

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Erstellung von IFC-Datenmodellen für den Holzbau und darauf basierende automatisierte Überprüfung der Einhaltung von Schallschutzanforderungen

Masterthesis

für den Master of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autorin: Tanja Stocker

Matrikelnummer:

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuerin: M.Sc. Camille Châteauevieux-Hellwig (TH Rosenheim)

3. Betreuer: M.Sc. Jimmy Abualdenien

Ausgabedatum: 26. April 2021

Abgabedatum: 25. Oktober 2021

Vorwort

Diese Arbeit entstand als Kooperation zwischen der Technischen Universität München und der Technischen Hochschule Rosenheim. Neben der vorliegenden schriftlichen Ausführung gehört ein Git-Repository zur Arbeit. Dieses enthält die entstandenen Programme, die Library, alle benötigten Dateien und die generierten Modelle (siehe Anhang C).

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dabei sind zunächst meine Betreuer*innen zu nennen, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und sich Zeit für meine Fragen genommen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich immer unterstützt. Insbesondere meinen Eltern, die mir das Studium nicht nur ermöglicht haben, sondern mich auch immer in meinem persönlichen Weg ermutigen.

Ebenso möchte ich mich bei meinem Freund bedanken, der mich in allen Dingen bestärkt und täglich dazu motiviert, neugierig zu bleiben.

Zuletzt möchte ich noch all denjenigen danken, die in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit für mich da waren.

Abstract

The use of timber constructions has the potential to reduce greenhouse gas emissions from the building sector. The material is renewable and characterised by its high resource efficiency. Digital approaches can help to increase the use of wood in the building sector. In particular, Building Information Modeling and its vendor-neutral data format IFC opens many opportunities to optimise the design process of buildings.

This work aims to support the design process of timber buildings. For this purpose, the possibilities of detailed models in the IFC data format are investigated and an exemplary building with typical timber components is created. Quality criteria for the IFC data format are formulated for evaluation and implemented in the application.

Based on this, the resulting possibilities from building models of high quality are analysed using Automated Code Compliance Checking. For this purpose, a process for compliance checking with sound insulation requirements of timber buildings is developed and implemented.

The basis of this work is the open-source toolkit *Xbim.Essentials*, which implements the object model of the IFC schema. The programming is done in *C#* in the *Visual Studio* programming environment.

The results show that detailed modelling of timber buildings is possible with the help of *Xbim* and that high quality can be achieved. However, this requires a high level of knowledge of the IFC schema and its implementation. Based on this, Automated Code Compliance Checking offers many possibilities to simplify and accelerate the checking process. The program developed within the scope of this work covers the process of sound insulation verification apart from the calculation of flanking transmission and checks compliance with standards and guidelines. The feedback of modified components shows the potential of the methodology. For further application, the calculation of the flanking transmission can be integrated. In addition, the traceability of modified components requires further investigation to ensure the integrity of the model.

Zusammenfassung

Die Verwendung von Holzkonstruktionen hat das Potenzial, die Treibhausgasmissionen des Bausektors zu senken. Der Rohstoff ist nachwachsend und zeichnet sich durch eine hohe Ressourceneffizienz aus. Digitale Ansätze können helfen, die Anwendung von Holz im Bausektor zu steigern. Insbesondere das Building Information Modeling und sein herstellerneutrales Datenformat IFC eröffnet viele Möglichkeiten zur Optimierung des Designprozesses von Gebäuden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Designprozess von Holzgebäuden zu unterstützen. Dazu werden die Möglichkeiten von detaillierten Modellen im IFC-Datenformat untersucht und ein exemplarisches Gebäude mit typischen Holzbauteilen erstellt. Zur Beurteilung werden Qualitätskriterien für das IFC-Datenformat formuliert und in der Anwendung implementiert.

Darauf aufbauend werden die sich ergebenden Möglichkeiten aus Gebäudemodellen hoher Qualität anhand des Automated Code Compliance Checking analysiert. Dafür wird ein Prozess für die Überprüfung von Übereinstimmung mit Schallschutzanforderungen von Holzgebäuden erarbeitet und implementiert.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet das Open Source Toolkit *Xbim.Essentials*, welches das Objektmodell des IFC-Schemas implementiert. Die Programmierung erfolgt in *C#* in der Programmierumgebung *Visual Studio*.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine detaillierte Modellierung von Holzgebäuden mithilfe von *Xbim* möglich ist und eine hohe Qualität erreicht werden kann. Dies setzt jedoch eine hohe Kenntnis des IFC-Schemas und dessen Implementierung voraus. Darauf aufbauend bietet das Automated Code Compliance Checking viele Möglichkeiten, den Überprüfungsprozess zu vereinfachen und beschleunigen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm deckt den Prozess der Schallschutzüberprüfung mit Ausnahme der Flankenübertragung ab und überprüft die Übereinstimmung mit Normen und Richtlinien. Die Rückführung von modifizierten Bauteilen zeigt dabei das Potenzial der Methodik auf. Zur weiteren Anwendung kann die Berechnung der Flankenübertragung integriert werden. Darüber hinaus muss die Rückführung von Modifikationen weiter untersucht werden, um die Integrität des Modells zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einführung	1
1.1 Ziel der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 IFC im Kontext von Building Information Modeling	4
2.1 Geometrie und Semantik	5
2.2 Level of Development	6
2.3 Model View Definition	8
2.4 Bedeutende Klassen	8
2.5 Qualität von IFC-Modellen	9
2.5.1 Status quo	9
2.5.2 Qualitätskriterien aus der Forschung	10
2.6 Erstellung von IFC-Dateien	14
3 Holzbau	15
3.1 Bauweisen	15
3.1.1 Wände	17
3.1.2 Trenndecken	19
3.2 Holzbau und BIM	21
4 Erstellen eines IFC-Modells für den Holzbau	22
4.1 Methodik	22
4.2 Ergebnisse	24
4.2.1 Programmierung	24
4.2.2 Modell	30
4.2.3 Qualität	34
4.2.4 Probleme	38

5	Schallschutz	41
5.1	Physikalische Grundlagen	41
5.1.1	Luftschall.....	45
5.1.2	Trittschall	46
5.2	Anforderungen/Normen	47
5.3	Schallschutz im Holzbau.....	49
5.3.1	Bauteilkataloge	50
5.3.2	Bauteilkonstruktionen.....	52
6	Automated Code Compliance Checking	54
6.1	Aufbereitung der Regelwerke	55
6.2	Vorbereitung des Gebäudemodells.....	58
7	ACCC für den Schallschutz im Holzbau	59
7.1	Methodik	59
7.1.1	Phase 1: Aufbereitung der Regelwerke	60
7.1.2	Phase 2: Vorbereitung des Gebäudemodells	62
7.1.3	Phase 3: Überprüfung auf Einhaltung des Nachweises	67
7.1.4	Phase 4: Bericht.....	69
7.1.5	Phase 5: Rückführung der identifizierten Fehler	70
7.2	Ergebnisse anhand eines Anwendungsbeispiels	71
7.2.1	Programmierung	72
7.2.2	Output	73
7.2.3	Probleme	74
7.2.4	Lösungsvorschlag.....	77
8	Diskussion	80
8.1	IFC-Holzbaumodell	80
8.2	ACCC für den Schallschutz	81
9	Fazit	84
	Literaturverzeichnis	85
	Anhang A: Funktionsbeschreibungen	90
	Anhang B: Zuweisungstabellen	99
	Anhang C: Datenpaket-Inhalt	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Trennung Semantik und Geometrie in IFC (Borrmann et al., 2015, S. 101)	6
Abbildung 2-2: Verschiedene Reifegrade einer Stahlstütze (Borrmann et al., 2015, S. 141)	7
Abbildung 2-3: Verschiedene Reifegrade einer Holzständerwand (nach BIM Forum, 2020)	7
Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau des <code>IfcLocalPlacement</code>	9
Abbildung 3-1: Massivholzbaukonstruktionen (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 40)	16
Abbildung 3-2: Holztafelbaukonstruktion (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 40)	17
Abbildung 3-3: Brettstapelwand aus verdübelten KVH-Brettern (Links), Brettsperrholzwand mit Kern aus BSP (Mitte), Tafelbauwand mit Ständerwerk aus KVH oder BSH und aussteifender Beplankung (Rechts) (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 51–54)	18
Abbildung 3-4: Verschiedene Aufbauten einer Holzdecke (Blödt et al., 2019, S. 35)	20
Abbildung 4-1: Übersicht über Modellierung des IFC-Schemas	25
Abbildung 4-2: Modellierung des IFC-Schemas für eine Holzständerwand	25
Abbildung 4-3: Modellierung des IFC-Schemas für <code>IfcPlate</code>	26
Abbildung 4-4: Modellierung des IFC-Schemas für <code>IfcMember</code>	26
Abbildung 4-5: Grundriss des Beispielgebäudes (Erdgeschoss) in <i>Autodesk Revit</i> .	30
Abbildung 4-6: Schnitt A-A des Beispielgebäudes in <i>Autodesk Revit</i>	31
Abbildung 4-7: Beispielgebäude dargestellt in den IFC-darstellenden Programmen <i>Solibri</i> (Links) und <i>BIMvision</i> (Rechts).....	31
Abbildung 4-8: Holzständerwand im Erdgeschoss des Gebäudes in <i>BIMvision</i>	32
Abbildung 4-9: Detaillierte (Links) und nicht detaillierte (Rechts) Ecke Holzständerwand in <i>BIMvision</i>	32
Abbildung 4-10: Detaillierte (Links) und nicht detaillierte (Rechts) Ecke Massivholzwand in <i>BIMvision</i>	32

Abbildung 4-11: Überblick über Erdgeschoss des Gebäudes in <i>BIMvision</i>	33
Abbildung 4-12: Draufsicht Geschossdecke mit unterliegender Tragstruktur in <i>BIMvision</i>	33
Abbildung 4-13: Alternatives Gebäude in <i>BIMvision</i>	34
Abbildung 4-14: Vergleich Darstellung der Fenster in <i>BIMvision</i> (Links) und <i>XbimXplorer</i> (Rechts)	36
Abbildung 4-15: IFC Validation des <i>XbimXplorer</i> vor (Links) und nach (Rechts) Nachbesserungen	37
Abbildung 4-16: Vergleich Benennung von Raum „Ground floor Space 1“ in <i>Solibri Office</i> (Oben) und <i>BIMvision</i> (unten).....	38
Abbildung 4-17: Warnung zur Positionierung von Fenstern und Türen in <i>Autodesk Revit</i> beim Öffnen des Modells	39
Abbildung 4-18: IFC-Schema-Diagramm LP vor (Links) und nach (Rechts) der Modifikation	39
Abbildung 4-19: Warnung zur Darstellung von Räumen in <i>Autodesk Revit</i> beim Öffnen des Modells	40
Abbildung 5-1: Bereiche des Frequenzbandes (Willems et al., 2020, S. 52)	42
Abbildung 5-2: Unterscheidung der Biegeweichheit anhand der Koinzidenzfrequenz (Willems et al., 2020, S. 73)	43
Abbildung 5-3: Übertragungswege in schematischer Darstellung für den Holzbau: Trittschallübertragung (Links), Luftschallübertragung über eine Decke (Mitte) und eine Wand (Rechts) (Châteauvieux-Hellwig et al., 2020)	44
Abbildung 5-4: Indexbeschreibung des Luftschalldämm-Maßes (Willems et al., 2020, S. 85).....	45
Abbildung 5-5: Indexbeschreibung des Trittschalldämm-Maßes (Willems et al., 2020, S. 95).....	47
Abbildung 5-6: Berechnung von R'_w (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017a, S. 22).....	48
Abbildung 5-7: Berechnung von $L'_{n,w}$ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017b, S. 21).....	49
Abbildung 5-8: Ausschnitt aus Abkürzungsverzeichnis von <i>VaBDat</i> (Technische Hochschule Rosenheim 2021)	51

Abbildung 5-9: Bauteilaufbau einer möglichen Holzständerwand (nach LIGNUM-Holzwirtschaft Schweiz, 2021)	51
Abbildung 7-1: Ablauf des ACCC	59
Abbildung 7-2: Zielwerte für Schallschutznachweise in drei Abstufungen (Blödt et al., 2019, S. 13).....	60
Abbildung 7-3: Übersicht Phase 2	62
Abbildung 7-4: Entscheidungsdiagramm für die Funktionalität der Wandbauteile	63
Abbildung 7-5: Beispiel für die Kürzelerstellung einer <code>IfcPlate</code> dargestellt in <code>XbimXplorer</code>	66
Abbildung 7-6: Übersicht über die Zusammenführung der Informationen in Phase 368	
Abbildung 7-7: Markierter Flankenterm für die Berechnung von R'_w (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017a, S. 22).....	68
Abbildung 7-8: Markierter Flankenterm für Berechnung von $L'_{n,w}$ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017b, 21)	68
Abbildung 7-9: UML-Klassendiagramm für die wichtigsten Klassen des Projekts	72
Abbildung 7-10: Ausschnitt aus „ReportAnalysis.txt“ für ein Beispielgebäude	73
Abbildung 7-11: Ausschnitt aus „ReportComplianceCheck.txt“ für ein Beispielgebäude	74
Abbildung 7-12: Wanddetail in Draufsicht vor (Links) und nach (Rechts) der Modifikation in <i>BIMvision</i>	75
Abbildung 7-13: Seitenansicht Übergang Decke zu Wand (Links) und Schnitt durch Fenster (Rechts) in <i>BIMvision</i>	75
Abbildung 7-14: Ansicht auf Innenwand vor (Links) und nach (Rechts) Modifikation in <i>BIMvision</i>	76
Abbildung 7-15: Draufsicht einer Gebäudeecke mit detaillierter Modellierung vor der Modifikation (Links) und daraus resultierender Modellierung nach der Modifikation (Rechts) in <i>BIMvision</i>	76
Abbildung 7-16: Schematischer Lösungsvorschlag für das Model Healing	78
Abbildung 7-17: Vergleich Schnittansichten vor (Links) und nach (Rechts) dem Model Healing der Fenster und Türen dargestellt in <i>BIMvision</i>	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Dimension der Datenqualität (Wand & Wang, 1996)	12
Tabelle 4-1: Inputparameter der Funktion GenerateFrameMember	27
Tabelle 4-2: Übersicht über Anforderungen an die Qualität von IFC-Modellen.....	34
Tabelle 5-1: Angabe Sicherheitsbeiwert u_{prog} für verschiedene Nachweise (Willems et al. 2020, S. 160)	48
Tabelle 7-1: Erforderliche Werte für Luftschallnachweise (Blödt et al., 2019, S. 13; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., S. 18–19; Willems et al., 2020, S. 160).....	61
Tabelle 7-2: Erforderliche Werte für Trittschallnachweise (Blödt et al., 2019, S. 13; Willems et al., 2020, S. 160)	61

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
A_0	Äquivalente Bezugsabsorptionsfläche (= 10 m ²)	m ²
C	Spektrum-Anpassungswert für überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm	dB
C_l	Spektrum-Anpassungswert für Decken	dB
C_{tr}	Spektrum-Anpassungswert für überwiegend tief- und mittelfrequenten Lärm	dB
$D_{n,j,w}$	Bewertete Schallpegeldifferenz	dB
f	Frequenz	Hz
f_g	Koinzidenzgrenzfrequenz	Hz
L'_n	Gesamt-Trittschallpegel	dB
$L'_{n,w}$	Bewerteter Gesamt-Trittschallpegel	dB
$L'_{n,w,zul}$	Zulässiger bewerteter Gesamt-Trittschallpegel	dB
L_n	Norm-Trittschallpegel	dB
$L_{n,ij,w}$	Bewerteter Norm-Trittschallpegel durch Flankenübertragung	dB
$L_{n,w}$ bzw. $L_{n,d,w}$	Bewerteter Norm-Trittschallpegel	dB
L_p	Schalldruckpegel	dB
p	Schalldruck	Pa
r	Strömungswiderstand	Pa*s/m ²

R	Labor-Schalldämm-Maß	dB
R'	Bau-Schalldämm-Maß	dB
R'_w	Bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	dB
$R'_{w,erf}$	Erforderliches bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	dB
$R_{Ff,w}, R_{Df,w}, R_{Fd,w}$	Bewertete Flankendämm-Maße für die Übertragungswege Ff, Df bzw. Fd	dB
R_w bzw. $R_{Dd,w}$	Bewertetes Labor-Schalldämm-Maß	dB
S_s	Fläche des trennenden Bauteils	m ²
$t_{Flanken}$	Term aus Flankenberechnung	dB
U_{prog}	Sicherheitsbeiwert	dB

Abkürzungsverzeichnis

ACCC	Automated Code Compliance Checking
BIM	Building Information Modeling
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
BST	Brettstapelholz
CCC	Code Compliance Checking
DLL	Dynamic Link Library
GUID	Globally Unique Identifier
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IFC	Industry Foundation Classes
KVH	Konstruktionsvollholz
LOD	Level of Development
LP	<code>IfcLocalPlacement</code>
MVD	Model View Definition
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
VPL	Visual Programming Languages

1 Einführung

Um den fortschreitenden Klimawandel zu verlangsamen, ist es nötig, die globalen Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren. Dabei trägt das Bauwesen eine große Verantwortung: Es ist weltweit für ein Drittel der CO₂-Emissionen und 60 % der weltweit produzierten Energie verantwortlich (International Energy Agency, 2009; Ürge-Vorsatz et al., 2011). Da die Betriebsenergie in den letzten Jahren stark gesunken ist, sind nun Optimierungen an der Baukonstruktion selbst gefragt. Ziel ist es, langlebige, optimierte Konstruktionen zu schaffen. Den wichtigsten Einfluss hat dabei der Designprozess. Hier werden die wichtigsten Entscheidungen wie die Geometrie, die Materialien und die Ausstattung des Bauwerks getroffen. Erfahrungsgemäß sind zu diesem Zeitpunkt aber wenig Möglichkeiten vorhanden, die Auswirkungen der einzelnen Entscheidungen zu beurteilen. Einen ersten Schritt lieferte das Aufkommen von digitalen Gebäudemodellen, dem Building Information Modeling (BIM). Die somit zur Verfügung stehenden Informationen können nicht nur zur grafischen Darstellung, sondern auch für weiterführende Analysen verwendet werden. Ein derzeit noch nicht weit verbreitetes Teilgebiet ist dabei das Automated Code Compliance Checking. Dabei wird das Modell automatisiert auf die Einhaltung von Normen oder Vorschriften geprüft. Im Designprozess wird auch das Material der Konstruktion entschieden. Dieses hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Ökobilanz eines Gebäudes. Der Holzbau hat das Potenzial, die Emissionen des Bauwesens zu senken. Als nachwachsender Rohstoff erhöht Holz zudem die Ressourceneffizienz. Jedoch ist das Fachwissen über den Baustoff und seine Anwendung derzeit in der Industrie nicht flächendeckend vertreten. Der Anteil der genehmigten Holzbau-Wohngebäude in Deutschland betrug 2020 erstmals über 20 % (Statista, 2021).

Als Baumaterial mit vergleichsweise geringer Dichte hat der Schallschutz eine besondere Bedeutung im Holzbau. Derzeit werden Schallbetrachtungen erst nach der Detailplanung durchgeführt. In dieser Planungsphase ist es zeit- und arbeitsaufwändig eventuelle Fehler zu verbessern. Dazu kommt, dass der Prozess auf manuellem Herauslesen und Verarbeiten der Gebäudeinformationen basiert. Dies führt zu einer hohen Fehleranfälligkeit. (Châteauvieux-Hellwig et al., 2021)

Digitale Ansätze können helfen, die Anwendung von Holz im Bausektor einfacher zugänglich zu machen. Derzeit existierende Programme für digitale Gebäudemodelle werden jedoch der Komplexität von Holzbauteilen nicht gerecht. So ist eine detaillierte Modellierung der Holzbauteile nur begrenzt möglich. Außerdem sind Parameter, die beispielsweise für die Schallschutzanalyse benötigt werden, häufig nicht vorhanden, was eine Nachbearbeitung der Modelle nötig macht (Chateauvieux-Hellwig et al., 2022, S. 13).

1.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Designprozess von Holzgebäuden zu unterstützen und zu verbessern. Der Fokus liegt dabei auf der Verwendung von digitalen Gebäudemodellen im herstellernerneutralen Format „Industry Foundation Classes“ (IFC) zur schalltechnischen Analyse des Gebäudes.

Um die Möglichkeiten von IFC für den Holzbau zu evaluieren, soll zunächst ein detailliertes IFC-Modell erstellt werden. Zur Ausschöpfung des gesamten Potenzials von IFC, soll das IFC4-Schema verwendet werden. Das Modell soll typische Konstruktionen von sowohl Holzmassivbau als auch Holzrahmenbau enthalten. Zudem soll es mindestens 3 Stockwerke mit je mindestens 3 Räumen beinhalten. Für das Dach soll entweder ein Flach- oder Steildach gewählt werden. Türen und Fenster sollen an geeigneter Stelle eingefügt werden. Die jeweiligen Bauteilelemente sollen mit Materialschichten und zugeordneten Property-Sets modelliert sein. Zudem sollen die Elemente mithilfe der Element-Verbindungen nach Möglichkeit des IFC4-Schemas verbunden sein. Darüber hinaus soll das Modell Räume und Raum-Bauteil-Verbindungen enthalten. Außerdem soll das IFC-Modell direkt, also ohne Umweg über den Export aus BIM-Software, erstellt werden. Hierfür sollen die Möglichkeiten des Toolkits *Xbim*¹ evaluiert werden.

Darauf aufbauend soll der Designprozess von Holzbaugebäuden optimiert werden. Dafür sollen die Möglichkeiten der automatisierten Überprüfung des Schallschutznachweises auf der Basis von IFC-Holzbaumodellen untersucht werden. Dies beinhaltet die Entwicklung einer Methodik, Definition von Anforderungen an das Modell und einer Implementierung des Prozesses.

¹ <https://docs.xbim.net/>

1.2 Aufbau der Arbeit

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung von Building Information Modeling im Holzbau. Dafür erfolgt zunächst eine Analyse des Status quo des herstellerneutralen Datenformats IFC für BIM. Im Anschluss werden die häufigsten Konstruktionsweisen des Holzbaus dargelegt und die Anwendung von BIM in diesem Sektor betrachtet. Es folgt eine Auseinandersetzung mit der Beurteilung von Qualität von IFC-Modellen. Im letzten Schritt wird ein exemplarisches Holzbaumodell mithilfe des Toolkits *Xbim* erstellt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Vorgehen des Automated Code Compliance Checking für den Schallschutz im Holzbau beleuchtet. Dazu folgt zunächst ein theoretischer Teil zu den Grundlagen des Schallschutzes und des Automated Code Compliance Checking. Anschließend wird ein Vorgehen für die Überprüfung des Schallschutzes auf der Basis von IFC-Holzbaumodellen erarbeitet. Dieses wird soweit möglich implementiert. Dafür dient das im ersten Teil erstellte Modell als Anschauungs- und Testbeispiel.

2 IFC im Kontext von Building Information Modeling

Als Building Information Modeling (BIM) bezeichnet man die Verwendung eines digitalen Gebäudemodells über den Lebenszyklus eines Bauwerks vom Entwurf bis hin zum Betrieb (Borrmann et al., 2015, S. 1). Daraus ergeben sich einige Vorteile. Beim Planungsprozess können beispielsweise Kollisionen frühzeitig erkannt werden. Außerdem vereinfacht sich die Verwendung von Berechnungs- und Simulationsprogrammen, da zur Berechnung relevante Informationen wie die Gebäudegeometrie direkt aus dem Modell entnommen werden kann. Auch eine Überprüfung des Modells auf gesetzliche Vorschriften oder Standards ist möglich. Durch die Verwendung von BIM verschiebt sich der Planungsaufwand in frühere Planungsphasen, was einen größeren Einfluss auf die Gestaltung, Fehlererkennung und Kosten des Gebäudes erlaubt. (Borrmann et al., 2015, S. 5–6)

Als herstellerunabhängiges Datenformat für den Datenaustausch von BIM-Modellen können Industry Foundation Classes (IFC) verwendet werden. Diese wurden von der internationalen Organisation *buildingSmart* entwickelt und normiert (Borrmann et al., 2015, S. 9). Als offener internationaler Standard für BIM-Daten wird das Format unter anderem für den Informationstransfer zwischen den verschiedenen Disziplinen im Bau- und auch Facility Management Sektor verwendet (buildingSMART International, 2019). Das IFC-Datenmodell enthält dabei sowohl geometrische als auch semantische Informationen (Borrmann et al., 2015, S. 9, 80). Es erlaubt eine Vielzahl von Datenaustauschszenarien über den kompletten Lebenszyklus eines Bauwerks und spielt daher eine maßgebende Rolle in der Realisierung des BIM-Konzeptes (Borrmann et al., 2015, S. 80). Die Anwendung von IFC im Bausektor nimmt zu, da es Kompatibilitätsprobleme löst (Solihin et al., 2015, S. 739).

Der IFC-Standard basiert auf der objektorientierten Datenmodellierungssprache *EXPRESS*. Diese definiert das Schema des Datenmodells, nicht jedoch konkrete Instanzen. Für die Darstellung der Instanzen gibt es mehrere Optionen, wobei die Verwendung eines STEP Physical File am häufigsten ist. Zur besseren Les-, Wart- und Erweiterbarkeit ist das IFC-Datenmodell in Schichten aufgebaut. Ein Grundprinzip stellt die Unabhängigkeit der Kernelemente sicher: Elemente aus weiter oben liegenden

Schichten dürfen auf Elemente aus weiter unten liegenden Schichten verweisen, umgekehrt ist dies jedoch nicht erlaubt. Von oben nach unten lauten die Schichten „Domain Layer“, „Interop Layer“ bzw. „Shared Layer“, „Core Layer“, und „Resource Layer“. Die Vererbungsstruktur der Klassen folgt diesem Schichtenprinzip. So erben alle Klassen von `IfcRoot`. Ausnahme hiervon sind die Klassen des Resource Layers, welche im IFC-Modell nicht als eigenständige Objekte existieren können. (Borrmann et al., 2015, S. 86–90)

Im Verlaufe seiner Entwicklung entstanden verschiedene Versionen des IFC-Standards. Die neueste Version ist IFC4, jedoch ist die Vorgängerversion IFC2x3 die derzeit Verbreitetste in BIM-Software. (Temel & Başağa, 2020, S. 117)

2.1 Geometrie und Semantik

Um ein Bauwerk vollständig digital zu beschreiben, ist eine dreidimensionale geometrische Darstellung nicht ausreichend. Es werden noch sogenannte semantische Informationen benötigt. Unter Semantik wird in diesem Zusammenhang die Bedeutung von Informationen oder Daten verstanden. Es ist gewissermaßen die Interpretation von hinterlegten Informationen. Bei digitalen Gebäudemodellen handelt es sich beispielsweise um Materialien oder Bauteiltypen. (Borrmann et al., 2015, S. 26, 43-44)

Die Trennung zwischen geometrischen und semantischen Informationen ist im IFC-Format strikt ausgeführt (siehe Abbildung 2-1). Dies erlaubt, einer semantischen Instanz verschiedene Modellierungen der Geometrien zu hinterlegen. Dadurch kann je nach Anwendung eine passende geometrische Darstellung verwendet werden, beispielsweise ein Flächenmodell oder Solid Modeling. Die Konsistenz zwischen den verschiedenen Modellierungen, also die Übereinstimmung der geometrischen Modellierungen untereinander, wird allerdings nicht vom IFC-Schema garantiert, sondern muss von der implementierenden Software sichergestellt werden. (Borrmann et al., 2015, S. 101)

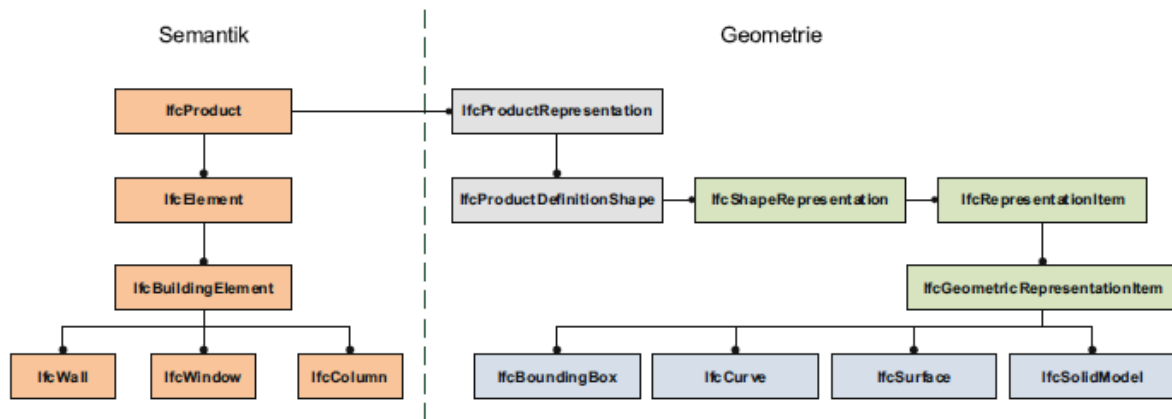


Abbildung 2-1: Trennung Semantik und Geometrie in IFC (Borrmann et al., 2015, S. 101)

Durch diese Konzipierung soll IFC in möglichst vielen Zweigen des Bauwesens anwendbar sein. Es erlaubt zudem eine Vielzahl an manuellen Anpassungen und Erweiterungen des Schemas um spezifische Anforderungen abzudecken.

