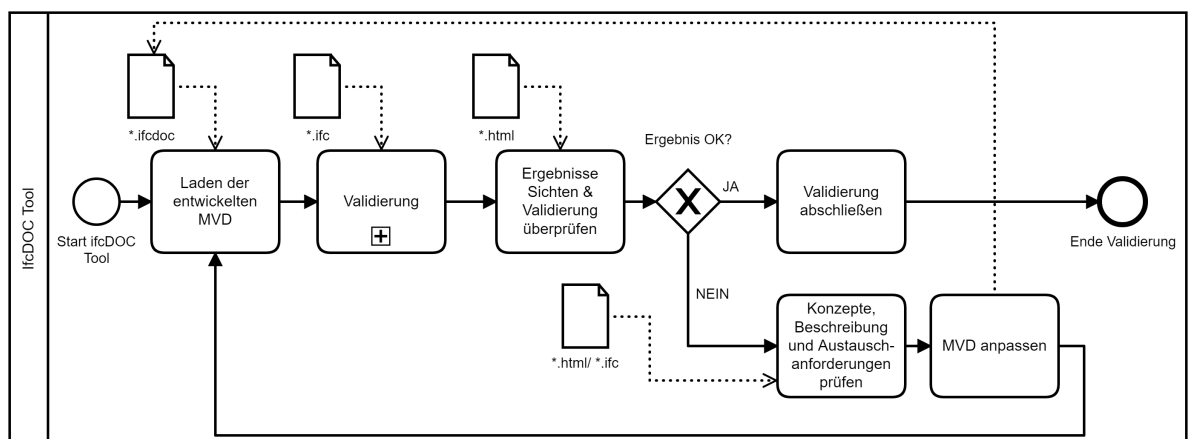


Abbildung 4.33: Prozess zur Validierung der MVD.

Abbildung 4.33 zeigt den iterativen Prozess zur Validierung der MVD. Die Validierung wird mit dem ifcDOC-Tool und den eigens dafür entwickelten IFC-Dateien durchgeführt. Die MVD wird sukzessive aus den Datenanforderungen, gegeben in den Anwendungsbeispielen, optimiert. Das Ergebnis stellt die vollendete MVD mit den dazugehörigen Datenaustauschanforderungen dar. Im Folgenden soll anhand eines Beispiels eine Validierung durch die MVD verdeutlicht werden. Hierzu soll das Vorhandensein von Ports (*IfcDistributionPort*) an einem Ventil (*IfcValve*) validiert werden. Ports stellen bspw. die Verbindungspunkte von einem physikalischen Objekt mit anderen Objekten dar und werden mit dem Konzept „Port Nesting“ definiert. In Abhängigkeit von der Art des Ventils müssen spezielle Ports verwendet werden, bspw. kann ein Dreiwege-Ventil zwei Einlässe und einen Auslass vorweisen (siehe Tabelle 4.10). Ports werden im IFC-Modell gemäß des in Abbildung 4.22 dargestellten Konzepts abgebildet und die hier definierte Spezialisierung ist für die Validierung in der MVD abgebildet.

Tabelle 4.10: Austauschforderungen des Konzepts „Port Nesting“ für ein Dreiwege-Ventil.

PREDEFINEDTYPE?	FLOW	DESCRIPTION
MIXING	SINK	Incoming fluid to be mixed.
MIXING	SINK	Incoming fluid to be mixed.
MIXING	SOURCE	Outgoing mixed fluid.

Tabelle 4.10 zeigt die einzelnen Bestandteile zur Definition der Validierungsregel. Die drei Parameter PREDEFINEDTYPE, FLOW und DESCRIPTION sind für dieses Konzept die Grundlage zur Validierung. Der Parameter PREDEFINEDTYPE ist mit einem Fragezeichen versehen, da dieser eine „Condition“ darstellt, womit abgefragt wird, ob der PREDEFINEDTYPE vorhanden ist und, falls dies zutrifft, ob dies für die restlichen Parameter ebenfalls gilt. Der Parameter FLOW ist im Gegensatz dazu ein „Constraint“, mit dem bei Vorhandensein dieses Parameters geprüft wird ob der angegebene Wert ([Value] = 'SINK' oder 'SOURCE') übereinstimmt. Der Parameter DESCRIPTION ist für informative Zwecke.

Code 4.2 zeigt einen Ausschnitt aus der Spezifizierung der Validierungsregel in der für die Validierung zu Grunde liegenden mvdXML. Zu erkennen ist, dass das Konzept eine eindeutige UUID und einen Namen vorweist. Dieses Konzept ist als empfohlen („recommended“) für den Export definiert und ist in dem Beispiel für das Dreiwege-Ventil („MIXING“) spezifiziert. Die in Tabelle 4.10 aufgeführte Spezialisierung ist ebenfalls als jeweils eigene Regel in der instanziierten mxdXML wiederzufinden.

Alle Konzepte werden entsprechend in der mvdXML abgebildet und stellen damit die Regeln dar, die eine Validierung der MVD ermöglichen. Die Anwendungsbeispiele liefern die Daten und Informationen, die für die Schnittstelle benötigt werden und somit die Grundlage für die relevante Struktur der MVD bilden.

```
<Concept uuid="279d1b28-c6e7-462a-81aa-aba1f589fa39" name="Port Nesting" ...>
  ...
  <Requirements>
    <Requirement applicability="export" requirement="recommended" ... />
  </Requirements>
  <TemplateRules operator="or">
    <TemplateRule Description="Incoming fluid to be mixed." Parameters="
      PredefinedType[Value]='MIXING' AND Flow[Value]='SINK'" />
    <TemplateRule Description="Incoming fluid to be mixed." Parameters="
      PredefinedType[Value]='MIXING' AND Flow[Value]='SINK'" />
    <TemplateRule Description="Outgoing mixed fluid." Parameters="PredefinedType
      [Value]='MIXING' AND Flow[Value]='SOURCE'" />
  </TemplateRules>
</Concept>
```

Code 4.2: Definition der Validierungsregel für das Konzept „Port Nesting“ eines Dreiwege-Ventils in mvdXML.

4.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein BIM-Anwendungsfall mit der harmonisierten IDM- und MVD-Methode zur Simulation von gebäudetechnischen Anlagen in einer dafür entwickelten Softwarearchitektur beschrieben. Die Randbedingungen und das Ziel des Anwendungsfalls wurden einleitend erläutert. Eine Rollendefinition mit den wesentlichen Arbeitsschritten wurde in einem Prozessdiagramm dargelegt. Eine darüber hinausgehende ausführliche Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte und eine detailliertere Beschreibung der Austauschszenarien erlaubte die Identifikation der Schnittstellen zwischen den Rollen und deren Datenmodellen. Die Datenaustauschanforderungen und das dazugehörige Modell wurden für die spezifizierte Schnittstelle zwischen der BIM-Plattform und dem BIM-Werkzeug konkretisiert, woraus die MVD abgeleitet wurde. Für die Erläuterung der MVD wurden verschiedene Themenblöcke dargelegt. Jeder Themenblock erläutert die Entitäten mit den dazugehörigen Konzepten zur Definition der MVD. Die Beschreibung des BIM-Anwendungsfalls wurde mit der Definition der dazugehörigen LODs in der identifizierten Schnittstelle vervollständigt, bevor das Kapitel mit einer Validierung der MVD erfolgreich abschließt.

5 Weiterführende Arbeit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel, die Anwendung der harmonisierten IDM- und MVD-Methode auf Basis des standardisierten IFC-Formats, zur Definition eines BIM-Anwendungsfalls mit dazugehörigen LODs, erreicht. Der BIM-Anwendungsfall wurde für das BIM-Ziel der „thermisch-energetischen Simulation von gebäudetechnischen Anlagen“ aufgebaut. Der entwickelte BIM-Anwendungsfall ist nur durch die integrale Vereinigung verschiedener Datenmodelle möglich, wodurch eine zusätzliche Definition des Beziehungsgefüges in Form von Mapping Rules gefordert ist. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit stellt der Leitfaden zur Erstellung von BIM-Anwendungsfällen dar, der in Kapitel Drei umfassend beschrieben ist. Grundlage hierfür ist der in Kapitel Zwei dargelegte Stand der Technik. Die Zusammenfassungen der einzelnen Kapitel der vorliegenden Arbeit stellen den Ausgangspunkt für die nachfolgende Beschreibung der weiterführenden Arbeit und eines möglichen Ausblicks dar.

Unter Bezugnahme auf ein ausführlich beschriebenes Anwendungsbeispiel wurde die Entwicklung der IDM, MVD, LODs und der Mapping Rules dargestellt. Es wurde anhand der Planung und Modellierung eines Heizungssystems aufgezeigt, wie ein Bauprozess gestaltet sein muss, damit das BIM-Ziel erreicht werden kann. Der Anwendungsfall gibt Aufschluss über die Gestaltung der Zusammenarbeit auf der Ebene der Nutzeranforderungen derart, dass die relevanten Daten und Informationen im Kollaborationsprozess zielgerichtet erzeugt und transparent kommuniziert werden können. Diese Informationen fließen in die Ebene der technologischen Umsetzung, damit die Schnittstellen effizient gestaltet werden können. Dieses integrale Beispiel vereint mehrere Datenmodelle miteinander und ermöglicht eine interoperable Kommunikation durch die Definition der Transformationslogik.

Bei der Ausarbeitung der zu Grunde liegenden Anwendungsbeispiele ist aufgefallen, dass gängige Komponenten der TGA im IFC-Datenmodell nicht abgebildet sind. Diesem Defizit wurde versucht mit der Verwendung von der Entität *IfcUnitaryEquipment* entgegen zu treten. Da jedoch die verwendete BIM-Plattform diese nicht abbilden konnte, blieb es beim Entwurf der Struktur. Die Strukturen zur Abbildung der fehlenden Komponenten (Wärmepumpe und BHKW) sind im Anhang A.2 ab Seite 193 aufgeführt. Eine andere Option zur Abbildung dieser Komponenten ist die Erweiterung des IFC-Schemas, indem bei der Implementer Support Group von bSI ein entsprechender Vorschlag eingereicht wird. Eine solche Erweiterung ist beispielhaft in Abbildung 5.1 dargestellt.

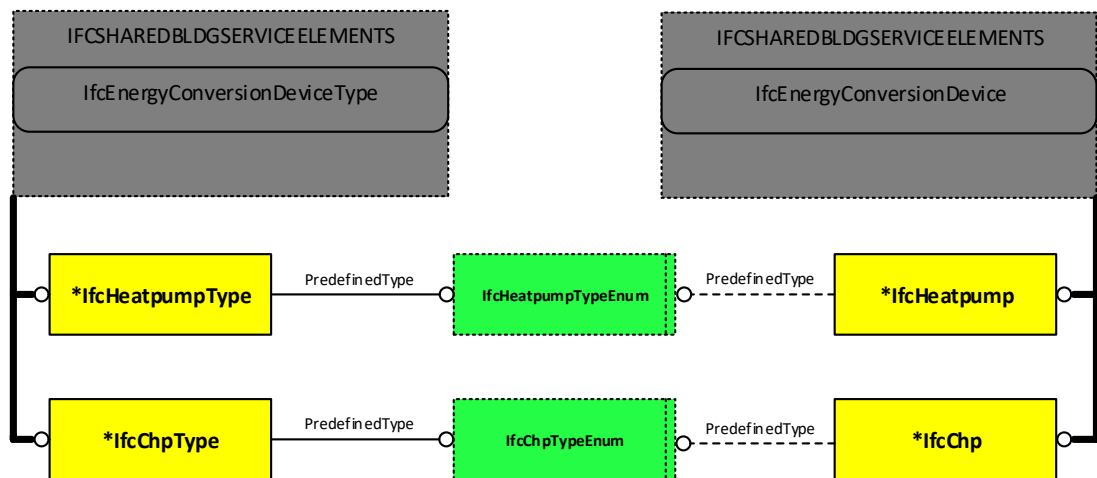


Abbildung 5.1: EXPRESS-G-Darstellung einer optionalen Erweiterung des IFC-Schemas zur Abbildung der Wärmepumpe und des BHKWs.

Zu sehen ist die EXPRESS-G-Darstellung einer möglichen Erweiterung zur Abbildung neuer Entitäten. Die benötigten Entitäten für die Wärmepumpe sind:

- ▷ *IfcHeatpump*;
- ▷ *IfcHeatpumpType*;
- ▷ *IfcHeatpumpTypeEnum*.

Eine Umsetzung der Wärmepumpe in STEP für das IFC-Schema ist in Code 5.1 aufgeführt. Zur Definition der Typen wurde die Art der Wärmepumpe gemäß einer Kombination der Wärmequelle und Wärmeträger gewählt. Je nachdem welche Typisierung als relevant erachtet wird, kann auch die Technologie der Wärmepumpe (elektr./ gasmotorische Kompression, Absorption, Adsorption) herangezogen werden.

Für das BHKW müssten folgende neu zu definierende Entitäten formuliert werden:

- ▷ *IfcChp*;
- ▷ *IfcChpType*;
- ▷ *IfcChpTypeEnum*.

Somit würden sich die neuen Entitäten in der *IfcHvacDomain*, unter den anderen gebäudetechnischen Komponenten, eingliedern.


```

ENTITY IfcHeatpump
SUBTYPE OF (IfcEnergyConversionDevice);
  PredefinedType : OPTIONAL IfcHeatpumpTypeEnum;
WHERE
  CorrectPredefinedType : NOT(EXISTS(PredefinedType)) OR
  (PredefinedType <> IfcHeatpumpTypeEnum.USERDEFINED) OR
  ((PredefinedType = IfcHeatpumpTypeEnum.USERDEFINED) AND
    EXISTS(SELF\IfcObject.ObjectType));
  CorrectTypeAssigned : (SIZEOF(IsTypedBy) = 0) OR
  ('IFCHVACDOMAIN.IfHeatpumpType' IN
    TYPEOF(SELF\IfcObject.IsTypedBy[1].RelatingType));
END_ENTITY;

ENTITY IfcHeatpumpType
SUBTYPE OF (IfcEnergyConversionDeviceType);
  PredefinedType : IfcHeatpumpTypeEnum;
WHERE
  CorrectPredefinedType : (PredefinedType <> IfcHeatpumpTypeEnum.USERDEFINED) OR
  ((PredefinedType = IfcHeatpumpTypeEnum.USERDEFINED) AND
    EXISTS(SELF\IfcElementType.ElementType));
END_ENTITY;

TYPE IfcHeatpumpTypeEnum = ENUMERATION OF (
  WATERWATER,
  WATERAIR,
  AIRAIR,
  AIRWATER,
  BRINEWATER,
  BRINEAIR,
  USERDEFINED,
  NOTDEFINED);
END_TYPE;

```

Code 5.1: Optionale Erweiterung des IFC-Schemas zur Abbildung der Wärmepumpe durch *IfcHeatpump*, *IfcHeatpumpType* und *IfcHeatpumpTypeEnum*.

Eine weitere optionale Erweiterung betrifft die geografische Referenzierung eines Bauprojekts. In der MVD werden hierzu mehrere Optionen geboten, bspw. bietet die Baustelle (*IfcSite*) die Attribute zur Bestimmung des Längen- (REFLONGITUDE) und des Breitengrads (REFLATITUDE). Das Gebäude hingegen bietet lediglich die postalische Adresse durch Verwendung des Konzepts „Building Attribute“. Da je nach Größe des Bauprojekts und des jeweiligen BIM-Ziels jedoch eine genaue Spezifizierung der Koordinaten benötigt wird (bspw. Sonnenstandssimulation), reichen eine postalische Adresse oder die Koordinaten der Baustelle nicht aus. Durch die Integration der beiden Attribute für Längen- und Breitengrade auf der Gebäudeebene kann das IFC-Schema optional erweitert werden. Der Vorteil hiervon ist, dass keine zusätzlichen geometrischen Berechnungen durchgeführt werden müssen, um den Umstand zu umgehen, dass mehrere Gebäude auf einer Baustelle lediglich durch die postalische Adresse voneinander unterschieden werden. Die beiden Attribute wären optional und vom Typen *IfcCompoundPlaneAngleMeasure*.

Eine Erweiterung des IFC-Schemas sollte unbedingt für die Entität *IfcSpatialZone* vorgenommen werden. Wie bereits in Abbildung 4.26 dargestellt, fehlt bei der grafischen Darstellung der *IfcSpatialZone*

der Bezug zu den Space Boundaries. Dementsprechend würde eine von den *IfcSpaces* abweichende Darstellung der thermischen Zone zu einer nicht korrekten Bildung von Space Boundaries führen. Somit würde die Bildung der thermischen Zonen mit *IfcSpatialZone* zu nicht abschätzbaren Fehlberechnungen führen. Es müssen ein Attribut und ein Select-Typ neu definiert werden:

- ▷ *IfcSpatialZone*.BOUNDED BY: Reference to a set of *IfcRelSpaceBoundary*s that defines the physical or virtual delimitation of that space against physical or virtual boundaries;
- ▷ *IfcSpaceBoundarySelect* mit Select-Typ *IfcSpatialZone*.

Das inverse Attribut BOUNDED BY ist vom Typen *IfcSpaceBoundarySelect* und dient der Auflistung von Select-Typen. Dementsprechend muss die Entität *IfcSpatialZone* in diese Liste mit aufgenommen werden, damit Space Boundaries ebenfalls für die geometrische Darstellung der *IfcSpatialZone* erzeugt werden können.

Der in dieser Arbeit erstellte BIM-Anwendungsfall basiert auf der Grundlage eines Forschungsprojekts zur Integration einer Softwareapplikation für die thermisch-energetische Simulation in die BIM-Umgebung. Diese Softwareapplikation baut auf den objektorientierten Modellierungsansatz Modelica und auf in Entwicklung befindliche Anlagenbibliotheken auf. Die in der MVD integrierten Komponenten der TGA und die Properties basieren auf diesen Anlagenbibliotheken. Dieser sich durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung ändernde Datengrundlage wird mit Hilfe der Mapping Rules entgegen getreten. Die notwendige Flexibilität der im Forschungsprojekt geschaffenen Werkzeugkette soll mit der Integrierbarkeit der Mapping Rules gewährleistet werden.

Als nächsten Schritt muss die Integration weiterer ausgereifter Anlagenbibliotheken den Rahmen der gebäudetechnischen Komponenten erweitern. Die geschaffenen Strukturen und Konzepte sind bereits ausgereift genug, jedoch basieren diese lediglich auf den in den Anwendungsbeispielen untersuchten Komponenten der TGA. Die Integration weiterer Komponenten der TGA würde das Anwendungsspektrum der MVD maßgeblich erweitern. Das IFC-Schema enthält weitere Komponenten, die es zu analysieren gilt und die in die MVD mit aufgenommen werden sollten. Dieses Ziel wird mit der Integration der MVD in dem internationalen Folgeprojekt „IBPSA Project 1 – BIM/GIS and Modelica Framework for building and community energy system design and operation“¹ weiter verfolgt.