2.2 Level of Development

Modelle und die hinterlegten geometrischen und semantischen Informationen können verschiedene Reife- oder Ausarbeitungsgrade enthalten. Um diese zu definieren und klassifizieren, verwendet man das sogenannte „Level of Development“ (LOD). Dafür hat das American Institute of Architects gemeinsam mit dem amerikanischen BIMforum formale Definitionen für sechs LODs erstellt und definiert: LOD100, LOD200, LOD300, LOD350, LOD400, LOD500. (Borrmann et al., 2015, S. 141)

Der Reifegrad nimmt dabei aufsteigend zu. Die jeweils benötigten Inhalte sind wie folgt definiert (Borrmann et al., 2015, S. 141; NATSPEC, 2016, S. 24):

- LOD 100 „Conceptual“: Generelle Darstellung von Flächen, Volumina, Position und Orientierung im Raum.
- LOD 200 „Approximate geometry“: Modellelemente werden mit ungefähren Angaben für Menge, Größe, Form, Position und Orientierung dargestellt.
- LOD 300 „Precise geometry“: Die Modellelemente weisen präzise Informationen bezüglich Menge, Größe, Form, Position und Orientierung auf.
- LOD 350: Die Modellelemente weisen zusätzlich zu präzisen Informationen zur eigenen Geometrie auch Schnittstellen zu anderen Gebäudesystemen auf.

- LOD 400 „Fabrication“: Die Modellelemente weisen zusätzlich zu einer präzisen Geometrie Informationen zur vollständigen Fertigung, Detaillierungen und Zusammenbau auf.
- LOD 500 „As-built“: Die Modellelemente sind mit allen überprüften Informationen wie eingebaut dargestellt.

Nicht-geometrische Informationen können ab LOD 200 hinterlegt werden.

In Abbildung 2-2 ist beispielhaft der Reifegrad einer Stahlstütze mit darunterliegendem Anschluss dargestellt. Bei komplexeren Bauteilen wie einer Holzständerwand kann die Skala bei höheren LODs beginnen, da ein Minimum an Informationen für die Darstellung benötigt wird. Abbildung 2-3 zeigt verschiedene Reifegrade einer Holzständerwand.

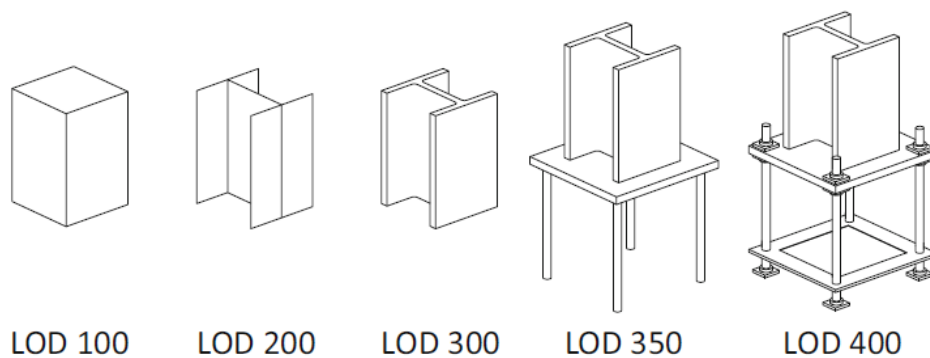


Abbildung 2-2: Verschiedene Reifegrade einer Stahlstütze (Borrmann et al., 2015, S. 141)



Abbildung 2-3: Verschiedene Reifegrade einer Holzständerwand (nach BIM Forum, 2020)

Die Reifegrade können dabei sowohl einem Modell als auch einzelnen Modellelementen zugewiesen werden. Für IFC-Modelle definiert der NATSPEC National BIM Guide objekt-/elementspezifische Anforderungen zur Erfüllung der unterschiedlichen Ausarbeitungsgrade (NATSPEC, 2016).

2.3 Model View Definition

Das IFC-Datenformat möchte für möglichst viele Anwendungen im Bauwesen verwendbar sein, weshalb eine Vielzahl an Informationen hinterlegbar ist. In der Praxis ist es jedoch wichtig, die für die spezifische Anwendung benötigten Informationen zu erhalten. Zur Definition des Datenaustausches können daher verschiedene sogenannte „Model View Definitions“ (MVDs) angelegt oder vordefinierte MVDs verwendet werden. Sie definieren, welche Modellinhalte vorhanden sein müssen und legen somit eine gewisse erforderliche Qualität des Modells fest. (Borrmann et al., 2015, S. 129–131)

Für die Version IFC4 unterscheidet man zwischen zwei MVD Typen (Borrmann et al., 2015, S. 137):

- Das Reference View wird vor allem für die Zusammenführung und die Koordination zwischen den Disziplinen verwendet. Dabei geht es beispielsweise um die Kollisionserkennung von Teilmodellen. Nötige Änderungen werden anschließend in den Teilmodellen vorgenommen.
- Das Design Transfer View dagegen übergibt vollständige Modelle, in denen Änderungen direkt vorgenommen werden können.

2.4 Bedeutende Klassen

Für diese Arbeit spielen einige Bestandteile des IFC-Schemas eine herausragende Rolle und werden deshalb im Folgenden erläutert. Weitere Details zu diesen und weiteren Klassen finden sich in der offiziellen Dokumentation (buildingSMART, 2020).

IfcPropertySet:

Mithilfe von `IfcPropertySet` können Elementen über das vordefinierte Schema hinaus anwendungsspezifische Eigenschaften (`IfcProperty`) zugeordnet werden. Dies erlaubt eine flexible und vielseitige Anwendung von IFC im Bausektor. Die gängigsten Eigenschaften sind dabei von Anwender*innen und Entwickler*innen standardisiert, zum Beispiel das `IfcPropertySet „Pset_WallCommon“` für Wände. (Borrmann et al., 2015, S. 112–113)

IfcRelConnects(Path)Elements:

`IfcRelConnectsElements` bzw. `IfcRelConnectsPathElements` bietet die Möglichkeit der Darstellung einer Verbindung zwischen Elementen innerhalb des Modells. Mithilfe von „Path“ lässt sich beschreiben, an welcher Stelle der Bauteile die Verbindung existiert. Diese Modellierung erlaubt, angrenzende Bauteile zu finden.

IfcLocalPlacement:

Positioniert man eine Komponente im Raum, so erfolgt dies im IFC-Schema über ein `IfcLocalPlacement`. Dabei wird ein Bezugs-Koordinatensystem definiert, sowie die Verschiebung der Komponente bezogen auf dieses Koordinatensystem. Das Attribut des Koordinatensystems wird `PlacementRelTo` bezeichnet, die Verschiebung `RelativePlacement`. Auf `PlacementRelTo` kann verzichtet werden, dann wird das globale Koordinatensystem als Referenz verwendet (Borrmann et al., 2015, S. 110). Das resultierende Schema ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

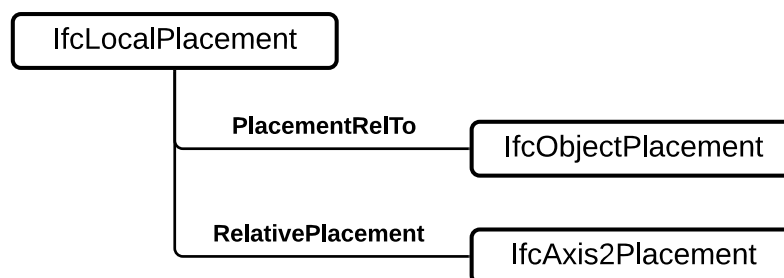


Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau des `IfcLocalPlacement`

2.5 Qualität von IFC-Modellen

Um die Nutzung und damit die Vorteile von IFC in der Bauindustrie zu erhöhen, ist es essenziell, dass Nutzende darauf vertrauen können, dass die Daten des Modells korrekt zwischen den Disziplinen übertragen werden können. Dies bedeutet, dass die Qualität der Dateien und des Prozesses sichergestellt sein muss. Im Folgenden wird der Status quo, mögliche Definitionen aus der Forschung, sowie deren Relevanz für das in dieser Arbeit gewählte Toolkit *Xbim* analysiert.

2.5.1 Status quo

Derzeit wird die Qualität der IFC-Modelle durch die Zertifizierung der internationalen non-profit-Organisation *buildingSMART* und die gängige Praxis der Softwarehersteller bestimmt. Allgemein gültige bzw. offizielle und evaluierbare Kriterien zur Evaluierung

der Qualität gibt es nicht. Jedoch können weder die Zertifizierung noch die gängige Praxis der Softwarehersteller aktuell eine ausreichend hohe Qualität der Daten leisten. (Solihin et al., 2015, S. 740–741)

Solihin et al. identifizieren folgende Probleme der Zertifizierung (Solihin et al., 2015, S. 740–741):

- Durch Zertifizierung ist zwar ein Mindestmaß an Qualität gesichert, jedoch werden dabei nur beschränkte Anwendungsfälle abgedeckt. Zudem orientiert sich der Zertifizierungsprozess mehr an den Möglichkeiten der Softwarehersteller als an den technischen Möglichkeiten des IFC-Datenformats.
- Die Prüfkriterien der Zertifizierung basieren derzeit noch nicht genügend auf systematischen/theoretischen Überlegungen, sondern wurden aufgrund Erfahrungen und Erwartungen entwickelt. Dies muss durch wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse ergänzt werden.
- Derzeit wird in den MVDs (Model View Definitionen) nicht berücksichtigt, dass Fehler unterschiedliche Auswirkungen auf die Verwendbarkeit im weiteren Prozess haben.
- Besonders geometrische Überprüfungen werden aktuell manuell von wenigen Expert*innen durchgeführt. Für Endnutzende bedeutet dies, dass (potenziell spät entdeckte) Fehler ohne guten Support nur schwer behoben werden können und somit ein Kontrollverlust über den Prozess entsteht.

2.5.2 Qualitätskriterien aus der Forschung

Erste Versuche, evaluierbare Regeln zu erstellen, unternahmen Solihin et al. Sie stellten dafür testbare Kriterien auf, die in 4 Kategorien unterteilt sind. Jede Kategorie stellt verschiedene Anforderungen an die jeweilige Datenqualität. Die Definitionen für die Bewertung der Datenqualität basieren auf Wand und Wang und sind an das IFC-Datenformat angepasst (Solihin et al., 2015, S. 743; Wand & Wang, 1996). Sie werden in Tabelle 2-1 erläutert. Die verschiedenen Anforderungen berücksichtigen, dass Fehler beispielsweise bei der topologischen Korrektheit schwerwiegender sein können als das Fehlen spezifischer Attribute. Die Kategorien lauten wie folgt (in Klammern ist die entsprechende geforderte Datenqualität angegeben) (Solihin et al., 2015, S. 747–748):

- 1) Analyse des Schemas der Datenstruktur (Anforderungen: Vollständig)
- 2) Semantische Tests (Anforderungen: Aussagekräftig)
- 3) MVD Übereinstimmungstests (Anforderungen: Übereinstimmend)
- 4) Export/Import Vollständigkeitstests (Anforderungen: Vollständig)

Die Tests der Kategorie 1) enthalten Überprüfungen der Syntax, der Instanztypen sowie der Enumerationen. Diese sind überwiegend schon im IFC-Toolkit oder in Zertifizierungsregeln implementiert. Darüber hinaus stellen die Autoren Regeln für Geometrie und Topologie auf. Bislang würden diese üblicherweise nicht betrachtet, seien aber ein essenzieller Teil des Datenstrukturschemas. An die Tests der Kategorie 1) werden die höchsten Anforderungen gestellt, da sie die Basis eines Modells hoher Qualität bilden. (Solihin et al., 2015, S. 748)

Die semantischen Tests der Kategorie 2) sollen Fehler identifizieren, die zwar strukturell richtig sind, aber aus Verhaltenssichtweise keinen Sinn ergeben. Beispielsweise sollen identische oder fast identische `IfcTypeObject` vermieden werden. Als Anforderung ist eine aussagekräftige Implementierung gefordert. (Solihin et al., 2015, S. 748)

In Kategorie 3) wird überprüft, ob die exportierten Parameter denen der MVDs entsprechen. Dabei können sowohl offizielle MVDs von *buildingSMART International* als auch von anderen Quellen verwendet werden. Jedoch müssen die Regeln logisch konsistent, widerspruchsfrei und ohne Zirkelschlüsse sein. (Solihin et al., 2015, S. 748–750)

Mithilfe der Export-/Import-Vollständigkeitstests in Kategorie 4) soll sichergestellt werden, dass das exportierte und importierte Modell basierend auf den vorhergehenden Schritten richtig übertragen wurde. Dies beinhaltet beispielsweise eine Überprüfung der Anzahl der Elemente, den Erhalt der GUID, sowie geometrische Betrachtungen. An der Sicherstellung dieser Kriterien ist sowohl die exportierende als auch die importierende Implementierung beteiligt. (Solihin et al., 2015, S. 750)

Tabelle 2-1: Dimension der Datenqualität (Wand & Wang, 1996)

Dimension der Datenqualität	Beschreibung	Nähere Beschreibung/Beispiel
Vollständig	Daten können auf einen Zustand zurückgeführt werden.	Es entsteht kein Datenverlust zwischen Zuständen (innerhalb der vereinbarten MVDs).
Aussagekräftig	Daten können auf einen sinnvollen Zustand abgebildet werden.	Daten sollen semantisch sinnvoll sein. Ein Bauteil, das semantisch in einem Stockwerk liegt, soll auch räumlich in diesem Stockwerk liegen.
Korrekt	Daten werden auf den richtigen Zustand abgebildet.	Der Zustand muss nicht nur valide, sondern auch richtig sein.
Übereinstimmend	Daten müssen mit dem vereinbarten Standard übereinstimmen.	Der vereinbarte Standard ist in diesem Kontext in der Regel das IFC-Schema oder die Anforderungen einer MVD.
Uneindeutig	Jeder Zustand muss in den vorherigen Zustand zurückführbar sein.	Im IFC-Datenformat sind mehrere geometrische Darstellungen und damit verschiedene Mappings erlaubt. Jedoch soll das Mapping immer eindeutig und die originalen Daten eindeutig definierbar sein.

Im Rahmen dieser Arbeit sind nicht alle Kategorien gleich relevant. Die Kriterien der Kategorie 1) sind beispielsweise nicht oder nur bedingt beeinflussbar. Sie werden durch die Implementierung des verwendeten Toolkits *Xbim* realisiert. Durch die direkte Erstellung der IFC-Datei in *Xbim* ohne grafische Oberfläche ist die Verwendung von MVDs nur eingeschränkt relevant. Da der Fokus dieser Arbeit nur auf dem Export liegt, können die Qualitätskriterien der Kategorie 4) nicht vollständig betrachtet werden.

Semantische Tests

Unter den vier beschriebenen Kategorien nehmen die semantischen Tests im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Stellung ein. Durch die Wahl der Programmierumgebung (*Xbim*) sind sie die einzigen Kriterien, die direkt von den Nutzenden beeinflusst werden. Aus diesem Grund werden sie im Weiteren genauer beschrieben und als Grundlage der Kriterien an das in Kapitel 4 erstellte Modell angelegt. Für die gegebene Zielsetzung lassen sich die Anforderungen für diese Arbeit auf die folgenden Punkte reduzieren (in Klammern ist jeweils die Nummerierung der ursprünglichen Anforderung aus Solihin et al., 2015, Anhang A angegeben):

1. Topologische Eigenschaften (II.A.1)
 - 1.1. Alle Komponenten im System sollen miteinander verbunden sein (II.A.1.1)
 - 1.2. Bei Wänden sollen die Verbindungen konsistent nach Verbindungsarten des IFC-Schemas ausgeführt sein (II.A.1.5)
2. Topologische Verbindungen (II.B.1)
 - 2.1. Jedes Objekt soll in einem Container sein (II.B.1.1)
 - 2.2. Die Grenzen von `IfcSpace` müssen vollständig und „wasserdicht“ sein (II.B.1.2)
3. Wohlgeformtheit (II.C.1)
 - 3.1. Sicherstellung der korrekten `IfcLocalPlacement` für Fenster und Türen (II.C.1.2)
4. Vollständigkeit des Modells (II.D.1)
 - 4.1. Vorhandensein von generellen, essenziellen Informationen (II.D.1.1)
 - 4.2. Keine geometrischen Überlappungen (abgesehen von wohldefinierten Fällen) (II.D.1.2)
 - 4.3. `IfcTypeObject`, `IfcPropertySet` und `IfcMaterialLayer` sollen nicht mehrfach vorkommen (II.D.1.3)
 - 4.4. Konsistenz zwischen parametrischen und geometrischen Informationen (II.D.1.4)
 - 4.5. Jede Fläche auf `IfcSlab` innerhalb der Außenwände muss entweder von Konstruktionen, Schächten oder Spaces bedeckt sein (II.D.1.5)
 - 4.6. Funktionsweise von Fenstern und Türen muss definiert sein (II.D.1.6)

5. Räumliche Integrität (II.E.1)

- 5.1. Es dürfen keine Objekte existieren, die frei im Raum schweben ohne Verbindung zu anderen Elementen (II.E.1.1)
- 5.2. Öffnungen in Elementen müssen sich räumlich innerhalb der jeweiligen Elemente befinden (II.E.1.2)
- 5.3. Objekte müssen sich in den jeweiligen Containern befinden, in denen sie räumlich positioniert sind (II.E.1.3)

Über diese in der Literatur beschriebenen Kriterien hinaus wurden weitere, praktisch orientierte Anforderungen an das Modell definiert:

6. Manuelle Lesbarkeit

- 6.1. Redundante Zeilen sollen vermieden werden

7. Darstellbarkeit

- 7.1. Das Modell soll in den gängigen BIM-Viewern darstellbar sein

2.6 Erstellung von IFC-Dateien

IFC-Dateien werden derzeit überwiegend durch den Export aus kommerzieller BIM-Software erstellt. Die Qualität der Modelle hängt dabei folglich maßgeblich von den entsprechenden Exportfunktionen ab. Diese können aktuell jedoch keine ausreichende Qualität gewährleisten. Ein Beispiel hierfür ist, dass in aus *Autodesk Revit* exportierten IFC-Dateien `IfcPropertySet` mit selbem Namen mehrfach vorkommen und widersprüchliche Informationen enthalten können.

Zudem können Informationen durch den Export verloren gehen. So sind `IfcRelPathElements`-Instanzen essenziell für die Betrachtung von benachbarten Elementen, sie werden jedoch in der Regel nicht aus kommerzieller BIM-Software exportiert.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit der seltener verwendete Ansatz einer direkten Erstellung von IFC-Dateien gewählt. Hierfür werden die benötigten Instanzen des IFC mithilfe des Toolkits *Xbim* erstellt.

3 Holzbau

Die Herausforderungen, die in den kommenden Jahren auf das Bauwesen zukommen, sind vielfältig. Eine zentrale Rolle bei deren Begegnung wird dem Holzbau beigemessen. Im Vergleich zu den Alternativen gilt die auf dem nachwachsenden Rohstoff Holz basierende Bauweise als ressourcenschonender und nachhaltiger (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 7). Das Projekt THG-Holzbau (Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden) konnte beispielsweise zeigen, dass bei einer Steigerung der Holzbauquote eine erhöhte Kohlenstoffspeicherung, sowie durch die Substitution von mineralischen Materialien eine Reduktion der Treibhausgas-Emissionen möglich ist (Hafner et al., 2017, S. 9). In der Anwendung zeichnet sich Holz durch sein geringes Gewicht, seine effiziente Transportfähigkeit, sowie gute Verarbeitbarkeit aus (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 7). Der hohe Vorfertigungsgrad erlaubt zudem einen schnellen und störungsarmen Bauablauf. Unter anderem deshalb kann Holz als Konstruktionsmaterial im Städtebau gut bei Umbau- und Nachverdichtungsmaßnahmen eingesetzt werden (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 7).

3.1 Bauweisen

Über die Jahrhunderte haben sich im Holzbau verschiedene Bauweisen entwickelt. Die wichtigsten Bauweisen lauten wie folgt (Steiger, 2013, S. 31; Winter, 2018):

- Blockbauweise
- Fachwerkbauweise
- Massivholzbauweise
- Holz-Skelettbauweise
- Holzrahmen-/Holztafelbau

Bei der Blockbauweise werden Baumstämme als Rundholz oder Kantholz aufeinander gestapelt und ergeben damit Wand und Tragwerk zugleich. Sie zeichnet sich durch einen hohen Holzverbrauch und in der Grundform mangelnder Luftdichtigkeit und Wärmedämmung aus. Heute wird sie nur noch selten angewendet. (Winter, 2018)

Ähnliches gilt für die Fachwerkbauweise. In dieser werden keine flächigen Bauteile, sondern ein Pfosten-Riegelsystem eingesetzt. Dadurch entsteht ein hoher Fugenanteil und in der ursprünglichen Form eine schlechte Wärmedämmung. (Winter, 2018)

In der Massivholzbauweise bilden flächig geklebte, gedübelte oder geschraubte Bauprodukte das Tragwerk. Üblicherweise wird Brettstapelholz (BST), Brettsperrholz (BSP) oder Brettschichtholz (BSH) verwendet. Die Bauteile sind als Tafeln ausgeführt (siehe Abbildung 3-1). Diese flächige Bauweise erlaubt einen hohen Vorfertigungsgrad mit aussteifend wirkenden Elementen. Es muss jedoch ein ausreichender Witterungsschutz der massiven Konstruktion gewährleistet sein. (Winter, 2018)

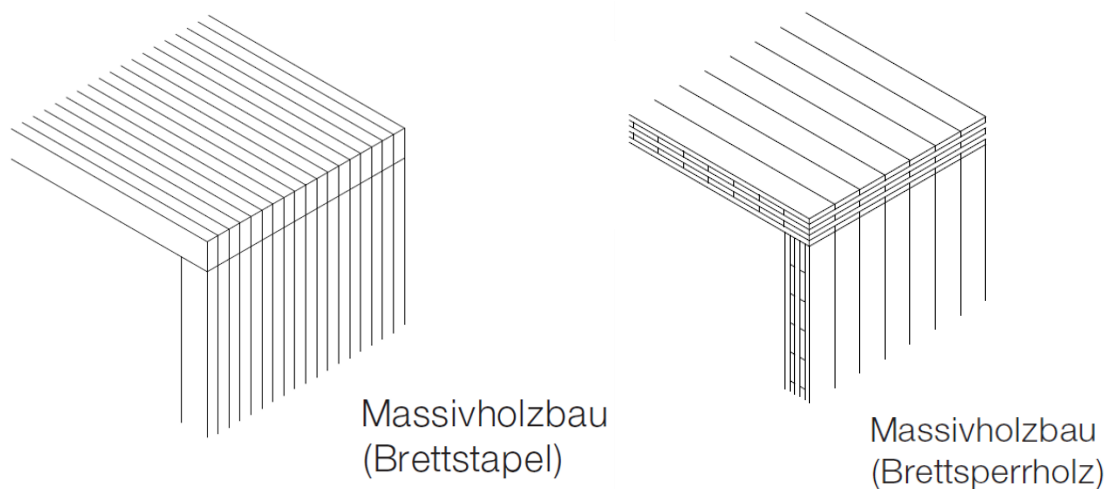


Abbildung 3-1: Massivholzbaukonstruktionen (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 40)

Der Holz-Skelettbau zeichnet sich durch große mögliche Spannweiten und damit eine freie Raumaufteilung aus. Das Primärtragwerk besteht aus Trägern und Stützen, das durch Balken und Sparrenlagen ergänzt wird. Die Wände sind dabei weitestgehend unabhängig vom Tragwerk. Mit dieser Bauweise sind jedoch viele Fugen und Durchdringungen verbunden. In der Praxis ist der Holz-Skelettbau eher selten. (Steiger, 2013, S. 44; Winter, 2018)

Die häufigste Bauweise ist der Holzrahmen- bzw. Holztafelbau. Die Konstruktion besteht aus einem tragenden Rahmen aus Konstruktionsvollholz (KVH) und einer aussteifenden Beplankung (i.d.R. Holzwerkstoffe) (siehe Abbildung 3-2). Die Bauweise vereint viele Vorteile: Ein hoher Vorfertigungsgrad und somit eine hohe Qualitätssicherung, ein guter Wärmeschutz, ein geringer Fugenanteil, und eine kurze Bauzeit. (Winter, 2018)

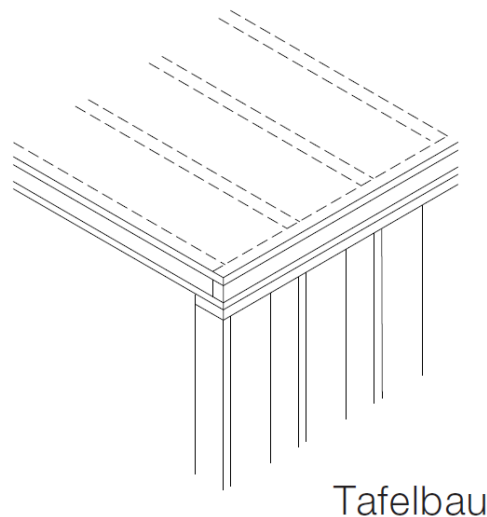


Abbildung 3-2: Holztafelbaukonstruktion (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 40)

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die beiden häufigsten Bauweisen Massivholzbau und Holzrahmenbau weiter betrachtet. Im Weiteren werden die für den Schallschutz maßgebenden Bauteile Außenwände, Innenwände, Gebäudetrennwände, Wohnungstrennwände und Trenndecken detaillierter beschrieben.

3.1.1 Wände

In der Vertikalen bilden Wände die raumabschließenden Elemente eines Gebäudes. Unterschieden werden können Außenwände, Innenwände, Gebäudetrennwände und Wohnungstrennwände. Diese müssen dem Einsatzort entsprechende statische und bauphysikalische Anforderungen erfüllen. Als Tragkonstruktion sind die beiden oben genannten Bauweisen aus Massivholz (z.B. eine Brettstapelwand aus verdübelten KVH-Brettern oder eine Brettsperrholzwand mit einem Kern aus BSP) und als Tafelbau (z.B. Tafelbauwand mit Ständerwerk aus KVH oder BSP und Beplankung zur Aussteifung) möglich. Beispiele sind in Abbildung 3-3 dargestellt. (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 51–54)

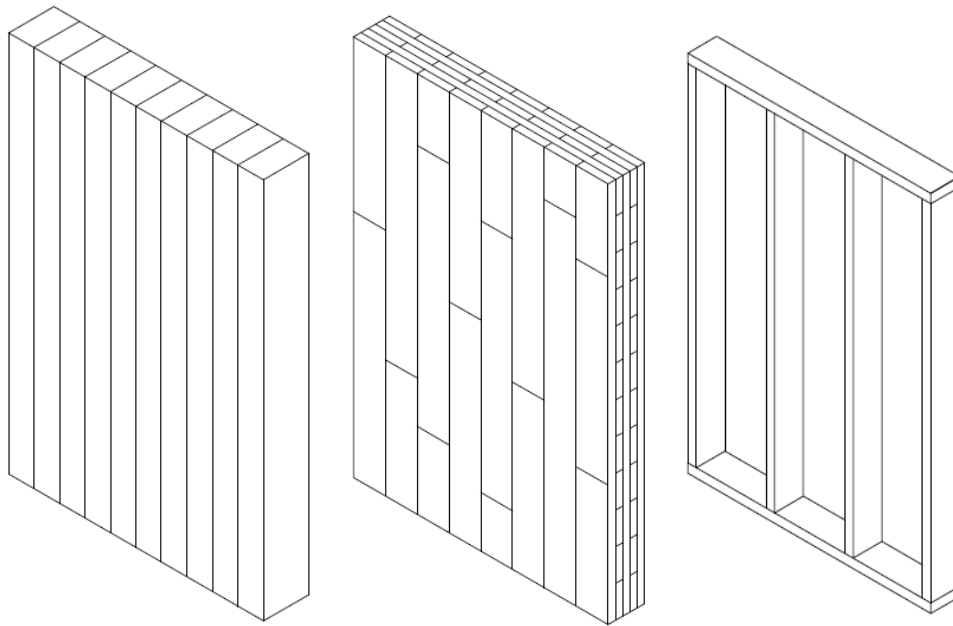


Abbildung 3-3: Brettstapelwand aus verdübelten KVH-Brettern (Links), Brettsperrholzwand mit Kern aus BSP (Mitte), Tafelbauwand mit Ständerwerk aus KVH oder BSH und aussteifender Beplankung (Rechts) (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 51–54)

Außenwände

Als Gebäudehülle erfüllen Außenwände verschiedene Funktionen. Dazu gehört unter anderem der Schutz vor Witterung, Temperatureinflüssen, Lärm und Wärmeverlust sowie die Bereitstellung von Licht und einer Interaktion mit der Außenwelt. Außerdem sind sie in der Regel die hauptsächliche Tragstütze der Gebäudestruktur und häufig auch Ort der Installationsführung. Dementsprechend kann der Aufbau je nach Umgebungsbedingungen stark variieren.

Die Fassade kann als Kompaktfassade oder als hinterlüftete Fassade mit Bekleidung und Unterkonstruktion ausgeführt sein. Darunter liegt die Beplankung, die üblicherweise aus einer oder mehreren Platten besteht. In der Regel folgt eine Schicht weiter innen die Tragstruktur, die aus einem Massivelement oder Ständerwerk und Dämmung bestehen kann. Raumseitig sind mehrere Optionen möglich. Bei einer Massivkonstruktion ist eine zusätzliche Beplankung oder Bekleidung optional. Im Tafelbau folgt üblicherweise eine Beplankung und fakultativ eine Bekleidung auf einer steif befestigten oder mittels Direktabhängiger befestigte Unterkonstruktion. In der Unterkonstruktion kann eine Installationsebene verlaufen und/oder der Innenraum kann gedämmt sein.

Trennwände

Trennwände dienen üblicherweise der funktionalen Trennung unterschiedlicher Nutzungseinheiten. Die Dimensionierung von Gebäudetrennwänden wird vor allem durch die Statik und den Brandschutz bestimmt (Blödt et al., 2019, S. 32). Für eine Verminderung der Schallübertragung zwischen den Wohneinheiten, können konstruktive Maßnahmen getroffen werden. So kommen neben einschaligen häufig auch zweischalige Konstruktionen zum Einsatz, welche zu einem höheren Schalldämm-Maß führen. Die Beplankung kann einseitig oder beidseitig angebracht werden, bestimmt auch durch die Brandschutzanforderung. Ständerkonstruktionen sind in der Regel gedämmt. Wandbekleidungen in unterschiedlichen Ausführungen sind nur bei einschaligen Konstruktionen üblich.

Innenwände

Innenwände haben häufig keine tragende Funktion und werden in der Regel nur als Raumteiler und Schallschutz innerhalb einer Nutzeinheit eingesetzt. Somit sind ihre Anforderungen geringer, womit auch eine einfache Ausführung möglich ist. In Massivbauweise kann eine Innenwand nur aus dem Tragelement bestehen, eine Tafelbauwand braucht darüber hinaus noch eine beidseitige Beplankung.

3.1.2 Trenndecken

Der übliche Deckenaufbau im Holzbau besteht von oben beginnend aus den folgenden Schichten: ein schwimmender Estrichaufbau (Estrich auf Trittschalldämmplatten), gegebenenfalls eine Rohdeckenbeschwerung oder eine Betonverbundschicht, die Tragkonstruktion (gegebenenfalls mit Füllung im Hohlraum) und optional eine Unterdecke (starr oder entkoppelt montiert). Verschiedene Aufbauten sind in Abbildung 3-4 dargestellt. (Blödt et al., 2019, S. 35)

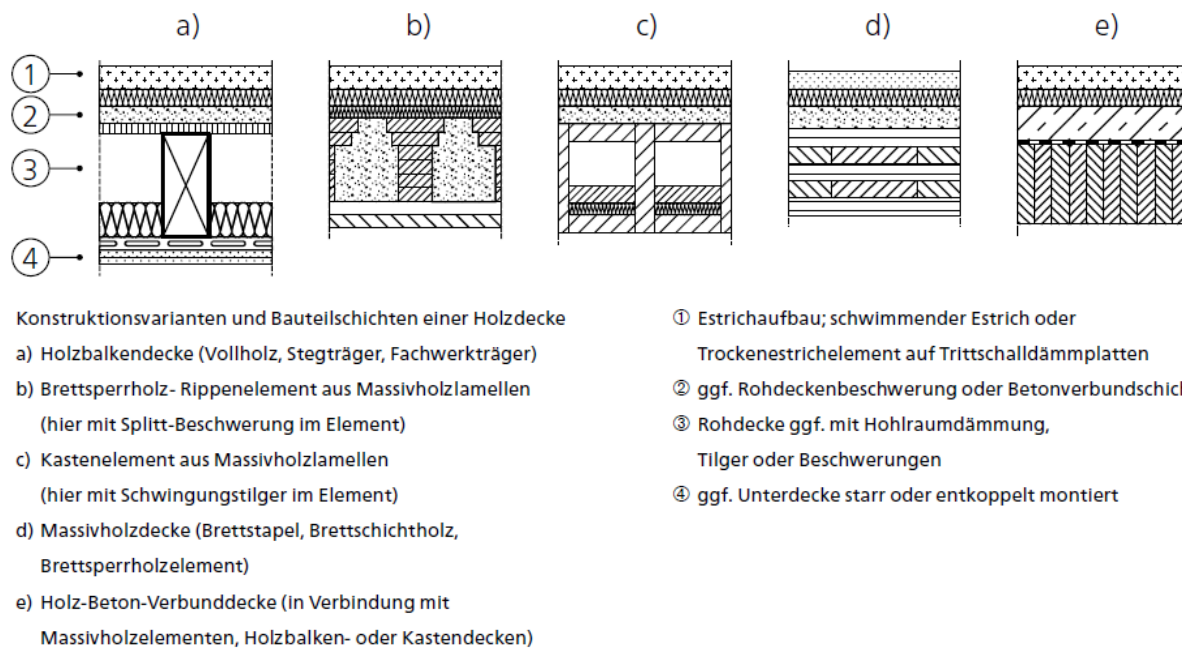


Abbildung 3-4: Verschiedene Aufbauten einer Holzdecke (Blödt et al., 2019, S. 35)

Die Tragkonstruktion kann sowohl massiv (flächiges Vollholzelement (BST, BSH, BSP) oder Rippen- bzw. Kastenelement), als auch in Holzrahmenbauweise (Holzbalkendecke) ausgeführt sein. Bei letzterer ergeben sich unterschiedliche Varianten in Abhängigkeit des Füllmaterials, welches in die Hohlräume der Balken eingebracht wird: Klassischerweise eine komplette Füllung mit Dämmstoff. Bei Sichtbalken kann der Zwischenraum jedoch auch leer gelassen werden. Eine Hohlkastendecke ist eine Weiterentwicklung der Balkendecke für mittlere und große Spannweiten. Der Hohlraum wird in der Regel mit Dämmung, Beschwerung, oder einem Schwingungstilger gefüllt. (Blödt et al., 2019, S. 35; Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 60)

Neben einer reinen Holzdecke, werden auch Holzbetonverbund-Decken eingesetzt. Dabei wird die hohe Zugfestigkeit des Holzes mit der hohen Druckfestigkeit des Betons kombiniert. Der Deckenaufbau besteht aus einer Betonschicht über der tragenden Holzkonstruktion, welche in jeder der oben genannten Bauweisen ausgeführt sein kann. (Blödt et al., 2019, S. 35)

3.2 Holzbau und BIM

Die Voraussetzungen für die Anwendung von BIM im Holzbau sind gut. Zum einen liegt dies am hohen Vorfertigungsgrad der Bauteile: Für deren maschinelle Fertigung werden schon seit vielen Jahren 3D-Modelle erstellt. Außerdem sind Prozesse im Holzbau und bei BIM ähnlich strukturiert. So koordiniert die Holzbauplanung in der Regel auch die angrenzenden Gewerke mit. Diese enge Abstimmung ist auch bei BIM erforderlich und wird in der Regel mittels eines BIM-Koordinierenden umgesetzt. Auch müssen sowohl in BIM als auch im vorfertigenden Holzbau aufgrund der jeweilig nötigen Prozesse Entscheidungen in frühen Planungsphasen gefällt werden. (Allplan, 2020; Kaufmann et al., 2019; Maier, 2019)

In der Praxis zeigt sich jedoch noch Handlungsbedarf. Während die Vorfertigung weitestgehend automatisiert und digitalisiert ist, ist der Planungsablauf noch nicht mit eingebunden. Zudem wird eine gewerkeübergreifende Verwendung von BIM derzeit kaum praktiziert. Probleme bei der Verwendung von BIM im Holzbau betreffen insbesondere den komplexen Aufbau der Bauteile. In kommerzieller BIM-Software ist ein detaillierter Schichtaufbau von Holzbauteilen nur schwer umsetzbar. Daher wird er häufig nicht mitmodelliert. Dies erschwert die Übergabe des Modells an die Fertigung (C. Châteauvieux-Hellwig, Persönliche Mitteilung, 2021). Bei spezialisierten Anwendungen können neben der Detailmodellierung auch die Darstellung von Verbindungen zwischen Bauteilen Grenzen aufzeigen. Sie werden bei der Modellierung, insbesondere auch im IFC-Schema, nur begrenzt dargestellt.

Eine Befragung unter Beteiligten in der Holzbaubranche ergab, dass nur eine knappe Hälfte der Befragten BIM nutzten. Hemmnisse betreffen die softwareübergreifende Verwendung von Modellen, sowie den Aufwand der Erstellung. (Allplan, 2020; Kaufmann et al., 2019)

Eine Verwendung von BIM könnte den Planungsprozess optimieren. Derzeit wird die Holzbaukompetenz erst spät in den Prozess eingebunden, auch wegen Vorschriften aus der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI). Dies kann dazu führen, dass nötige Anpassungen den Bauablauf verzögern und sich die Kosten erhöhen (Kaufmann, Huß et al., 2017). Durch die Verwendung von BIM-Modellen und konsistenter Datenverwaltung könnten somit Probleme vermieden und ein Wandel zu optimierten Prozessen ermöglicht werden. (Bruderverlag GmbH & Co. KG, 2021)

4 Erstellen eines IFC-Modells für den Holzbau

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, bietet sich die Verwendung von BIM im Holzbau besonders an. Um den Datenaustausch zwischen Disziplinen möglichst reibungslos zu ermöglichen, eröffnet das IFC-Datenformat viele Möglichkeiten. Jedoch zeigt sich, dass die fehlerfreie Implementierung des Formats für BIM-Softwarehersteller anspruchsvoll und dadurch nur begrenzt einsetzbar ist (Borrmann et al., 2015, S. 9). Darüber hinaus stellt auch die Zertifizierung derzeit nicht die nötige Mindestqualität sicher (Solihin et al., 2015, S. 739). Hinzu kommt, dass Holzbauteile in der Regel aus mehreren Schichten bestehen, die in BIM-Modellen der Einfachheit halber oft nicht mitmodelliert werden (C. Châteaueux-Hellwig, Persönliche Mitteilung, 2021).

Für viele Anwendungen von IFC-Dateien, beispielsweise das Automated Code Compliance Checking, ist es jedoch notwendig, ein detailliertes und qualitativ hochwertiges Modell zu haben. Im Folgenden wird das Erstellen eines solchen beispielhaften Gebäudemodells mithilfe des Toolkits *Xbim* beschrieben. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse, sowie das Modell selbst werden in Kapitel 7 verwendet, um darüber hinaus die Möglichkeiten des Automated Code Compliance Checkings für den Schallschutz im Holzbau zu analysieren.

4.1 Methodik

Die Grundlage der Programmierung bietet das Open Source Toolkit *Xbim.Essentials* (Lockley et al., 2017). Die zur Verfügung gestellten Libraries in der Programmiersprache *C#* ermöglichen das Auslesen, die Transformation und Validierung von Daten für IFC-Modelle. Dabei wird das komplette Objektmodell des IFC-Schemas implementiert. Zur Hilfestellung sind auch einige Beispiele dokumentiert. Als Ausgangspunkt für diese Arbeit diente das Beispiel „Proper Wall in 3D“ (xbim Ltd., 2021). Als Programmierumgebung wurde Visual Studio gewählt.

Die Informationen zum IFC4-Format stammen aus der offiziellen Dokumentation von *buildingSMART* (buildingSMART, 2020). Hier ist jede Klasse mit den benötigten Attributen, sowie weiteren Informationen und Beispielen beschrieben.

Eine weitere Grundlage bildet die Datenplattform *LignumData* der Holzwirtschaft Schweiz (Lignumdata, 2019). Diese beinhaltet verschiedene Bauteile und deren Baumaterialien, die im Holzbau Anwendung finden. Dabei werden auch IFC-Dateien dieser Bauteile bereitgestellt. Da von offizieller Seite nur wenige Informationen existieren, wie eine gute Implementierung der Entitäten und insbesondere ihrer Beziehungen aussieht, bildeten die hier zur Verfügung gestellten Modelle eine Grundlage für mögliche Implementierungen. Dafür wurden die Dateien analysiert und daran angelehnte Bauteile mithilfe von *Xbim* modelliert.

Im Weiteren ist eine Abfolge der groben Schritte aufgeführt, die nötig sind, um das IFC-Modell wie in den Anforderungen beschrieben zu erstellen. Die Ergebnisse der Schritte mit Beispielen folgen im Anschluss.

- 1) Erstellen eines `IfcStore` (hier genannt „model“): Das `IfcStore` wird mit den Credentials, einem `IfcProject` und den Einheiten des Modells initialisiert. Im Verlauf werden dem `IfcStore` alle Instanzen zugefügt.
- 2) Erstellen der Basiselemente des `IfcProject`: Dem Projekt wird ein `IfcSite`, und in diesem wiederum ein `IfcBuilding` zugefügt.
- 3) Vordefinierte `IfcBuildingElementType` werden dem `model` zugefügt: Ein `IfcSlabType` für jeweils Bodenplatte, Decken und Dach; `IfcWallType` für je Ständeraußenwände, Massivaußenwände und Massivinnenwände; `IfcDoorType` für Türen; `IfcWindowType` für Fenster.
- 4) Standardkoordinaten werden definiert: Bei der Erstellung von geometrischen Instanzen werden häufig der Ursprung sowie die üblichen Achsen des Standard-Koordinatensystems benötigt. Um diese nicht wiederholt anlegen zu müssen, werden zu Beginn diese Standardkoordinaten definiert und im Verlauf häufig wiederverwendet. So lassen sich redundante Zeilen in der IFC-Datei reduzieren.
- 5) Festlegen geometrischer Parameter: Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Beispielgebäude mit L-förmigem Grundriss und fest vordefinierten Wandtypen erstellt.

- 6) Erstellen der Stockwerke: Dies erfolgt in jedem Stockwerk auf ähnliche Weise. Zunächst wird ein `IfcBuildingStorey` erstellt. Dann wird entweder die Bodenplatte oder eine Decke modelliert. Anschließend werden die Außenwände je nach Angabe als Ständer- oder Massivholzkonstruktion, und die Innenwände ebenfalls als Massivholzkonstruktion zugefügt. Alle genannten Instanzen erhalten über `IfcPropertySet` ihre schalltechnischen Eigenschaften zugewiesen. Bei Wänden ist zudem das standardisierte `IfcPropertySet` „Pset_Wall-Common“ mit Information zu „IsExternal“ und „LoadBearing“ hinterlegt. Die Wände werden mit den jeweilig angrenzenden Wänden und Bodenplatten/Decken über die Beziehung `IfcRelConnectsPathElements` verbunden. Anschließend werden die Fenster und Türen an vordefinierten Stellen eingefügt. Zuletzt werden `IfcSpace` an den entsprechenden Stellen und mit den benötigten Verbindungen zu angrenzenden Bauteilen (über `IfcRelSpaceBoundary`) erstellt und dem `model` zugefügt. Das oberste Stockwerk erhält anschließend noch das Dach.
- 7) Exportieren des `model`: Im letzten Schritt wird das `model` mit all seinen enthaltenen Instanzen als IFC-Datei gespeichert.

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse umfassen sowohl den entstandenen Code zur Generierung des Gebäudemodells, sowie das Modell selbst. Dabei wird auch die Qualität des Modells berücksichtigt und identifizierte Probleme benannt.

4.2.1 Programmierung

Der Code ist in zwei Teile gegliedert. Allgemeine Funktionen wie das Erstellen einer `IfcPlate` mit bestimmtem Input sind in der externen Dynamic Link Library (DLL) „XbimBuildingComponentLibrary“ ausgegliedert. Dies ermöglicht ein Verwenden der Funktionen auch in anderen Projekten. Modellspezifische Funktionen sind im Projekt „IfcWoodBuilding“ implementiert. Beide Projekte inkludieren das Package „Xbim.Essentials“, welches die *Xbim*-Implementierung bzw. die Klassen aus dem IFC-Schema enthält. Darauf basierend enthalten die Projekte wenige eigene Klassen. Stattdessen bestehen sie vor allem aus Funktionen, die die Klassen aus dem IFC-Schema entsprechend bestimmter Eingabeparameter erstellen. Eine Übersicht über alle Funktionen findet sich in Anhang A.

In Abbildung 4-1 ist ein Auszug der IFC-Struktur dargestellt, die aus den in Abschnitt 4.1 genannten Schritten resultiert. Dabei stehen Entitäten von `IfcObjectDefinitions` in Boxen und Entitäten von `IfcRelationship` sind als Linien mit der entsprechenden Beschriftung abgebildet. Attribute und Property Sets sind der Lesbarkeit halber nicht abgebildet. Aus demselben Grund ist stellvertretend nur ein `IfcBuildingElement` und `IfcBuildingElementType` vorhanden. Jedes der oben genannten Elemente wie Wände oder Decken sind auf diese Art in der IFC-Datei vertreten. Wie diese genauer aufgebaut sind, ist am Beispiel einer Ständerwand in Abbildung 4-2 dargestellt. Gestrichelte Linien stellen eine Attribut-Beziehung dar. Dabei sind nur für das Verständnis relevante Attribute aufgeführt.

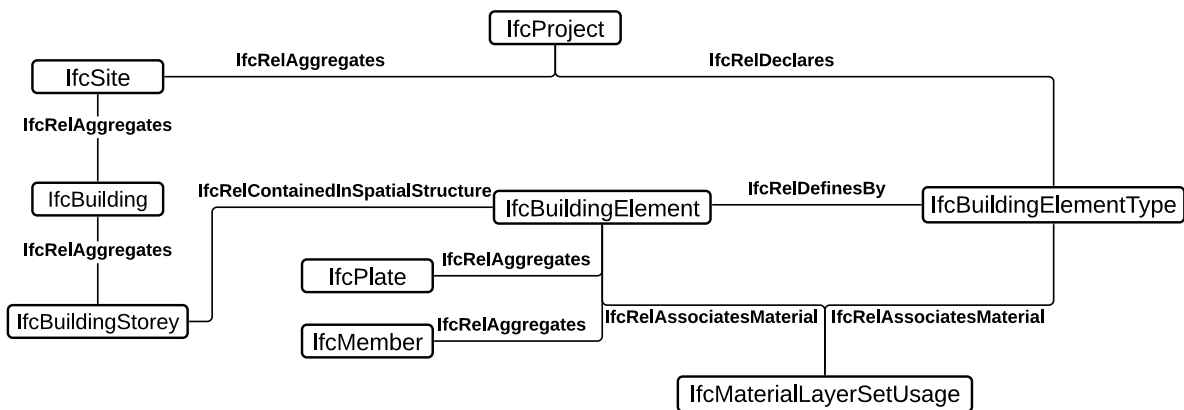


Abbildung 4-1: Übersicht über Modellierung des IFC-Schemas

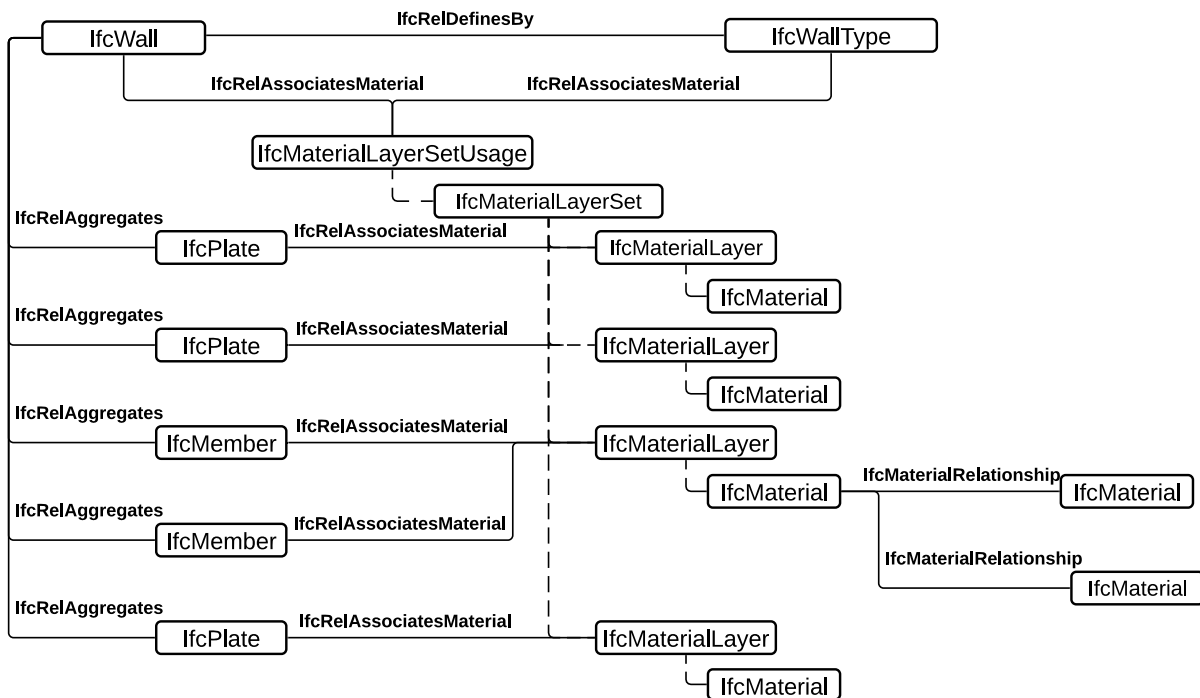


Abbildung 4-2: Modellierung des IFC-Schemas für eine Holzständerwand

Geometrische Informationen sind überwiegend auf der Ebene der *IfcPlate* bzw. *IfcMember* hinterlegt. In Abbildung 4-3 ist der logische Aufbau einer *IfcPlate* und in Abbildung 4-4 eines *IfcMember* mit Modellierung als „Swept solid“ abgebildet. Auch hier sind Attribute mittels einer gestrichelten Linie mit der Entität verbunden. Genauere Informationen zu den Attributen enthält die Dokumentation von *buildingSMART* (*buildingSMART*, 2020). In Abbildung 4-4 hört die Darstellung auf Ebene der *IfcExtrudedAreaSolid* aus Platzgründen auf, wäre aber im weiteren Verlauf vergleichbar mit der Darstellung aus Abbildung 4-3.