Die Erstellung von BIM-Anwendungsfällen mit den in dieser Arbeit repräsentierten Methoden erlaubt es, ein Projekt gemäß einer integralen Planung erfolgreich abzuschließen. Die Nutzerebene und die Ebene der technologischen Umsetzung werden miteinander verbunden, um interoperable Schnittstellen zwischen allen Beteiligten zu schaffen. Das dadurch entstehende BIM-Anwendungsfälle-Kompodium kann als Grundlage für zukünftige Projekte fungieren, so dass die Kollaboration bereits

¹ Github Repository des IBPSA Project 1: <https://ibpsa.github.io/project1/>

in frühen Projektphasen besser verstanden und planbar gemacht werden kann. Eine durchgängige Anwendung der Methoden erlaubt es den Projekterfolg gemeinschaftlich zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- [Albrecht 2014] ALBRECHT, M.: *Building Information Modelin (BIM) in der Planung von Bauleistungen*. disserta Verlag, 2014 (ISBN 978-3-95425-344-9)
- [Allweyer 2009] ALLWEYER, T.: *BPMN 2.0 – Business Process Model and Notation: Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung*. Books on Demand, 2009
- [American Institute of Architects 2008] AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS: *E202- 2008 Building Information Modeling Protocol Exhibit*. Online. <https://www.aiacontracts.org/contract-documents/19031-building-information-modeling-protocol-exhibit>. Version: Mai 2008
- [Ausschuss für Arbeitsstätten 2014] AUSSCHUSS FÜR ARBEITSSTÄTTEN: *Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung*, 2014. (ASR A3.4) . – Ausschuss für Arbeitsstätten
- [Baerisch 2005] BAERISCH, S.: Versionskontrollsysteme in der Softwareentwicklung / Informationszentrum Sozialwissenschaften der Arbeits-gemeinschaft Sozialwissenschaftlicher Institute e.V. (ASI). Version: Juni 2005. https://www.gesis.org/fileadmin/upload/forschung/publikationen/gesis_reihen/iz_arbeitsberichte/ab_36.pdf. DEU, Juni 2005. – Forschungsbericht
- [Bayer 2015] BAYER, B.: Die vernetzte Bauindustrie. In: *Ernst & Sohn Special BIM* (2015), November, S. 18–21
- [Bazjanac] BAZJANAC, V.: *Interoperabilität von Datenmodellen*. <https://profiles.stanford.edu/vladimir-bazjanac>. – Darstellung der Interoperabilität von Datenmodellen, erarbeitet aus Gesprächen mit Prof. Vladimir Bazjanac von der Stanford University
- [Bazjanac 2010] BAZJANAC, V.: Space Boundary Requirements for Modeling of Building Geometry for Energy and other Performance Simulation. In: *CIB W078-W102: 27th International Conference*. Cairo, Egypt, 2010
- [Bazjanac u. a. 2011] BAZJANAC, V. ; MAILE, T. ; O'DONNELL, J. ; ROSE, C. ; MRAZOVIC, N.: Data Environments and Processing in Semi-Automated Simulation with EnergyPlus. In: *CIB W078-W102: 28th International Conference*. Sophia Antipolis, France, 2011
- [Beetz u. a. 2015] *Kapitel 7 Prozessgestützte Defintion von Modellinhalten*. In: BEETZ, J. ; BORRMANN, A. ; WEISE, M.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6), S. 129–147

- [BMVI u. Dobrindt 2015] BMVI ; DOBRINDT, A.: Stufenplan Digitales Planen und Bauen - Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Version: November 2015. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile. 2015. – Forschungsbericht
- [Bodden u. a. 2017] BODDEN, J. ; ELIXMANN, R. ; ESCHENBRUCH, K. ; PROF. DR. KLAUS ESCHENBRUCH (Hrsg.): *BIM-Leistungsbilder*. Bd. 1. Kapellmann Rechtsanwälte, 2017
- [Bolpagni 2016] BOLPAGNI, M.: *The Many Faces of 'LOD'*. online. <http://www.bimthinkspace.com/2016/07/the-many-faces-of-lod.html>. Version: Juli 2016
- [Borrmann u. a. 2015a] BORRMANN, A. ; BEETZ, J. ; KOCH, C. ; LIEBICH, T.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6)
- [Borrmann u. a. 2015b] *Kapitel 6 Industry Foundation Classes - Ein herstellungabhängiges Datenmodell für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks*. In: BORRMANN, A. ; KÖNIG, M. ; KOCH, C. ; BEETZ, J.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6), S. 83–128
- [Borrmann u. a. 2015c] *Kapitel 13 BIM-Manager*. In: BORRMANN, A. ; KÖNIG, M. ; KOCH, C. ; BEETZ, J.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6), S. 237–247
- [BuildingSMART International 2015] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Core Purpose*. <http://buildingsmart.org/about/vision-mission/core-purpose/>. Version: Mai 2015
- [BuildingSMART International 2016a] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *BuildingSMART certification*. <http://www.buildingsmart-tech.org/certification>. Version: November 2016
- [BuildingSMART International 2016b] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *BuildingSMART International home of openBIM*. <http://buildingsmart.org/>. Version: Mai 2016
- [BuildingSMART International 2016c] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *IFC 4 Konzepte*. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/link/chapter-4.htm>. Version: Mai 2016
- [BuildingSMART International 2016d] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *IFC4 Add2 Release - Welcome to buildingSMART-Tech.org*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases/ifc4-add2-release>. Version: Mai 2016
- [BuildingSMART International 2016e] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *IfcDOCTool summary page*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/specification-tools/ifcdoc-tool>. Version: Mai 2016

- [BuildingSMART International 2016f] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *IfcRelSpaceBoundary*. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/link/ifcrelspaceboundary.htm>. Version: September 2016
- [BuildingSMART International 2016g] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Information Delivery Manuals*. <http://iug.buildingsmart.org/idms>. Version: Februar 2016
- [BuildingSMART International 2016h] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *mvdXML Format Overview*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/mvd-overview>. Version: April 2016
- [BuildingSMART International 2017a] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Concepts for the MVDs*. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/link/object-typing.htm>. Version: Mai 2017
- [BuildingSMART International 2017b] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Design Transfer View*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/ifc4-design-transfer-view>. Version: Mai 2017
- [BuildingSMART International 2017c] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Model View Definition Summary*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition>. Version: Februar 2017
- [BuildingSMART International 2017d] BUILDINGSMART INTERNATIONAL: *Reference View*. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/ifc4-reference-view>. Version: März 2017
- [Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Leitbild Bau - Zur Zukunft des Planens und Bauens in Deutschland eine gemeinsame Initiative der deutschen Bauwirtschaft*. Online. http://www.bauindustrie.de/media/attachments/Leitbild_Bau_final.pdf. Version: Juni 2009
- [Bundesrat 2013] BUNDESRAT: *Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen*. Gesetz. http://www.hoai.de/online/HOAI_2013/HOAI_2013.php. Version: Dezember 2013
- [Chipman u. a. 2013] CHIPMAN, T. ; FALLON, K. ; FELDMAN, R. ; WILLIAMS, G. ; FADOJUTIMI, O.: *Ontology for life-cycle modeling of electrical distribution systems: Model view definition* / Kristine Fallon Associates Inc. 2013. – Forschungsbericht
- [Chipman u. a. 2016] CHIPMAN, T. ; LIEBICH, T. ; WEISE, M.: *mvdXML - Specification of Standardized format to define and exchange Model View Definitions with Exchange Requirements and Validation Rules* / Model Support Group (MSG) of buildingSMART International Ltd. Version: Oktober 2016. <http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/mvdxml/mvdxml-1.1/final/mvdxml-1-1-documentation>. 2016. – Forschungsbericht

- [DBV 2015] DBV: *Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e. V. - Qualität der Planung*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik Verein DBV, Februar 2015
- [Digital Alchemy 2016] DIGITAL ALCHEMY: *Digital Alchemy - Simergy Pro*. http://www.digitalalchemypro.com/html/products/DAProducts_Simergy.html. Version: Dezember 2016
- [Dijkman u. a. 2008] DIJKMAN, R. ; DUMAS, M. ; OUYANG, C.: Semantics and analysis of business process models in BPMN. In: *Information and Software technology* (2008), Nr. 12, S. 1281–1294
- [DIN 276 2008] *Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [DIN 4708-2 1994] *Zentrale Wassererwärmungsanlagen; Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [DIN EN 12831 2003] *Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003
- [DIN EN 13779 2007] *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [DIN EN 442-1 2015] *Radiatoren und Konvektoren - Teil 1: Technische Spezifikationen und Anforderungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [DIN EN ISO 19650-1 2018] *Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Konzepte und Grundsätze*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [DIN EN ISO 19650-2 2018] *Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 2: Lieferphase der Assets*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [DIN EN ISO 29481-1 2016] *Building Information Models — Information Delivery Manual — Part 1: Methodology and format*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN EN ISO 29481-2 2016] *Building Information Models — Information Delivery Manual — Part 2: Interaction framework*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN EN ISO 9001 2015] *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [DIN ISO 16757-1 2015] *Datenstrukturen für elektronische Produktkataloge der Technischen Gebäudeausrüstung - Teil 1: Konzepte, Architektur und Modelle*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [DIN ISO 16757-2 2016] *Datenstrukturen für elektronische Produktkataloge der Technischen Gebäudeausrüstung - Teil 2: Geometrie*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN ISO 31000 2011] *Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011

- [DIN V 18599-1 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*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-1 bis -11 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1 bis Teil 11*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-10 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-11 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 11: Gebäudeautomation*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-2 2016] *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*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-3 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-4 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-5 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-6 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-7 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-8 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [DIN V 18599-9 2016] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten - Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016

- [Drees & Sommer u. Vrame 2016] DREES & SOMMER ; VRAME: *BIM Praxisleitfaden 1.0.* online. <http://www.bim-blog.de/bim-praxisleitfaden-1-0/>. Version: Juli 2016
- [E DIN EN ISO 12006-3 2016] *Bauwesen – Organisation von Daten zu Bauwerken – Teil 3: Struktur für den objektorientierten Informationsaustausch.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen 2018] E3D LEHRSTUHL FÜR ENERGIEEFFIZIENTES BAUEN, RWTH Aachen University: *Homepage des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen der RWTH Aachen University.* Online. <http://www.e3d.rwth-aachen.de/>. Version: September 2018
- [East 2007] EAST, E.: Construction operations building information exchange (Cobie): Requirements definition and pilot implementation standard / Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Lab. 2007. – Forschungsbericht
- [Eastman u. a. 2009] EASTMAN, C. ; JEONG, Y. ; SACKS, R. ; KANER, I.: Exchange model and exchange object concepts for implementation of national BIM standards. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 24 (2009), Nr. 1, S. 25–34
- [Eastman u. Sacks 2010] EASTMAN, C. ; SACKS, R.: Introducing a new methodology to develop the information delivery manual for AEC projects. In: *CIB W078-W102: 27th International Conference.* Cairo, Egypt, 2010, S. 16–18
- [Eastman u. a. 2008] EASTMAN, C. ; TEICHOLZ, P. ; SACKS, R. ; LISTON, K.: *BIM Handbook - A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors.* 2nd Edition. New Jersey, USA : John Wiley & Sons, 2008 (ISBN 978-0-470-18528-5)
- [Ebertshäuser u. von Both 2016] EBERTSHÄUSER, S. ; BOTH, P. von: Prüfung und Konvertierung von HVAC ifcXML zu SimModel. In: *Proceedings CESBP Central European Symposium on Building Physics / BauSIM 2016.* Dresden, Germany, 2016, S. 621–628
- [Egger u. a. 2013] EGGER, M. ; HAUSKNECHT, K. ; LIEBICH, T. ; PRZYBYLO, J.: BIM-Leitfaden für Deutschland - Information und Ratgeber / Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Version: Dezember 2013. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile. 2013. – Endbericht
- [Essig 2015] ESSIG, B.: *BIM und TGA - Engineering und Dokumentation der Technischen Gebäudeausrüstung.* Beuth Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–410–25733–2
- [Faschingbauer 2011] FASCHINGBAUER, G.: *Simulationsbasierte Systemidentifikation im Rahmen der baubegleitenden geotechnischen Überwachung,* TU Dresden, Institut für Bauinformatik, Diss., 2011
- [Freund u. Rücker 2014] FREUND, J. ; RÜCKER, B.: *Praxishandbuch BPMN 2.0.* Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 2014. – ISBN 9783446429864

- [Fuchs 2014] FUCHS, S.: *Erschließung domänenübergreifender Informationsräume mit Multimodellen*, TU Dresden, Institut für Bauinformatik, Diss., 2014
- [Gadatsch 2017] GADATSCH, A.: Einführung in die Datenmodellierung. In: *Datenmodellierung für Einsteiger*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2017. – ISBN 9783658190699, S. 1–7
- [General Service Administration 2015] GENERAL SERVICE ADMINISTRATION: GSA BIM Guide Overview / U.S. General Service Administration. Version: Dezember 2015. https://www.gsa.gov/portal/mediaId/226771/fileName/GSA_BIM_Guide_v0_60_Series01_Overview_05_14_07.action. 2015. – Forschungsbericht
- [Gigante-Barrera u. a. 2017] GIGANTE-BARRERA, A. ; CRUNDEN, M. ; RUIKAR, K.: LOD object content specification for manufacturers within the UK using the IDM standard. In: *Electronic Journal of Information Technology in Construction* (2017), Mai, Nr. 22, S. 80–103
- [Gigante-Barrera u. Ruikar 2016] GIGANTE-BARRERA, A. ; RUIKAR, D.: BIM maturity implementation for Electrical Manufacturers within the UK: Model Element LOD Creation Using the Information Delivery Manual Standard. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Osaka, Japan, 2016
- [Green Building XML Schema Inc. 2016] GREEN BUILDING XML SCHEMA INC.: *Green Building XML Schema*. online. <http://gbxml.org/>. Version: Dezember 2016
- [Hietanen 2008] HIETANEN, J.: *IFC Model View Definition Format*. http://www.buildingsmart-tech.org/downloads/accompanying-documents/formats/mvdxl-documentation/MVD_Format_V2_Proposal_080128.pdf. Version: Januar 2008
- [Hietanen u. Kohlhaas 2016] HIETANEN, J. ; KOHLHAAS, A.: Der (innere) Wert von IFC. In: *BIM - Building Information Model - Ernst & Sohn Special* (2016), November, 40-44. https://protonet.gsp-network.com/public_links/fctq1xdPNejioxgCl8Ksig
- [Hietanen u. Lehtinen 2006] HIETANEN, J. ; LEHTINEN, S.: The useful minimum / Tampere University of Technology - Virtual Building Laboratory. Version: Oktober 2006. http://cic.vtt.fi/projects/vbe-net/data/2006_The_Useful_Minimum.pdf. 2006. – Forschungsbericht
- [Huang u. a. 2012] HUANG, L. ; HÄUBI, F. ; BREIT, M. ; BORRMANN, A.: BIM-based Information Exchange for Functional AEC Design and Ordering Processes. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Moscow, Russia, 2012
- [Hyun u. a. 2016] HYUN, S. ; MARJANOVIC HALBURD, L. ; RASLAN, R.: Bridging The Performance Gap: Information Delivery Manual Framework To Improve Life-Cycle Information Availability. In: *IBPSA Building Simulation*. Newcastle, England, 2016

- [ISO 10303-11 2004] *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [ISO 10303-21 2016] *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [ISO 10303-28 2007] *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 28: Implementation methods: XML representations of EXPRESS schemas and data, using XML schemas*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [ISO 12006-2 2015] *Building construction - Organization of information about construction works - Part 2: Framework for classification*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [ISO 16354 2013] *Guidelines for knowledge libraries and object libraries*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013
- [ISO 22263 2008] *Organization of information about construction works - framework for management of project information*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [ISO 29481-1 2010] *Building Information Models — Information Delivery Manual — Part 1: Methodology and format*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [ISO EN 16739 2013] *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013
- [ISO/DIS 19650 2016] *Organization of information about construction works – Information management using building information modelling*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [ISO/DIS 29481-1 2014] *Building Information Models — Information Delivery Manual — Part 1: Methodology and format*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014
- [ISO/TS 12911 2012] *Framework for building information modelling (BIM) guidance*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [ISO/WD 29481-3 2016] *Building Information Models — Information Delivery Manual — Part 3: Model View Definitions*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016
- [Kastens u. Büning 2014] KASTENS, U. ; BÜNING, H.: *Modellierung: Grundlagen und formale Methoden*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014. – ISBN 978-3446415379
- [Katranuschkov u. a. 2010] KATRANUSCHKOV, P. ; WEISE, M. ; WINDISCH, R. ; FUCHS, S. ; SCHERER, R.: BIM-based generation of multi-model views. In: *CIB W078-W102: 27th International Conference*. Cairo, Egypt, 2010

- [König 2015] *Kapitel 4 Prozessmodellierung*. In: KÖNIG, M.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6), S. 57–73
- [König u. a. 2017] KÖNIG, M. ; RAHM, T. ; NAGEL, F. ; SPEIER, L.: BIM-Anwendungen im Tunnelbau: Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten. In: *Bautechnik* (2017), S. 227–231
- [Kovacic u. a. 2016] KOVACIC, I. ; ACHAMMER, C. ; MÜLLER, C. ; SEIBEL, H. ; SRECKOVIC, M. ; WIEGAND, D. ; GLÖGGLER, J. ; FILZMOSER, M. ; KÖSZEGI, T. ; DAUKSZEWICZ, N.: INTEGRALE PLANUNG - Leitfaden für Public Policy, Planer und Bauherrn / TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement. Version: Dezember 2016. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_219310.pdf. 2016. – Forschungsbericht
- [Kreider 2013] KREIDER, R.: *An Ontology of the Uses of Building Information Modeling*, Pennsylvania State University, PhD Thesis, 2013. <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/19966>
- [LBNL 2013] LBNL: *Simergy: Simergy Homepage*. <https://simergy-beta.lbl.gov/>. Version: Oktober 2013
- [LBNL 2017] LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory: *Space Boundary Tool*. Online. <http://simulationresearch.lbl.gov/projects/space-boundary-tool>. Version: April 2017
- [Lee u. a. 2013] LEE, C. ; PARK, H. ; HAM, S.: Extended Process to Product Modeling (xPPM) for integrated and seamless IDM and MVD development. In: *Advanced Engineering Informatics* (2013), September, Nr. 27, S. 636–651
- [Lee u. a. 2016] LEE, Y. ; EASTMAN, C. ; SOLIHIN, W.: An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. In: *Advanced Engineering Informatics* 30 (2016), Nr. 3, S. 354–367
- [Liebich u. Hausknecht 2016] LIEBICH, T. ; HAUSKNECHT, K.: *BIM-Kompendium – Building Information Modeling als neue Planungsmethode*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2016. – ISBN 978-3-8167-9490-5
- [Liebich u. a. 2011] LIEBICH, T. ; SCHWEER, C. ; WERNIK, S. ; WOHLHAGE, L.: Die Auswirkungen von Building Information Modeling (BIM) auf die Leistungsbilder und Vergütungsstruktur für Architekten und Ingenieure sowie auf die Vertragsgestaltung / Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR). Version: 2011. <http://www.irbnet.de/daten/baifo/20118035383/Endbericht.pdf>. 2011. – Forschungsbericht
- [Maile u. a. 2007] MAILE, T. ; FISCHER, M. ; BAZJANAC, V.: *Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective*. Online. <https://cife.stanford.edu/sites/default/files/WP107.pdf>. Version: April 2007

- [Maile u. a. 2013] MAILE, T. ; O'DONNELL, J. ; BAZJANAC, V. ; ROSE, C.: BIM-Geometry Modeling Guidelines for Building Energy Performance Simulation. In: *IBPSA Building Simulation*. Chambéry, France, 2013
- [Müller u. a. 2016] MÜLLER, D. ; LAUSTER, M. ; CONSTANTIN, A. ; FUCHS, M. ; REMMEN, P.: AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. In: *BauSIM 2016*. Dresden, Germany, 2016
- [Modelica Association 2016] MODELICA ASSOCIATION: *Modelica Libraries*. <https://modelica.org/libraries>. Version: Dezember 2016
- [Nawari 2012] NAWARI, O.: BIM standard in off-site construction. In: *Journal of Architectural Engineering* (2012), Dezember, S. 107–113
- [van Nederveen u. Tolman 1992] NEDERVEEN, G. van ; TOLMAN, F.: Modelling multiple views on buildings. In: *Automation in Construction* Bd. 3, 1992, S. 215–224
- [NIBS 2013] NIBS: *National BIM Standard-United State - V2 eBook*. National Institute of Building Science and buildingSMARTalliance, 2013 <https://www.nibs.org/store/ViewProduct.aspx?id=2038899>
- [Oldfield u. a. 2017] OLDFIELD, J. ; BERGS, R. ; OOSTEROM, P. van: 3D Cadastral Lifecycle: An Information Delivery Manual ISO 29481 for 3D Data Extraction from the Building Permit Application Process. In: *7th International FIG Workshop on the Land Administration Domain Model*, 2017
- [OMG 2016] OMG, Object Management G.: *Unified Modeling Language*. <http://www.uml.org/>. Version: Juni 2016
- [OMG 2017] OMG, Object Management G.: *Object Management Group Homepage*. <http://www.omg.org/>. Version: Mai 2017
- [Omniclass 2017] OMNICLASS: *OmniClass Construction Classification System Homepage*. Online. <http://www.omniclass.org/>. Version: Januar 2017
- [Pahl u. Damrath 2000] PAHL, P. ; DAMRATH, R.: *Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik*. Springer-Verlag, 2000. – ISBN 978–3–642–570131–1
- [Park u. a. 2011] PARK, Y. ; CHO, C. ; LEE, G.: Identifying a subset of BPMN for IDM development. In: *CIB W078-W102: 28th International Conference*. Sophia Antipolis, France, 2011, S. 26–28
- [Pennsylvania State University 2010] PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY: BIM Execution Planing Guide / Pennsylvania State University. Version: April 2010. <http://bim.psu.edu/>. 2010. – Forschungsbericht
- [Pilling 2017] PILLING, A.: *BIM-das digitale Miteinander: Planen, Bauen und Betreiben in neuen Dimensionen*. Beuth Verlag, 2017. – ISBN 978–3410261766

- [Pinheiro u. a. 2016] PINHEIRO, S. ; WIMMER, R. ; MUHIC, S. ; MAILE, T. ; O'DONNELL, J. ; BAZJANAC, V. ; FRISCH, J. ; TREECK, C. van: Model View Definition for Advanced Building Energy Performance Simulation. In: *BauSim Conference*. Dresden, Germany, 2016
- [Pinheiro u. a. 2017] PINHEIRO, S. ; WIMMER, R. ; O'DONNELL, J. ; MUHIČ, S. ; FRISCH, J. ; TREECK, C. van: MVD based Information Exchange between BIM and Building Energy Performance Simulation. In: *Automation in Construction* (2017)
- [Planen-Bauen 4.0 2015] PLANEN-BAUEN 4.0, Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens mbH: *Konzept zur schrittweisen Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken - Stufenplan zur Einführung von BIM*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-stufenplan-endbericht.pdf?__blob=publicationFile. Version: Dezember 2015
- [Przybylo 2017] PRZYBYŁO, J.: *BIM in der Anwendung: Beispiele und Referenzen*. Beuth Verlag, 2017. – ISBN 978–3410268154
- [Rose u. Bazjanac 2013] ROSE, C. ; BAZJANAC, V.: An algorithm to generate space boundaries for building energy simulation. In: *Engineering with Computers* (2013), Dezember, 1-10. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00366-013-0347-5>
- [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a. 2017] RWTH AACHEN UNIVERSITY E3D LEHRSTUHL FÜR ENERGIEEFFIZIENTES BAUEN ; RWTH AACHEN UNIVERSITY ENERGY EFFICIENT BUILDINGS AND INDOOR CLIMATE ; FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS ; FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ; KARLSRUHE INSTITUTE FOR TECHNOLOGY ; BERLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ; AEC3 GERMANY GMBH: *EnEff:BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung von Simulation auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen / RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen*. Version: Oktober 2017. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A89124431X/>. 2017. – Forschungsbericht
- [Scherer u. Schapke 2014a] SCHERER, R. ; SCHAPKE, S.: *Informationssysteme im Bauwesen*. Springer, 2014. – ISBN 978–3662447598
- [Scherer u. Schapke 2014b] SCHERER, R. ; SCHAPKE, S.: *Informationssysteme im Bauwesen 2: Anwendungen*. Springer-Verlag, 2014. – ISBN 978–3662447598
- [Scherer u. Schapke 2014c] SCHERER, R. ; SCHAPKE, S.: Multimodellbasierte Zusammenarbeit in Bauprojekten. In: *Informationssysteme im Bauwesen 1*. Springer, 2014. – ISBN 978–3662447598, S. 3–38
- [Schmidt 2002] SCHMIDT, D.: *Pattern-orientierte Software-Architektur: Muster für nebenläufige und vernetzte Objekte*. dpunkt-Verlag, 2002. – ISBN 978–3898641425

- [Schoch 2015] SCHOCH, O.: Schöne neue BIM-Welt. In: *Ernst & Sohn Special BIM* (2015), November, S. 7–11
- [See 2010] SEE, R.: Concept Design BIM 2010 / IFC Solutions Factory. Version: 2010. <http://www.blis-project.org/IAI-MVD/>. 2010. – Forschungsbericht
- [See u. a. 2011] SEE, R. ; HAVES, P. ; SREEKANTHAN, P. ; BASARKAR, M. ; O'DONNELL, J. ; SETTLEMYRE, K.: Development of a user interface for the EnergyPlus whole building energy simulation program. In: *IBPSA Building Simulation*. Sydney, Australia, 2011
- [Shearer 2000] SHEARER, C.: The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. In: *Journal of data warehousing* (2000), S. 13–22
- [Shen u. a. 2009] SHEN, Geoffrey ; BRANDON, Peter ; BALDWIN, Andrew: *Collaborative construction information management*. Routledge, 2009
- [Silver 2011] SILVER, B.: *BPMN Method and Style, with BPMN Implementer's Guide: A structured approach for business process modeling and implementation using BPMN 2.0*. Cody-Cassidy Press Aptos, 2011. – ISBN 978–0982368114
- [Smart Vision Europe 2015 2016] SMART VISION EUROPE 2015: *Cross-Industry Standard Process for Data Mining*. <http://crisp-dm.eu/>. Version: Juli 2016
- [Steinmann 2015] STEINMANN, R.: 13. BIM-Anwendertag. BIM-Standards für Deutschland. Präsentation. www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=File.download&id=2656&name=bS-Anwendertag_150624_Steinmann.pdf. Version: Oktober 2015
- [van Treeck 2004] TREECK, C. van: *Gebäudemodell-basierte Simulation von Raumluftströmungen*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [van Treeck 2016a] TREECK, C. van: Erweiterung von BIM Modellentwicklungsgraden zur Unterscheidung von Modellinhalt und Modellqualität. In: *HLH* (2016), November, S. 24–28
- [van Treeck 2016b] Kapitel 1. In: TREECK, C. van: *Gebäude. Technik. Digital. Building Information Modeling: BIM, Energiekonzept, Trinkwasser, Brandschutz, Recht. Building Information Modeling*. VDI Springer, 2016 (ISBN 978-3-662-52825-9)
- [van Treeck u. a. 2018] TREECK, C. van ; SIWIECKI, J. ; SCHMIDT, P. ; ZEPPENFELDT, U.: Digitale Planung und BIM in der TGA: konzeptbasierte Methoden als Strukturgeber für den integralen Planungsprozess. In: *IBPSA Building Simulation*. Karlsruhe, Germany, 2018
- [van Treeck u. a. 2015] Kapitel 18 BIM für die Energiebedarfsermittlung und Gebäudesimulation. In: TREECK, C. van ; WIMMER, R. ; MAILE, T.: *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI Buch, Springer Verlag, 2015 (ISBN 978-3-658-05605-6), S. 293–303

- [Tuschy 2014] TUSCHY, S.: Building Information Modeling (BIM) - Eine bisher weitgehend unbekannte Größe in der TGA. Version: Oktober 2014. <http://btga.de/almanach/2014/088-091.pdf>. In: *BTGA-Almanach 2014*. Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e. V., Oktober 2014
- [VBI 2016] VBI, Verband Beratender Ingenieure: *BIM-Leitfaden für die Planerpraxis - Empfehlungen für planende und beratende Ingenieure*. Online. http://www.vbi.de/uploads/media/VBI_BIM-Leitfaden_0916-final.pdf. Version: September 2016
- [VDI 2018] VDI: *BIM-Gremien – ISO, CEN, DIN und VDI (Stand: 2016-05-01)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin. https://m.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gbg_dateien/UEbersicht_Spiegelung_BIM-Gremien_Stand_2018_03.pdf. Version: Dezember 2018
- [VDI 2078 2015] *Calculation of thermal loads and room temperatures (design cooling load and annual simulation)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [VDI 2552-3 2017] *Building Information Modeling - Mengen und Controlling*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017
- [VDI 3805 2011] *Product data exchange in the Building Services - Fundamentals*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011
- [VDI 6007-1 2012] *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden*. Beuth Verlag GmbH, 2012
- [VDI 6026 2008] *Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen*. Beuth Verlag GmbH, 2008
- [Venugopal u. a. 2012] VENUGOPAL, M. ; EASTMAN, C. ; SACKS, R. ; TEIZER, J.: Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema. In: *Advanced engineering informatics* (2012), S. 411–428
- [W3C 2012] W3C: *W3C XML Schema Definition Language (XSD)*. Online. <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>. Version: April 2012
- [Weise 2006] WEISE, M.: *Ein Ansatz zur Abbildung von Änderungen in der modell-basierten Objektplanung*. TU Dresden, Institut für Bauinformatik, Diss., 2006
- [Wetter u. a. 2015] WETTER, M. ; BONVINI, M. ; NOUIDUI, T. ; TIAN, W. ; ZUO, W.: Modelica Buildings Library 2.0. In: *Proceedings of 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2015, S. 387–394
- [Wetter u. van Treeck 2017] WETTER, M. ; TREECK, C. van: IEA EBC Annex 60: New Generation Computational Tools for Building & Community Energy Systems / Energy in Buildings and Communities Programme. Version: Mai 2017. <http://www.iea-annex60.org/>. 2017. – Final Report

- [Wimmer u. Wimmer 2017] WIMMER, K. ; WIMMER, N.: *Conceptual Modeling of Complex Artifacts*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. – ISBN 978–1542963602
- [Wimmer u. a. 2015a] WIMMER, R. ; CAO, J. ; REMMEN, P. ; MAILE, T. ; O'DONNELL, J. ; FRISCH, J. ; STREBLOW, R. ; MÜLLER, D. ; TREECK, C. van: Implementation of advanced BIM-based mapping rules for automated conversion to Modelica. In: *IBPSA Building Simulation*. Hyderabad, India, 2015
- [Wimmer u. a. 2014] WIMMER, R. ; MAILE, T. ; O'DONNELL, J. ; CAO, J. ; TREECK, C. van: Data-requirements specification to support BIM-based HVAC-definitions in Modelica. In: *BauSIM 2014*. Aachen, Germany, 2014
- [Wimmer u. a. 2017] WIMMER, R. ; PINHEIRO, S. ; O'DONNELL, J. ; MAILE, T. ; MUHIC, S. ; FRISCH, J. ; BAZJANAC, V. ; TREECK, C. van: Realizing openBIM - Development of a BIM Model View Definition for Advanced Building Energy Performance Simulation. In: *Gebäudetechnik | Innenraumklima* (2017), August, S. 276–291
- [Wimmer u. a. 2015b] WIMMER, R. ; REMMEN, P. ; LAUSTER, M. ; CAO, J. ; PINHEIRO, S.: Planning and Design of Energy Efficient Buildings by Combining BIM and Modelica. In: *27. Forum Bauinformatik*. Aachen, Germany, 2015
- [Wissenschaftlicher Rat Dudenredaktion 2006] WISSENSCHAFTLICHER RAT DUDENREDAKTION: *Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Bd. 1*. Dudenverlag, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus, 2006. – ISBN 978–3411055081
- [Wix u. Karlshoej 2010] WIX, J. ; KARLSHOEJ, J.: Information Delivery Manual - Guide to Components and Development Methods / BuildingSMART International. Version: Mai 2010. [http://web.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/IndustryFoundationClasses\(IFC\)/IDM/IDM2{ }Methodology.pdf](http://web.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/IndustryFoundationClasses(IFC)/IDM/IDM2{ }Methodology.pdf). 2010. – Forschungsbericht
- [Wu u. Issa 2014] WU, W. ; ISSA, R.: BIM execution planning in green building projects: LEED as a use case. In: *Journal of Management in Engineering* (2014), Dezember
- [Zeb u. Froese 2011] ZEB, J. ; FROESE, T.: Design and management of transactions in the AEC/FM industry using an ontological approach. In: *3rd International/9th Construction Specialty Conference, Ottawa, Canadian Society of Civil Engineering*, 2011, S. 1–10
- [Zeb u. a. 2012] ZEB, J. ; FROESE, T. ; VANIER, D.: A review of the process formalization standards to develop a transaction protocol for infrastructure management. In: *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2012* (2012), November, S. 405

Anhang

Anhang

A.1 Gebäudetechnische Komponenten des IFC4-Datenmodells

Tabelle A.1: Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 1.

General MEP Elements	Allgemeine TGA Elemente
<i>IfcEngine</i>	Motor
<i>IfcMedicalDevice</i>	Medizinisches Gerät
<i>IfcUnitaryEquipment</i>	Einbaufertige Anlage
<i>IfcFlowMeter</i>	Zähler (allgemein)
<i>IfcFilter</i>	Filter
Ports for Connectivity	Anschlüsse
<i>IfcDistributionPort</i>	Anschluss/ Port
Heating, Cooling	Heizung, Kühlung
<i>IfcBoiler</i>	Heizkessel
<i>IfcBurner</i>	Brenner
<i>IfcCoil</i>	Heiz- / Kühlelemente
<i>IfcSpaceHeater</i>	Heizkörper
<i>IfcTubeBundle</i>	Rohrbündel
Plumbing	Sanitär
<i>IfcSuppressionTerminal</i>	Feuerlöscheinrichtung
<i>IfcInterceptor</i>	Abscheider
<i>IfcSanitaryTerminal</i>	Sanitäreinrichtung
<i>IfcStackTerminal</i>	Rohrabdeckung
<i>IfcTank</i>	Tank
<i>IfcWasteTerminal</i>	Ablauf/ Abscheider
Common	Allgemein
<i>IfcPipeSegment</i>	Rohr
<i>IfcPipeFitting</i>	Rohrverbinder
<i>IfcPump</i>	Pumpe
<i>IfcValve</i>	Ventil
Ventilation	Lüftung
<i>IfcAirTerminalBox</i>	Volumenstromregler
<i>IfcDamper</i>	Regelklappe
<i>IfcDuctSilencer</i>	Kanalschalldämpfer

Tabelle A.2: Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 2.

Air Conditioning	Klima
<i>IfcAirToAirHeatRecovery</i>	Wärmerückgewinner
<i>IfcChiller</i>	Kältemaschine
<i>IfcCondenser</i>	Kondensator
<i>IfcCooledBeam</i>	Kühlbalken
<i>IfcCoolingTower</i>	Kühlturm
<i>IfcEvaporativeCooler</i>	Verdunstungskühler
<i>IfcEvaporator</i>	Verdampfer
<i>IfcHeatExchanger</i>	Wärmetauscher
<i>IfcHumidifier</i>	Befeuchter
<i>IfcCompressor</i>	Kompressor
Common	Allgemein
<i>IfcDuctSegment</i>	Kanal
<i>IfcDuctFitting</i>	Kanalverbinder
<i>IfcAirTerminal</i>	Luftauslass
<i>IfcFan</i>	Ventilator
Electrical	Elektrotechnik
<i>IfcElectricAppliance</i>	elektrisches Gerät
<i>IfcElectricDistributionBoard</i>	elektrischer Verteilungsregler
<i>IfcElectricGenerator</i>	Elektrogenerator
<i>IfcElectricMotor</i>	Elektromotor
<i>IfcElectricFlowStorageDevice</i>	elektrisches Speichergerät
<i>IfcElectricTimeControl</i>	elektrische Zeitsteuerung
<i>IfcMotorConnection</i>	Motoranschluss
<i>IfcProtectiveDevice</i>	Sicherung
<i>IfcAudioVisualAppliance</i>	audiovisuelles Gerät
<i>IfcCommunicationsAppliance</i>	Kommunikationsgerät
<i>IfcJunctionBox</i>	Verbindungsdose
<i>IfcLamp</i>	Lampe/ Leuchtmittel
<i>IfcLightFixture</i>	Leuchte
<i>IfcSolarDevice</i>	Solargerät
<i>IfcSwitchingDevice</i>	Schalter
<i>IfcTransformer</i>	Transformator

Tabelle A.3: Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 3.