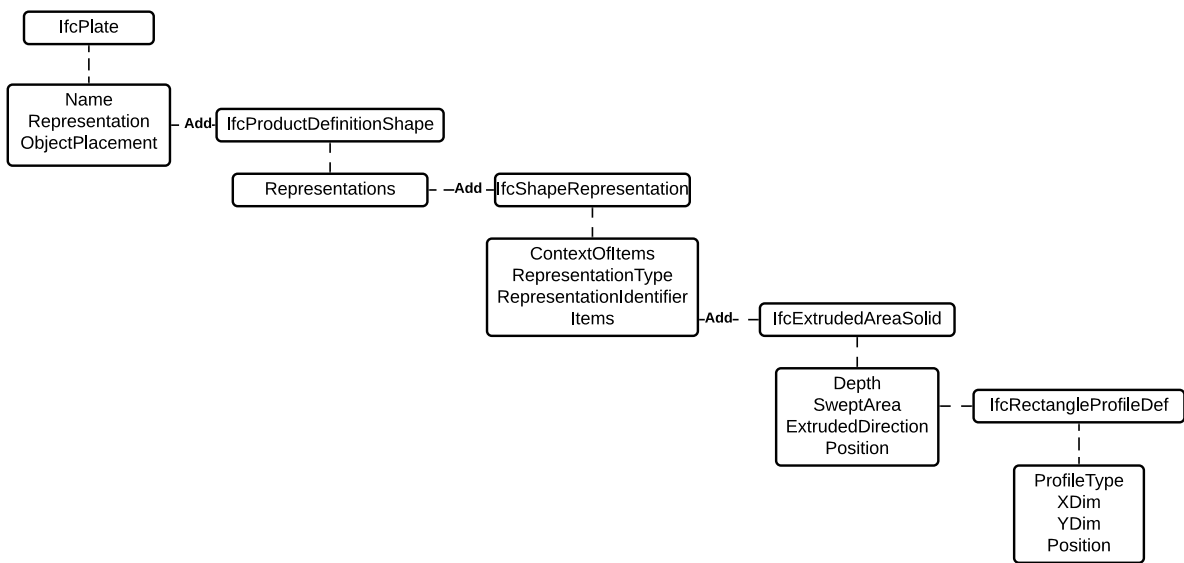


Abbildung 4-3: Modellierung des IFC-Schemas für *IfcPlate*

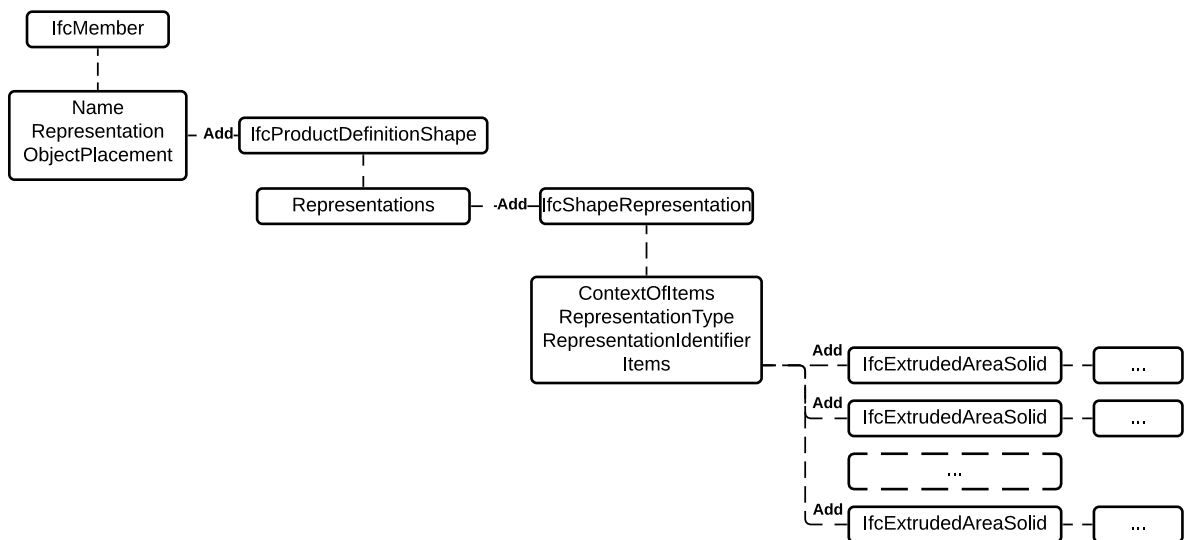


Abbildung 4-4: Modellierung des IFC-Schemas für *IfcMember*

Im Weiteren soll beispielhaft die Implementierung in C# gezeigt werden. Dafür wird die Funktion „GenerateFrameMember“ erläutert. Sie erstellt ein `IfcMember` für ein Holzständerwerk mit vordefiniertem Abstand zwischen den Ständern. Die Funktion gibt ein `IfcMember` zurück und benötigt folgende Inputs:

Tabelle 4-1: Inputparameter der Funktion `GenerateFrameMember`

Inputparameter	Datentyp	Beschreibung
<code>model</code>	<code>IfcStore</code>	Enthält das Modell
<code>standard-Coordinates</code>	<code>StandardCoordinates</code> (eigene Klasse)	Ursprung, X-Achse, Y-Achse, Z-Achse, negative X-Achse etc.
<code>name</code>	<code>String</code>	Name des <code>IfcMember</code>
<code>desired-Distance</code>	<code>Double</code>	Gewünschter Abstand zwischen den einzelnen Ständern (i. d. R. 625 mm)
<code>positioning-Point</code>	<code>IfcCartesianPoint</code>	Positionierungspunkt des Ständerwerks
<code>lengthTot</code>	<code>Double</code>	Länge des Ständerwerks
<code>lengthRect</code>	<code>Double</code>	Länge des Durchschnitts eines Ständers
<code>widthRect</code>	<code>Double</code>	Breite des Durchschnitts eines Ständers
<code>height</code>	<code>Double</code>	Höhe des Ständerwerks
<code>lp</code>	<code>IfcLocalPlacement</code>	Positionierung des Ständerwerks

Die verwendeten Funktionen haben folgende Aufgaben:

- Funktion `GenerateRectProfile`: Generiert ein `IfcRectangleProfileDef` (Rechteckprofil) für das gegebene Modell mit den Dimensionen Länge und Breite des Rechtecks

- Funktion `GenerateAx3D`: Generiert ein `IfcAxis2Placement3D` (Platzierung und Orientierung in einem dreidimensionalen Koordinatensystem) innerhalb des gegebenen Modells mit dem übergebenen Punkt und Achsen
- Funktion `GenerateBodyFromRect`: Generiert ein `IfcExtrudedAreaSolid` (extrudierter Körper aus einem zweidimensionalen Profil) aus dem übergebenen `IfcProfileDef` (z.B. `IfcRectangleProfileDef`) innerhalb des gegebenen Modells mittels einer Extrusion entlang der gegebenen Achse und Höhe. Die Positionierung erfolgt mittels der übergebenen `IfcAxis2Placement3D`

Es folgt der Programmcode in C# der Funktion:

```
public static IfcMember GenerateFrameMember(IfcStore model, StandardCoordinates standardCoordinates, string name, double desiredDistance, IfcCartesianPoint positioningPoint, double lengthTot, double lengthRect, double widthRect, double height, IfcLocalPlacement lp)
{
    //Create an IfcMember
    var member = model.Instances.New<IfcMember>();
    member.Name = name;

    //Create a rectangular profile for the stud
    var rectProf = GenerateRectProfile(model, lengthRect, widthRect);

    //Create a Definition shape to hold the geometry
    var shape = model.Instances.New<IfcShapeRepresentation>();
    var modelContext = model.Instances.OfType<IfcGeometricRepresentationContext>().FirstOrDefault();
    shape.ContextOfItems = modelContext;
    shape.RepresentationType = "SweptSolid";
    shape.RepresentationIdentifier = "Body";

    //determine amount n of studs according to the desired positioning and distance
    int n = (int)Math.Floor((double)(lengthTot - lengthRect) / desiredDistance) + 2;

    //determine remainder of distance
    double remainder = lengthTot - lengthRect - (n - 3) * desiredDistance;

    //extrusion height of vertical studs considering two horizontal studs at top and bottom
    double extrusionHeight = height - 2 * lengthRect;
}
```

```
//Generate studs
//horizontal boards
var setPointLowerBoard = model.Instances.New<IfcCartesianPoint>(p =>
p.SetXYZ(positioningPoint.X, positioningPoint.Y, positioningPoint.Z));
var Ax3DLowerBoard = GenerateAx3D(model, setPointLowerBoard, standardCoordinates.XAxis, standardCoordinates.NegZAxis);
var lowerBoardBody = GenerateBodyFromRect(model, standardCoordinates.ZAxis, rectProf, lengthTot, Ax3DLowerBoard);
var setPointUpperBoard = model.Instances.New<IfcCartesianPoint>(p =>
p.SetXYZ(positioningPoint.X, positioningPoint.Y, positioningPoint.Z + height - lengthRect));
var Ax3DUpperBoard = GenerateAx3D(model, setPointUpperBoard, standardCoordinates.XAxis, standardCoordinates.NegZAxis);
var upperBoardBody = GenerateBodyFromRect(model, standardCoordinates.ZAxis, rectProf, lengthTot, Ax3DUpperBoard);
shape.Items.Add(lowerBoardBody);
shape.Items.Add(upperBoardBody);

//first and last stud
var setPointFirst = model.Instances.New<IfcCartesianPoint>(p =>
p.SetXYZ(positioningPoint.X, positioningPoint.Y, positioningPoint.Z));
var Ax3DStudFirst = GenerateAx3D(model, setPointFirst, standardCoordinates.ZAxis, standardCoordinates.XAxis);
var bodyFirst = GenerateBodyFromRect(model, standardCoordinates.ZAxis, rectProf, extrusionHeight, Ax3DStudFirst);
var setPointLast = model.Instances.New<IfcCartesianPoint>(p =>
p.SetXYZ(positioningPoint.X + lengthTot - lengthRect, positioningPoint.Y, positioningPoint.Z));
var Ax3DStudLast = GenerateAx3D(model, setPointLast, standardCoordinates.ZAxis, standardCoordinates.XAxis);
var bodyLast = GenerateBodyFromRect(model, standardCoordinates.ZAxis, rectProf, extrusionHeight, Ax3DStudLast);
shape.Items.Add(bodyFirst);
shape.Items.Add(bodyLast);

//place remaining studs in between (n-2 times)
for (int i = 0; i < n - 2; i++)
{
    var setPoint = model.Instances.New<IfcCartesianPoint>(p =>
p.SetXYZ(positioningPoint.X + remainder / 2 + i * desiredDistance,
positioningPoint.Y, positioningPoint.Z));
    var Ax3DStud = GenerateAx3D(model, setPoint, standardCoordinates.ZAxis, standardCoordinates.XAxis);
    var body = GenerateBodyFromRect(model, standardCoordinates.ZAxis, rectProf, extrusionHeight, Ax3DStud);
    shape.Items.Add(body);
}
}
```

```
//Product Definition shape
var rep = model.Instances.New<IfcProductDefinitionShape>();
rep.Representations.Add(shape);
member.Representation = rep;

//local placement
member.ObjectPlacement = lp;

return member;
}
```

4.2.2 Modell

Das modellierte Gebäude besteht aus 3 Stockwerken. Der L-förmige Grundriss ist in Abbildung 4-5 und der Schnitt A-A in Abbildung 4-6 dargestellt. Die Raumhöhe beträgt 2,5 m. Die Abmessungen des Grundrisses können einfach variiert werden. Abbildung 4-7 zeigt das Gebäude dargestellt in zwei verschiedenen BIM-Softwares.

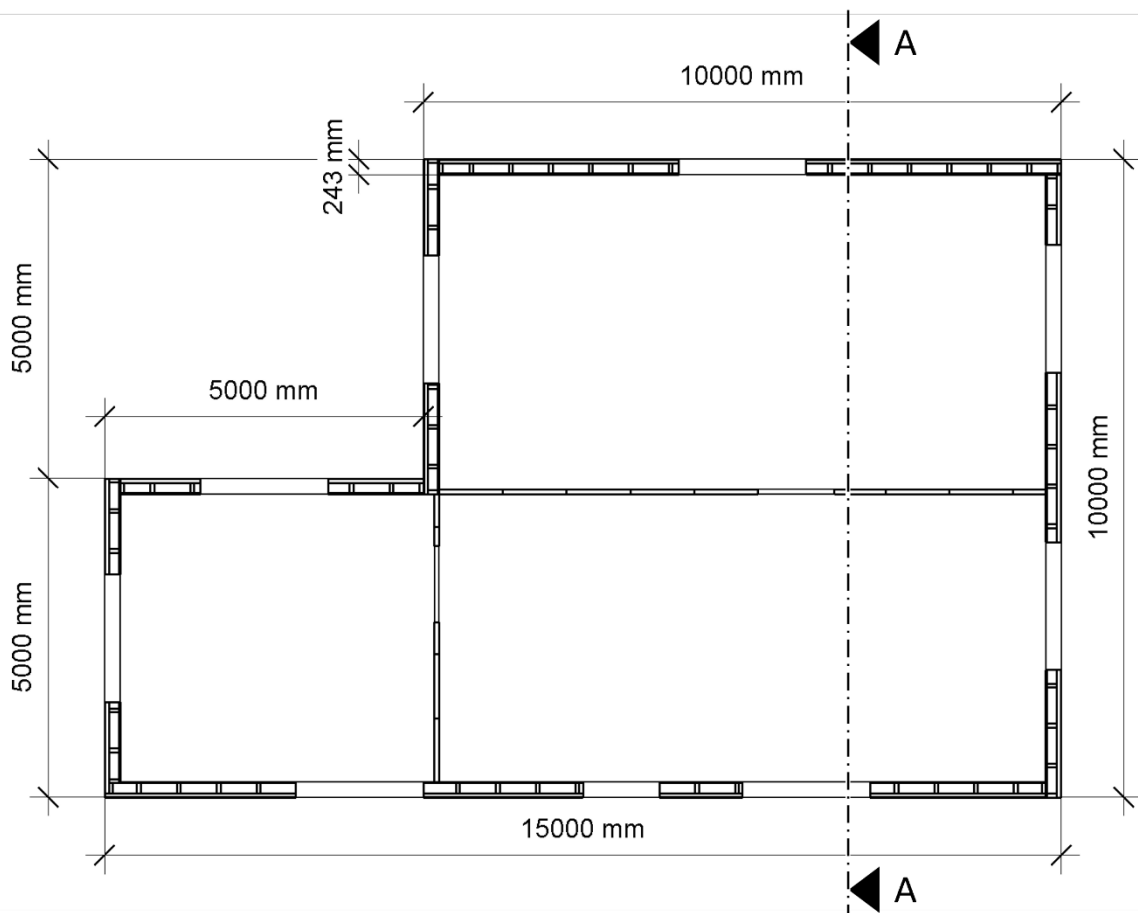


Abbildung 4-5: Grundriss des Beispielgebäudes (Erdgeschoss) in Autodesk Revit

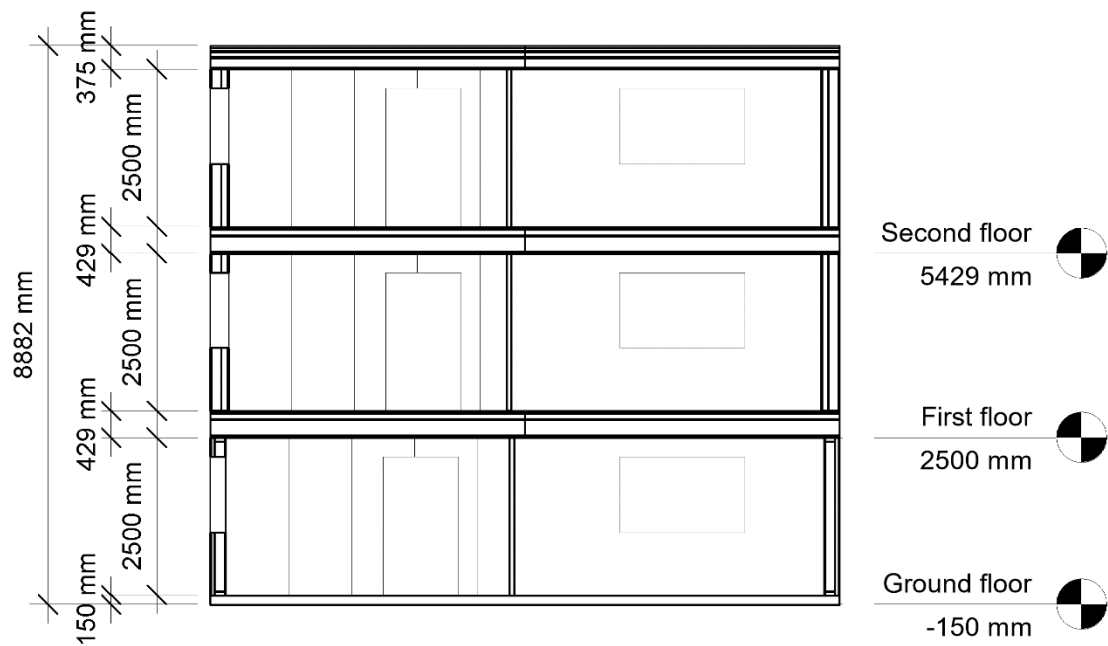


Abbildung 4-6: Schnitt A-A des Beispielgebäudes in *Autodesk Revit*

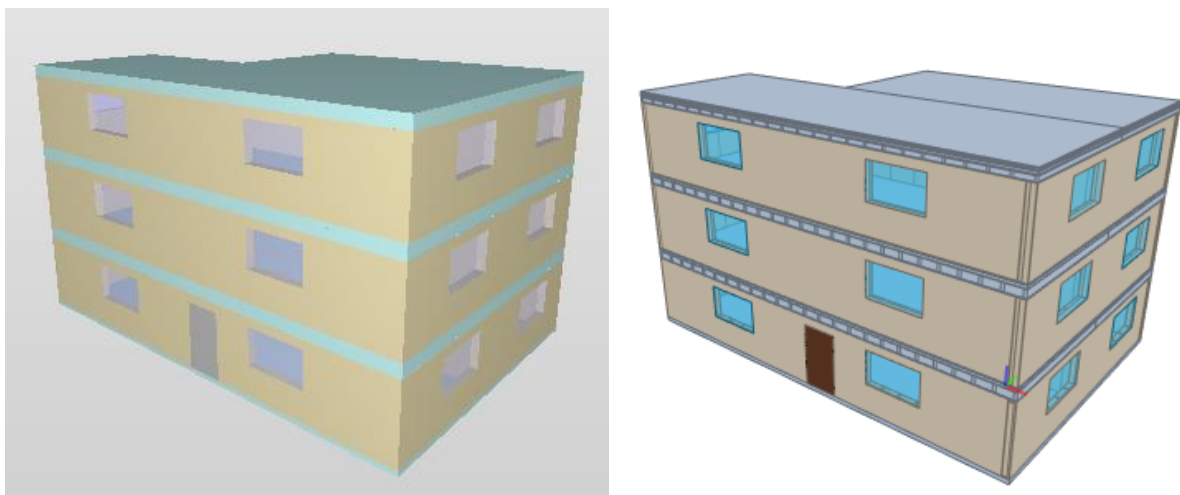


Abbildung 4-7: Beispielgebäude dargestellt in den IFC-darstellenden Programmen *Solibri* (Links) und *BIMvision* (Rechts)

Die Bodenplatte besteht aus dem Material Beton. Die Außenwände im Erdgeschoss sind als Holzständerwände modelliert (siehe Abbildung 4-8), angelehnt an das Bauteil D1187 von *Lignumdata*. Im ersten und zweiten Stock stehen Massivholzwände analog zu Bauteil D0928. Die Geschossdecken sind Holzbalkendecken. Das Dach ist als Flachdach modelliert.

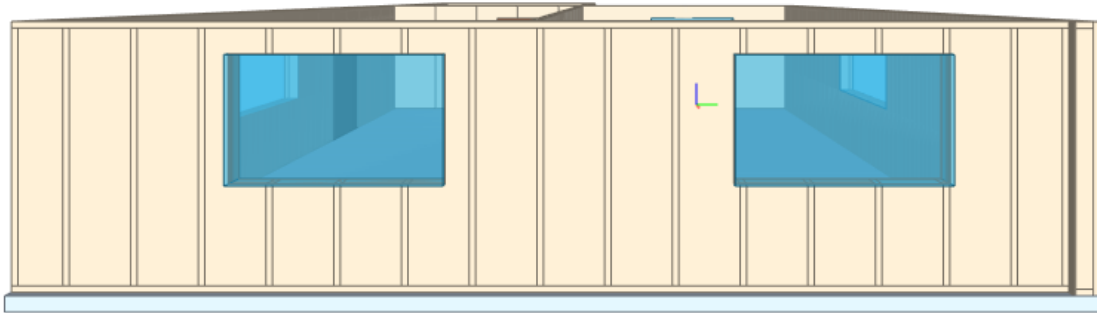


Abbildung 4-8: Holzständerwand im Erdgeschoss des Gebäudes in *BIMvision*

Bei allen Gebäudeecken über dem Ursprung ist die Außenwand detailliert modelliert, bei den anderen wurde eine vereinfachte Darstellung gewählt (siehe Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10).

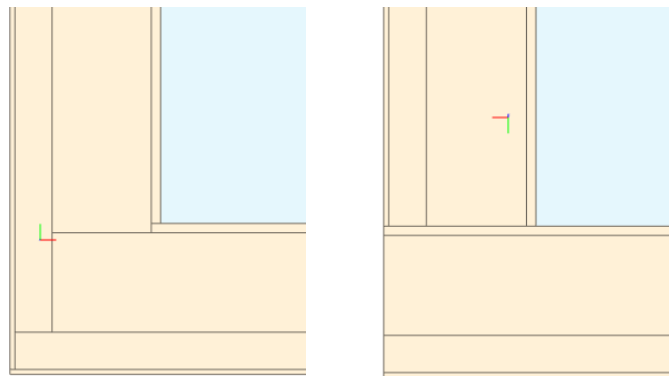


Abbildung 4-9: Detaillierte (Links) und nicht detaillierte (Rechts) Ecke Holzständerwand in *BIMvision*

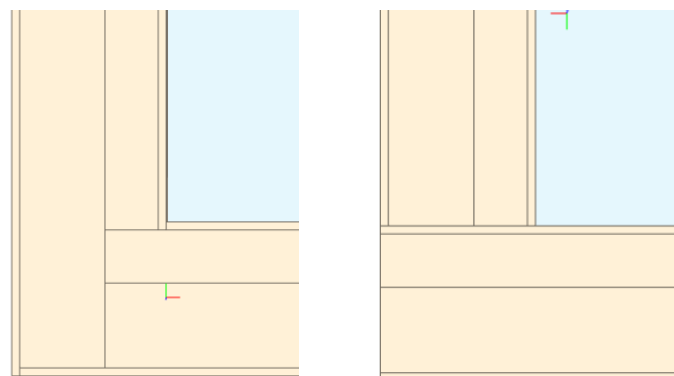


Abbildung 4-10: Detaillierte (Links) und nicht detaillierte (Rechts) Ecke Massivholzwand in *BIMvision*

Abbildung 4-11 zeigt das Erdgeschoss mit den Innenwänden. Diese sind als Massivholzzinnenwände modelliert, basierend auf Bauteil C0464 aus *Lignumdata*.

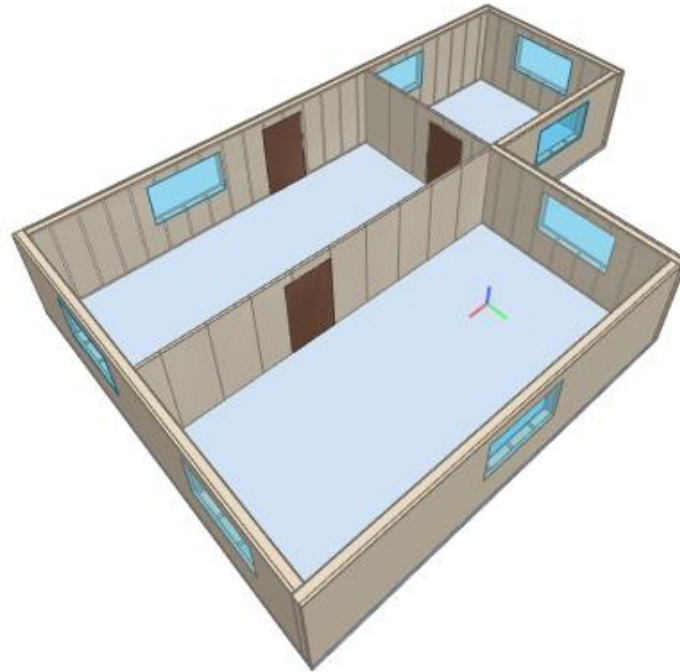


Abbildung 4-11: Überblick über Erdgeschoss des Gebäudes in *BIMvision*

Aufgrund des L-förmigen Grundrisses und des vielschichtigen Deckenaufbaus (besonders der Positionierung der Balken und Lattung), ist die Decke in zwei Teilen modelliert (siehe Abbildung 4-12). Die Teile sind durch die Beziehung `IfcRelAggregates` mit einer weiteren Instanz des Typs `IfcSlab` verbunden. Diese Überinstanz enthält keine eigene Geometrie. Der Aufbau der Decke entspricht Bauteil A2294 aus *Lignumdata*. Das Flachdach wurde angelehnt an das Bauteil F0101 modelliert.

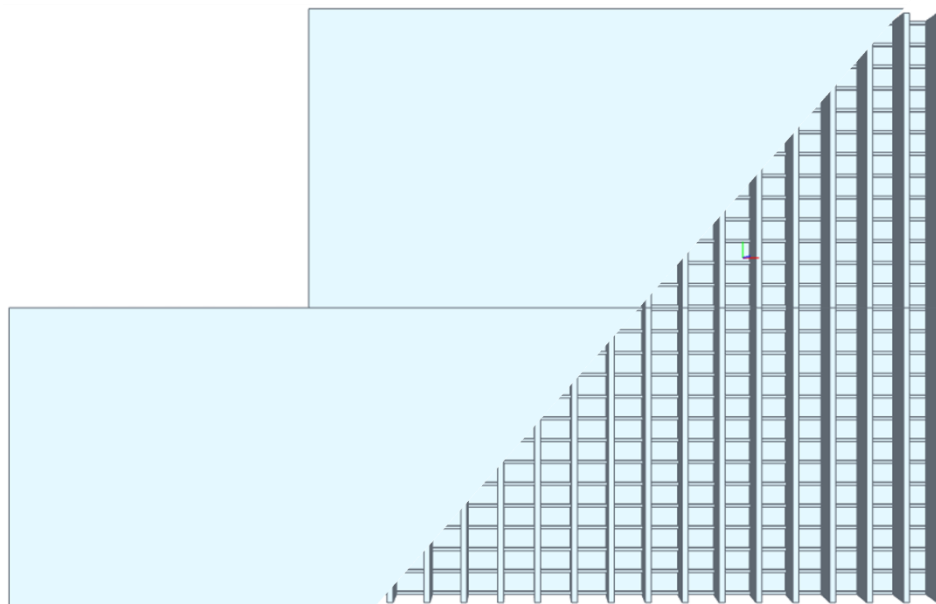


Abbildung 4-12: Draufsicht Geschossdecke mit unterliegender Tragstruktur in *BIMvision*

Alle schalltechnisch relevanten Bauteile haben Informationen zu deren Schalleigenschaften mittels `IfcPropertySet` hinterlegt. Dabei sind Einzahlwerte als `IfcPropertySingleValue` und frequenzabhängige Werte als `IfcPropertyTableValue` angelegt. Letztere sind zwar im IFC-Schema implementiert, werden in den gängigen Darstellungsprogrammen jedoch nicht angezeigt.

Mit moderaten Änderungen der Programmierung lassen sich auch andere Modelle erstellen. Ein Beispiel ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

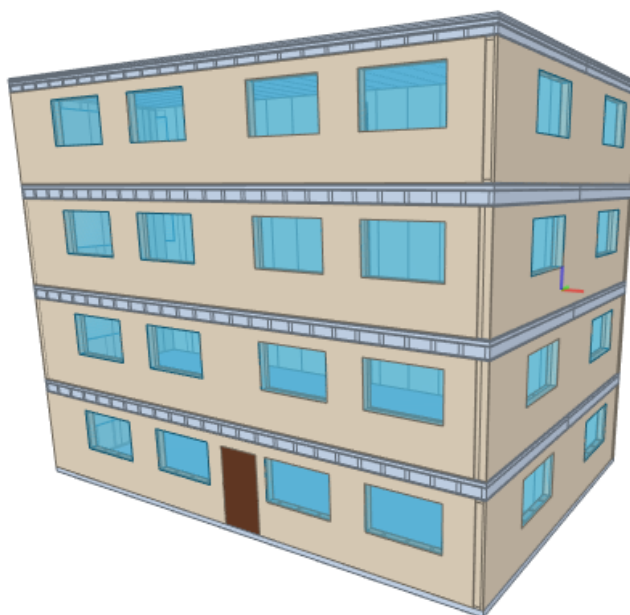


Abbildung 4-13: Alternatives Gebäude in *BIMvision*

4.2.3 Qualität

Bei der Erstellung des Modells wurde darauf geachtet, die in Abschnitt 2.5.2 definierten Qualitätskriterien zu erfüllen. Eine Übersicht ist in Tabelle 4-2 dargestellt. In den meisten Fällen konnte die Qualität nur durch manuelles Überprüfen und Berücksichtigen sichergestellt werden. Für den gegebenen Rahmen dieser Arbeit ist dieses Vorgehen ausreichend. Im Allgemeinen ist eine automatisierte Überprüfung jedoch erforderlich.

Tabelle 4-2: Übersicht über Anforderungen an die Qualität von IFC-Modellen

Anforderung Nr.	Kurzbeschreibung	Erfüllt	Sicherstellung
1.1	Komponenten verbunden	Ja	Manuell
1.2	Verbindungen Wände	Ja	Manuell

Anforderung Nr.	Kurzbeschreibung	Erfüllt	Sicherstellung
2.1	Objekte in Containern	Ja	Manuell
2.2	Geschlossene Spaces	Ja	Manuell
3.1	Platzierung Fenster und Türen	Ja	Manuell
4.1	Essenzielle Informationen	Teilweise	Manuell
4.2	Keine Überlappungen	Ja	<i>Solibri</i> ²
4.3	Keine Doubletten	Ja	IfcValidation des <i>XbimXplorer</i> ³
4.4	Konsistenz geometrische - parametrische Informationen	Ja	Manuell
4.5	Vollständige Space Modellierung	Ja	Manuell
4.6	Funktionsweise Türen/Fenster	Ja	Manuell
5.1.	Keine freischwebenden Objekte	Ja	Manuell
5.2	Öffnungen räumlich innerhalb Elemente	Ja	Manuell
5.3	Objekte räumlich innerhalb Container	Ja	Manuell
6.1	Lesbarkeit	Überwiegend	Manuell
7.1	Darstellbar in gängiger Software	Teilweise	<i>Autodesk Revit</i> ⁴ , <i>Solibri</i> , <i>BimVision</i> ⁵ , <i>XbimXplorer</i>

² <https://www.solibri.com/>

³ <https://docs.xbim.net/downloads/xbimxplorer.html>

⁴ <https://www.autodesk.eu/>

⁵ <https://bimvision.eu/de/>

- Zu 4.1: Als essenzielle Informationen werden allgemeine Informationen zum Projekt und Modell bezeichnet, wie der Header-Abschnitt, Einheiten oder Informationen zum `IfcProject`. Da im Rahmen dieser Arbeit kein konkretes Projekt bearbeitet wird, sind Informationen zu beispielsweise dem genauen Ort nicht befüllt. Modellspezifische Parameter sind dagegen besetzt. Daher ist diese Anforderung hier nur teilweise erfüllt.
- Zu 6.1: Die Anzahl der Zeilen der IFC-Datei ließen sich durch einfache Änderungen stark reduzieren. Dazu zählt, dass Achsen und Punkte wie der Ursprung eingangs definiert, und anschließend wiederverwendet werden konnten. Ebenso können Zeilen eingespart werden, wenn statt der Definition der Standardachsen bei `IfcLocalPlacement` die Defaults verwendet werden. Dadurch erscheint in der IFC-Datei ein ‚\$‘ an der entsprechenden Stelle, statt eines Verweises auf eine weitere Zeile. Dies erhöht zudem die manuelle Lesbarkeit, da nicht nach dem Verweis gesucht werden muss.
- Zu 7.1: In *XbimExplorer* werden Fenster in mehrschichtigen Bauteilen nicht korrekt dargestellt. Da dies in anderer Software gelingt, liegt das Problem vermutlich im *XbimExplorer* selbst. Ein Vergleich ist in Abbildung 4-14 dargestellt. In *Solibri*, *Autodesk Revit* und *BimVision* wird das Modell fehlerfrei abgebildet.