Common	Allgemein
<i>IfcCableSegment</i>	Kabelsegment
<i>IfcCableFitting</i>	Kabelverbinder
<i>IfcCableCarrierSegment</i>	Kabelträgersegment
<i>IfcCableCarrierFitting</i>	Kabelträger Passstück
Building Automation	Gebäudeleittechnik
<i>IfcActuator</i>	Aktor
<i>IfcAlarm</i>	Alarm/ Gefahrenmelder
<i>IfcController</i>	Regler
<i>IfcFlowInstrument</i>	Messinstrument (allgemein)
<i>IfcProtectiveDeviceTrippingUnit</i>	Sicherungsschalter
<i>IfcUnitaryControlElement</i>	Einheitsregler
<i>IfcSensor</i>	Sensor

A.2 IfcUnitaryEquipment

Die Entität *IfcUnitaryEquipment* wird dazu genutzt komplexe Komponenten, bestehend aus mehreren gebäudetechnischen Grundbausteinen, als eine Einheit darzustellen. Bspw. werden somit Lüftungseinheiten, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplungen, etc. aggregiert. Abbildung A.1 zeigt eine Wärmepumpe, Abbildung A.2 zeigt ein Blockheizkraftwerk jeweils definiert als *IfcUnitaryEquipment*. Dargestellt sind die notwendigen Objekte bzw. Entitäten, deren Port Connectivity und Signalübertragung für die MSR. Die blauen Kästen stellen die einzelnen Entitäten mit deren Typen dar und die darunter positionierten grünen Kästen repräsentieren die jeweiligen Ports. Die schwarzen Pfeile veranschaulichen die Port-Verbindungen inklusive Flussrichtung und die violetten Bögen heben hervor, welche Entitäten zum Zweck für die MSR innerhalb der Komponente zusätzlich genutzt werden. Durch den violetten Punkt am Ende des Bogens ist das Objekt gekennzeichnet, dass das Kontrollsignal erhält.

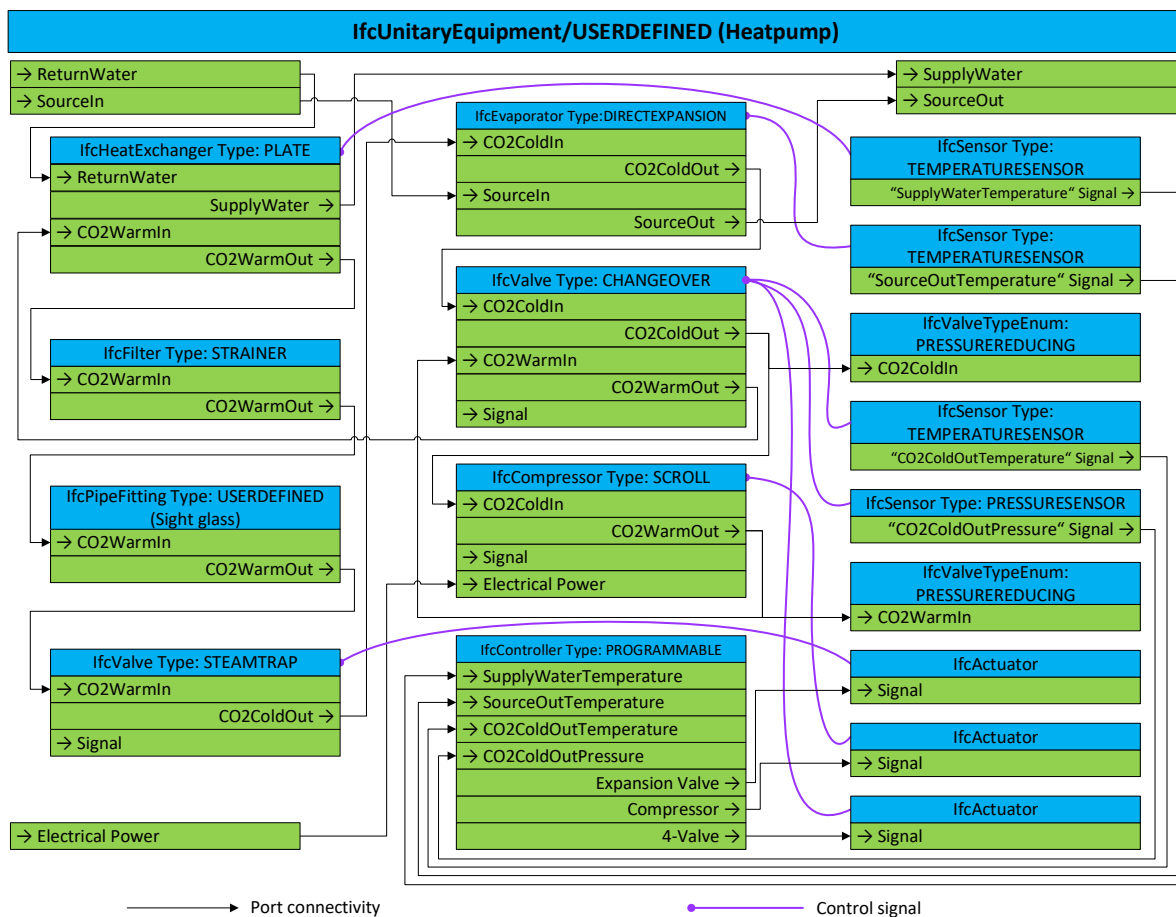


Abbildung A.1: Beispiel einer *IfcUnitaryEquipment*, ausgeführt als Wärmepumpe (Heatpump).

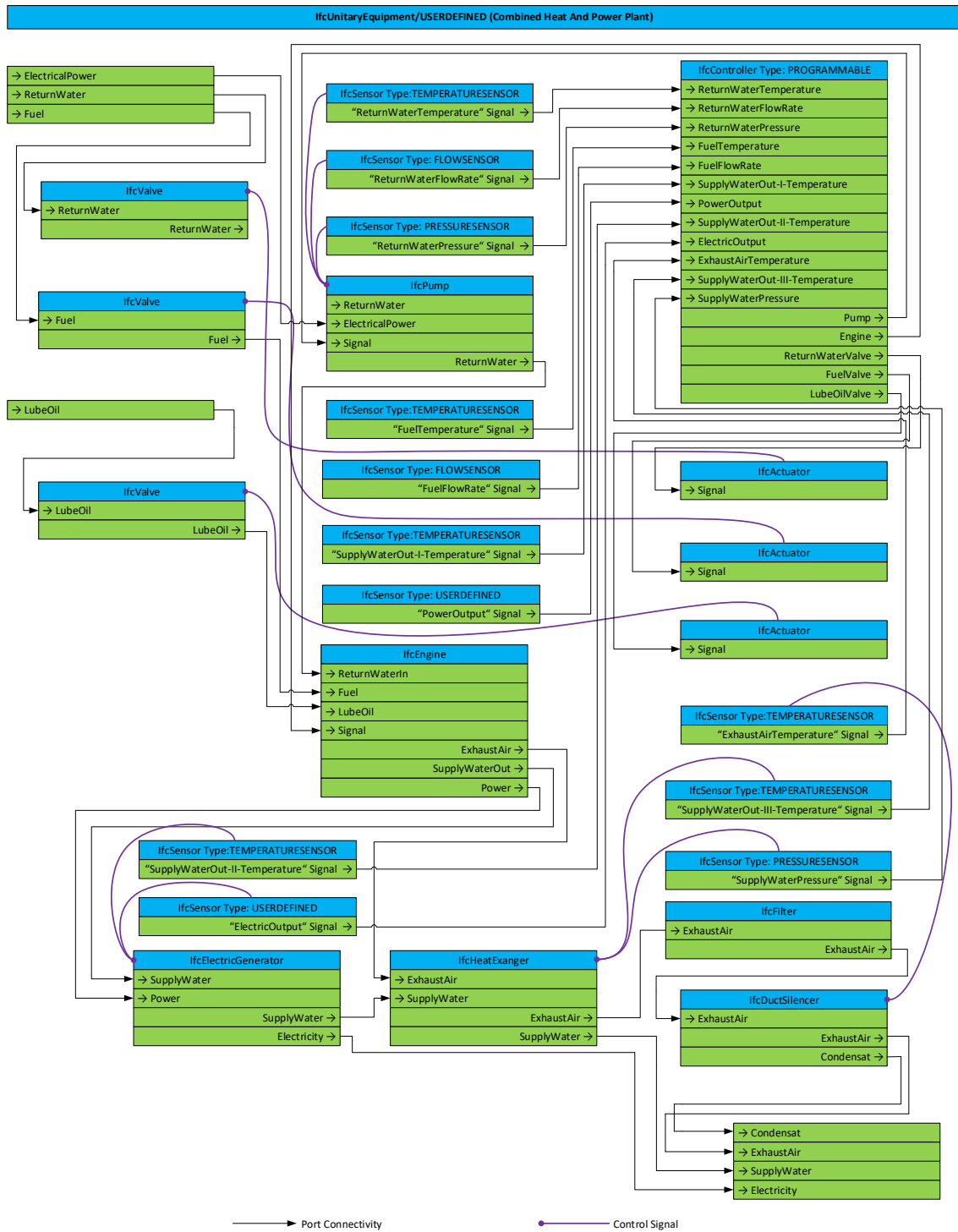


Abbildung A.2: Beispiel einer *IfcUnitaryEquipment*, ausgeführt als Kraft-Wärme-Kopplung (CHP).

Damit die Wärmepumpe und das Blockheizkraftwerk in Form einer *IfcUnitaryEquipment* definiert werden können, müssen zusätzlich noch die entsprechenden Konzepte spezifiziert. Die für eine erfolgreiche Validierung dieser Aggregation benötigten Konzepte sind:

- ▷ Object Typing;
- ▷ Property Sets for Objects;
- ▷ Quantity Sets;
- ▷ Material Constituent Set;
- ▷ Aggregation;
- ▷ Port Nesting.

Die entsprechenden Konzepte sind in der MVD definiert.

A.3 Wassergeführte Anwendungsbeispiele

Die folgenden Anwendungsbeispiele wurden im Projekt EnEff:BIM spezifiziert und zur Untersuchung der Schnittstelle genutzt [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].

Anwendungsbeispiel 1.1 Boiler and Radiator

Kurzbeschreibung „Der hydraulische Kreis des Anwendungsbeispiels 1.1 besteht aus folgenden Teilen, die nachfolgend eingehend erläutert werden (siehe Abbildung A.3):

1. Gas-Heizkessel zur Wärmeerzeugung;
2. Pumpe;
3. Heizkörper mit Thermostatventil (innerhalb der Zone);
4. Rohre und Verbindungsstücke um die Komponenten zu verbinden, inklusive Ventile;
5. Ausdehnungsgefäß.

Gas-Heizkessel Der Gas-Heizkessel hat eine maximale Leistung von 1300 W. Die Vorlauftemperatur wird auf einen konstanten Wert von 70 °C geregelt. Das Wasservolumen im Wärmeübertrager des Kessels beträgt 0,01 m³. Der Wirkungsgrad ist vom Teillastverhalten abhängig und in Tabelle A.4 in Abhängigkeit der Teillast gegeben.

Tabelle A.4: Wirkungsgrad des Gas-Heizkessels in Abhängigkeit der Teillast.

Teillast	Wirkungsgrad
0,0	0,78
0,2	0,78
0,4	0,82
0,6	0,84
0,8	0,86
1,0	0,88

Pumpe Die Pumpe hat eine maximale Förderhöhe von 5 m. Der maximale Volumenstrom von 3 m³/h ist bei einer Förderhöhe von 0,5 m möglich. Die Fördercharakteristik der Pumpe ist abhängig

vom Volumenstrom und kann in zwei Modi abgerufen werden. Tabelle A.5 stellt die volle Förderleistung sowie den reduzierten Betrieb dar, der Nachts zwischen 18 Uhr und 5 Uhr morgens aktiv ist.

Tabelle A.5: Fördercharakteristik der Pumpe in Abhängigkeit des Volumenstroms für reduzierten und normalen Betrieb.

Volumenstrom [m ³ /h]	Förderhöhe min. [m]	Förderhöhe max. [m]
0,00	0,6	5,0
0,50	0,4	4,5
0,75	0,3	3,0
1,30	0,0	2,5
1,50	0,0	1,5
2,50	0,0	1,0
3,00	0,0	0,5
3,50	0,0	0,0

Heizkörper Der Heizkörper vom Typ 11 (eine Platte, ein Konvektorblech) besitzt folgende Eigenschaften, welche sich nach der Europäischen Norm ISO EN 442 [DIN EN 442-1, 2015] richten:

Tabelle A.6: Eigenschaften des Heizkörpers.

Parameter	Wert
Norm-Wärmeleistung	979 W
Vorlauftemperatur	75 °C
Rücklauftemperatur	65 °C
Bezugs-Lufttemperatur	20 °C
Volumen	3,15 l
Masse (Stahl)	19,58 kg
Länge	1,0 m
Breite	0,6 m
Strahlungsanteil der Wärmeleistung	0,35
Emissionsgrad	0,35

Thermostatventil Die Leistungsregelung des Heizkörpers wird über ein Ventil realisiert. Der Regler kann als P-Regler mit einer Verstärkung von 0,1 und dem Stellbereich zwischen 0 (komplett geschlos-

sen) und 1 (komplett geöffnet) angesehen werden. Die Solltemperatur wird auf 20 °C gesetzt. Diese Regelung entspricht der eines Thermostatventils.

Sonstiges Dieses Anwendungsbeispiel wird durch Rohre im Vor- und Rücklauf, ein Ausdehnungsgefäß und Ventilen komplementiert. Die Kupferrohre verbinden die Komponenten untereinander; der Durchmesser beträgt jeweils 0,03 m. Die Verbindungen werden mit Hilfe von Verbindungs- und Anschlusselementen, sogenannter Fittings, realisiert. Das Ausdehnungsgefäß wird im Rücklauf des hydraulischen Kreises vor der Pumpe installiert und hält den Druck im Kreis auf einem konstanten Niveau von 0,03 bar. Das Gefäß umfasst 35 l.

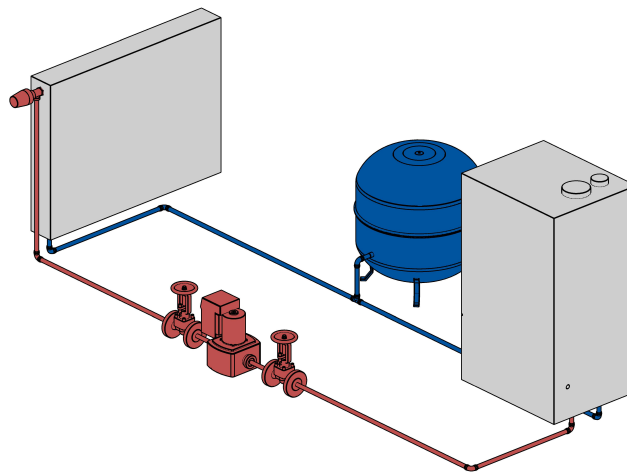


Abbildung A.3: Anwendungsbeispiel 1.1. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Anwendungsbeispiel 1.2 Boiler and Radiator and Domestic Hot Water System

Kurzbeschreibung Das Anwendungsbeispiel 1.2 entspricht im Wesentlichen dem Anwendungsbeispiel 1.1, wird jedoch um einen TWW-Speicher zur Versorgung des Gebäudes mit Brauchwarmwasser erweitert. Dazu wird ein Speicher, ein Drei-Wege-Ventil zur Be- bzw. Entladung des Speichers und eine Zapfstelle zur Entnahme des Wassers installiert (siehe Abbildung A.4).

TWW-Speicher Der TWW-Speicher wird nur zur Entnahme von Brauchwarmwasser genutzt. Der Bedarf wurde gemäß DIN 4708 Teil 2 berechnet [DIN 4708-2, 1994]. Der Speicher hat folgende Eigenschaften:

Tabelle A.7: Eigenschaften des TWW-Speichers.

Parameter	Wert
Durchmesser	0,72 m
Höhe	1 m
Wärmeübertragervolumen	0,05 m ³
Wärmeübertragungskoeffizient Wärmeübertrager	1500 W/(m * K)
Wärmeübertragerfläche	20 m ²
Wärmeleitfähigkeit Dämmung	0,2 m
Dämmstärke	0,2 m
Wärmeübertragungskoeffizient innen	1500 W/(m * K)
Wärmeübertragungskoeffizient außen	15 W/(m * K)

Drei-Wege-Ventil Das Drei-Wege-Ventil wird zur Be- bzw. Entladung genutzt. Der Speicher wird beladen, wenn der Raum die Solltemperatur erreicht hat und die Speichertemperatur unterhalb der Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers liegt.

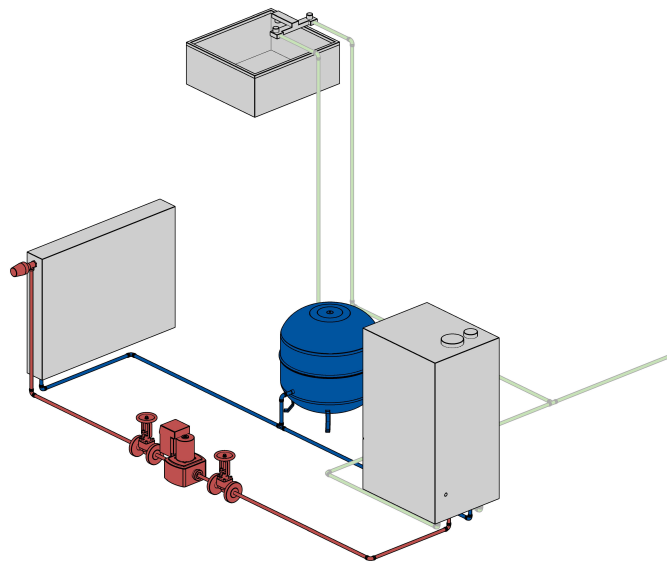


Abbildung A.4: Anwendungsbeispiel 1.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Anwendungsbeispiel 2.1 Heatpump and Radiator

Kurzbeschreibung Dieses Anwendungsbeispiel ersetzt den Gas-Heizkessel mit einer Wärmepumpe. Die übrigen Komponenten entsprechen dem Anwendungsbeispiel 1.1.

Wärmepumpe Die Wärmeleistung sowie die benötigte elektrische Leistung für den Verdichter werden anhand der Temperatur der Wärmesenke bzw. -quelle berechnet (siehe Tabelle A.8 und Tabelle A.9). Die Volumina im Verdampfer bzw. Kondensator betragen jeweils $0,01 \text{ m}^3$.

Tabelle A.8: Elektrische Leistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quellen-/Senktemperatur.

Quellen-/Senktemperatur [K]	273,15	283,15	288,15
308,15	203 W	212 W	217 W
328,15	296 W	323 W	337 W

Tabelle A.9: Kondensatorleistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quellen-/Senktemperatur.

Quellen-/Senktemperatur [K]	273,15	283,15	288,15
308,15	885 W	1162 W	1300 W
328,15	811 W	1060 W	1185 W

Anwendungsbeispiel 2.2 Heatpump and Floor Heating

Kurzbeschreibung Dieses Anwendungsbeispiel entspricht Anwendungsbeispiel 2.1, bis auf den Austausch des Heizkörpers durch eine Flächenheizung innerhalb der thermischen Zone (siehe Abbildung A.5).

Flächenheizung Die Flächenheizung ist in den Fußboden der thermischen Zone integriert und bedeckt die komplette Fläche von $17,5 \text{ m}^2$. Weitere Eigenschaften können Tabelle A.10 entnommen werden.

Tabelle A.10: Eigenschaften der Flächenheizung.

Parameter	Wert
Rohrabstand	0,2 m
Außendurchmesser	0,02 m
Rohrdicke	0,0025 m
Thermische Leitfähigkeit Rohr	0,35 W/(m * K)
Estrichdicke oberhalb	0,02 m
Estrichdicke unterhalb	0,02 m
Thermische Leitfähigkeit Estrich	0,35 W/(m * K)
Dichte Estrich	0,35 kg/m ³

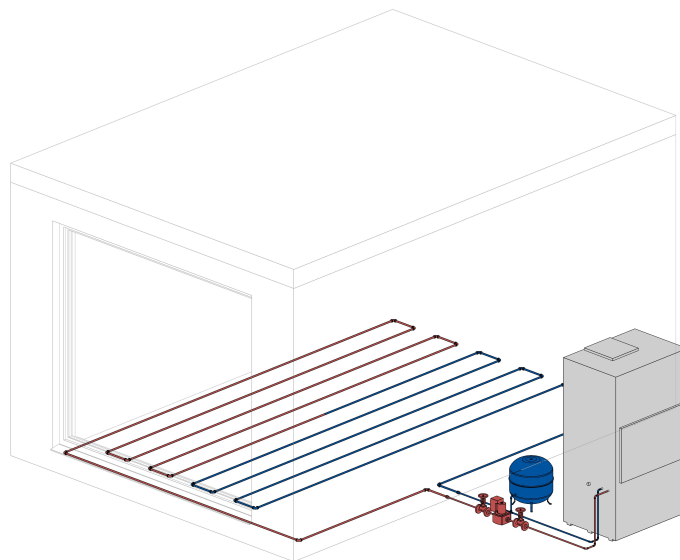


Abbildung A.5: Anwendungsbeispiel 2.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Anwendungsbeispiel 4.0 CHP and Boiler and Radiator

Kurzbeschreibung Dieses Anwendungsbeispiel entspricht Anwendungsbeispiel 1.1, mit dem Unterschied, dass anstatt des Gas-Heizkessels ein Mikroblokheizkraftwerk als Wärmeerzeuger eingesetzt wird, sowie ein Pufferspeicher zur zeitlichen Entkopplung von thermischem und elektrischem Energiebedarf (siehe Abbildung A.6).

Mikroblockheizkraftwerk Das Blockheizkraftwerk stellt gleichzeitig thermische und elektrische Energie bereit. Die Leistungscharakteristik sowie das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Energie ist durch folgende Parameter gegeben:

Tabelle A.11: Eigenschaften des Mikroblockheizkraftwerks.

Parameter	Wert
Elektrische Leistung	1000 W
Thermische Leistung	2500 W
Elektrischer Wirkungsgrad	0,27
Thermischer Wirkungsgrad	0,67
Brennstoffausnutzungsgrad	0,92
Modulierungsgrad	0,5

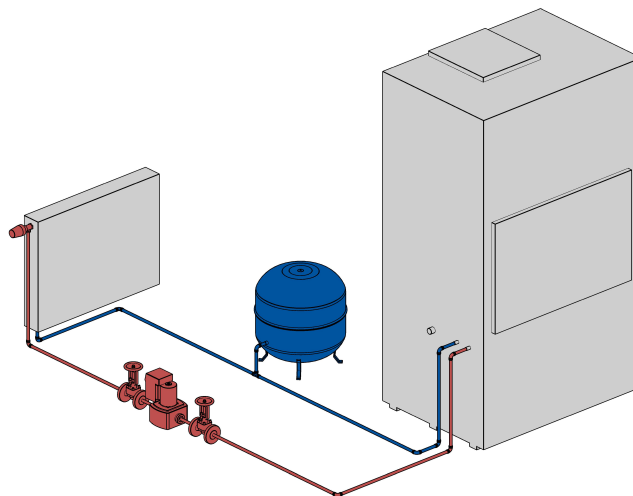


Abbildung A.6: Anwendungsbeispiel 4.0. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Drei-Wege-Ventil Das Drei-Wege-Ventil zur Regelung der Be- und Entladung des Pufferspeichers wird mit der nachfolgend beschriebenen Strategie betrieben. Wenn in der thermischen Zone ein Wärmebedarf besteht, wird der Pufferspeicher zuerst vollständig entladen bis die notwendige Vorlauf-temperatur nicht mehr erreicht werden kann. Besteht weiterhin ein Bedarf an thermischer Energie

schaltet das BHKW ein. Um ein häufiges Takten des BHKW zu vermeiden, wird es so lange betrieben, bis der thermische Bedarf der Zone gedeckt ist und der Speicher wieder vollständig beladen ist.

Anwendungsbeispiel 5.0 Multi Zone

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit wurde das in Abbildung A.7 dargestellte reale Gebäude als Anwendungsbeispiel in das Projekt mit aufgenommen. Es handelt sich um ein Bürogebäude mit drei Stockwerken, mehreren thermischen Zonen und einem Heizungssystem und befindet sich in der Mathieustraße 30 in 52074 Aachen. Diese Immobilie gehört zum Gebäudeportfolio der RWTH Aachen University. Es dient grundsätzlich als Büro, zusätzlich verfügt es über Seminarräume, CIP-Pools, Teeküchen, WCs und einem kleinen Serverraum.



Abbildung A.7: Anwendungsbeispiel 5.0, reales Bürogebäude in der Mathieustraße 30, 52074 Aachen.

Für dieses Anwendungsbeispiel ergeben sich folgende Randbedingungen:

- ▷ Norm Heizlast: 80 942 W;
- ▷ Förderhöhe der Pumpe: 9068 Pa;
- ▷ Fördermenge der Pumpe: 2,22 l/s;
- ▷ Neun thermische Zonen gemäß DIN 18599-10 (siehe Abbildung A.10);
- ▷ 96 Radiatoren;
- ▷ Gasheizkessel für die Wärmeversorgung (siehe Abbildung A.8);
- ▷ Nettogeschossfläche ungefähr 2220 m².

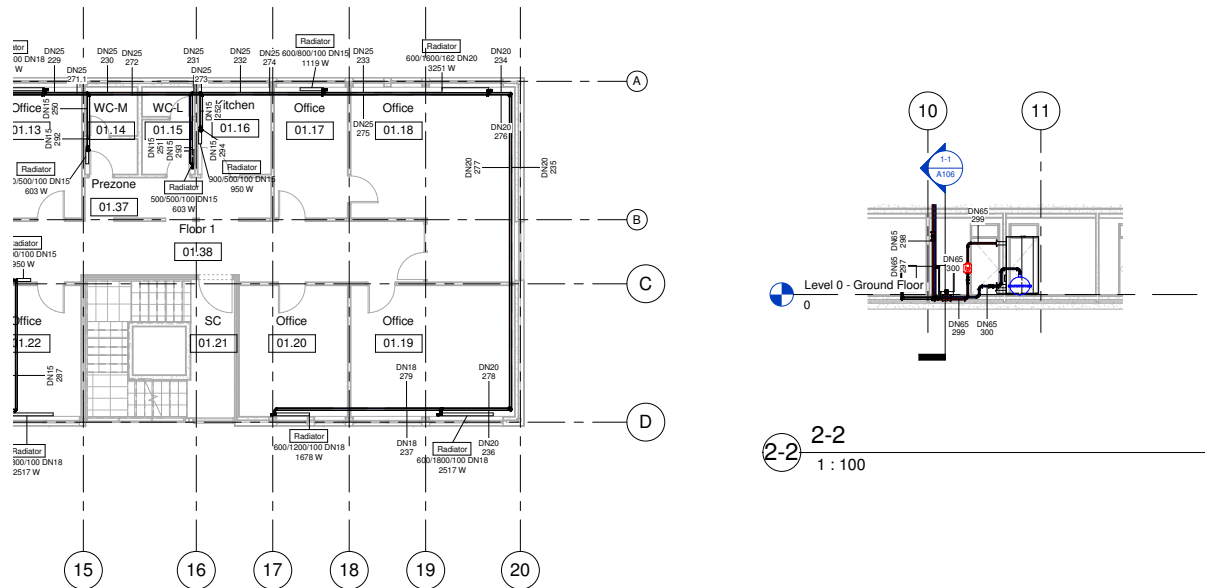


Abbildung A.8: Ausschnitt der Pläne des Heizungssystems.

Grundsätzlich gleicht das gebäudetechnische System dieses Anwendungsbeispiels dem des Anwendungsbeispiel 1.1, jedoch wird aus den Randbedingungen ersichtlich, dass es sich um wesentlich größere Dimensionen handelt. Jeder der 96 Radiatoren verfügt über einen Thermostat und kann von Hand bedient werden (siehe Abbildung A.9).

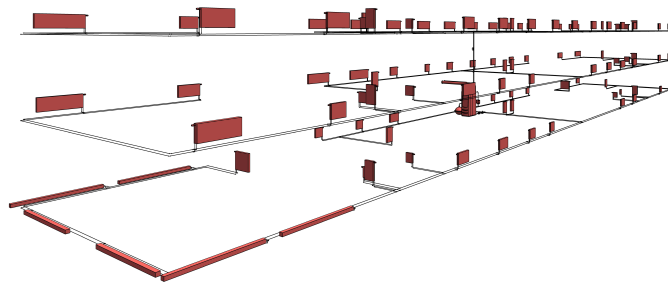


Abbildung A.9: Darstellung des Heizungssystems, erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Die thermischen Zonen der drei Etagen sind ebenfalls gemäß der DIN 18599-10 Tabelle 4 definiert

[DIN V 18599-10, 2016], wurden jedoch entsprechend der realen Umsetzung angepasst, so dass auf jeder Etage drei thermische Zonen vorhanden sind. Diese neun thermischen Zonen teilen sich auf den drei Etagen auf die thermischen Zonen Büro West, Büro Ost und Flur auf und sind in Abbildung A.10 farblich hervorgehoben.

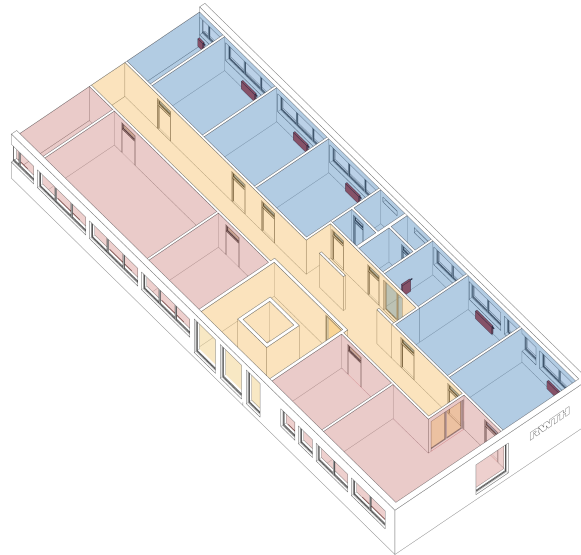


Abbildung A.10: Darstellung der thermischen Zonen mit Aufteilung nach Büro Ost (blau) und Büro West (rot) sowie Flur (gelb).

Die Gebäudehülle und somit die Fassade wurde dem realen Gebäude entsprechend modelliert (siehe Abbildung A.11). Der Schichtaufbau jeder einzelnen Wand ist im Modell hinterlegt. Tabelle A.12 zeigt beispielhaft den Wandaufbau einer Außenwand auf der Westseite des Gebäudes.

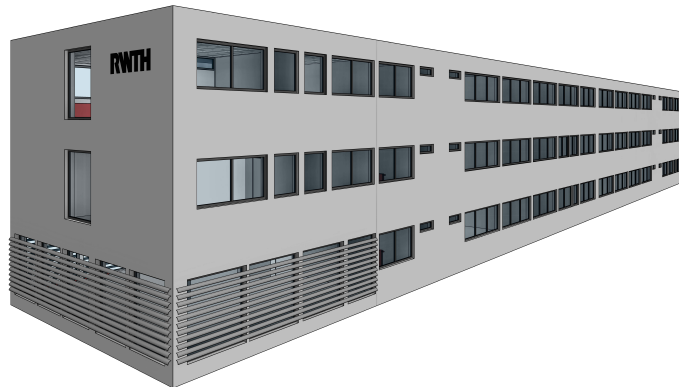


Abbildung A.11: Ansicht des BIM-Modells, erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Die Außenwand hat dabei einen U-Wert von $0,213 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Ebenso entsprechen die Innenwände der realen Umsetzung mit einem U-Wert im Bereich von $0,2492 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \dots 0,452 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (siehe Abbildung A.12). Einen U-Wert im Bereich von $0,0756 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \dots 0,2696 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ergibt sich für die Deckenkonstruktionen. Die Bodenplatte hat einen U-Wert von $0,0652 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Die Fenster weisen im Schnitt einen U-Wert von $1,4554 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf.

Tabelle A.12: Materialkennwerte der einzelnen Schichten der Außenwand vom Anwendungsbeispiel 5.0.

	d m	λ $\text{W}/(\text{mK})$	ρ kg/m^3	c J/kg	R $\text{m}^3 \text{K}/\text{W}$
Gipskartonplatten	0,0125	0,65	1100	0,84	0,019
PE-Folie	0,0002	0,502	950	2,301	0
Gipskartonplatten	0,0125	0,65	1100	0,84	0,019
Mineralwolle	0,1	0,04	200	0,71	2,5
Gipsfaser	0,015	0,32	1150	1,1	0,047
Mineral, pflanzl. Faserdämmstoffe	0,06	0,034	200	0,71	1,765
Luftschicht (ruhend)	0,1	0,025	1,2	1,0035	0,18
Aluminium-Kassettenprofil	0,03	235	2700	0,897	0

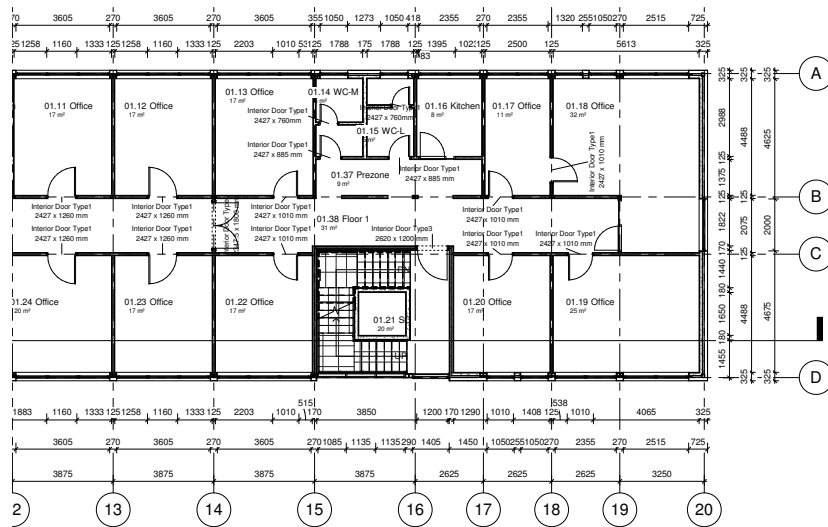


Abbildung A.12: Teilgrundriss der ersten Etage, ohne TGA.

A.4 Luftgeführte Anwendungsbeispiele

Anwendungsbeispiel 3.1 AHU for Heating

Kurzbeschreibung Das Anwendungsbeispiel 3.1 beschreibt eine Teilklimaanlage und besteht aus den folgenden Komponenten (siehe Abbildung A.13):

1. Heizaggregat;
2. Filter;
3. Schalldämpfer;
4. Lüftungskanäle mit, Klappen und Luftein- und -auslässen;
5. Ventilatoren.

Heizaggregat Die Lüftungsanlage ist als Teilklimaanlage ausgelegt, so dass die Konditionierung der Zuluft lediglich durch Aufheizen des Luftvolumenstroms geregelt wird. Die Ergebnisse der Heizlastberechnung ergaben, dass die Anlage 1000 W leisten muss.

Luftfilter Die Luftfilter sind als Feinstaubfilter der Filterklasse F7 für Büroräume ausgelegt.

Schalldämpfer Zur Vermeidung von Schallemissionen in den Raum oder nach Außen werden Schalldämpfer in der Lüftungsanlage vor dem Einlass und nach dem Auslass im Zu- und Abluftkanal positioniert. Es werden Reflexionsschalldämpfer verwendet.

Lüftungskanäle Das Luftleitsystem besteht aus rechteckigen Kanalleitungen. Da sich die Form, die Geschwindigkeit des Luftvolumenstroms und somit die Reynoldszahl nicht ändert ergibt sich ein Druckverlust von 0,1 Pa/m für die Zuluftkanäle. Bei den Abluftkanälen ist ein Gesamtdruckverlust von ungefähr 150 Pa gegeben.

Ventilatoren Die Ventilatoren befinden sich in den Zu- und Abluftkanälen und sind als Axialventilatoren ausgeführt. Es wird insgesamt ein Druck von von 350 Pa aufgebaut.

Wie bereits auf Seite 141 beschrieben kann das IFC-Modell semantisch erweitert werden. Dies wurde ebenfalls für die luftgeführten Anwendungsbeispiele durchgeführt.

IfcCoil

Für das Anwendungsbeispiel wurden die folgenden PSets als relevant erachtet:

- ▷ PSet_CoilTypeCommon für allgemeine Eigenschaften;
- ▷ PSet_CoilTypeCommon für die Aufzeichnung von Leistungswerten.

Relevante Properties sind:

- ▷ NominalSensibleCapacity: Nominelle sensible Leistung;
- ▷ NominalLatentCapacity: Nominelle latente Leistung;
- ▷ AirPressureDropCurve: Funktion zur Beschreibung des Druckverlusts in Abhängigkeit des zu fördernden Mediums und der Volumenstrommenge.

Zusätzlich wurden unter anderem der Property *Efficiency* zur Beschreibung der Effizienz des Heizregisters [-] in dem PSet *PSim_Coil* zum Zweck der optimalen Datengrundlage für die Simulation formuliert.

IfcFilter

Luftfilter werden in Modelica nicht definiert. Jedoch bietet das IFC-Schema energierelevante Informationen für diese Komponenten. Im PSet *Pset_FilterPHistory* werden Properties abgebildet, die die Effizienz des Filters und somit den Widerstand im Luftvolumenstrom beschreiben.