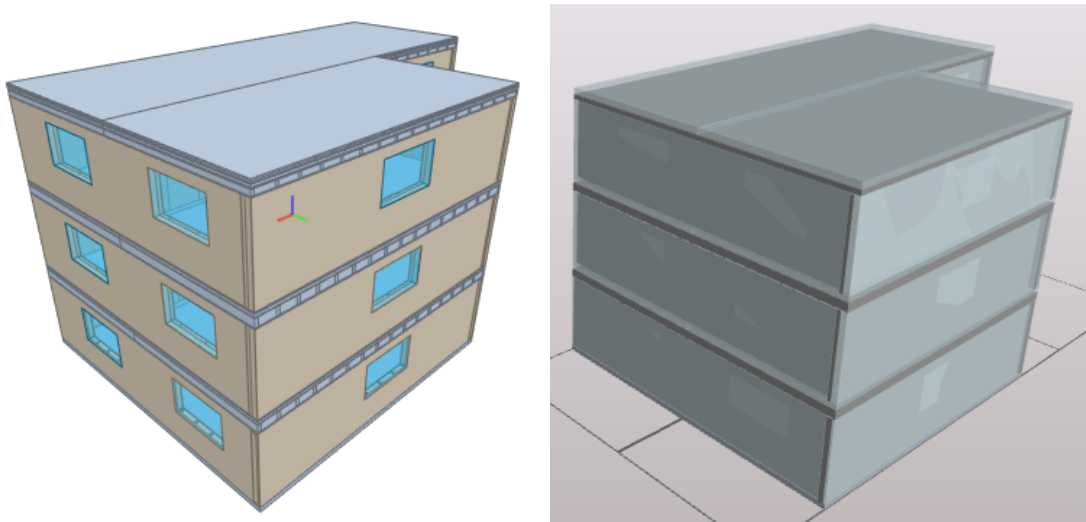


Abbildung 4-14: Vergleich Darstellung der Fenster in *BIMvision* (Links) und *XbimExplorer* (Rechts)

Beim Öffnen in *Autodesk Revit*, werden 9 Warnungen angezeigt, jedoch keine Fehler. Die Warnungen beziehen sich auf unvollständig abgeschlossene Räume. Dieses Problem konnte nicht gelöst werden. Genauere Informationen sind in Abschnitt 4.2.4 aufgeführt.

Zur weiteren Qualitätssicherung dienen Tools externer Hersteller. So hat der *XbimXplorer* eine Validierungsoption (siehe Abbildung 4-15). Die hierdurch erkannten Fehler konnten behoben werden.

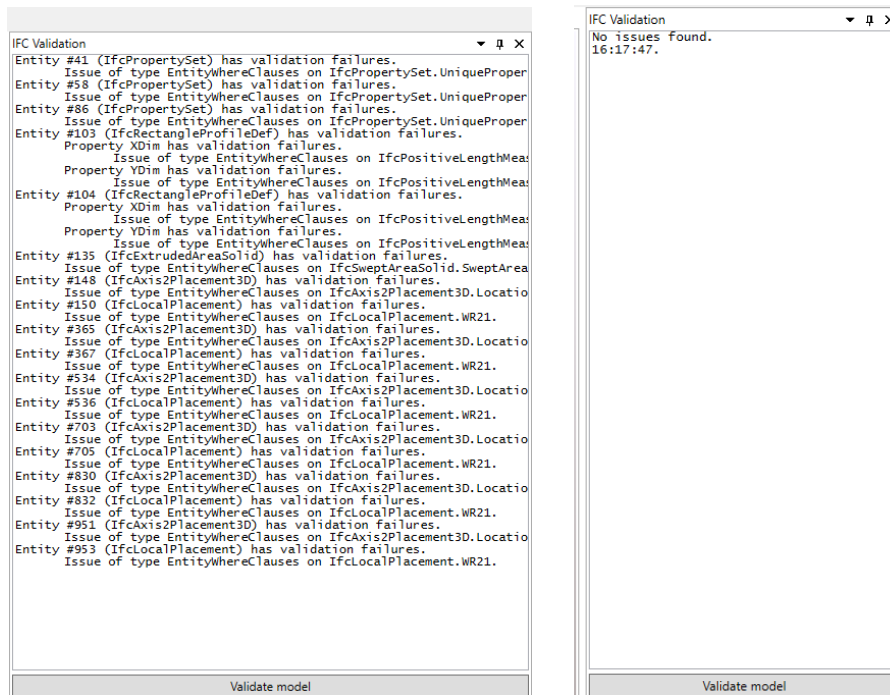


Abbildung 4-15: IFC Validation des *XbimXplorer* vor (Links) und nach (Rechts) Nachbesserungen

Auch der Model Checker von *Solibri Office* stellt eine Modellüberprüfung zur Verfügung. Eine Architekturprüfung mit den Regelsätzen zur Überprüfung der Räume, Überschneidungen und der Architektur ergab folgende Fehler mittleren Schweregrades:

- 1) *Fehlende Treppen-, Stützen- und Balken-Komponenten*: Bekannt; im Rahmen der Arbeit nicht vorgesehen.
- 2) *Keine Konstruktionstypen für Decke-Komponenten*: Bezieht sich auf die Modellierung der zusammengesetzten Decken/Dach, bei der die übergeordneten Elemente keine eigene Geometrie vorweisen. Da jedoch die Bestandteile eine Geometrie vorweisen, sollte dies zu keinem Fehler führen.
- 3) *Fehlende Namen bei Raum-Komponenten*: Lässt sich nicht ohne Weiteres nachvollziehen. Im *Solibri Viewer* ist die Eigenschaft „Name“ nicht besetzt, in *BIMVision* jedoch schon (siehe Abbildung 4-16). In der Programmierung wurde sie festgelegt.

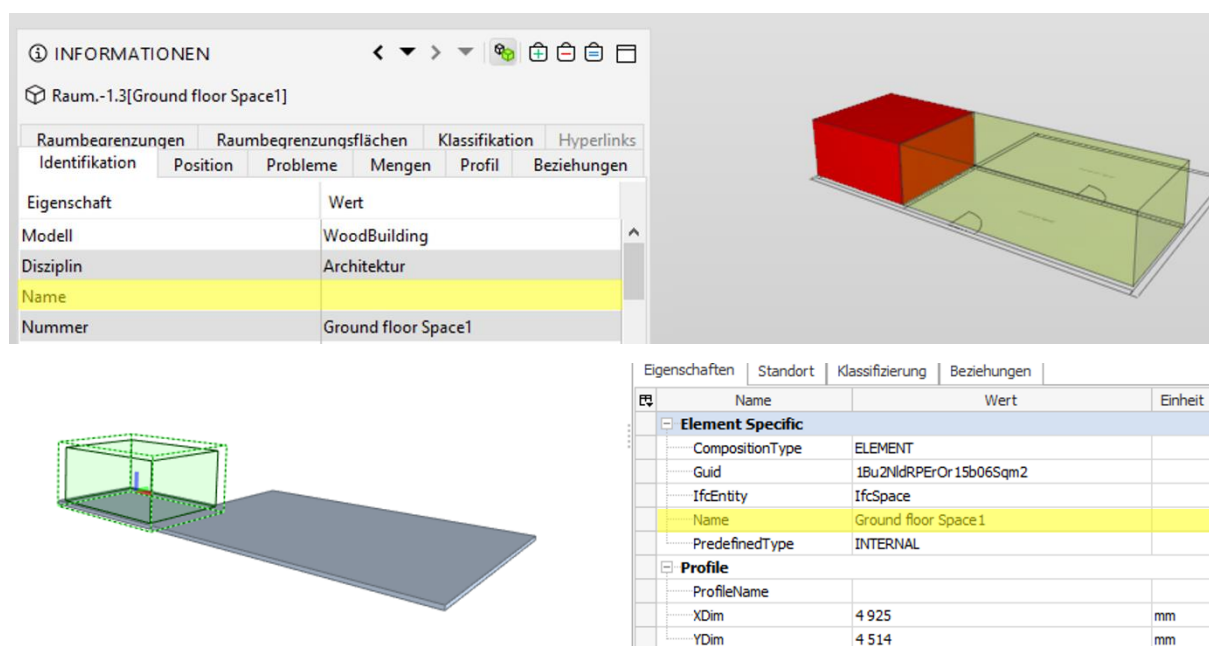


Abbildung 4-16: Vergleich Benennung von Raum „Ground floor Space 1“ in *Solibri Office* (Oben) und *BIMvision* (unten)

Abgesehen von den genannten Fehlern findet der Überprüfungsprozess von *Solibri Office* keine weiteren und insbesondere keine Überlappungen (siehe Anforderung Nr. 4.2).

4.2.4 Probleme

Während der Implementierung sind einige Probleme aufgetreten. Diese sollen im Weiteren vorgestellt werden.

Xbim bietet einige integrierte zusätzliche Attribute zum IFC4-Schema. Diese können jedoch nicht immer manuell angepasst werden und werden auch nicht automatisch erstellt. Ein Beispiel ist das Attribut `TotalHeight` von `IfcBuildingStorey`.

Bei der Verwendung von `IfcLocalPlacement` werden diese nicht automatisch relativ zum übergreifenden Bauteil erstellt, sondern diese Verbindung muss manuell erstellt werden. Dies stellt eine mögliche Fehlerquelle dar.

Darüber hinaus bietet die Implementierung und Interpretation der IFC-Struktur verschiedener Softwarehersteller Fehlerpotenzial. Im Folgenden wird dies am Beispiel der `IfcLocalPlacement` von Fenstern erläutert. Erstellt man ein Fenster in einer Wand, so benötigen drei der beteiligten Instanzen ein `IfcLocalPlacement` (LP): Das Fenster (`IfcWindow`), die Wand (`IfcWall`) und die Öffnung (`IfcOpeningElement`). Zunächst wurde die Positionierung des Fensters und der Öffnung identisch gewählt. Dies

wurde in allen verwendeten IFC-Darstellungssoftwares korrekt abgebildet, mit Ausnahme von *Autodesk Revit*. Beim Öffnen wurden hier Warnungen angezeigt (siehe Abbildung 4-17). In der Darstellung wurden die Fenster jedoch korrekt abgebildet.

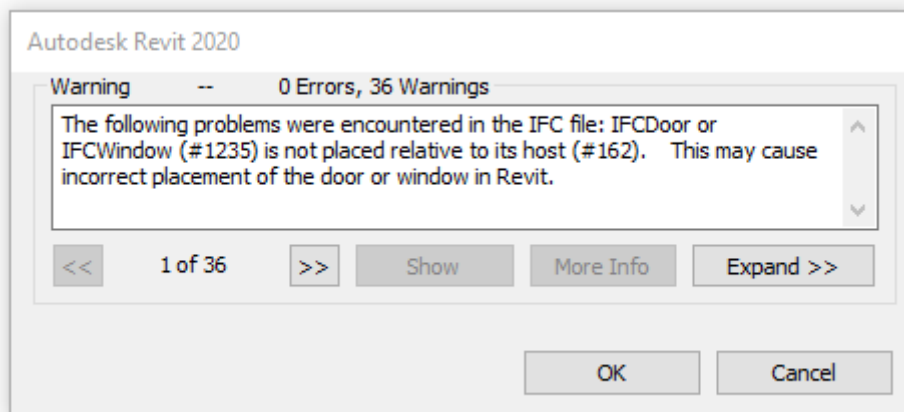


Abbildung 4-17: Warnung zur Positionierung von Fenstern und Türen in *Autodesk Revit* beim Öffnen des Modells

Eine genaue Analyse der in *Autodesk Revit* erstellten IFC-Modelle ergab, dass die Positionierungsstruktur von der im Rahmen dieser Arbeit Verwendeten abweicht. Die ursprüngliche und modifizierte Positionierung ist schematisch in Abbildung 4-18 dargestellt. Nach dieser Änderung der Positionierungsstruktur treten die Warnungen in *Autodesk Revit* nicht mehr auf.

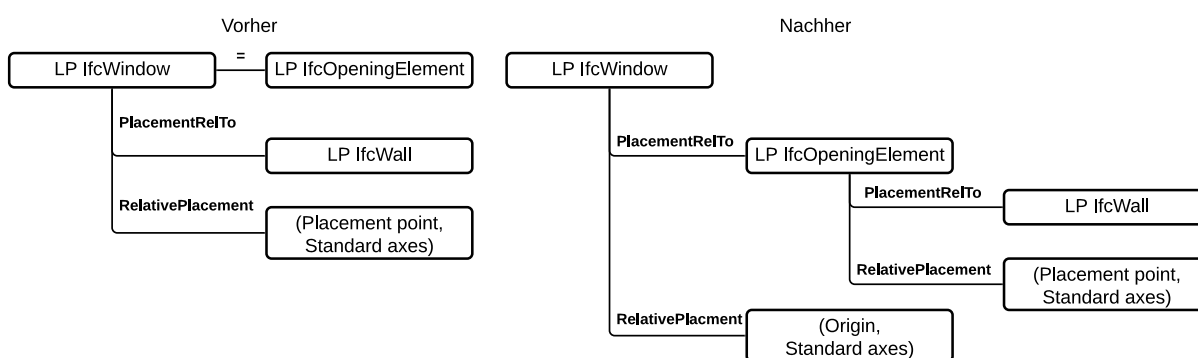


Abbildung 4-18: IFC-Schema-Diagramm LP vor (Links) und nach (Rechts) der Modifikation

In der offiziellen Dokumentation des verwendeten Standards IFC4 ist nicht erkenntlich, dass diese Implementierung gewählt werden muss. Ebenso konnten alle verwendeten darstellenden BIM-Softwares (inklusive *Autodesk Revit*) die Fenster korrekt darstellen. Daraus lässt sich schließen, dass oben dargestellte Implementierung eine interne Anforderung von *Autodesk Revit* ist. Diese sehr spezifischen und nicht dokumentierten Besonderheiten machen es schwierig, ein IFC-Modell unabhängig von kommerzieller

BIM-Software zu erstellen und dann darauf vertrauen zu können, dass diese es korrekt abbilden können.

Ähnliche Probleme zeigen sich auch bei der Darstellung von `IfcSpace`. Aus der Warnung (siehe Abbildung 4-19) und einer Analyse der IFC-Datei lässt sich jedoch nicht erkennen, weshalb *Autodesk Revit* die Räume nicht korrekt darstellen kann. In anderer Software (z.B. *BimVision*) gelingt die Darstellung fehlerfrei.

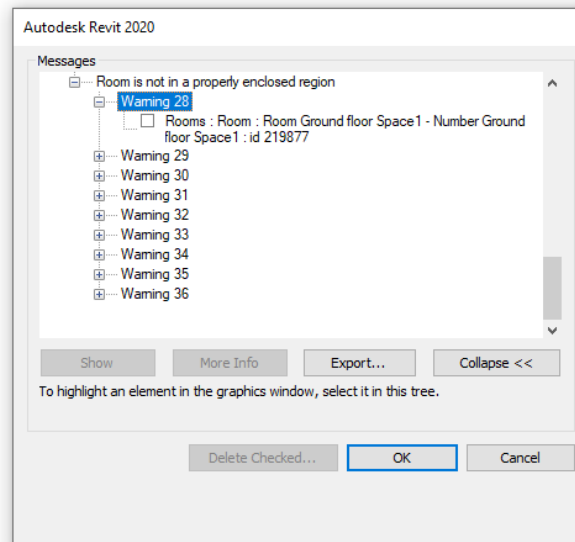


Abbildung 4-19: Warnung zur Darstellung von Räumen in *Autodesk Revit* beim Öffnen des Modells

Die aus der Erstellung eines IFC-Holzbaumodells gewonnenen Erkenntnisse, sowie das Modell selbst werden im Weiteren für eine automatisierte Überprüfung von Schallschutzanforderungen verwendet. Dazu folgt zunächst eine Einführung in den Schallschutz und das Automated Code Compliance Checking und anschließend eine Implementierung des automatisierten Schallschutznachweises.

5 Schallschutz

Die Auswirkungen von Lärm auf die Gesundheit lassen sich durch zahlreiche Studien belegen (z.B. World Health Organization, 2018, S. xiii). Sie reichen von Schlafstörungen über Gehörschädigungen bis hin zur koronaren Herzkrankheit (Passchier-Vermeer & Passchier, 2000, S. 1). Ziel des Schallschutzes ist es daher, den Schallpegel auf ein Niveau zu begrenzen, das keine gesundheitsschädlichen Folgen hat und eine hohe Lebensqualität ermöglicht. (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 82)

Die Überprüfung des Schallschutzes wird derzeit erst durchgeführt, wenn das Design schon detailliert ist. Mögliche nötige Verbesserungen gehen zu diesem Zeitpunkt mit erheblichem Zeitaufwand einher. Dies kann den Ablauf des Projektes verzögern und zu höheren Kosten führen. Außerdem basiert der Nachweis auf einer manuellen Ermittlung und Verarbeitung von Gebäudeinformationen. Dadurch ist der Prozess fehleranfällig. (Châteauvieux-Hellwig et al., 2021, S. 1)

5.1 Physikalische Grundlagen

Unter Schall versteht man die „mechanische Schwingung eines elastischen Mediums“ (Willems et al., 2020, S. 47) in für den Menschen hörbaren Frequenzen. Es handelt sich um eine zeitlich periodische und ortsveränderliche Dichteänderung in einem Material.

Als bauakustisch relevanter Bereich gilt dabei das Frequenzintervall von 100 bis 3150 Hz (siehe Abbildung 5-1) (Willems et al., 2020, S. 48). Es treten in der Baupraxis jedoch vermehrt auch Beschwerden bei tieferen Frequenzen auf. Diese stammen in der Regel von Verkehrslärm oder von Trittschall innerhalb des Gebäudes. Deshalb sollten auch Frequenzen unter 100 Hz berücksichtigt werden. Typischerweise geht der erweiterte Bereich bis 50 Hz (Blödt et al., 2019, S. 10). Bei der Raumakustik definieren Willems et al. das relevante Frequenzintervall von 63 bis 8000 Hz (plus gegebenenfalls tiefere Frequenzen) (Willems et al., 2020, S. 49).

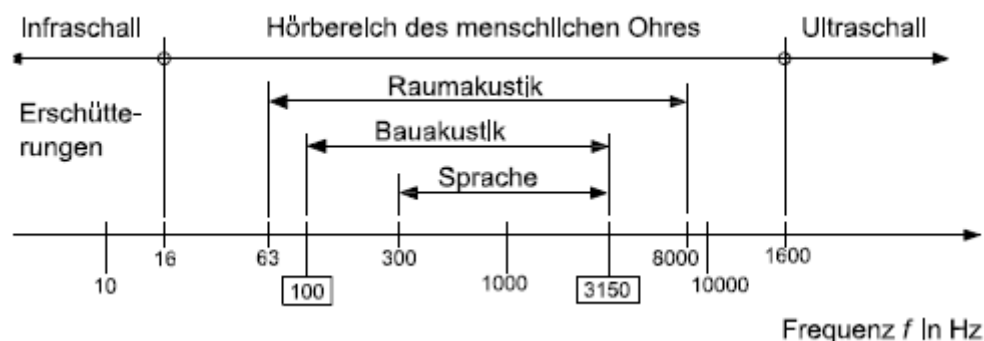


Abbildung 5-1: Bereiche des Frequenzbandes (Willems et al., 2020, S. 52)

Die genannten Dichteänderungen lassen sich als Druck messen. Der sogenannte Schalldruck p stellt dabei die „Amplitude einer Schallschwingung“ (Willems et al., 2020, S. 57) dar. Wichtige Größen des Schalldrucks sind:

- Hörgrenze: 20 μPa
- Schmerzgrenze: 20 Pa
- Obergrenze: existiert nicht (abhängig von eingesetzter Energie)

In der Regel wird der Schalldruck als Pegel angegeben. Ein Pegel ist der „Logarithmus eines Quotienten aus Größen gleicher Einheit“ (Willems et al., 2020, S. 53). Dadurch kann die logarithmische Wahrnehmung von Schall im menschlichen Gehirn adäquater dargestellt werden. Die Formel für den Schalldruckpegel L_p lautet wie folgt:

$$L_p = 10 * \lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 * \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB} \quad (1)$$

Dabei ist p der Schalldruck in Pa und p_0 die Hörschwelle als Bezugswert ($p_0 = 20 \mu\text{Pa}$). Somit ergibt sich ein Wert von 0 dB bei der Hörschwelle, und ein Wert von 120 dB für die Schmerzgrenze. Eine Veränderung des Schalldruckpegels um 10 dB führt zu einer Verdoppelung bzw. Halbierung der Lautstärke. Die Verdopplung einer Lärmquelle führt durch die logarithmische Addition zu einer Erhöhung des Schalldruckes um 3 dB. (Willems et al., 2020, S. 57–58)

Für die Beurteilung von Bauteilen spielen die Eigenfrequenzen (auch Eigenmoden genannt) eine große Rolle. Dies sind die Eigenschwingungen von Bauteilen oder Materialien in Abhängigkeit ihrer Abmessungen und Lagerbedingungen. Trifft die Frequenz

einer Schallquelle eine der Eigenfrequenzen, so verschlechtert sich das Schalldämmverhalten des Bauteils. (Willems et al., 2020, S. 74)

Relevant sind auch die sogenannten Koinzidenzfrequenzen. So werden Frequenzen bezeichnet, bei denen die Schallwellenlänge, die freie Biegewellenlänge des flächigen Trennelements und der Einfallswinkel der Schallwelle in einem gewissen Verhältnis stehen, sodass sich die Wellen maximal überlagern. Dies führt zur höchsten Schwingungsamplitude des flächigen Trennelements und somit zu einer Verschlechterung der Schalldämmeigenschaften. Der Effekt tritt vor allem bei tiefen Frequenzen auf. Um nachteilige Auswirkungen zu verhindern, sollte die niedrigste der Koinzidenzfrequenzen (Koinzidenzgrenzfrequenz f_g) außerhalb des bauakustisch relevanten Bereichs liegen. Mithilfe der Koinzidenzgrenzfrequenz werden auch biegeeweiche und biegesteife Bauteile differenziert (siehe Abbildung 5-2). (Willems et al., 2020, S. 70–73)

biegeweich	→	Bauteile mit $f_g > 2000$ Hz
bauakustisch ungünstig	→	$200 \text{ Hz} < f_g < 2000$ Hz
biegesteif	→	Bauteile mit $f_g < 200$ Hz

Abbildung 5-2: Unterscheidung der Biegeweichheit anhand der Koinzidenzgrenzfrequenz (Willems et al., 2020, S. 73)

Das Bergersche Gesetz formuliert, wie Schall in massehaltigen Gebilden gedämpft wird. Bezogen auf das Bauwesen, lässt sich damit die schalldämmende Wirkung von einschaligen Gebäudeteilen bestimmen. Aus dem Gesetz ergeben sich folgende Erkenntnisse (Willems et al., 2020, S. 68–70):

- Das Schalldämm-Maß wächst mit der flächenbezogenen Masse des trennenden Bauteils
- Hohe Schalleinfallswinkel (streifend) führen zu einem geringeren Schalldämm-Maß
- Höhere Frequenzen werden besser gedämmt

Das Bergersche Gesetz ist allerdings nur für biegeeweiche, einschalige Bauteile anwendbar. Dabei handelt es sich um „Bauteile, die als Ganzes schwingen“ (Willems et al., 2020, S. 70–74). Dies ist der Fall, wenn Bauteile aus einem einheitlichen Material, oder aus mehreren fest miteinander verbundenen Schichten mit unterschiedlichen,

aber schalltechnisch ähnlichen Eigenschaften bestehen. Ein Beispiel hierfür ist Mauerwerk mit Putzschichten.

Mehrschalige Bauteile sind dagegen Bauteile, deren Bestandteile nicht starre, sondern federnde Verbindungen durch elastische Schichten wie Dämm- oder Luftschichten aufweisen. Sie werden als Masse-Feder-Masse-System modelliert. Hieraus ergeben sich deutliche Abweichungen von Berger. Unterhalb und bei der Resonanzfrequenz verschlechtern sich die Schalldämmeigenschaften. Oberhalb der Resonanzfrequenz werden dagegen Verbesserungen im Vergleich zu einem einschaligen Bauteil gleicher Masse erreicht. Diese sind bei entkoppelten Konstruktionen besonders effektiv. (Blödt et al., 2019, S. 22; Willems et al., 2020, S. 74–80)

Man unterscheidet verschiedene Schallübertragungswege im Bauwesen (Willems et al., 2020, S. 83–86):

- Direkte Übertragung über das trennende Bauteil
- Flankenübertragung/Nebenwegübertragung über flankierende Bauteile

Eine schematische Darstellung der Übertragungswege ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Beteiligung des trennenden Bauteils wird mit „D“ bzw. „d“ gekennzeichnet, Flanken mit „F“ bzw. „f“. In Großbuchstaben sind Elemente auf der Seite des Senderraums und in Kleinbuchstaben empfangsraumseitige Elemente gekennzeichnet.

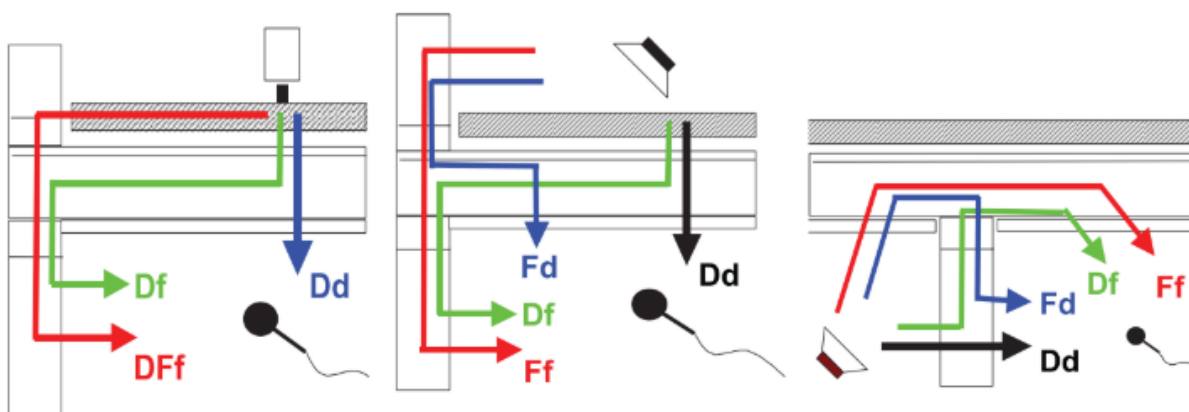


Abbildung 5-3: Übertragungswege in schematischer Darstellung für den Holzbau: Trittschallübertragung (Links), Luftschallübertragung über eine Decke (Mitte) und eine Wand (Rechts) (Châteauvieux-Hellwig et al., 2020)

Zudem differenziert man zwei Bereiche, in denen schalltechnische Eigenschaften eine Rolle spielen (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 83, 262):

- Luftschall: sich in der Luft ausbreitender Schall
- Körperschall: Direktes Anregen eines Bauteils durch z.B. Gehen, Klopfen an der Wand, Bohren von Löchern, Fallenlassen von Gegenständen

Im Bauwesen wird Luftschall und der Spezialfall „Trittschall“ des Körperschalls (Gehen auf horizontalen Bauteilen) normativ berücksichtigt, welche im Folgenden erläutert werden.