IfcDuctSilencer

Die Komponente Schalldämpfer wird ebenfalls nicht in einer der Modelica-Bibliotheken abgebildet. Das IFC-Schema bietet abermals energierelevante Informationen, die relevant für ein Simulationsmodell sein können. Die PSets *Pset_DuctSilencerTypeCommon* und *Pset_DuctSilencerPHistory* beinhalten:

- ▷ *AirPressureDropCurve*: Funktion zur Beschreibung des Druckverlusts in Abhängigkeit vom Volumenstrom;
- ▷ *HydraulicDiameter*: Hydraulischer Durchmesser;
- ▷ *AirFlowrateRange*: Zulässiger Bereich der Menge des Luftvolumenstroms.

IfcDuct

Für das Anwendungsbeispiel wurden die folgenden PSets als relevant erachtet (siehe Abbildung A.13):

- ▷ *PSet_DuctSegmentTypeCommon* für allgemeine Eigenschaften;
- ▷ *PSet_DuctSegmentPHistory* für die Aufzeichnung von Leistungswerten;
- ▷ *PSet_DuctSegmentOccurrence*.

Relevante Properties sind:

- ▷ *InteriorRoughnessCoefficient*: Reibungskoeffizient;
- ▷ *WorkingPressure*: Erlaubter Druckbereich für den Luftkanal;
- ▷ *TemperatureRange*: Maximal und minimal mögliche Temperatur zur Definition des Temperaturbereichs.

Zusätzlich wurden unter anderem die folgenden Properties in dem PSet *PSim_Duct* zum Zweck der optimalen Datengrundlage für die Simulation formuliert:

- ▷ *HydraulicDiameter*: Hydraulischer Durchmesser;
- ▷ *AirFlowrateRange*: Zulässiger Bereich der Menge des Luftvolumenstroms.

IfcFan

Für das Anwendungsbeispiel wurden die folgenden PSets als relevant erachtet:

- ▷ PSet_FanTypeCommon für allgemeine Eigenschaften;
- ▷ PSet_FanPHistory für die Aufzeichnung von Leistungswerten;
- ▷ PSet_FanOccurrence.

Relevante Properties sind:

- ▷ NominalAirFlowRate: Nominaler Luftvolumenstrom;
- ▷ NominalRotationSpeed: Nominale Umdrehungsgeschwindigkeit;
- ▷ PressureCurve: Funktion zur Beschreibung des Druckverlaufs in Abhängigkeit vom geförderten Volumensrom;
- ▷ ImpellerDiameter: Laufraddurchmesser.

Zusätzlich wurden unter anderem die folgenden Properties in dem PSet *PSim_Fan* zum Zweck der optimalen Datengrundlage für die Simulation formuliert:

- ▷ *FanPowerCoefficient*: Koeffizienten der Leistungskurve des Ventilators;
- ▷ *PressureRise*: Druckerhöhung des Motors.

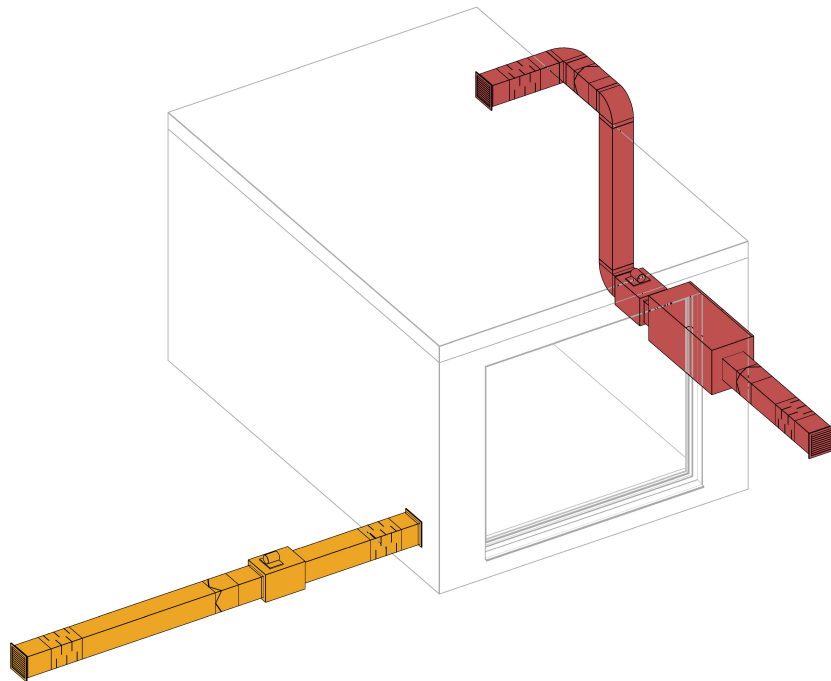


Abbildung A.13: Anwendungsbeispiele 3.1 und 3.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.

Anwendungsbeispiel 3.2 AHU for Cooling

Kurzbeschreibung Das Anwendungsbeispiel 3.2 entspricht dem Anwendungsbeispiel 3.1, jedoch wird der Zuluftvolumenstrom gekühlt anstatt erhitzt. Dementsprechend ergeben sich folgende Komponenten:

1. Kühlaggregat;
2. Filter;
3. Schalldämpfer;
4. Lüftungskanäle mit, Klappen und Luftein- und -auslassen;
5. Ventilatoren.

Kühlaggregat Das Kühlaggregat senkt die Temperatur der Zulufttemperatur ab ohne dabei den Taupunkt zu unterschreiten. Die Ergebnisse der Kühllastberechnung haben ergeben, dass ungefähr 168 W/m^2 abgeführt werden müssen, so dass die Anlage für ungefähr 2940 W ausgelegt ist.

Ventilatoren Wegen der Temperaturänderung und der daraus resultierenden höheren Dichte der Zuluft muss der Zuluftventilator ungefähr 220 Pa Leistung aufbringen.“

A.5 Leistungsphasen VDI 6026

Grundlagenermittlung (LP-1) Vor dem Beginn der Projektplanung sind die Ziele und Rahmenbedingungen des Projekts vom Auftraggeber zu definieren. Dabei sollen die Fachplaner einbezogen werden, um realisierbare Ziele zu formulieren und frühzeitig die Zusammenarbeit zu fördern. Diese Vorleistung wird auch als „strategische Planung“ bezeichnet und in der VDI-Richtlinie 6026 aus dem Jahr 2002 noch als Leistungsphase 0 aufgeführt [VDI 6026, 2008]. Die strategische Vorplanung ist für einen erfolgreichen Projektablauf unerlässlich und kann, wie alle folgenden Leistungsphasen, anhand der HOAI entsprechend vergütet werden. Die strategische Planung wird in der neueren VDI-Richtlinie 6026 nicht als eigene Leistungsphase, sondern als Teil der Grundlagenermittlung formuliert. Die Grundlagenermittlung beinhaltet zudem überschlägige Berechnungen der Statik und Ver- und Entsorgungstechnik. Außerdem sind ein Katasterplan, ein Bebauungsplan und ein Plan der Ver- und Entsorgung des Grundstücks vorzulegen.

Vorplanung (LP-2) In der Vorplanung soll auf Grundlage von LP-1 „eine erste Darstellung der zu errichtenden Anlage“ erstellt werden. Dazu wird eine grobe Bemessung der Bauteile und der Anschlusswerte ans Versorgungsnetz durchgeführt. Dies dient der Abschätzung des Flächenbedarfs für Versorgungsanlagen und der Anschlussleistungen. Größere Bauteile, Anlagen und die voraussichtliche Möblierung werden in den Grundrissen dargestellt, um frühzeitig zu erkennen, ob eine ausreichende Nutzfläche vorhanden ist. Die gewerkeübergreifende Abstimmung ist hier besonders wichtig, um späteren Unstimmigkeiten vorzubeugen. Vor Eintritt in die dritte Leistungsphase ist eine Kostenabschätzung vorzunehmen.

Entwurfsplanung (LP-3) Die dritte Leistungsphase kann in zwei Varianten ausgeführt werden. Bei der Variante „normal weiterlaufend“ wird die Grobbemessung aus LP-2 soweit verfeinert, dass keine grundlegenden Änderungen mehr notwendig sind. Die Endbemessung zur Ausführungsreife erfolgt in der Ausführungsplanung (LP-5). Bei der Variante „hier endend“ wird der Entwurf an andere Fachplaner übergeben, die die spätere Ausführungsplanung übernehmen. Dazu müssen die übergebenen Pläne und Bemessungen soweit ausgereift sein, dass nur geringe Abweichungen zu der Endbemessung auftreten dürfen. Der Detailgrad ist bei dieser Variante demnach höher als bei der Variante „normal weiterlaufend“.

Genehmigungsplanung (LP-4) Die Genehmigungsplanung ist entscheidend für das Fortlaufen des Projekts, da ohne die öffentlich-rechtliche Genehmigung keine weitere Planung möglich ist. Für die Freigabe von LP-4 ist die zuständige Genehmigungsbehörde verantwortlich. Zur Vereinfachung des Genehmigungsprozesses wird empfohlen, den geforderten Detailgrad des einzureichenden

Entwurfs mit der jeweiligen Genehmigungsbehörde abzustimmen. Je nach gefordertem Detailgrad müssen die Ergebnisse aus LP-3 weiter verfeinert werden.

Ausführungsplanung (LP-5) Nach einer genehmigten Entwurfsplanung wird in der fünften Leistungsphase eine weitere Verfeinerung aller Berechnungen und Pläne vorgenommen. Die Dimensionierungen und Berechnungen sind dabei zur Ausführungsreife fertigzustellen und zu dokumentieren. Dazu gehört ebenfalls die genaue Beschreibung aller TGA-Komponenten mit Anschlussleistung, Kenndaten und gegebenenfalls Herstellerangaben. In den Plänen werden Versorgungsleitungen und deren Querungen durch Schnitte und Detailzeichnungen dargestellt, sodass „die Koordinierung der Gewerke deutlich wird“. Sobald die Planung der ersten Bauphasen (bspw. Ausschachtung, Fundamente, Ver- und Entsorgungsleitungen des Grundstücks, etc.) zur Ausführungsreife abgeschlossen ist, kann die Errichtung des Bauwerks beginnen.

Montageplanung (LP-6) In der Montageplanung werden die Berechnungen aus LP-5 nochmals geprüft. Das Ziel dieser Leistungsphase ist die Erstellung von umfangreichen Montageplänen mit allen Informationen, die für die ausführenden Handwerker notwendig sind (bspw. Bauteile, Befestigungen, Revisionsöffnungen, Leitungsabschnitte, etc.). Der fertige Montageplan erlaubt damit die Bauausführung ohne weitere Abstimmung der Gewerke.

Revisionsunterlagen (LP-7) Die letzte Leistungsphase bildet den Übergang vom Planungsprozess zum Betrieb des Bauwerks. Dazu sind alle Beteiligten verpflichtet, dem zukünftigen Betreiber alle Ergebnisse aus den vorherigen Planungsphasen zur Verfügung zu stellen. Die „Revisionsunterlagen“ enthalten alle Unterlagen und Angaben, die zum Betreiben (Bedienen und Instandhalten) notwendig sind“. Zudem sind in den Plänen wartungs- und prüfpflichtige Bauteile gesondert zu kennzeichnen.

A.6 EnEff:BIM-Subprozess

Abbildung A.14 veranschaulicht den Bauprozess, angepasst durch die Anwendung der BIM-Methode, inklusive der Schnittstelle zum Subprozess EnEff:BIM. Der EnEff:BIM-Subprozess stellt das zu Grunde liegende Forschungsprojekt dar. Dargestellt wird das Projektdiagramm der im Projekt entwickelten IDM. Dieser Subprozess ist nach der Freigabe von LP-3 in den Planungsprozess eingereiht. An diesem Punkt des Planungsprozesses haben die BIM-Koordinatoren die Teilmodelle der einzelnen Fachdisziplinen aus LP-3 erstellt und für die Übersendung an die Genehmigungsbehörde freigegeben. In der VDI-Richtlinie 6026 sind die zu leistenden Berechnungen und Bemessungen definiert, die zum Ende von LP-3 fertiggestellt sein sollen. Die Richtlinie fordert unter anderem eine Heiz- und Kühllastberechnung und eine Leistungsbilanz der TGA-Komponenten. Die einzelnen TGA-Komponenten (Kessel, Wärmetauscher, Pumpen, Behälter, Kühlfläche, Raumluftechnik, etc.) sollen so bemessen sein, „dass grundsätzliche Änderungen in der Ausführungsplanung bei unveränderten Planungsgrundlagen vermieden werden“ [VDI 6026, 2008]. Damit ist für die Gebäudegeometrie und die TGA ein ausreichender Planungsfortschritt erreicht, um eine belastbare Simulation durchzuführen. Der Subprozess sollte nicht nach der Genehmigungsplanung (LP-4) angeordnet werden, da er relevant für den Bauprozess ist und somit evtl. grundlegende Änderungen mit sich bringt.

Prozess beteiligt. Der Architekt/ Objektplaner als einer der BIM-Koordinatoren ist verantwortlich für die Aufbereitung des Architekturmodells. Die Vorbereitung und Prüfung des Architekturmodells ist Voraussetzung für die Generierung der 2nd level Space Boundaries. Diese werden nach erfolgreicher Prüfung mit dem Space Boundary Tool (SBT) generiert. Parallel modelliert der TGA-Ingenieur – ebenfalls als BIM-Koordinator – am gebäudetechnischen Fachmodell. Das Modell muss ebenfalls überprüft werden und wird entsprechend formulierter Regeln auf Konsistenz überprüft. Der TGA-Ingenieur referenziert das Modell des Objektplaners und führt Prüfroutinen, bspw. eine Kollisionsprüfung, durch. Dadurch wird eine effiziente Zusammenarbeit gewährleistet und es werden Missverständnisse vermieden. Bevor das Simulations-Team die aufbereiteten Modelle erhält, sichtet es die ersten Entwürfe und nutzt die daraus gewonnenen Informationen um nach weiterem Input für das Simulationsmodell zu recherchieren. Folgende Informationen sind für eine Simulation relevant:

- ▷ Wetterdaten;
- ▷ Innere Lasten;
- ▷ Ökonomische Daten;
- ▷ Aktivitäten und Zeitpläne;
- ▷ Angestrebte Simulation und hierfür erforderliche fallspezifische Parameter.

Nachdem alle notwendigen Informationen recherchiert wurden und ebenfalls die Modelle bei der BIM-Koordinatoren erfolgreich den Überprüfungsprozess bestehen, werden die zusätzlichen Informationen in das simulationsoptimierte BIM-Modell (Energiemodell) überführt. Diese Datenanreicherung harmonisiert die erarbeiteten Modelle und die simulationsspezifischen Informationen. Nachdem alle Informationen ins Modell eingepflegt sind, muss entschieden werden welches Tool zur Simulation verwendet wird. Da das Datenmodell SimModel zur Datenanreicherung und als Datenaustauschformat zwischen der BIM-Plattform und dem BIM-Werkzeug gewählt wurde, kann die Simulation entweder mit EnergyPlus oder mit einer der Modelica Bibliotheken ausgeführt werden. Da dieses Projekt die Verwendung der Modelica-Umgebung ermöglichen möchte, stehen die entsprechenden Bibliotheken für die Simulation zur Auswahl. Dazu muss der definierte Prozess zur Verwirklichung der Schnittstelle zwischen SimModel und den Modelica-Bibliotheken und die Erstellung der Simulationsmodelle vollzogen werden. Nachdem die Simulation erfolgreich durchgeführt wurde, können die Ergebnisse analysiert werden. Die Ergebnisse werden in einem Bericht zusammengefasst und aus dem EnEff:BIM-Subprozess (siehe Abbildung A.15) heraus in den BIM adaptierten Bauprozess (siehe Abbildung A.14) zurückgeführt.

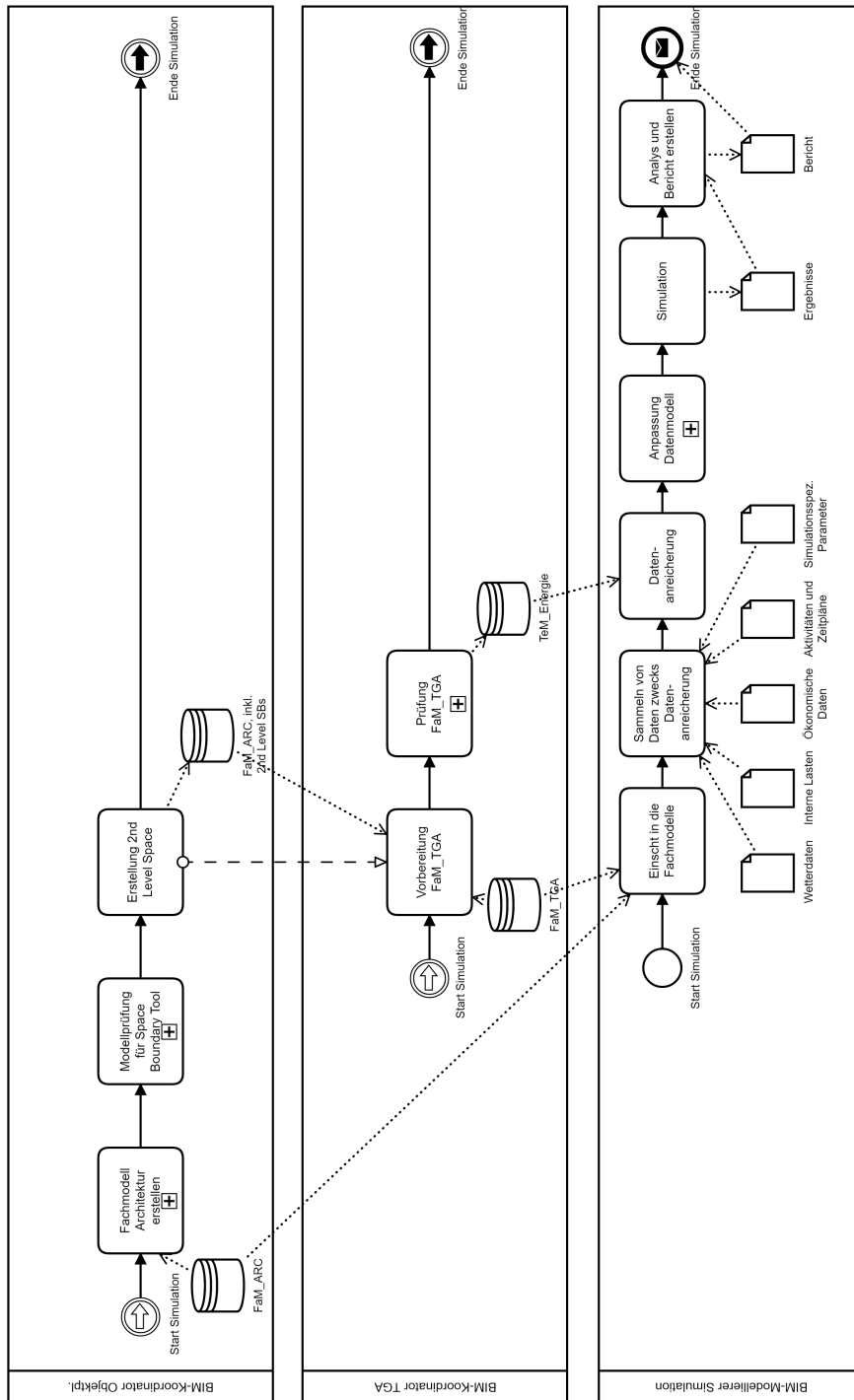


Abbildung A.15: Prozessdiagramm des EnEff:BIM-Subprozesses.

A.7 Generische LOD Definition

Tabelle A.13: Definition der generischen LODs – Teil 1.*

LOD 100	
	Abstrakte Geometrie/ abstrahierte Darstellung
LOG	Das Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein Symbol oder eine andere generische Repräsentation. Elementbezogene Informationen (wie Kosten pro m ² , etc.) können von anderen Modellelementen abgeleitet werden.
LOI	Das Modellelement enthält nur generische Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelementes ergeben und die eine qualitative und quantitative Bewertung im Rahmen einer Kostenschätzung gem. DIN 276 ermöglichen.
LOD 200	
	Grobe Geometrie
LOG	Ein Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein generisches Objekt, das mit ungefähren Abmessungen, Position und Orientierung versehen ist.
LOI	Ein Modellelement enthält neben generischen Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelementes ergeben, spezifische Informationen zu Konstruktion, Material, Gestaltung, die eine qualitative und quantitative Bewertung im Rahmen einer Kostenberechnung gem. DIN 276 ermöglichen.
LOD 210	
	Grobe Geometrie
LOG	Das Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein generisches Objekt, das mit ungefähren Abmessungen, Position und Orientierung versehen ist.
LOI	Ein Modellelement enthält neben generischen Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelementes ergeben, spezifische Informationen zu Konstruktion, Material, Gestaltung, die eine qualitative und quantitative Bewertung im Rahmen einer Baugenehmigung ermöglichen.
LOD 310	
	Exakte Geometrie
LOG	Das Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung.
LOI	Ein Modellelement enthält neben generischen Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelementes ergeben, spezifische Informationen zu Konstruktion, Material, Gestaltung.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.14: Definition der generischen LODs – Teil 2.*

LOD 320	
	Präzise Geometrie
LOG	Das Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung sowie Schnittstellen zu anderen Gebäudesystemen.
LOI	Ein Modellelement enthält neben generischen Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelements ergeben, spezifische Informationen zu Konstruktion, Material und Gestaltung, die eine qualitative und quantitative Bewertung und Bildung von Leistungspositionen ermöglicht.
LOD 350	
	Präzise Geometrie
LOG	Das Modellelement wird geometrisch repräsentiert durch ein spezifisches Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung sowie Schnittstellen zu anderen Gebäudesystemen.
LOI	Ein Modellelement enthält neben generischen Informationen, die sich aus der Anwendung des Modellelementes ergeben, spezifische Informationen zu Konstruktion, Material und Gestaltung die eine qualitative und quantitative Bewertung und Bildung von Leistungspositionen ermöglicht.
LOD 410	
	Ausführung / Werkplanung
LOG	Das Modellelement wird im Modell geometrisch repräsentiert durch ein detailliertes Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung sowie Informationen zu Herstellung, Zusammenbau und Installation.
	Die vorhandenen Planer-Modelle werden durch auftragnehmerseitige Fachmodelle ersetzt:
	Rohbau/ Stahlbau: Stahlelemente enthalten Informationen wie Verankerungen, Aussteifungen etc. Betonplatten enthalten alle Daten über die verbaute Bewehrung. Zudem sind Details wie Anschlüsse und Verbindungsmittel dargestellt.
LOI	Architektur: Das Architekturmodell beinhaltet alle Parameter und Informationen, die für eine Montage benötigt werden. Holz- und Stahlbolzen sind modelliert, Fassade, Fenster und Türen enthalten alle relevanten Informationen sowie Herstellerangaben. TGA: Das TGA-Modell beinhaltet alle Parameter und Informationen, die für eine Montage benötigt werden. Darüber hinaus sind freizuhaltende Flächen, bspw. zur Instandhaltung, zu modellieren.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.15: Definition der generischen LODs – Teil 3.*

LOD 450	
	Revisionsmodell
LOG	Das Modellelement wird im Modell geometrisch repräsentiert durch ein detailliertes Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung sowie Informationen zu Herstellung, Zusammenbau und Installation.
LOI	Das Modellelement enthält alle planerischen und ausführungsbedingten Änderungen vorangegangener Phasen und wurde auf der Baustelle hinsichtlich seiner Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung überprüft und freigegeben.
LOD 500	
	As-Built-Modell / Bestandsmodell
LOG	Das Modellelement wurde durch geeignete Vermessungsmethoden überprüft und der Örtlichkeit angepasst. Es stellt den baulichen Istzustand dar. Das Modellelement wird im Modell geometrisch repräsentiert durch ein detailliertes Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung.
LOI	Informationen zu Herstellung, Zusammenbau und Installation.
LOD 600	
	Betriebsmodell
LOG	Das Modellelement ist im Modell geometrisch repräsentiert durch ein detailliertes Objekt in Bezug auf Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung und enthält Informationen zu Herstellung, Zusammenbau und Installation.
LOI	Ergänzt wird das Modellelement durch betriebsspezifische Informationen des FM (Wartung, Austausch, Ersatz etc.)

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

A.8 Generische LOD-Definition für TGA

Tabelle A.16: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 1.*

LOD	
	Eventuell Ermittlung und Abstimmung der Nutzervorgaben unter Berücksichtigung der anerkannten Regeln der Technik unter Hinzuziehung von Spezialisten, bspw. Brandschutzsachverständiger. Überschlägige Abschätzung des Primärenergieeinsatzes anhand von Flächenansätzen. Kontaktaufnahme mit Versorgern zur Ermittlung der Versorgungsmöglichkeiten. Darstellung der Nutzervorgaben, Annahmen bzw. Vorgaben aus den anerkannten Regeln der Technik. Modellierung des Flächenbedarfs in Zentralen, Schächten und abgehängten Decken auch im Vergleich zu alternativen Lösungsmöglichkeiten. Ermittlung der Verbrauchsdaten der Wirtschaftlichkeit für die einzelnen alternativen Lösungsmöglichkeiten aufgrund von Erfahrungswerten für die 2. Stufe der KG 400 der DIN 276. Überschlägige Auslegung und Grobbemessung aller Kostengruppen der 2. Stufe in der KG 400, der DIN 276. Grundlage der Berechnungen sind Bedarfe (Mengen, Leistungen, etc.)
100	der einzelnen Gewerke. Anschlüsse und Komponenten werden soweit möglich modelliert. Das Modell wird entsprechend Maßstab 1:200 aufgebaut und detailliert. Funktions- bzw. Prinzipschemata zur Darstellung der Grundfunktionen der geplanten Anlagen mit den wesentlichen Komponenten werden erstellt. Abstimmung des technischen Gesamtkonzepts für eine passende technische und wirtschaftliche Gesamtlösung unter Beachtung der Zielvorgaben. Abstimmung der Raumbedarfe aller Gewerke (bspw. VDI 2050) und Mitwirkung bei der Koordinierung zu einem Ganzen. Falls CAFM zusätzlich gewünscht: Mitwirken beim Einrichten der Struktur und Nomenklatur. Kostenschätzung anlagenspezifisch getrennt nach Zonen, Bauteilen oder Funktionsbereichen nach Vorgaben des Auftraggebers bzw. des Objektplaners bis zur 2. Stufe der DIN 276.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.17: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 2.*

LOD	
	Darstellung der Nutzervorgaben, Berechnungen bzw. Vorgaben aus den anerkannten Regeln der Technik. Das Modell der Entwurfsplanung ist durch den Auftraggeber auf Übereinstimmung mit seinen funktionalen Planungsvorgaben zu prüfen, zu genehmigen und die Planungsleistung abzunehmen.
	Grundlage der Kosten: Berechnung der Mengen von Bezugseinheiten der Kostengruppe und Multiplikation mit Kostenansatz bis zur 2. Stufe der DIN 276.
	Das Modell wird entsprechend Maßstab 1:100 modelliert. Aus dem Modell werden Darstellungen mit Hauptdimensionen erzeugt.
	Modellierung aller Ver- und Entsorgungsnetze mit den wesentlichen Funktionsgruppen und Funktionselementen.
	Funktionsschemata zur Darstellung der Funktionen der geplanten Anlagen mit den relevanten Anlagenbauteilen sollen falls möglich aus dem Modell abgeleitet werden.
	Die Bemessung erfolgt auf der Grundlage der vorliegenden Berechnungen. Die Bemessung hat so zu erfolgen, dass grundsätzliche Änderungen in der Ausführungsplanung bei unveränderten Planungsgrundlagen vermieden werden. Es
200	dürfen aus der Tiefe der Berechnungen später keine grundsätzlichen Änderungen mehr resultieren.
	CAFM: Fortführung der Struktur und Nomenklatur.
	Kostenberechnung der Mengen von Bezugseinheiten der Kostengruppe und Multiplikation mit Kostenansatz bis zur 2. Stufe der DIN 276.
	Alle für das Brandschutzkonzept notwendigen Berechnungen, Dimensionierungen und Zeichnungen müssen abgeschlossen sein.
	Gemeinsame Schnittstellendefinition zwischen den Gewerken der KG 400, nutzer- bzw. bauherrenseitigen oder bauseitigen Leistungen (Listen). Die Koordination erstreckt sich in dieser Phase bereits auf die Ausführbarkeit der Planung. Dazu sind eventuell Schnitte und Schachtausfädelungen erforderlich.
	Es müssen alle statisch relevanten Durchbruchgrößen, Lasten und Schachtgrößen für die Bauangaben gemacht werden.
	Modellierung der Schächte inklusive zu berücksichtigender Bedienungs-/ Instandhaltungs-/ Sicherheitsvolumina an der Stelle der jeweils größten Installationsdichte, inklusive Hinweis auf die Art des Brandschutzes.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.18: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 3.*

LOD	
	Darstellung der im Entwurf abgestimmten Nutzervorgaben zur Vorlage bei den Genehmigungsstellen und Berechnungen nach den Vorgaben der Genehmigungsstellen (bspw. Wasserbehörden, Baubehörden, Feuerwehr etc.) sowie anderer Stellen (EVU, VdS etc.). Die Genehmigungsplanung wird durch die jeweilige Genehmigungsstelle geprüft und genehmigt. ----- CAFM: Fortführung der Struktur und Nomenklatur. ----- Die Festlegungen der Entwurfsplanung für die Berechnungen sind berücksichtigt, in die Genehmigungspläne überführt und beinhalten die Dimensionierung aller Zentralen, Versorgungsanschlüsse und Trassen. Ebenfalls werden Volumenkörper für die Möblierung im Modell hinterlegt. -----
210	Die Bemessung erfolgt auf der Grundlage der vorliegenden Berechnungen des Entwurfs; hierbei sind alle für das Brandschutzkonzept notwendigen Bemessungen zu berücksichtigen. Dem Modell werden alle Angaben, Beschreibungen, Daten und Zusammenstellungen hinterlegt, die erforderlich sind um die Planung nachzuvollziehen, zu beurteilen und zu genehmigen. ----- Funktionsschemata zur Darstellung der Funktionen der geplanten Anlagen mit den relevanten Anlagenbauteilen sowie alle für das Brandschutzkonzept notwendigen Darstellungen. ----- Pläne im Maßstab 1:100 werden aus dem Modell abgeleitet. Darstellung aller Ver- und Entsorgungsnetze mit den wesentlichen Funktionsgruppen und Funktionselementen sowie alle für das Brandschutzkonzept notwendigen Einbauteile. ----- Hinweis auf die Art des Brandschutzes für die Schächte.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.19: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026
– Teil 4.*

LOD	Eine ausführungsfähige Planungslösung, in der die funktionalen Vorgaben des AG (Bausoll) umgesetzt wurden. Diese ist mit allen Gewerken koordiniert, technisch und terminlich ausführbar. Umsetzen der von der Behörde genehmigten und dem Auftraggeber freigegebenen Planungsunterlagen.
	CAFM: Fortführen der Struktur und Nomenklatur. Entwicklung des GA-Schemas.
	Die in der Entwurfsplanung erstellten Berechnungen sind in der Ausführungsplanung zu überprüfen und fortzuschreiben und gegebenenfalls sind auch Simulationen zu erstellen. Grundlegende Veränderungen und Abweichungen zur Entwurfsplanung sind zu dokumentieren und zu begründen.
	Vollständige Berechnung aller Anlagen/ -teile unter Berücksichtigung aller Schnittstellen zum Schallschutz, Brandschutz, Wärmeschutz.
	Angaben zum Schallschutz, Brandschutz, Wärmeschutz werden den Elementen im Modell hinterlegt.
	Die Bemessung erfolgt auf der Grundlage der abschließenden Berechnungen und enthält Angaben zu Ver-/ Entsorgung und Verteilung aller Gewerke.
310	Schemata mit zugehörigen Leistungsdaten, Dimensionen, Voreinstellungen und Komponenten inklusive Gebäudeautomationskomponenten, die für eine Funktion der Anlage erforderlich sind. Inklusive Funktionsschemata für jede Anlage mit Funktionskomponente, Prinzip der Verteilung und das Regelschema für KG 480. Zusätzlich KG 420 Wärmeverbrauchseinrichtungen und KG 461/ 462 Übersichtsschema Förderhöhe und Geschwindigkeit.
	Strangschema, bzw. Schaltpläne für alle Medien/ Netzarten mit Auslegungsdaten/ Parametern, sowie die Kommunikations-/ Meldeeinrichtungen und das Kennzeichnungssystem. Zusätzlich KG 440 Energieerzeugung/-verteilung bis Schaltanlagen/ -verteiler für alle Netzarten mit Auslegungsdaten als Modellparameter. Das Modell erlaubt das Ableiten von Plänen mit einer Detaillierung gemäß Maßstab 1 : 50 bis 1:1. Ausführungsfähige Darstellung inklusive der Koordination mit Dimensionen und Komponenten; wenn sinnvoll, in Mehrstrichdarstellung. Es sind sämtliche Komponenten darzustellen, die zur ordnungsgemäßen Funktion der Anlage erforderlich sind. Platzvorhaltungen, Flächen zur Bedienung und Instandhaltung, Vorgaben für Nach- und Überströmungen sowie Einbringungswege sind darzustellen, z.B. gemäß VDI 2050. Art und Umfang der erforderlichen Dämmung und des Brandschutzes sind anzugeben.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.20: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 5.*

LOD	
	Detaillierung des Modells gemäß Maßstab 1:1 für Installationsschwerpunkte und Zentralen mit allen Gewerken und der erforderlichen Bemaßung. Details sind so zu wählen, dass Übersichtlichkeit und Verständnis gegeben sind. Ein Installationsschwerpunkt liegt vor, wenn Gewerke kreuzen, übereinander liegen oder gemeinsam ausfädeln, und wird aus der Kollisionsprüfung ersichtlich. Die Zentralen und Schächte sind im Detail darzustellen. Nach Bedarf sind die aus dem Modell abgeleiteten Zeichnungen in angemessenen Maßstab darzustellen. Eindeutige Darstellung von Schnittstellen einander tangierender Gewerke sowie nutzer- bzw.
310	bauherren- oder bauseitiger Leistungen. Zu zeigen sind Anforderungen und Leistungsumfang. Schachtmodell: Schachtbelegung und Schachtausfädelung mit allen darin geplanten Gewerken, inklusive der Brandschutzausführung. Relevante Angaben für andere Planungsbeteiligte (bspw. für Deckenspiegel, Wandabwicklungen, Fliesenspiegel, Revisionsöffnungen, Schlitz- und Durchbruchangaben sowie Einbauten und Montageöffnungen mit festgelegter Positionierung). Beschreibung der funktionalen Wirkungsweise der einzelnen Anlagen mit Angaben aller notwendigen Kenn-, Betriebs- und Auslegungsdaten.
LOD	
320	–

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.21: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 6.*

LOD	
350	Die vom Auftraggeber übergebene koordinierte Ausführungsplanung ist zu überprüfen. Das Modell der Montageplanung dient als Information für Auftraggeber, Objektplaner, andere Auftragnehmer und Objektüberwachung. Sie ist die Ergänzung der übergebenen Ausführungsplanung um die für die Montage notwendigen Angaben und ist mit dem Auftraggeber abzustimmen und von diesem freizugeben. CAFM: Fortführung der Struktur und Nomenklatur; Funktionsmatrix, GA-Schemata und GA-Grafiken können aus Modell abgeleitet werden. Prüfung der Berechnung und Dimensionierung gemäß den relevanten Normen der allgemeinen technischen Vertragsbedingungen. Parametrisierung für die zur Montage vorgesehenen Einbauteile, bspw. Stromaufnahme, Gewichte der Einbauteile, Fundamentangaben, relevante Befestigungsteile, Abdichtungen zum Gebäude, Angaben zu Datenpunkten. Vervollständigung der Funktions-, Regel- und Strangschemata für die Montage. Stromlaufpläne allpolig der Schaltschränke, Verteilungen und Unterverteilungen sowie Schaltungsunterlagen und Klemmenlisten. Anpassung der Funktionsbeschreibung und Konfiguration der Modellparameter für die Montage. Modellierung aller Anlagen mit allen notwendigen Einbauteilen, die zur Montage der Anlage erforderlich sind. Hierbei ist der Platzbedarf für Reparaturen und Instandhaltung zu berücksichtigen und entsprechend zu modellieren. Erstellung der Montageplanung auf Basis des Modells der Ausführungsplanung um die für die Montage relevanten Angaben, insbesondere auch Werkstattzeichnungen für Komponenten. Angaben zur Umsetzung brandschutztechnischer Maßnahmen (Darstellung und Kennzeichnung). Modelle werden entsprechend Maßstab 1:50 bis (falls notwendig) 1:1 parametrisiert. Angaben zu Leitungsverbindungen, genaue Typbezeichnungen und technische Daten der Einbaukomponenten. Modellierung notwendiger Halte- und Befestigungsstrukturen unter Berücksichtigung der Positionsbezeichnungen sowie der Dimensionen der Trassen Betriebsmittelkennzeichnung gemäß Stromlaufplan. Soweit erforderlich: Kennzeichnung der verschiedenen Medienströme nach EN/ DIN/ VDI. Sofern für die Montage erforderlich, sind für die Zentralen, Trassen und Schächte Schnitte und Details im erforderlichen Maßstab aus dem Modell abzuleiten und anzufertigen. Fundamentpläne müssen Angaben über Abmessungen, Lasten sowie Hinweise zum Aufbau und den Beschichtungen des Fundamentes enthalten. Die für den Bau relevanten technischen Daten (bspw. Emissionswerte) sind anzugeben.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.22: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 7.*