5.1.1 Luftschall

Die direkte Übertragung eines Bauteils von Luftschall lässt sich im Labor leicht evaluieren. Dafür wird die Schallpegeldifferenz zwischen dem Sende- und Empfangsraum bestimmt. Das resultierende Maß wird (Labor-) Schalldämm-Maß R bezeichnet. Je größer es ausfällt, desto besser ist das Bauteil bezogen auf die Schalldämmeigenschaften. Für die Ermittlung mit einer Berücksichtigung der Nebenwege wird das sogenannten Bau-Schalldämm-Maß R' im eingebauten Zustand gemessen. (Willems et al., 2020, S. 94)

Die Schalldämm-Maße R bzw. R' sind frequenzabhängig. In der Praxis sind Einzahlwerte jedoch einfacher zu handhaben. Daher verwendet man häufig bewertete Schalldämm-Maße (notiert mit R_w bzw. R'_w). Hierfür wird die Bezugskurve verschoben und der Wert bei $f = 500$ Hz bestimmt. (Willems et al., 2020, S. 87)

Die Notation der verschiedenen Schalldämm-Maße ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

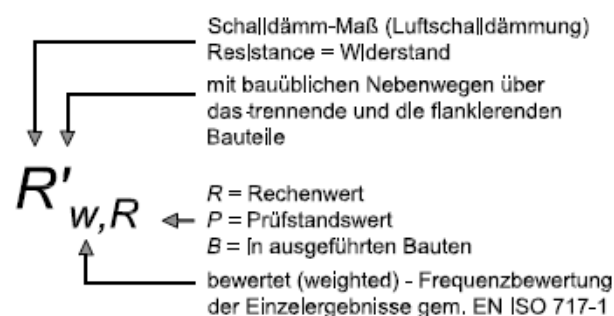


Abbildung 5-4: Indexbeschreibung des Luftschalldämm-Maßes (Willems et al., 2020, S. 85)

Verbesserungen oder Verschlechterungen der Schalldämmeigenschaften eines Bauteils (z.B. durch Vorsatzkonstruktionen) werden mit ΔR angegeben. (Willems et al., 2020, S. 87)

Um das Verhalten eines Bauteils auch bei der Verwendung eines bewerteten Einzahlwertes annähernd beschreiben zu können, wurden Spektrum-Anpassungswerte eingeführt. Diese berücksichtigen Spektren, die verschiedene Arten an Lärmquellen repräsentieren (Willems et al., 2020, S. 88–89):

- C (Spektrum 1): Für überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm von z.B. Wohngeräuschen
- C_{tr} (Spektrum 2; tr für traffic): Für überwiegend tief- und mittelfrequenten Lärm von z.B. städtischem Straßenverkehr

Die Spektrum-Anpassungswerte können auch für einen erweiterten Frequenzbereich berechnet und angegeben werden (Willems et al., 2020, S. 88–89). In den Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ fließt beispielsweise das Verhalten des Bauteils bei Frequenzen zwischen 50 und 5000 Hz ein.

5.1.2 Trittschall

Zur Bewertung des Trittschalls wird das trennende Bauteil (üblicherweise eine Decke oder eine Treppe) mit einem geeichten Norm-Hammerwerk angeregt und der resultierende Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen. Das resultierende Maß wird (Norm-) Trittschallpegel L_n bezeichnet. Je größer es ausfällt, desto schlechter dämmt das Bauteil die Übertragung des Trittschalls. (Willems et al., 2020, S. 94)

Die Notation folgt derselben Logik wie beim Luftschall (siehe Abbildung 5-5): Der Apostroph kennzeichnet die Berücksichtigung der Schallnebenwege (über flankierende Bauteile) und das bewertete Maß erhält den Index „w“ und wird analog zum Luftschall ermittelt. Der Index „n“ zeigt an, dass das Maß auf eine Fläche von 10 m² normiert ist. Auch hier kann ein erweiterter Frequenzbereich betrachtet werden. (Willems et al., 2020, S. 94–100)

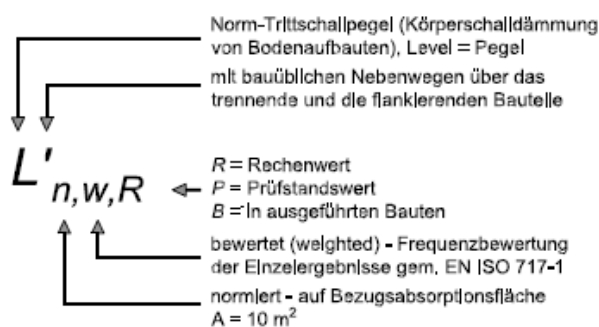


Abbildung 5-5: Indexbeschreibung des Trittschalldämm-Maßes (Willems et al., 2020, S. 95)

Um ein breiteres Spektrum an Geräuschquellen zu berücksichtigen, wird auch beim Trittschall ein Spektrum-Anpassungswert verwendet. Der Wert C_I (I für Impact) ist so gewählt, dass sich für massive Decken mit wirkungsvoller Deckenauflage ein Wert von 0 dB ergibt. Für Holzbalkendecken, die typischerweise tieffrequente Spitzen haben, resultiert daraus ein positiver C_I -Wert, während er bei Decken mit weniger wirksamen oder nicht vorhandenen Deckenauflagen (wie z.B. bei Betondecken) einen Wert zwischen -15 dB und 0 dB annimmt. Der Wert C_I ist für den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz definiert. Um auch tiefere Frequenzen zu betrachten, die beim Trittschall auftreten, kann der Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$ herangezogen werden, der Frequenzen zwischen 50 Hz und 2500 Hz berücksichtigt. (Blödt et al., 2019, S. 11; Willems et al., 2020, S. 100)

5.2 Anforderungen/Normen

Die bauaufsichtlichen Mindestanforderungen an den Schallschutz werden in Deutschland über die DIN 4109 geregelt. Sie definiert als Ziele den „Gesundheitsschutz“, „Vertraulichkeit bei normaler Sprechweise“ und „Schutz vor unzumutbaren Belästigungen“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., S. 4). Dieser öffentlich-rechtliche Nachweis bietet jedoch nur ein Mindestmaß an Komfort und sollte daher in der Praxis durch erhöhte Anforderungen eines privatrechtlich vereinbarten Nachweises ergänzt werden. Welcher zusätzliche Nachweis gewählt wird, ist projektspezifisch zu vereinbaren. Möglichkeiten sind die Empfehlungen nach VDI 4100, DEGA Empfehlungen 103 und 104 und weitere. Die Nachweise definieren jeweils die erforderlichen bzw. zulässigen Werte für $R'_{w,erf}$ und $L'_{n,w,zul}$. (Willems et al., 2020, S. 158)

Grundsätzlich werden Anforderungen an das bewertete Luftschalldämm-Maß R'_w für vertikale und horizontale und den bewerteten Norm-Trittschalldämm-Maß $L'_{n,w}$ für horizontale Bauteile gestellt (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 82). Im Allgemeinen muss

das vorhandene Maß besser sein als der erforderliche Wert. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten wird in der DIN 4109 zudem ein Sicherheitszuschlag gefordert. Tabelle 5-1 sind diese Sicherheitsbeiwerte (u_{prog}) nach dem vereinfachten Verfahren angegeben. (Willems et al., 2020, S. 160)

Tabelle 5-1: Angabe Sicherheitsbeiwert u_{prog} für verschiedene Nachweise (Willems et al. 2020, S. 160)

Nachweis	Sicherheitsbeiwert u_{prog}
Luftschalldämmung bei trennenden Bauteilen	2 dB
Luftschalldämmung von Außenbauteilen	2 dB
Luftschalldämmung von Türen	5 dB
Trittschalldämmung	3 dB

Das bewertete Luftschalldämm-Maß R'_w berechnet sich nach DIN EN ISO 12354-1 gemäß Abbildung 5-6.

$$R'_w = - \left(10 \lg \left(10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{nj,w}/10} \right) \right) \text{ dB}$$

Abbildung 5-6: Berechnung von R'_w (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017a, S. 22)

Dabei ist $R_{Dd,w}$ in dB das bewertete Schalldämm-Maß der direkten Luftschallübertragung (auch R_w genannt). Die Größen $R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$ und $R_{Fd,w}$ in dB stehen für bewertete Flankendämm-Maße über unterschiedliche Wege. Über die bewertete Schallpegeldifferenz $D_{n,j,w}$ in dB werden Übertragungen durch kleine technische Bauteile oder Luftschallübertragungssysteme berücksichtigt. S_s in m^2 bezieht sich auf die Fläche des trennenden Bauteils, A_0 in m^2 stellt die äquivalente Bezugsabsorptionsfläche dar. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017a, S. 22)

Der bewertete Trittschallpegel $L'_{n,w}$ berechnet sich nach DIN EN ISO 12354-2 für übereinanderliegende Räume wie in Abbildung 5-7 definiert.

$$L'_{n,w} = \left(10 \lg \left(10^{L_{n,d,w}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij,w}/10} \right) \right) \text{dB}$$

Abbildung 5-7: Berechnung von $L'_{n,w}$ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017b, S. 21)

Dabei ist $L_{n,d,w}$ in dB der bewertete Norm-Trittschallpegel der direkten Übertragung (auch $L_{n,w}$ genannt) und $L_{n,ij,w}$ in dB der bewertete Norm-Trittschallpegel durch Flankenübertragung. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017b, S. 21)

Der resultierende Nachweis ist in den Formeln (2) und (3) dargestellt. Bei Berechnung und Messung soll laut Norm auf 1/10 dB gerundet werden.

$$R'_w - u_{prog} \geq R'_{w,erf} \quad (2)$$

$$L'_{n,w} + u_{prog} \leq L'_{n,w,zul} \quad (3)$$

5.3 Schallschutz im Holzbau

Der Schallschutz hat für den Holzbau eine besondere Relevanz. Grund hierfür ist das im Vergleich zum Stahlbeton- oder Mauerwerksbau geringe Eigengewicht der Holzbaukonstruktionen, welches nach dem Bergerschen Gesetz zu einer höheren Schallübertragung führt. In Forschung und Praxis wurden jedoch in den letzten Jahrzehnten schalltechnisch gleichwertige Aufbauten entwickelt. Dabei kommen zwei Strategien zum Einsatz:

- Luftschallschutz: „schalltechnische Entkopplung über unabhängige oder federnd gelagerte Vorsatzschalen“ (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 83)
- Trittschallschutz: „Einbringen zusätzlicher Masse durch massive Estriche und schwere Schüttungen“ (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 83) und Entkopplung durch schwimmende Estriche

Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass Trittschallverbesserungsmaße für Bodenbeläge, Estriche und abgehängte Decken meist für Betondecken angegeben werden. Im Holzbau fallen sie jedoch aufgrund unterschiedlicher Frequenzvorgänge der Materia-

lien meist niedriger aus. Bei der Ausführung muss sichergestellt werden, dass schalldämmende Konstruktionen ohne Fugen ausgeführt sind. (Kaufmann, Krötsch & Winter, 2017, S. 83)

Die schon erwähnten tiefen Frequenzen sind in allen Bauweisen relevant und sollten bei der Planung beachtet werden. Im Holzbau sind wirksame Verbesserungsmaßnahmen aufgrund zahlreicher akustischer Parameter der Bauteile jedoch einfacher implementierbar als in anderen Bauweisen und beispielsweise bei Massivholz- und Holzbalkendecken können somit gute Werte erzielt werden. (Blödt et al., 2019, S. 11, 13)

5.3.1 Bauteilkataloge

Um Schalldämmwerte für Holzbaukonstruktionen zu erhalten, werden die Bauteile in der Regel jeweils im Labor und in Einbausituationen geprüft. Da dies aufwändig ist, kann für die Planung stattdessen auf Bauteilkataloge zurückgegriffen werden, die aus bereits geprüften Aufbauten bestehen. Diese können als „Grundlage für die Nachweisführung gegenüber Baubehörden herangezogen werden“ (dataholz.eu, 2021). Es stehen verschiedene Datenquellen zur Verfügung. Beispielsweise der Online-Katalog *dataholz.eu* (dataholz.eu, 2021), die Online-Datenbank *Lignumdata* (LIGNUM-Holzwirtschaft Schweiz, 2021) und die Vibroakustik Bauteil Datenbank „*VaBDat*“ der Technischen Hochschule Rosenheim (Technische Hochschule Rosenheim, 2021).

Als Datenquelle dieser Arbeit wurde die Datenbank *VaBDat* der Technischen Hochschule Rosenheim gewählt. Aus diesem Grund wird sie im Folgenden detaillierter vorgestellt. Die Datenbank ist in drei Ebenen aufgeteilt: Die erste Ebene enthält Kenngrößen zu Bauprodukten oder Baustoffen (z.B. Koinzidenzgrenzfrequenz, E-Modul). Die zweite Ebene enthält schalltechnische Kennzahlen zu Bauteilen, die aus den Bauprodukten der darunter liegenden Ebene zusammengesetzt sind. In der dritten Ebene werden Stoßstellen zwischen Bauteil-Kombinationen betrachtet. Für eine Überprüfung der Schallschutznachweise sind sowohl die Kennzahlen der Bauteile als auch der Stoßstellen relevant.

Für die Einträge in *VaBDat* wird ein System von Kürzeln verwendet. Dafür sind zunächst alle Materialien in Kategorien und untergeordnete Varianten klassifiziert. Das Kürzel für ein Material sieht dann wie folgt aus:

M__[Kürzel Kategorie in Kleinbuchstaben][Kürzel Variante in Großbuchstaben]_[charakteristischer Kennwert]

Der charakteristische Kennwert ist abgesehen von Trittschalldämmungen und Beschwerungen die Dicke in mm. Ein Ausschnitt der Klassifikation sowie ein Beispiel sind in Abbildung 5-8 abgebildet. Die vollständige Klassifikation findet sich unter www.vab-dat.de/documents/Support/Abbreviation/Abbreviation_Def.pdf.

Beispiel: **M_bCLT81**

Material

	Material Gruppe	+	Material	charakter. Kennwert
a	Luftschicht (air layer)	+	C geschlossen (closed)	Dicke in mm (thickness in mm)
		+	O offen (open)	
b	Werkstoffplatten (boards)	+	BST Brettstapel (brettstapel)	Dicke in mm (thickness in mm) Beispiel: 81
		+	CB Spanplatte (chipboard)	
		+	CBC Spanplatte, zement (chipboard, cement)	
		+	CLT Brettsperrholz (cross laminated timber)	
		+	CO Betonplatte (concrete)	
		+	GP Gipsplatte (gypsum board)	
		+	GF Gipsfaserplatte (gypsum fibre board)	
		+	GL (Kunststoff-) Glas ((plastic) glas)	
		+	MDF MDF-Platte (medium-density fibreboard)	
		+	OSB OSB-Platte (oriented strand board)	
e	Elast. Zwischenlager (elastic interlayer)	+	COR Kork (cork)	Dicke in mm (thickness in mm)
		+	PUR Polyurethan (polyurethane)	

Abbildung 5-8: Ausschnitt aus Abkürzungsverzeichnis von VaBDat (Technische Hochschule Rosenheim 2021)

Bauprodukte werden anschließend aus der Summe ihrer Materialien gebildet. Die Nomenklatur zeigt sich am besten an einem Beispiel. Der in Abbildung 5-9 dargestellte Bauteilaufbau einer Holzständerwand entspricht folgendem Kürzel:

B_iWF60_jWS160||iCF160_bOSB15

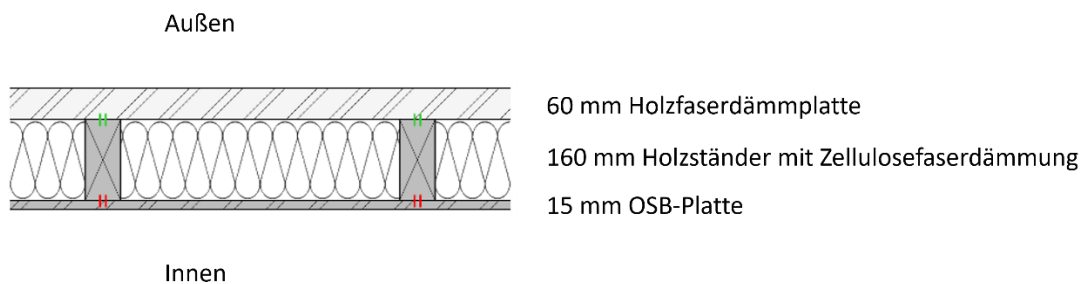


Abbildung 5-9: Bauteilaufbau einer möglichen Holzständerwand (nach LIGNUM-Holzwirtschaft Schweiz, 2021)

Das „B“ zu Beginn weist auf ein Bauteil hin. Die jeweiligen Materialschichten sind anschließend mit Unterstrichen voneinander getrennt. In diesem Beispiel handelt es sich um drei Schichten. Die zweite Schicht ist hier in zwei Materialien innerhalb derselben Schichtebene unterteilt. Gekennzeichnet wird dies durch „||“. In diesem Fall handelt es sich bei der zusammengesetzten Bauteilschicht um einen Vollholzständer gefüllt mit Zellulosefaser mit 160 mm Schichtdicke.

Bauprodukte enthalten als allgemeine Informationen neben ihrem Kürzel in der Regel den Einsatzort (z.B. Außenwand), die Bauweise (z.B. Timber Frame Construction (TFC)) und die flächenbezogene Masse. Des Weiteren sind ihnen ihre schalltechnischen Eigenschaften zugeordnet. Die Materialien von Bauprodukten werden in der Reihenfolge von oben nach unten bzw. außen nach innen angegeben.

5.3.2 Bauteilkonstruktionen

Blödt et al. definieren verschiedene konstruktive Einflüsse auf die Schalldämmung. Diese hängen von Bauteil und Bauweise ab. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflüsse auf die jeweiligen Bauteile erläutert. Die Informationen stammen, soweit nicht anders gekennzeichnet, von Blödt et al., 2019, S. 25–54.

5.3.2.1 Wände

Für den Holztafelbau spielt die notwendige Beplankung eine große Rolle. Die besten schalldämmenden Eigenschaften werden bei einer hohen Masse und geringen Biegesteifigkeit der Beplankung erreicht. Deren Befestigung am Ständerwerk kann je nach Ausführung die Weitergabe des Schalls unterbrechen. Dafür eignet sich besonders eine Trennung des Ständerwerks oder eine entkoppelte Montage. Auch eine entkoppelt montierte oder freistehende Vorsatzschale kann gewählt werden.

Dämmstoffe können Schall im Hohlraum absorbieren und dämpfen. Dies wird durch die Materialeigenschaft des Strömungswiderstandes r in $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ beschrieben. Ein höherer Wert bedeutet bessere Schallabsorptionseigenschaften. Daneben wirkt sich bei einigen Dämmstoffen eine höhere Masse positiv aus. Die Tiefe des Ständerwerks selbst hat nur einen geringen Einfluss auf die schalltechnischen Eigenschaften. Die Rasterbreite beeinflusst die Eigenfrequenzen der Beplankung. In der Regel führen größere Abstände zu einer besseren Schalldämmwirkung.

In der Massivholzbauweise bestimmt vor allem das Massivholzelement die Schalldämmung. Insbesondere dessen Flächengewicht und Biegesteifigkeit sind von Bedeutung. Direkt montierte Beplankung bewirkt dabei durch die Erhöhung der flächenbezogenen Masse eine Verbesserung der Dämmwirkung. Das Vorhandensein von Bekleidungen wirkt sich ebenso positiv aus. In der Praxis bewirkt insbesondere der Fugenschall eine Verschlechterung der Eigenschaften. Eine Beplankung oder Bekleidung auf mindestens einer Seite kann diesen Effekt deutlich reduzieren.

5.3.2.2 Trenndecken

Die Tragstruktur der Trenndecken selbst hat ab einer gewissen Mindestdicke nur einen geringfügigen Einfluss auf die Schallübertragung. Ebenso sollten die Effekte der Gehbeläge in der Regel vernachlässigt werden.

Bei der Wahl des Estrichaufbaus spielt die flächenbezogene Masse des Estrichs, sowie die Steifigkeit der Trittschalldämmplatte eine Rolle. Es handelt sich hierbei um ein Masse-Feder-Masse-System.

Eine Rohdeckenbeschwerung erhöht die Trittschalldämmung und kann als Plattenmaterial oder Schüttung aufgebracht werden. Bei einer Balkendecke kann sie auch im Hohlraum verfüllt werden. Dadurch kann Masse auf die Konstruktion gebracht werden, ohne die Aufbauhöhe zu vergrößern.

Schwingungstilger sind Masse-Feder-Systeme, die in oder auf dem Bauteil angebracht werden können, um bestimmte Frequenzen zu tilgen. Bei Decken ist dies üblicherweise der Frequenzbereich zwischen 30 Hz und 100 Hz.

Unterdecken können je nach Ausführung verschieden starke Verbesserungen oder auch Verschlechterungen der Schalleigenschaften bewirken. Die größte Dämpfung der tiefen Frequenzen wird durch eine hohe Abhänghöhe und eine hohe Masse erreicht. Auch die Art der Montage über Direktabhängiger, Federschienen und entkoppelte Abhängiger im Gegensatz zu direkten Beplankungen spielen eine entscheidende Rolle.

6 Automated Code Compliance Checking

Im Bauwesen müssen die Anforderungen von verschiedenen, ortsspezifischen Normen erfüllt werden. Diese sollen die Qualität und Sicherheit der Bauwerke sicherstellen. Dieser Vorgang des Überprüfens wird auch Code Compliance Checking (CCC) genannt. Heute wird er größtenteils manuell durchgeführt. Dafür werden 2D Pläne entsprechend den gestellten Anforderungen von Fachleuten überprüft und bewertet. Mit immer komplexer werdenden Gebäuden (unter anderem durch den Einsatz von digitalen Gebäudemodellen) und der hohen Anzahl an Normen, ist diese Aufgabe (zeit-)aufwändig und fehleranfällig. Zudem muss sie bei jeder Planungsänderung wiederholt werden. (Ismail et al., 2017, S. 1; Preidel & Borrmann, 2015, S. 1)

Um den Aufwand zu verringern, wird seit den 1960ern an einer Automatisierung des CCC geforscht. Unter Automated Code Compliance Checking (ACCC) versteht man eine automatisierte oder teilautomatisierte Überprüfung eines Gebäudemodells auf die Einhaltung von Normen und Richtlinien. Dabei wird das Modell auf Grundlage der Objekte, Attribute und Beziehungen bewertet. Dies ermöglicht eine durchgängig hohe Planungsqualität zu gewährleisten. Das Aufkommen von BIM förderte die Bestrebungen, da die Modelle hier schon eine digitale Repräsentation erhalten, die zur Überprüfung herangezogen werden kann. (Borrmann et al., 2015, S. 321; Ismail et al., 2017, S. 1)

Die Einführung von IFC als offenes Datenformat von BIM sorgte für einen weiteren Schub in der Entwicklung und Verwendung von ACCC (Nawari, 2018). Es ermöglichte eine bessere Kollaboration und Datenaustausch zwischen verschiedener BIM Software und den ACCC Systemen (Ismail et al., 2017, S. 1). Temel und Başıağaç haben gezeigt, dass es mithilfe der IFC-Struktur und den vorhandenen Daten im Schema möglich ist, ACCC durchzuführen (Temel & Başıağaç, 2020, S. 126).

Derzeit kommen vor allem geschlossene Systeme des ACCC zur Anwendung. Diese können zwar den Grad der Fehleranfälligkeit reduzieren, bieten jedoch in der Anwendung nur einen sehr beschränkten Handlungsspielraum. Dies betrifft beispielsweise manuelle Überprüfungen, Weiterentwicklungen oder regionale Anpassungen. Sie zei-

gen dennoch auf, welches Potenzial ACCC hat: Es ergibt sich eine große Arbeitserleichterung und Effizienzsteigerung bei einer kombinierten Benutzung von BIM. (Borrmann et al., 2015, S. 329)

Die derzeit verfügbaren Software-Lösungen zur automatisierten Überprüfung sind vor allem in geometrisch-topologischen Fragestellungen, wie dem Brandschutz oder der Fluchtweganalyse, angesiedelt. Beispiele sind *Solibri Model Checker (SMC)*, *Corenet System*, *Jotne Edmmodelchecker*, *Norwegian Statsbygg's Design Rule Checking Efforts*, *International Code Council*, *Us General Services Administration Design Rule Checking*, *Designcheck* (Australien) und *Lica System* (Portugal). (Borrmann et al., 2015, S. 329; Temel & Başıağa, 2020, S. 115)

Ein System zur automatisierten Verifizierung von Normen/Regeln besteht üblicherweise aus 4 Phasen (Borrmann et al., 2015, S. 323; Nawari, 2018, S. 3):

- 1) Aufbereitung der Regelwerke: Interpretation, Entwicklung und logisches Arrangieren der Regeln für die Anwendung
- 2) Vorbereitung des Gebäudemodells: Abfragen der benötigten Informationen
- 3) Ausführung: Überprüfung auf Einhaltung des Nachweises
- 4) Bericht: Aufbereiten der Ergebnisse

Darüber hinaus kann noch ein fünfter Schritt betrachtet werden, in welchem Verfahren zur automatisierten Verbesserung und Rückführung der identifizierten Fehler entwickelt werden. (Solihin & Eastman, 2015, S. 79)

Die größten Herausforderungen bestehen derzeit in einer sinnvollen Implementierung der Regelwerke, sowie in der Sicherstellung einer ausreichenden Qualität und Konsistenz des Gebäudemodells. Diese Schritte werden im Folgenden näher erläutert. (Borrmann et al., 2015, S. 325; Solihin & Eastman, 2015, S. 69)

6.1 Aufbereitung der Regelwerke

Die Interpretation der Regeln wird als wesentlichster und kompliziertester Schritt betrachtet (Ismail et al., 2017, S. 1). Ein Grund hierfür ist, dass die derzeit bestehenden Regeln in einer menschen-orientierten Sprache verfasst sind. Dies bedeutet zum ei-

nen, dass der Text in eine maschinen-lesbare Form gebracht werden muss. Zum anderen setzen die Regeln üblicherweise zusätzliches Fachwissen voraus, das zu ihrer korrekten Interpretation nötig ist. Dieses Fachwissen beinhaltet beispielsweise versteckte Annahmen, vorausgesetztes Allgemeinwissen des Themas oder eine Abhängigkeit zu anderen Regeln. Um diesem Problem zu begegnen, ist eine (einmalige) manuelle Interpretation unumgänglich. (Solihin & Eastman, 2015, S. 71)

Im Allgemeinen werden zwei Möglichkeiten der Formulierung der Regeln unterschieden: eine festgeschriebene Übertragung in Programm-Routinen und eine Darstellung mit Prozess- und Zwischenschritten.