LOD	
350	Parametrisierung von Inspektions- und Wartungsöffnungen für technische Komponenten, die eine Zugänglichkeit erfordern. Bei den angrenzenden Gewerken ist die Zugänglichkeit dieser Bauteile durch geeignete Maßnahmen (bspw. Öffnungen, Klappen) zu gewährleisten. Ferner ist eine eindeutige Darstellung von Schnittstellen einander tangierender Gewerke aus dem Modell abzuleiten. Die vom Bauherrn/ Planer übernommenen Anlagenbeschreibungen sind um bauspezifische und betriebliche Angaben, die Auswirkungen auf die Montage und Inbetriebnahme haben, zu ergänzen. Für die jeweiligen Gewerke: Angaben zu Wärmedämmungen, Schutz von Trassen, Trassenführungen, Einbaustellen für Mess-, Regel-, und Stellorgane (mit Angabe von Soll- und Grenzwerten), Einstellung von Drossel- und Reglerarmaturen, Liefergrenzen und Übergabepunkte zu angrenzenden Leistungen. Zusätzlich anzugeben sind: Hinweise für die Werkstatt, Angaben für die Vorfertigung, Raumdaten. Bereitstellung von Angaben über bspw. Baustelleneinrichtungen, Lagerflächen, Transportwege und Liefertermine, die eine Koordination der Baulogistik ermöglichen.
LOD	
410	–
LOD	
450	–
LOD	
500	–

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Tabelle A.23: Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 8.*

LOD	
	Die Modelle für die Revisionsunterlagen, die u.a. aus den Modellen für Bestandsplänen, Bedienungs- und Wartungsunterlagen bestehen, sind zu übergeben und sollen den Auftraggeber, Nutzer und Betreiber in die Lage versetzen, die Anlagen sicher zu nutzen und zu betreiben. Es müssen eindeutige Angaben zu Wartung, Instandhaltung, Sicherheitshinweisen, Betrieb, Stör- und Fehlerbehandlung etc. enthalten sein. CAFM: Fortführen der Struktur und Nomenklatur. GA-Grafiken sind ableitbar. Aus dem Modell werden, soweit möglich, die Unterlagen gemäß zugehöriger VOB/C abgeleitet. Die Berechnungen, die Genehmigungsbestandteil sind, sind beizufügen. Betriebs-, Wartungs- und Bedienungsanleitungen mit allen für den Betrieb relevanten Angaben sind im Modell zu hinterlegen oder zu verlinken. Angaben über die tatsächlich zur Ausführung gelangten Einbauteile für Betrieb, Wartung, Instandhaltung, Störbeseitigung, Ablaufbeschreibungen, Funktionsbeschreibungen, Datenpunktliste und technische Angaben z.B. Stromaufnahme, Gewichte der Einbauteile etc. Liste der Ersatzteile, die der Betreiber vorhalten soll.
600	Anpassung der Funktions-, Regel- und Strangschemata an die tatsächlich ausgeführte Anlage Stromlaufpläne allpolig der Schaltschränke, Verteilungen und Unterverteilungen, Schaltungsunterlagen, Klemmenlisten mit Querverweisen zu den Schnittstellen anderer Gewerke, Funktionsmatrix. Die relevanten aus dem Modell abgeleiteten Zeichnungen und Grundrisse sind im Maßstab 1: 50 bis 1:10 zu erzeugen. Darstellung aller Anlagen mit allen relevanten Einbauteilen. Angaben zu brandschutztechnischen Maßnahmen, Dämmungen und Isolierungen. Die Inhalte entsprechen der tatsächlich ausgeführten Anlage. Falls gefordert werden Schnitte und Details zu den Zentralen, Trassen und Schächte die für einen ordnungsgemäßen Betrieb notwendig sind, erzeugt. Für die jeweiligen Gewerke gilt: verschiedene Medienströme sind in den aus dem Modell abgeleiteten Zeichnungen gekennzeichnet, ebenso wie Revisions- und Wartungskomponenten, der Platzbedarf für Reparaturen und Instandhaltung und Angaben zum Schutz von Trassen. Die Darstellung von Liefergrenzen ist ebenfalls enthalten.

* Aus der Zusammenarbeit mit dem Richtlinienausschuss der VDI 2552 Blatt 4.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Übersicht des im EnEff:BIM-Forschungsprojekt entwickelten Frameworks [E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, 2018].	4
2.1 Gegenüberstellung des Aufwands bei der traditionellen Arbeitsweise, basierend auf den Honoraren für die Objektplanung der HOAI 2013 und der BIM-optimierten Arbeitsweise (qualitativ) in einem Bauprojekt, kumulativ aufgeführt [i. A. a. van Treeck, 2016b; Egger u. a., 2013; Bundesrat, 2013].	8
2.2 Schematische Darstellung des BIM-Referenzprozesses [i. A. a. BMVI u. Dobrindt, 2015].	12
2.3 Abgrenzung von BIM-Einsatzformen hinsichtlich der Verwendung von publizierten oder proprietären Formaten und einer integralen oder isolierten Planung [i. A. a. van Treeck, 2016b].	14
2.4 BIM-Umgebung zur Instanziierung des BIM-Datenmodells [i. A. a. Bazjanac].	15
2.5 Veranschaulichung des Sachverhalts der Modellbildung Gesamtmodell, Fachmodelle, Teilmodelle.	18
2.6 IFC Versionsverlauf [i. A. a. Liebich u. Hausknecht, 2016].	19
2.7 Definition von <i>IfcObject</i> mit der Datenmodellierungssprache EXPRESS [i. A. a. Borrmann u. a., 2015b].	21
2.8 Ausschnitt aus einer IFC-Datei.	22
2.9 IFC4-Datenmodell (BuildingSMART International [2016d]).	23
2.10 Auszug der bidirektionalen Vererbung für gebäudetechnische Komponenten im IFC Datenmodell.	25
2.11 Die primäre Funktion eines interoperablen Datenmodells in einer Schnittstelle zwischen zwei Softwaretools [i. A. a. Hietanen u. Lehtinen, 2006].	27
2.12 BIM-Anwendungsfälle des BIM Execution Plan [Pennsylvania State University, 2010].	32
2.13 Vereinfachte IDM-Basisstruktur [i. A. a. ISO 29481-1, 2010].	36
2.14 Aufgeschlüsselte IDM-Basisstruktur.	38
2.15 Beispiel für ein Interaktionsdiagramm als Crispinet-Diagramm [i. A. a. DIN EN ISO 29481-1, 2016; Shearer, 2000] (R_i : Rolle i, T_j : Transaktion j, CR_k : Kundenrolle k). . . .	40
2.16 Gegenüberstellung von Rolle und Akteur [i. A. a. Wix u. Karlshøj, 2010].	40
2.17 Beispiel für ein Transaktionsdiagramm als UML-Sequenzdiagramm (T1 – Lieferungsanfrage für ein Design)[i. A. a. DIN EN ISO 29481-1, 2016; Oldfield u. a., 2017].	41

2.18 Beispiel für ein Prozessdiagramm gemäß BPMN-Darstellungsweise.	43
2.19 Funktionsweise einer MVD.	47
2.20 Konzeptvorlage in einem Instanzdiagramm: „Object Typing“ [BuildingSMART International, 2017a].	49
2.21 Veranschaulichung unterschiedlicher LOD-Level gemäß Beetz u. a. [2015] am Beispiel eines Heizungssystems.	51
2.22 Fortschreibung der LODs über den Planungszyklus verschiedener Fachmodelle [i. A. a. van Treeck, 2016b].	55
2.23 Übersicht und Zusammenhänge der BIM-Gremien - ISO, CEN, DIN und VDI [VDI, 2018].	61
3.1 Überblick über die im Hesmos-Projekt identifizierten Schritte zur Entwicklung der IDM- und MVD-Methode [i. A. a. Beetz u. a., 2015].	64
3.2 Optionen zur Definition einer IDM in Abhängigkeit von der Art und dem Kontext (Vergleiche hierzu Abbildung 2.13).	66
3.3 Das CRISP-Data-Mining-Referenzmodell [Smart Vision Europe 2015, 2016].	69
3.4 Die vom BPMN-Prozessdiagramm zu vermittelnden Informationen.	71
3.5 Das Datenmodell bestehend aus Klassen und das instanziierte BIM-Modell bestehend aus Objekten [DIN EN ISO 29481-1, 2016].	74
3.6 Veranschaulichung der Definition der minimalen Datenanforderungen und Erweiterung zur Definition der LODs.	83
3.7 Mapping Rules [Wimmer u. a., 2015a, 2014].	85
3.8 Beispielhafte Darstellung der Mapping Rules auf der Objektebene in einem Venn-Diagramm [Wimmer u. a., 2015a].	88
3.9 Beispielhafte Darstellung der Mapping Rules auf der Parameterebene in einem Venn-Diagramm (Wimmer u. a. [2015a]).	90
3.10 Oberste Ebene des Mapping XSD Schemas, dargestellt in der logischen Sichtweise. . .	91
3.11 Flussdiagramm für das Objekt Mapping [Wetter u. van Treeck, 2017].	96
3.12 Flussdiagramm für das Parameter Mapping [Wetter u. van Treeck, 2017].	97
3.13 Flussdiagramm zur Entwicklung des BIM-Anwendungsfalls, Teil 1.	100
3.14 Flussdiagramm zur Entwicklung des BIM-Anwendungsfalls, Teil 2.	101
4.1 IFC-Datenmodell zur SimModel Toolkette [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].	104
4.2 SimModel zur Modelica Toolkette [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].	104
4.3 Beispielhafte Modelica Implementierung des Anwendungsbeispiels 1.1 [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].	105

4.4	Beispielhaftes BPMN-Prozessdiagramm zur Erstellung des Auswertungsmodells für die Simulation der TGA, basierend auf der allgemeinen BIM-Prozesslandkarte des BIM-Praxisleitfadens [Drees & Sommer u. Vrame, 2016].	109
4.5	Architektur des Raums (in hellblau) gemäß VDI 6007-1.	112
4.6	Übersicht über die Rollen und die ersten Arbeitspakete der Entwurfsplanung zur Zielerfüllung des BIM-Anwendungsfalls in einem Prozessdiagramm.	114
4.7	Darstellung von 2 nd Level Space Boundaries [van Treeck u. a., 2015].	115
4.8	Beispielhafte Zonenbildung gemäß EnEV nach DIN V 18599 [i. A. a. DIN V 18599-1, 2016].	117
4.9	Detaillierte Betrachtung der allgemeinen Arbeitspakete des TGA-Ingenieurs zur Dimensionierung der TGA.	117
4.10	Definition der Begrenzungsflächen zur Berechnung der Norm-Heizlast [van Treeck u. a., 2015].	119
4.11	Illustration der relevanten Informationen für die Kühllastberechnung.	120
4.12	Wärmeversorgung des Anwendungsbeispiels 1.1.	122
4.13	Funktionsschema des Heizungssystems für das Anwendungsbeispiel 1.1.	123
4.14	Arbeitsschritte zur Durchführung der Simulation.	124
4.15	Identifikation der Schnittstellen des Anwendungsbeispiels 1.1.	126
4.16	Interface des ifcDOC-Tools Version 11.4 zur Generierung der MVD.	134
4.17	Inhalte der MVD.	135
4.18	1 st Level Space Boundaries für zwei Räume, getrennt mit einer <i>IfcWallStandardCase</i> . .	137
4.19	Instanzdiagramm des Konzepts zur Definition der 2 nd Level Space Boundaries für <i>IfcSpace</i>	138
4.20	2 nd Level Space Boundaries für einem Raum an einer Wand mit einem Fenster. . . .	139
4.21	Aufbau einer Wand im IFC-Datenmodell zur Spezifizierung der Materialeigenschaften. Dargestellt ist die Assoziation der einzelnen Wandschichten (<i>IfcMaterialLayer</i>). . . .	140
4.22	Verbindung von TGA-Komponenten <i>IfcDuctSegment</i> und <i>IfcDuctFitting</i> im IFC-Modell.	143
4.23	Verbindung von TGA-Komponenten eines beispielhaften Heizungssystems im IFC-Modell.	144
4.24	Stundenbasiertes Profil für interne Lasten in W an einem beispielhaften Arbeitstag. .	146
4.25	Definition von Anwesenheitsprofilen für Montage im Jahr 2016, in IFC.	147
4.26	Darstellung der Funktion einer <i>IfcSpatialZone</i> (grün) anhand dreier Räume, die zwei verschiedene thermische Zonen darstellen sollen. Oben, links: Die drei Räume im Modell.	149
4.27	Beispielhafte Umsetzung eines Standard-Regelkreises gemäß IFC4-Schema.	151
4.28	Beispielhafte Umsetzung eines Reglers gemäß IFC4-Schema.	152
4.29	Exchange Definition der speziell für die Schnittstelle definierten MVD, erstellt im ifcDOC-Tool.	155

4.30 Zusammenfassung der im Projekt EnEff-BIM verwendeten Datenmodelle in der Schnittstelle zwischen der BIM-Plattform und dem BIM-Werkzeug Modelica [i. A. a. RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].	160
4.31 Veranschaulichung eines Mappingprozess am Beispiel eines Heizkessels.	162
4.32 Veranschaulichung der Integration von Anwendungsbeispielen im Projekt EnEff-BIM zur Definition der IDM und MVD [i. A. a. Pinheiro u. a., 2017].	164
4.33 Prozess zur Validierung der MVD.	164
5.1 EXPRESS-G-Darstellung einer optionalen Erweiterung des IFC-Schemas zur Abbildung der Wärmepumpe und des BHKWs.	168
A.1 Beispiel einer <i>IfcUnitaryEquipment</i> , ausgeführt als Wärmepumpe (Heatpump).	193
A.2 Beispiel einer <i>IfcUnitaryEquipment</i> , ausgeführt als Kraft-Wärme-Kopplung (CHP).	194
A.3 Anwendungsbeispiel 1.1. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	198
A.4 Anwendungsbeispiel 1.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	199
A.5 Anwendungsbeispiel 2.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	201
A.6 Anwendungsbeispiel 4.0. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	202
A.7 Anwendungsbeispiel 5.0, reales Bürogebäude in der Mathieustraße 30, 52074 Aachen.	203
A.8 Ausschnitt der Pläne des Heizungssystems.	204
A.9 Darstellung des Heizungssystems, erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	204
A.10 Darstellung der thermischen Zonen mit Aufteilung nach Büro Ost (blau) und Büro West (rot) sowie Flur (gelb).	205
A.11 Ansicht des BIM-Modells, erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	206
A.12 Teilgrundriss der ersten Etage, ohne TGA.	207
A.13 Anwendungsbeispiele 3.1 und 3.2. Darstellung erzeugt mit der BIM-Plattform Autodesk Revit 2016.	210
A.14 Bauprojektplanung gemäß VDI 6026-1, angepasst gemäß der BIM-Methode, inkl. EnEff:BIM-Subprozess [VDI 6026, 2008].	215
A.15 Prozessdiagramm des EnEff:BIM-Subprozesses.	217

Tabellenverzeichnis

2.1	Ausschnitt aus dem Leistungsbild der HOAI [Bundesrat, 2013].	9
2.2	Gegenüberstellung der im Projekt EnEff:BIM untersuchten Datenmodelle [RWTH Aachen University E3D Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen u. a., 2017].	29
2.3	Beispielhafte Aufführung von BIM-Zielen in der Planung, Ausschreibung und Bauausführung [Liebich u. Hausknecht, 2016].	30
2.4	Beispiel für Datenaustauschanforderungen.	44
2.5	Beispiel für ein Datenaustauschanforderungsmodell.	45
2.6	Beispiele einer zeit- und inhaltsorientierten Modellentwicklungsmatrix für Modellinhalte.	56
2.7	BIM-relevante ISO-Normen.	57
3.1	Beispiel für eine alphanumerische Zuordnung von in der Schnittstelle definierten Parametern zum jeweiligen LOD und MEA.	82
4.1	Aufbau der Außenwand.	112
4.2	Ausschnitt aus den Datenaustauschanforderungen für das Architekturmodell des Anwendungsbeispiels.	127
4.3	Ausschnitt aus den Datenaustauschanforderungen für das TGA-Modell des Anwendungsbeispiels.	128
4.4	Definition der Properties des Konzepts „Port Nesting“ zur Spezifikation der Ports einer Pumpe.	143
4.5	Beispielhafter Ausschnitt aus der Exchange Definition der MVD [i. A. a. Wimmer u. a., 2017].	154
4.6	Beispielhafte Zuordnung der LOD-Levels zu den Lph der HOAI und die Betriebsphase.	157
4.7	Ausschnitt aus den generischen Definition der TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 [VDI 6026, 2008].	159
4.8	Ausschnitt aus der prozessorientierten Modellentwicklungsmatrix für das Anwendungsbeispiel in der Schnittstelle zwischen BIM-Gesamtkoordinator und BIM-Modellierer.	159
4.9	Anwendungsbeispiele des EnEff-BIM-Projekts zur Definition der Schnittstelle zwischen BIM-Plattformen und der Modelica Simulationsumgebung.	163
4.10	Austauschanforderungen des Konzepts „Port Nesting“ für ein Dreiwege-Ventil.	165

A.1 Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 1.	190
A.2 Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 2.	191
A.3 Gebäudetechnische Komponenten, abgebildet im IFC4-Datenmodell. (Liebich u. Hausknecht [2016]) Teil 3.	192
A.4 Wirkungsgrad des Gas-Heizkessels in Abhängigkeit der Teillast.	196
A.5 Fördercharakteristik der Pumpe in Abhängigkeit des Volumenstroms für reduzierten und normalen Betrieb.	197
A.6 Eigenschaften des Heizkörpers.	197
A.7 Eigenschaften des TWW-Speichers.	199
A.8 Elektrische Leistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quellen-/ Senktemperatur.	200
A.9 Kondensatorleistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quellen-/ Senktemperatur.	200
A.10 Eigenschaften der Flächenheizung.	201
A.11 Eigenschaften des Mikroblokheizkraftwerks.	202
A.12 Materialkennwerte der einzelnen Schichten der Außenwand vom Anwendungsbeispiel 5.0.	206
A.13 Definition der generischen LODs – Teil 1.*	219
A.14 Definition der generischen LODs – Teil 2.*	220
A.15 Definition der generischen LODs – Teil 3.*	221
A.16 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 1.*	222
A.17 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 2.*	223
A.18 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 3.*	224
A.19 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 4.*	225
A.20 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 5.*	226
A.21 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 6.*	227
A.22 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026 – Teil 7.*	228

A.23 Definition der generischen LODs der Planung für die TGA, abgeleitet aus der VDI 6026	
– Teil 8.	229