Bei Ersteren spricht man von einer „Black-Box-Methode“. Die Regeln werden auf eine für den Computer optimierte Art und Weise festgeschrieben, sodass die Schritte für den Anwender schwer nachvollziehbar sind. Dadurch ist auch eine Erweiterung oder Überprüfung durch den Anwender nicht vorgesehen. Die dadurch erlangte Geschlossenheit des Systems und die Standardisierung der Systemelemente führt auf der anderen Seite zu einer geringen Fehleranfälligkeit. (Borrmann et al., 2015, S. 324)

Im Gegensatz dazu steht die zweite, sogenannte „White-Box-Methode“. Hierbei liegt der Fokus auf einer Darstellung der Regeln, die gleichwohl für Mensch und Maschine lesbar sind. Dies bewirkt einen hohen Grad an Nachvollziehbarkeit und ermöglicht dadurch eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse, die im Bauwesen üblich ist. Zur Darstellung der Regeln wird üblicherweise „Code Representation Language“ verwendet. Besonders „Visual Programming Languages“ (VPL) eignen sich dafür, da sie von Menschen gut lesbar sind. (Borrmann et al., 2015, S. 324; Preidel & Borrmann, 2015, S. 4)

Der Aufwand der ersten Methode ist zunächst höher, da die Regeln definiert, übersetzt und gepflegt werden müssen. Dies erfordert ein hohes Maß an Programmierexpertise. Die zweite Methode dagegen kann auch von Bauexperten ohne Programmiererfahrung umgesetzt werden, und erlaubt zudem einen größeren Handlungsspielraum. Jedoch ist sie in der Entwicklung und Umsetzung deutlich aufwändiger. (Borrmann et al., 2015, S. 324; Ismail et al., 2017, S. 1–2)

Welche Methode zu bevorzugen ist, hängt neben den genannten Vor- und Nachteilen auch mit der betrachteten Art von Regel zusammen. Solihin und Eastman definieren folgende Arten (Solihin & Eastman, 2015, S. 72–75):

- 1) Regeln, für deren Evaluierung nur eine begrenzte Zahl an expliziten Daten nötig sind.
- 2) Regeln, für deren Evaluierung nur einfache abgeleitete Attributwerte benötigt werden
- 3) Regeln, für deren Evaluierung erweiterte Datenschemata gebraucht werden
- 4) Regeln, die einen „Beweis der Lösung“ erforderlich machen

Die Regeln der ersten Klasse sind relativ einfach zu verstehen und zu implementieren, ermöglichen aber große Fortschritte bei der Gebäudequalität. Für die zweite Klasse erfolgt eine Abwägung zwischen vom Nutzer geforderten und aus dem Modell ableitbaren Attributen. Für Regeln der dritten und vierten Klasse gibt es derzeit noch wenig Fortschritte. Daraus ergibt sich, dass besonders in den komplizierten Fällen 3) und 4) auf „White-Box-Methoden“ zurückgegriffen werden sollte, während Typ 1) und 2) erwartungsgemäß im „Black-Box-Ansatz“ verständlich bleiben. (Solihin & Eastman, 2015, S. 72–75)

Die hier beschriebenen Ansätze beziehen sich vor allem auf Bauvorschriften und Richtlinien. Solihin und Eastman merken darüber hinaus an, dass ähnliche Vorgehensweisen auch auf andere Arten von Anforderungen anwendbar sind, und schon bei der Entwicklung der Konzepte mitgedacht werden sollten. Sie definieren folgende 7 Kategorien: Wohlgeformtheit des Gebäudemodells, Bauverordnungen, Kundenanforderungen, Anforderungen der Bauphase, Sicherheit (während des Baus und bei Wartungsarbeiten), Überprüfung der Garantieranforderungen, Vollständigkeit des BIM-Modells für Facility Management. Anforderungen zur Wohlgeformtheit des Modells wurden schon in Abschnitt 2.5.2 thematisiert. (Solihin & Eastman, 2015, S. 70)

6.2 Vorbereitung des Gebäudemodells

Um ein Modell auf die Einhaltung von Regeln zu überprüfen, muss es in eine gewisse Form gebracht werden und/oder spezifische Informationen enthalten. Beim ACCC wird ein digitales Gebäudemodell verwendet, das häufig in Form einer IFC-Datei vorliegt. Der Inhalt des IFC-Modells wird im Allgemeinen von der gewählten MVD, sowie dem vorhandenen LOD beeinflusst. (Solihin & Eastman, 2015, S. 70–71)

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben definieren MVDs die benötigten Inhalte eines Modells. Hiermit lässt sich sicherstellen, dass gewisse Informationen im Modell enthalten sind. Für das ACCC werden allerdings häufig sehr spezifische, anwendungsabhängige Informationen benötigt, die in den Standard-MVDs nicht enthalten sind. So sind bei Normüberprüfungen bezüglich des Schallschutzes Bauteilkennwerte nötig, die üblicherweise nicht im Modell hinterlegt sind. Die spezifischen Anforderungen müssen daher klar kommuniziert werden.

Genügend Informationen für das ACCC sind üblicherweise ab der Designentwicklungsphase vorhanden. Das LOD (siehe auch Abschnitt 2.2) beträgt hier typischerweise LOD 300 oder LOD 350. Dies entspricht dem derzeitigen Entwicklungsstand der ACCC. Es wird jedoch erwartet, dass es mit der Zeit möglich sein wird, auch mit geringeren LODs zu arbeiten. (Solihin & Eastman, 2015, S. 71)

7 ACCC für den Schallschutz im Holzbau

Kapitel 2 und 6 zeigen auf, welche Möglichkeiten digitale Methoden im Bauwesen und im Speziellen auch für den Holzbau eröffnen. Durch das ACCC können Gebäude einfacher auf die Einhaltung von Normen geprüft werden. Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, ist der Schallschutz im Holzbau eine der besonders zu betrachtenden Anforderungen. Software Tools, die die Schallschutzüberprüfung in den Planungsprozess einbinden, fehlen jedoch (Châteauvieux-Hellwig et al., 2021, S. 1). Um dem zu begegnen, werden im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeiten des ACCC für den Schallschutz im Holzbau analysiert. Dafür wird zunächst die Umsetzung und anschließend deren Ergebnisse erläutert.

7.1 Methodik

Das Konzept für das ACCC für den Schallschutz im Holzbau basiert auf den vier bzw. fünf Phasen aus Kapitel 6. Die Umsetzung erfolgt in der Programmierumgebung *Visual Studio* in der Sprache *C#*. Das entstandene Programm führt dabei alle Phasen des ACCC für die schalltechnisch relevanten Bauteile des Input-IFC-Modells aus (siehe auch Abbildung 7-1). Als relevante Bauteile werden im Rahmen dieser Arbeit Wände und Decken betrachtet.

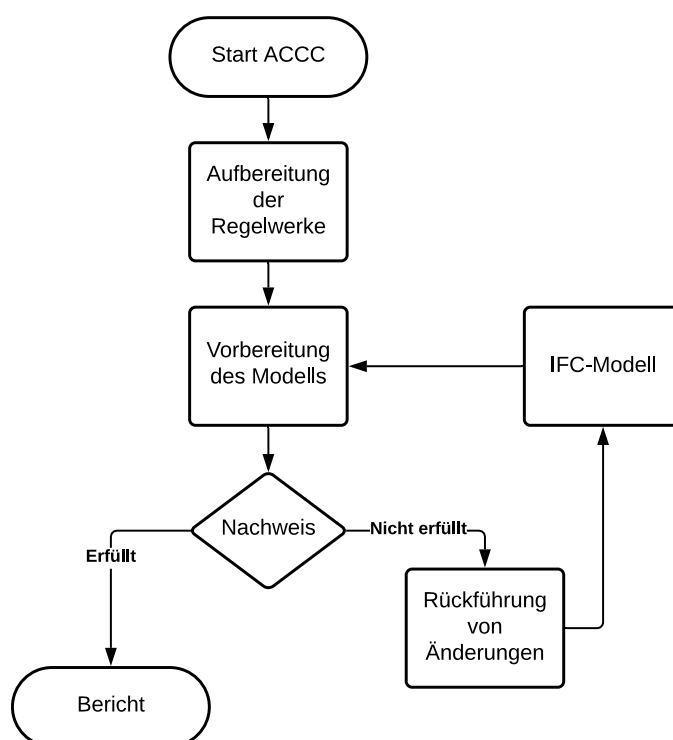


Abbildung 7-1: Ablauf des ACCC

7.1.1 Phase 1: Aufbereitung der Regelwerke

Wie in Abschnitt 5.2 erläutert, bietet die für den Schallschutz in Deutschland relevante Norm DIN 4109 nur Mindestanforderungen. Für einen üblichen Standard an Komfort sind jedoch höhere Anforderungen nötig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die von Blödt et al. definierten Zielwerte gewählt (siehe Abbildung 7-2). Diese sind explizit für den Holzbau formuliert, können aber auch darüber hinaus verwendet werden, insbesondere für Mischbauweisen. Die Autor*innen unterscheiden drei Komfortstufen: „Basis“ entspricht den Mindestanforderungen der DIN 4109-1, „Basis+“ stellt ein mittlerer Standard mit verbessertem Trittschall dar, und „Komfort“ spiegelt einen erhöhten Schallschutz mit besonders berücksichtigtem Trittschall dar. Die übliche Vereinbarung entspricht „Basis+“, welche daher im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

1	Schallschutzniveau		
	2	3	4
Bauteil / Übertragungsweg:	BASIS Δ DIN 4109-1:2018	BASIS +	KOMFORT
1 Wohnungstrennwand	$R'_{w} \geq 53$ dB	$R'_{w} \geq 56$ dB	$R'_{w} \geq 59$ dB
2 Reihenhaustrennwand	$R'_{w} \geq 62$ dB	$R'_{w} \geq 62$ dB $R_w + C_{50,5000} \geq 62$ dB ^{1) 5)}	$R'_{w} \geq 67$ dB $R_w + C_{50,5000} \geq 65$ dB ^{1) 5)}
3 Wohnungstrenndecke	$R'_{w} \geq 54$ dB	$R'_{w} \geq 57$ dB	$R'_{w} \geq 60$ dB
4 Wohnungstrenndecke Trittschallpegel	$L'_{n,w} \leq 53$ dB ³⁾	$L'_{n,w} \leq 50$ dB $L_{n,w} + C_{L50,2500} \leq 50$ dB ²⁾	$L'_{n,w} \leq 46$ dB $L_{n,w} + C_{L50,2500} \leq 47$ dB ²⁾
5 Dachterrassen und Loggien mit darunterliegenden Wohnräumen	$L'_{n,w} \leq 50$ dB	$L'_{n,w} \leq 50$ dB	$L'_{n,w} \leq 46$ dB
6 Decken unter Laubengängen (in alle Schallausbreitungsrichtungen)	$L'_{n,w} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 50$ dB	$L'_{n,w} \leq 46$ dB
7 Treppenlauf und Treppenpodest	$L'_{n,w} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 50$ dB	$L'_{n,w} \leq 46$ dB
8 Außenlärm nach Lärmpegelbereich und Anforderungen der DIN 4109			Anforderungen nach DIN 4109 inkl. Berücksichtigung $C_{1,50-5000}$ für das opake Bauteil ⁴⁾
9 Weitere Bauteile	nach DIN 4109-1:2018	nach DIN 4109-1:2018	nach DIN 4109-5:2019 ⁶⁾

¹⁾ ergänzender Luftschallanforderungswert nur ans Bauteil ohne Flanken
²⁾ ergänzender Trittschallanforderungswert nur ans Bauteil ohne Flanken
³⁾ Sonderregelung für Deckenkonstruktionen, die der DIN 4109-33:2016 zuzuordnen sind, ansonsten $L'_{n,w} \leq 50$ dB
⁴⁾ Für Fensterflächenanteile über 30% gesonderte Betrachtung, reine Bauteilanforderung
⁵⁾ Anforderung an die Doppelschalenwand, beide Wände
⁶⁾ nach jeweils gültiger Fassung oder E-DIN 4109-5:2018

Abbildung 7-2: Zielwerte für Schallschutznachweise in drei Abstufungen (Blödt et al., 2019, S. 13)

Für Außenbauteile werden die Regelungen der DIN 4109 herangezogen. Die erforderlichen Werte für das bewertete Schalldämm-Maß sind dabei abhängig vom maßgeblichen Außenlärmpegel. Dieser ist projektabhängig und kann im Rahmen dieser Arbeit

nicht mitbestimmt werden. Daher wird von einem niedrigen bis mittlerem Außenlärmpegel im Lärmpegelbereich III von 65 dB ausgegangen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., S. 19 Tabelle 7). Für Wohnräume ergibt sich daraus ein $R'_{w,erf}$ von 35 dB. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., S. 18)

Bezogen auf die vier Arten von Regeln aus Abschnitt 6.1 handelt es sich hierbei um eine Regel der Klasse 1), die nur eine begrenzte Anzahl an expliziten Daten benötigt. Daher kann auch ein Ansatz der „Black-Box-Methode“ nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Dafür werden die erforderlichen Werte in Form von CSV-Dateien hinterlegt, welche in Tabelle 7-1 für den Luftschall und Tabelle 7-2 für den Trittschall angeführt sind. Diese, sowie die Informationen für die Luftschallnachweise, werden innerhalb des Programms eingelesen und entsprechend den Informationen für die Nachweisführung interpretiert.

Tabelle 7-1: Erforderliche Werte für Luftschallnachweise (Blödt et al., 2019, S. 13; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., S. 18–19; Willems et al., 2020, S. 160)

Bauteil	$R'_{w,erf}$ in dB	u_{prog} in dB	Nachweis
Außenwand	35	2	R'_{w}
Gebäudetrennwand	62	2	R'_{w}
Gebäudetrennwand	62	2	$R_w + C_{50-5000}$
Wohnungstrennwand	56	2	R'_{w}
Wohnungstrenndecke	57	2	R'_{w}

Tabelle 7-2: Erforderliche Werte für Trittschallnachweise (Blödt et al., 2019, S. 13; Willems et al., 2020, S. 160)

Bauteil	$L'_{n,w,zul}$ in dB	u_{prog} in dB	Nachweis
Wohnungstrenndecke	50	3	$L'_{n,w}$
Wohnungstrenndecke	50	3	$L_{n,w} + C_{1,50-2500}$

Die Spalte „Nachweis“ bezieht sich dabei auf den entsprechenden Nachweis aus Abbildung 7-2 für „Basis+“ unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Sicherheitsbeiwertes (u_{prog}).

7.1.2 Phase 2: Vorbereitung des Gebäudemodells

In der Phase der Vorbereitung soll das Gebäudemodell überprüft und aufbereitet werden, sodass im Folgenden die für die Nachweisführung notwendigen Informationen bereitgestellt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Gebäudemodelle im IFC-Format betrachtet. Dabei findet vor allem das Modell aus Kapitel 4 Verwendung, sowie leicht modifizierte Versionen davon. Darüber hinaus werden einzelne Bauteile von *LignumData* zur Überprüfung und Validierung des Codes verwendet. Dazu werden die Bauteile manuell angepasst.

Im Allgemeinen werden drei Schritte durchlaufen: Auslesen der Bauteile aus einem IFC-Modell, Ermittlung der schalltechnischen Eigenschaften und der Funktionalität jedes Bauteils. Die Umsetzung dieser Schritte ist in Abbildung 7-3 dargestellt und wird im folgenden Abschnitt erläutert. Damit der Ablauf auf diese Weise möglich ist, werden Anforderungen an das Modell gestellt. Sie werden in Abschnitt 7.1.2.2 aufgeführt.

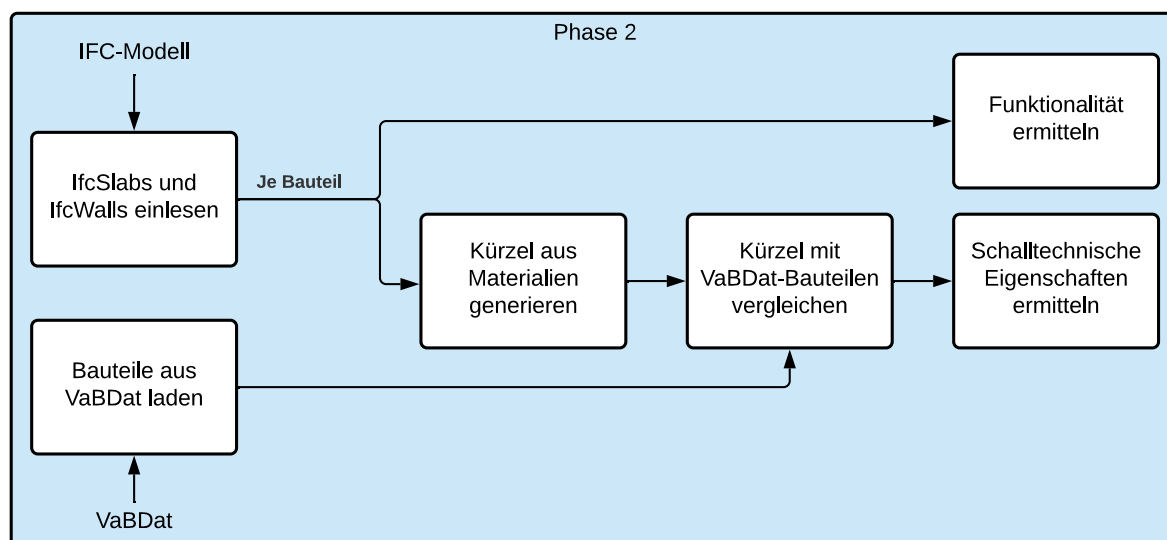


Abbildung 7-3: Übersicht Phase 2

7.1.2.1 Vorgehensweise

Im ersten Schritt werden alle Instanzen der Typen `IfcSlab` und `IfcWall` aus dem IFC-Modell ausgelesen. Um die Überprüfung auf Einhaltung der Schallschutzanforderungen durchzuführen, werden Informationen zu den schalltechnischen Eigenschaften der Konstruktion und zur Funktionalität der Bauteile benötigt.

Bei Wänden werden die Funktionalitäten Innenwand, Außenwand, Wohnungstrennwand und Gebäudetrennwand unterschieden. Zur Bestimmung wird der in Abbildung 7-4 dargestellte Prozess durchlaufen. Bei `IfcSlab` werden im Rahmen dieser Arbeit nur Decken betrachtet. Dabei werden Innendecken und Wohnungstrenndecken differenziert. Für die Unterscheidungen müssen die Modellierungsanforderungen, die in Abschnitt 7.1.2.2 vorgestellt werden, erfüllt sein.

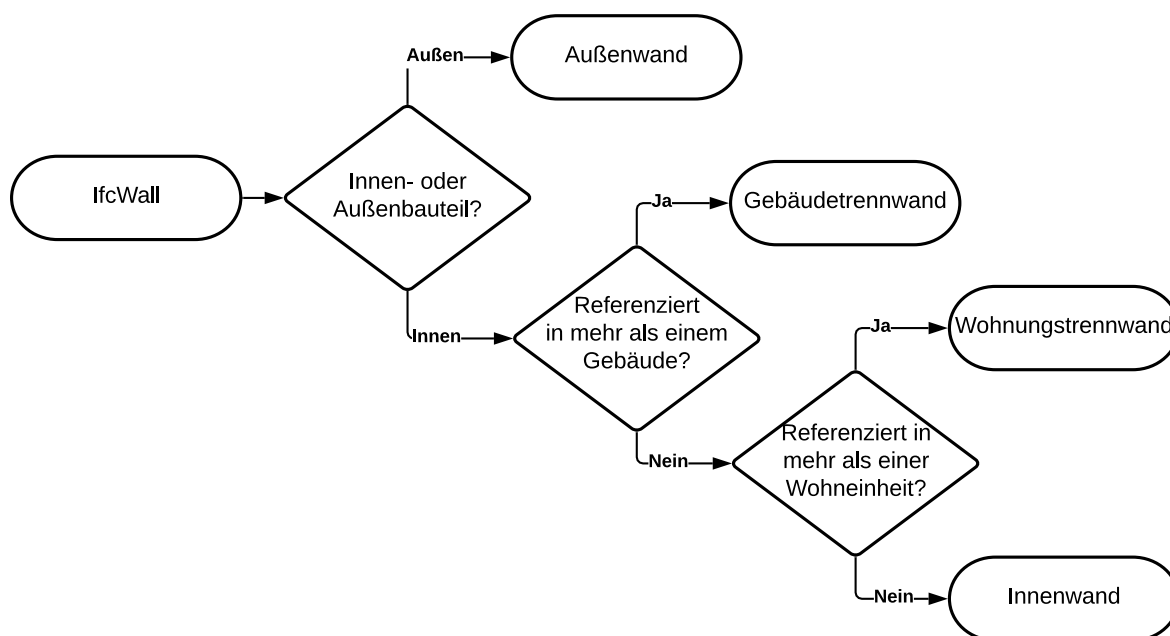


Abbildung 7-4: Entscheidungsdiagramm für die Funktionalität der Wandbauteile

Die schalltechnischen Eigenschaften der Konstruktion unterteilen sich in zwei Kategorien: Bauteilspezifische Kennzahlen und quantifizierte Bewertungen der Stoßstellen. Das Erkennen und automatisierte Bewerten von letzteren in IFC-Modellen ist Gegenstand aktueller Forschung (z.B. Châteauvieux-Hellwig et al., 2021). Daher steht im Rahmen dieser Arbeit nur die Ermittlung der schalltechnischen Eigenschaften der Bauteile selbst im Fokus.

Diese können mithilfe von `IfcPropertySet` direkt im Modell enthalten sein. Allerdings gibt es dafür keine vordefinierten Vorlagen. Dies bedeutet, dass Werte zwar hinterlegt sein können, es aber keine standardisierte Form und damit Abfragemöglichkeit gibt. Zudem sind sie in der Praxis nur selten hinterlegt. Daher werden möglicherweise hinterlegte `IfcPropertySet` hier nicht betrachtet.

Stattdessen müssen die entsprechenden Werte von externen Quellen bezogen werden. Die Datenquelle dieser Arbeit ist die in Abschnitt 5.3.1 vorgestellte Datenbank

VaBDat (Technischen Hochschule Rosenheim). Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt über einer REST-API-Schnittstelle. Mithilfe von `System.Net.HttpWebRequest`⁶ können alle Bauteile aus *VaBDat* in die Programmierumgebung geladen werden. Die Aufbereitung erfolgt mittels `System.Xml.Linq.XDocument`⁷.

Für den Abgleich eines Bauteils aus dem Modell mit der Datenbank wird ein Kürzel entsprechend der Kürzel-Logik von *VaBDat* erstellt (siehe Abschnitt 5.3.1). Die Grundlage dieser Klassifizierung ist die Benennung der `IfcMaterial` und `IfcMaterialLayer`, sowie die Dicke des `IfcMaterialLayer`. Damit diese Klassifizierung erfolgreich ist, müssen einige Anforderungen beachtet werden. Diese werden in Abschnitt 7.1.2.2 erläutert.

Anschließend wird auf Grundlage des Kürzels in den Datensätzen von *VaBDat* nach einem entsprechenden Eintrag gesucht. Dafür wird das Kürzel des Bauteils aus dem Modell mit den Bauteilen aus *VaBDat* verglichen. Es werden verschiedene Fälle unterschieden:

- 1) Ein identisches Bauteil wird gefunden
- 2) Ein identisches Bauteil abgesehen vom Dämmmaterial wird gefunden
- 3) Ein identisches Bauteil abgesehen von den Schichtdicken wird gefunden
- 4) Ein Bauteil bestehend aus der Tragstruktur wird gefunden
- 5) Bauteile, die die gleiche Tragstruktur enthalten, werden gefunden

Die Wertigkeit der Übereinstimmung nimmt dabei von oben nach unten ab. Die passendste Übereinstimmung sowie alle Bauteile aus Punkt 5) werden anschließend in einer Textdatei aufgelistet. Grund hierfür ist, dass die letzte Entscheidung, welches Bauteil am passendsten ist, auf persönlichen Erfahrungswerten beruht und daher von den Ingenieur*innen getroffen werden muss. Der identifizierte Datensatz aus *VaBDat* enthält schalltechnische Eigenschaften, welche für den Nachweis herangezogen werden können.

⁶ <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/api/system.net.httpwebrequest?view=net-5.0>

⁷ <https://docs.microsoft.com/de-de/dotnet/api/system.xml.linq.xdocument?view=net-5.0>

7.1.2.2 Anforderungen an das Modell

Damit die Schallschutzüberprüfung gelingt, muss das Modell bestimmte Anforderungen erfüllen. Grundsätzlich sollte das Modell eine möglichst gute Qualität aufweisen (siehe Abschnitt 2.5.2). Im Rahmen dieser Anwendung sind jedoch nicht alle Kriterien einer guten Qualität nötig, um eine korrekte Durchführung zu garantieren. Zudem gibt es darüber hinaus Informationen, die dringend benötigt werden, um eine Überprüfung des Schallschutzes durchzuführen. Die wichtigsten Anforderungen für den gegebenen Kontext werden im Folgenden erläutert.

Anforderungen bezüglich der Schalleigenschaften

Wie beschrieben erfolgt die Ermittlung der Schalleigenschaften der Bauteile durch die Datenbank *VaBDat*. Deren Klassifizierung funktioniert mit Kürzeln, die auf den Materialien basieren. Um die Materialien abzurufen, wird eine Modellierung analog zu Abbildung 4-2 in Abschnitt 4.2.1 erwartet. Optional ist dabei die Verbindung `IfcRelAssociatesMaterial` zwischen `IfcWall` und `IfcMaterialLayerSetUsage`. Ebenso kann `IfcMaterialLayerSetUsage` weggelassen werden und `IfcRelAssociatesMaterial` direkt auf `IfcMaterialLayerSet` verweisen.

Für die Benennung der `IfcMaterial` und `IfcMaterialLayer` gibt es aus dem IFC-Format keine vorgeschriebenen Regeln. Für die Ermittlung des Bauteilaufbaus sind sie jedoch die einzige Informationsquelle. Daher müssen zur automatisierten Analyse Anforderungen an ihre Benennung gestellt werden. Wie zuvor beschrieben gliedert sich die Datenquelle *VaBDat* in Kategorien und Varianten. Für die Implementierung wurden daher folgende Benennungsregeln festgelegt: Das Attribut `Name` von `IfcMaterialLayer` enthält ein Stichwort für die Kategorie, das Attribut `Name` von `IfcMaterial` enthält ein Stichwort für die Variante. Als charakteristischer Kennwert wird in der Regel die Dicke aus dem Attribut `LayerThickness` des `IfcMaterialLayer` genommen. Ausnahmen hiervon gibt es für Trittschalldämmungen und Beschwerungen, die in *VaBDat* eine andere Größe als die charakteristische Kenngröße hinterlegt haben. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kenngröße an diesen Stellen daher weggelassen. Dies ist für die gegebene Anwendung ausreichend genau. Die Stichwortzuweisung von Materialnamen zu Kategorien oder Varianten findet sich in Anhang B. Sie basiert auf den in der Dokumentation von *VaBDat* definierten Begriffen.

In Abbildung 7-5 ist ein Beispiel für eine `IfcPlate` abgebildet. Dessen `IfcMaterialLayer` hat den Namen „Außenputz“ und `LayerThickness` 8. Das zugehörige `IfcMaterial` trägt den Namen „Zementputz“. Daraus ergibt sich das Kürzel „pCE8“.



Abbildung 7-5: Beispiel für die Kürzelerstellung einer `IfcPlate` dargestellt in `XbimXplorer`

Der Name eines Materials darf aus mehr als nur den zugelassenen Stichwörtern bestehen. Beispielsweise könnte zusätzlich der Name der herstellenden Firma enthalten sein. Mehrdeutige Namen wie „Putz zur Verwendung auf Werkstoffplatten“ sind dagegen nicht erlaubt. Es gibt zwei Ausnahmen, bei denen nicht verhindert werden kann, dass zwei Schlagwörter innerhalb eines Namens verwendet werden:

- Name mit „Dämmung“ und „Platte“ (z.B. „Holzfaserdämmplatte“) → Dämmung wird gewählt
- Name mit „Trittschalldämmung“ und somit auch „Dämmung“ → Trittschalldämmung wird gewählt

Jedes `IfcMaterialLayer` sollte einer physischen Schicht im Bauteil entsprechen. Dadurch entspricht die Summe über die Dicken der `IfcMaterialLayer` der Gesamtdicke des Bauteils. Schichten, die aus mehreren Materialien bestehen, müssen über den in Abbildung 4-2 gezeigten Umweg modelliert werden. Dabei wird ein Stellvertretermaterial definiert, das über `IfcMaterialRelationship` mit den tatsächlichen Materialien verbunden ist. In diesem Fall werden nur die Namen der tatsächlichen Materialien betrachtet. Sie müssen sowohl ein Stichwort für die Kategorie als auch für die Variante enthalten. Schichten ohne geometrische Modellierung, wie Informationen zu

Verbindungen der Schichten, sollten möglichst nicht als `IfcMaterialLayer` in der IFC-Datei angelegt sein, da sie über die Stichwortzuweisungen nicht abgedeckt sind.

Bei einer manuellen Anpassung der Namen in der IFC-Datei muss beachtet werden, dass Umlaute derzeit entsprechend ISO 10646 repräsentiert werden müssen. Zum Beispiel muss ein kleines „ä“ als „\X\E4“ angegeben werden. Bei einem Export aus BIM-Software geschieht dies automatisch. (buildingSMART Technical, 2020)

Anforderungen bezüglich der Funktionalität

Darüber hinaus sind weitere Anforderungen nötig, um die Funktionalität der Bauteile zu identifizieren. Bei `IfcSlab`-Elementen müssen Bodenplatten, Decken und Dächer unterschieden werden. Dafür muss das Attribut `PredefinedType` die entsprechende Information enthalten. Bei `IfcWall` ist eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenwänden nötig. Die entsprechende Information muss im `IfcPropertySet` „Pset_WallCommon“ im Attribut `IsExternal` hinterlegt sein. Das `IfcPropertySet` kann dabei entweder der `IfcWall` oder dem zugehörigen `IfcWallType` zugeordnet sein.

Außerdem müssen trennende Bauteile zwischen Wohnungseinheiten oder Gebäuden identifiziert werden, da sie andere Anforderungen bezüglich des Schallschutzes erfüllen müssen. Dafür sollen Wohnungseinheiten jeweils als `IfcZone` modelliert werden. Hierdurch können beispielsweise die Wände dazwischen als Wohnungstrennwände erkannt werden. Bei Reihenhäusern ist jeder Teil des Hauses als eigenes `IfcBuilding` zu modellieren, inklusive der entsprechenden Bauteilzuweisungen, um Gebäudetrennwände erkennen zu können.

7.1.3 Phase 3: Überprüfung auf Einhaltung des Nachweises

Mit dem Regelwerk aus Phase 1 (Abschnitt 7.1.1) und dem in Phase 2 analysierten Modell (Abschnitt 7.1.2) kann nun in Phase 3 die Überprüfung auf Einhaltung des Schallschutznachweises erfolgen. Eine schematische Darstellung der Zusammenführung der Informationen wird in Abbildung 7-6 gezeigt.

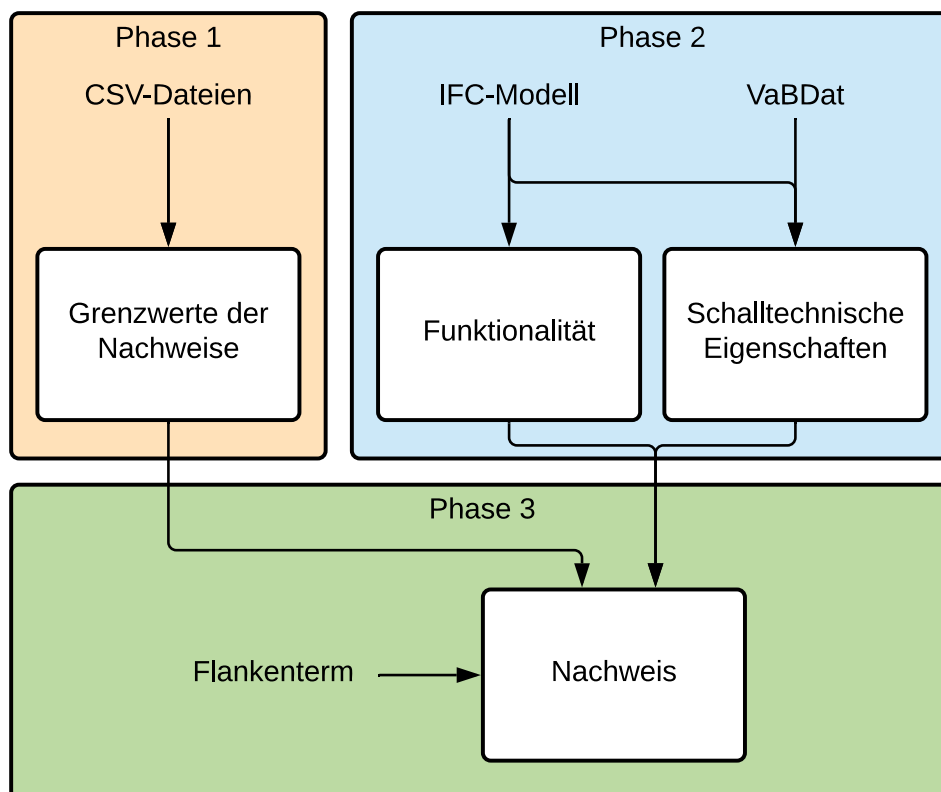


Abbildung 7-6: Übersicht über die Zusammenführung der Informationen in Phase 3

Neben den Informationen aus Phase 1 und 2 werden zum Nachweis auch die Terme zur Flankenübertragung benötigt. Da diese nicht im Rahmen dieser Arbeit ermittelt werden, muss dieser Beitrag extern berechnet und anschließend über die Konsole eingegeben werden. Dabei soll jeweils das Ergebnis der rot markierten Berechnung in Abbildung 7-7 bzw. Abbildung 7-8 je Bauteil und Nachweis eingegeben werden.

$$R'_{w} = - \left(10 \lg \left(10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Pf,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{nj,w}/10} \right) \right) \text{ dB}$$

Abbildung 7-7: Markierter Flankenterm für die Berechnung von R'_{w} (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017a, S. 22)

$$L'_{n,w} = \left(10 \lg \left(10^{L_{n,d,w}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij,w}/10} \right) \right) \text{ dB}$$

Abbildung 7-8: Markierter Flankenterm für Berechnung von $L'_{n,w}$ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017b, 21)

Die Überprüfung selbst wird je Bauteil durchgeführt. Dafür werden im ersten Schritt die zu führenden Nachweise bestimmt. Diese hängen von der Funktionalität und Art des Bauteils ab. So sind beispielsweise für Innenwände innerhalb einer Wohneinheit keine Nachweise zu führen, für Innenwände zwischen Wohnungseinheiten jedoch schon. Die Einhaltung der Anforderungen aus Abschnitt 7.1.2.2 sind bei diesem Schritt besonders wichtig. Bei Wänden werden Außenwände, Gebäudetrennwände, Wohnungstrennwände und Innenwände unterschieden. Decken können Wohnungstrenndecken oder Innendecken sein.

Anschließend werden die schalltechnischen Bauteilkennwerte des passendsten Datensatzes aus *VaBDat* bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine zwischengeschaltete Expertenüberprüfung der Bauteilkennwerte verzichtet. Abhängig vom Nachweis kann nun der Wert für R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ mit dem eingegebenen Flankenterm berechnet werden. Es werden auch der Sicherheitsbeiwert und falls erforderlich die Spektrum-Anpassungswerte berücksichtigt.

Damit wird nun der passende Nachweis aus Formel (2) bzw. (3) (Abschnitt 5.2) mit den erforderlichen bzw. zulässigen Grenzwerten durchgeführt. Ist der Nachweis erfüllt, so kann mit dem nächsten Nachweis bzw. nächstem Bauteil fortgefahren werden. Ist der Nachweis nicht erfüllt, so wird das Modell falls möglich mit einem passenden Bauteil modifiziert. Dieser Prozess wird in Abschnitt 0 geschrieben. Um bei mehreren Nachweisen sicherzustellen, dass die letzte Aktualisierung des Bauteils auch alle vorherigen Nachweise erfüllt, erfolgt zum Schluss eine nochmalige Überprüfung.

7.1.4 Phase 4: Bericht

Nachdem der Nachweis in Phase 3 durchgeführt wurde, müssen die Ergebnisse auf verständliche Art und Weise an die Nutzenden übermittelt werden. Für den gegebenen Fall wird eine Textdatei gewählt. In dieser wird für jedes Bauteil die gewählten Kennwerte angegeben. Anschließend wird jeweils das Ergebnis des/der Nachweise(s) aufgeführt, sowie gegebenenfalls die Maßnahmen der Rückführung. Das Ergebnis mit beispielhaften Dateien wird in Abschnitt 7.2.2 erläutert.

7.1.5 Phase 5: Rückführung der identifizierten Fehler

Ergibt der Nachweis aus Phase 3, dass Bauteile die geforderten Werte nicht einhalten, so muss das Modell überarbeitet, und ein geeigneteres Bauteil übernommen werden. Dies kann sowohl manuell als auch automatisiert erfolgen. Diese automatisierte Verbesserung und Rückführung identifizierten Fehler entspricht einer Art „Heilungsprozess“ des Modells. Es werden Anpassung innerhalb des Freiheitsgrades des Entwurfs vorgenommen, um erkannte Probleme des Überprüfungsprozesses zu beheben. Angelehnt an das Reparieren von geometrischen Modellen (z.B. Chong et al., 2007), wird dies im Rahmen dieser Arbeit als „Model Healing“ bezeichnet. Es wird exemplarisch gezeigt, wie dieser Prozess im Rahmen eines ACCC automatisiert erfolgen kann.

Im ersten Schritt muss die geforderte Anforderung an das Bauteil ermittelt werden. Aufgrund nicht-linearer Abhängigkeiten ist die Berechnung eines einzelnen Wertes nicht möglich. Im Folgenden wird dies an einem Beispiel erläutert. Aus dem Nachweis für den Luftschall (Formel (2)) folgt, dass sich der minimale Wert für R'_w wie in Formel (4) berechnet. Diese Gleichung lässt sich lösen. Löst man nun die Berechnung von R'_w nach R_w auf, so hängt dies von den Flankentermen ab. Diese werden jedoch von der Wahl des Bauteils beeinflusst, welches wiederum den Wert von R_w bestimmt. Eine rechnerische Lösung ist also nicht möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass die Flankenterme beim Wechsel des Bauteils konstant bleiben. Dies entspricht dem gängigen Vorgehen, bei dem man sich iterativ der Lösung annähert. Die Berechnung für $R_{w,min}$ ist in Formel (5) angegeben, wobei für $t_{Flanken}$ das Ergebnis der Flankenterme des ursprünglichen Bauteils eingesetzt wird.

$$R'_{w,min} = R'_{w,erf} + u_{prog} \quad (4)$$

$$R_{w,min} = (-10) * \lg \left(10^{\frac{R'_{w,min}}{10}} - t_{Flanken} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

Im nächsten Schritt werden alle Bauteile mit gleicher Funktion aus $VaBData$ ausgewählt, die die ermittelten Anforderungen an R_w bzw. $L_{n,w}$ erfüllen. Anschließend wird aus diesen Bauteilen das Geeignetste ermittelt. Grundsätzlich ist eine ähnliche Bauweise, also insbesondere dieselbe Tragstruktur, wünschenswert. Zur Beurteilung der Geeignetheit der Bauteile wird folgende Skala verwendet:

100% identische Bauteile

90% identische Bauteile abgesehen von der Dämmung

80% identische Bauteile abgesehen von den Dicken

50% Bauteile mit gleicher Tragstruktur

40% Bauteile mit gleicher Tragstruktur aber verschiedener Dicke

10% Bauteile mit gleicher Anzahl an Schichten

0% keine Übereinstimmung

Diese Skala ähnelt der in Abschnitt 7.1.2.1 vorgestellten Beurteilung von Bauteilen. Sie kann mit weiteren Erfahrungswerten und Erkenntnissen ergänzt werden.

Das *VaBDat*-Bauteil mit höchster Übereinstimmung wird anschließend erstellt. Der Ausgangspunkt ist dafür das *VaBDat*-Kürzel des Bauteils. Hieraus werden die *IfcMaterialLayer* (mit allen untergegliederten Instanzen), die Geometrie beschrieben durch *IfcPlate* und *IfcMember* und ein neuer *IfcBuildingElementType* erstellt. Dafür werden die Positionierung und Dimension der vorherigen Geometrie (so weit möglich) verwendet. Anschließend werden die Materialien, die Geometrie, und der Typ des Bauteils aus dem IFC-Modell durch die jeweils neu erstellten Instanzen ersetzt.

Bei der Erstellung der *IfcPlate* und *IfcMember* auf Grundlage des *VaBDat*-Kürzels kommen die Stichwortzuweisungen aus Abschnitt 7.1.2.1 (und Anhang B) in invertierter Richtung zum Einsatz. Die Funktionen zur Erstellung der geometrischen Elemente sind in der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Library *XbimBuildingComponentLibrary* enthalten.

7.2 Ergebnisse anhand eines Anwendungsbeispiels

Die Schritte aus dem vorigen Abschnitt wurden in einem *C#*-Programm umgesetzt. Damit wird ein Modell, das entsprechende Anforderungen erfüllt, auf Übereinstimmung mit definierten Schallschutzanforderungen überprüft. Ist der Nachweis für ein Bauteil nicht erfüllt, so wird es, wenn möglich, durch ein passendes Bauteil ersetzt. Die Ergebnisse des Prozesses werden mithilfe von zwei Textdateien an die Nutzenden kommuniziert. Bei der Umsetzung offenbaren sich auch Probleme, die sich durch das IFC-Schema oder die Implementierung ergeben.

7.2.1 Programmierung

Das Project „CodeComplianceCheck“ enthält alle Funktionen zur automatisierten Überprüfung. Darüber hinaus greift es auf die im ersten Teil der Arbeit erstellte Library „XbimBuildingComponentLibrary“ für die Erstellung eines aktualisierten Bauteils zurück. Darüber hinaus verwendet das Projekt das Package *Xbim.Essentials*, welches die Implementierung des IFC-Schemas enthält. Die Funktionalität besteht daher vor allem aus Funktionen, die diese Klassen entsprechend den Anforderungen auslesen oder erstellen. Zur Strukturierung wurden einige wenige Klassen erstellt. Die Wichtigsten sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Die Vererbungshierarchie mit abstrakten Klassen (kursiver Name im Diagramm) ermöglicht Funktionen, die für alle Instanzen der Unterklassen verwendbar sind.

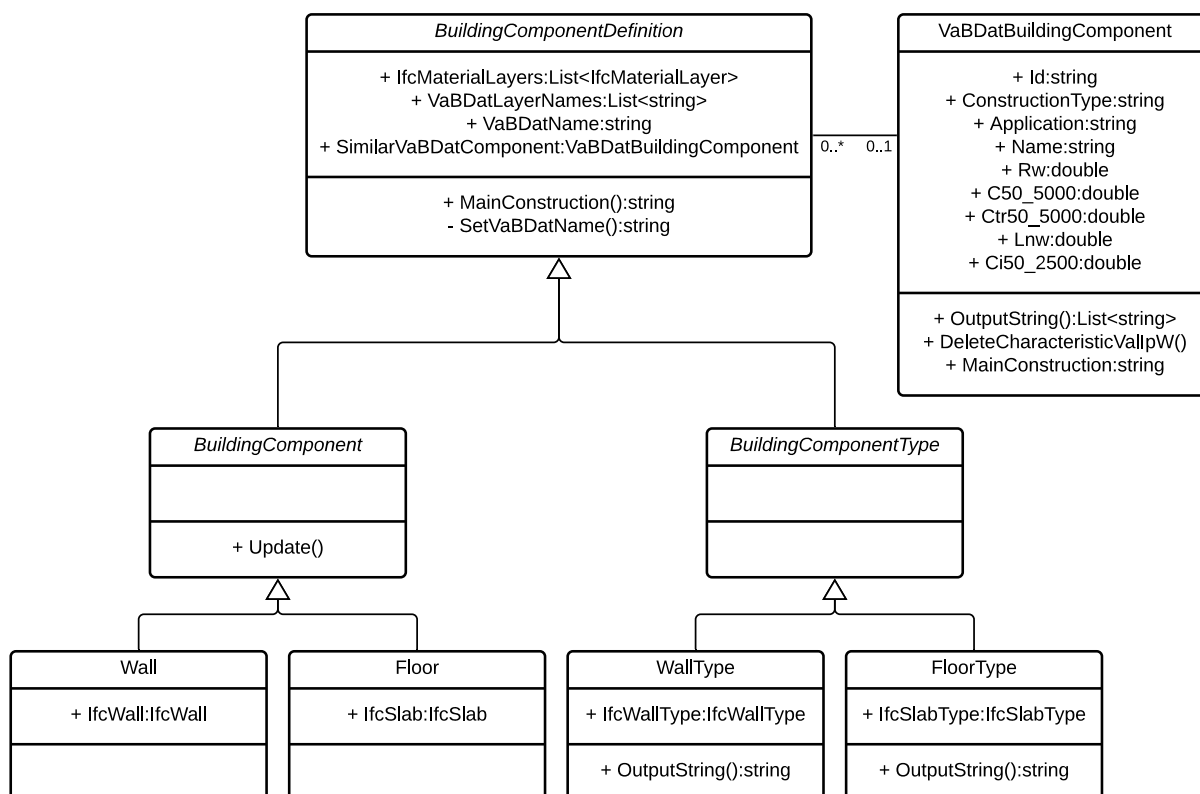


Abbildung 7-9: UML-Klassendiagramm für die wichtigsten Klassen des Projekts

„CodeComplianceCheck“

Alle Funktionen des Projektes sind in Anhang A aufgeführt und beschrieben.

7.2.2 Output

Das Programm generiert zwei Textdateien mit Informationen, sowie das aktualisierte Modell (unter neuem Namen). Auf diese drei Dateien wird im Folgenden näher eingegangen.

7.2.2.1 Report Analysis

Die Datei „ReportAnalysis.txt“ enthält Informationen zur Analyse aller Wand- und Deckenbauteile des IFC-Modells bezogen auf ihre schalltechnischen Eigenschaften. Es wird das Ergebnis des in Phase 2 durchgeführten Abgleichs mit der *VaBDat*-Datenbank ausgegeben. Dabei werden die Wand- und Deckenentitäten gebündelt und anhand ihres `IfcBuildingElementType` analysiert. Diese Datei dient der manuellen Überprüfung der Ergebnisse. Zuerst wird je Bauteil der am besten übereinstimmende Datensatz der Datenbank angegeben und anschließend mögliche andere ähnliche Bauteile. Mit dem zugehörigen Expertenwissen kann nun entschieden werden, welches Bauteil tatsächlich am nächsten an das Vorhandene herankommt. Ein Ausschnitt aus einer exemplarischen Datei ist in Abbildung 7-10 gezeigt.

```
WallType #30 for Walls #162 #383 #556 #729 #860 #985 with shortcut B_pCE8_iWF60_jWS160||iCF160_b0SB15
  Identical entry:
    Id: 296
    Name: B_pCE8_iWF60_jWS160||iCF160_b0SB15
    ConstructionType: timber frame construction (TFC)
    Application: Außenwand
    Rw: 46
    C50_5000: -2
    Ctr50_5000: -8
  Related entries containing the supporting structure:
    Id: 297
    Name: B_pCE8_iWF60_jWS160||iCF160_b0SB15_bGF12
    ConstructionType: timber frame construction (TFC)
    Application: Außenwand
    Rw: 51
    C50_5000: -2
    Ctr50_5000: -6
    Id: 298
    Name: B_iWF60_jWS160||iCF160_b0SB15
    ConstructionType: timber frame construction (TFC)
    Application: Außenwand
    Rw: 42
    C50_5000: -2
    Ctr50_5000: -7
```

Abbildung 7-10: Ausschnitt aus „ReportAnalysis.txt“ für ein Beispielgebäude

7.2.2.2 Report Compliance Check

In der Datei „ReportComplianceCheck.txt“ werden die Ergebnisse des ACCC ausgegeben. Dabei werden je Bauteil die verwendeten schalltechnischen Eigenschaften, die Funktion des Bauteils und die Ergebnisse aller durchgeführten Nachweise aufgeführt.

Bei nicht erfülltem Nachweis und anschließendem Model Healing sind der Name und die schalltechnischen Eigenschaften des modifizierten Bauteils angegeben. Der Ausschnitt eines Beispiels findet sich in Abbildung 7-11.

```
Wall #1112 with shortcut B_b0SB75:
  Assigned properties:
    Id: 300
    Name: B_b0SB75
    ConstructionType: brettstapel (BST)
    Application: Innenwand
    Rw: 34
    C50_5000: -7
    Ctr50_5000: -8
  Check for Wohnungstrennwand
  Code Rw not fulfilled
  Replaced with: B_bGF12_frT120||iMW100_a0105_frT120||iMW100_bGF12
    Id: 131
    Name: B_bGF12_frT120||iMW100_a0105_frT120||iMW100_bGF12
    ConstructionType: timber frame construction (TFC)
    Application: Gebäudetrennwand
    Rw: 66
    C50_5000: -4
    Ctr50_5000: -16
```

Abbildung 7-11: Ausschnitt aus „ReportComplianceCheck.txt“ für ein Beispielgebäude

7.2.2.3 Aktualisiertes Modell

Das aktualisierte Modell nach dem Model Healing wird am selben Ort wie das Original mit dem Zusatz „_modified“ gespeichert. Es enthält das ursprüngliche Modell, bei dem alle Bauteile ersetzt wurden, welche die Anforderungen nicht erfüllt haben und für die die Datenbank *VaB* einen anforderungserfüllenden Datensatz enthält. Dabei stimmen die Positionierung und Bauteilfläche der modifizierten Bauteile mit den Ursprünglichen überein. Die Dicke bei Wänden bzw. Höhe bei Decken kann jedoch abhängig vom Bauteilaufbau variieren.

7.2.3 Probleme

Bei der Modellierung und Programmierung traten verschiedene Probleme auf. Diese hängen überwiegend mit dem gewählten Vorgehen des Model Healings bei nicht eingehaltenen Nachweisen zusammen. Der Ansatz in dieser Arbeit war, die Geometrien und Materialien der entsprechenden Bauteile durch Modifizierte zu ersetzen. Dies birgt jedoch einige Probleme, da sich besonders die Geometrien nicht eins zu eins ersetzen lassen. Beispielsweise entstehen im Gebäude an den Außenecken Überlappungen bzw. Lücken, wenn modifizierte Bauteile größer bzw. kleiner als die ursprünglichen sind. Erkennbar ist dies beispielsweise in Abbildung 7-12, die dasselbe Detail vor und nach der Modifikation zeigen. Ein weiteres Beispiel hierfür ist Abbildung 7-13 (Links),

bei dem der modifizierte Fußbodenaufbau im Vergleich niedriger ist und somit die Wände über der Decke schweben.

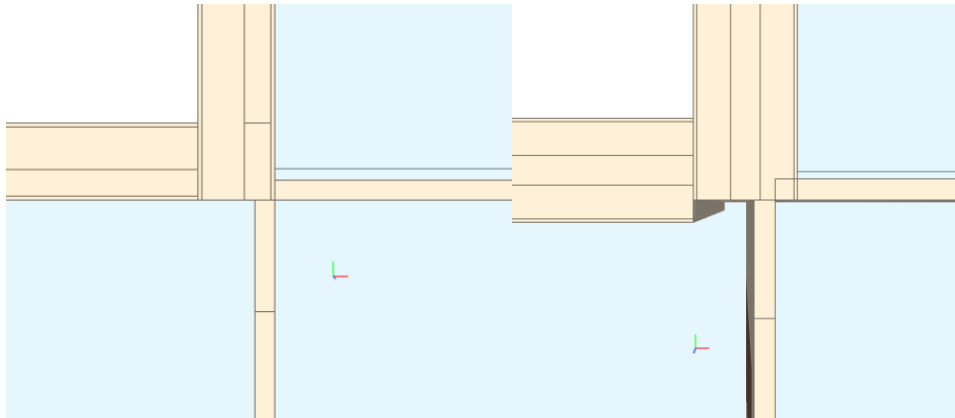


Abbildung 7-12: Wanddetail in Draufsicht vor (Links) und nach (Rechts) der Modifikation in *BIMvision*

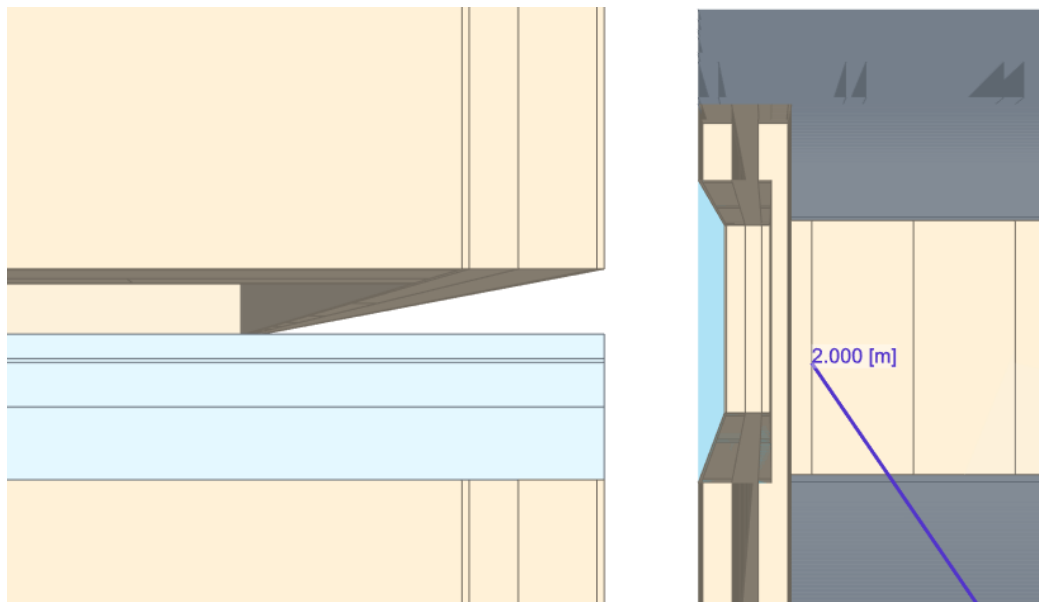


Abbildung 7-13: Seitenansicht Übergang Decke zu Wand (Links) und Schnitt durch Fenster (Rechts) in *BIMvision*

Ein ähnliches Problem zeigt sich bei den Fensteröffnungen und Fensterelementen. Diese haben dieselbe Dicke wie die umliegende Wand und aktualisieren sich nicht automatisch, wenn sich die Dicke der Wand ändert (siehe Abbildung 7-13 (Rechts)). Ebenso kann die geometrische Beschreibung von `IfcSpace` nach einer Modifikation nicht mehr der tatsächlichen Raumfläche entsprechen.

Ein weiteres Problem ist die starke Abhängigkeit von der Modellierung. Deutlich wird dies, wenn beispielsweise eine Innenwand aus vielen 1 m langen, hintereinander positionierten Elementen besteht. Aus dieser Modellierung lässt sich zunächst nicht erkennen, wie lang die Wand insgesamt ist. Stattdessen wird 1 m als Gesamtlänge angenommen und folglich das Bauteil durch eine Wand dieser Länge ersetzt (siehe Abbildung 7-14). Ebenso können exakt modellierte Gebäudeecken zu Überlappungen führen. Grund hierfür ist, dass die Modifizierung nur eine Länge für alle Schichten des Bauteils annimmt und keine genaue Modellierung der Ecken berücksichtigt (siehe Abbildung 7-15).

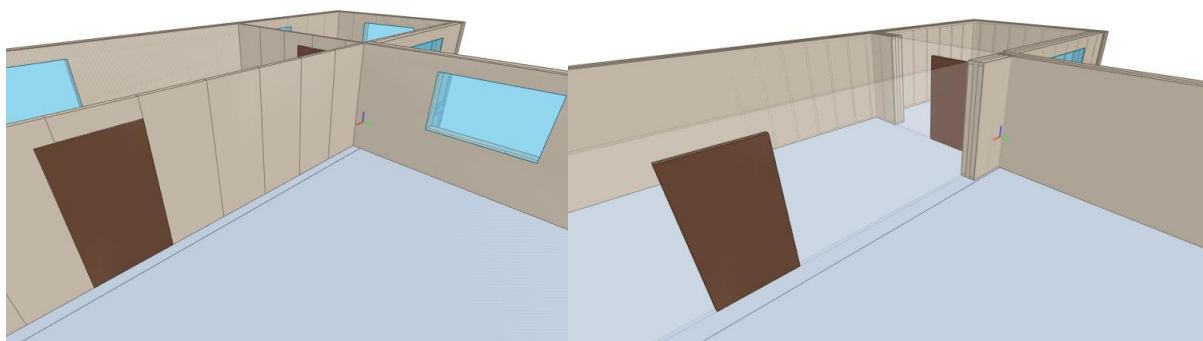


Abbildung 7-14: Ansicht auf Innenwand vor (Links) und nach (Rechts) Modifikation in *BIMvision*

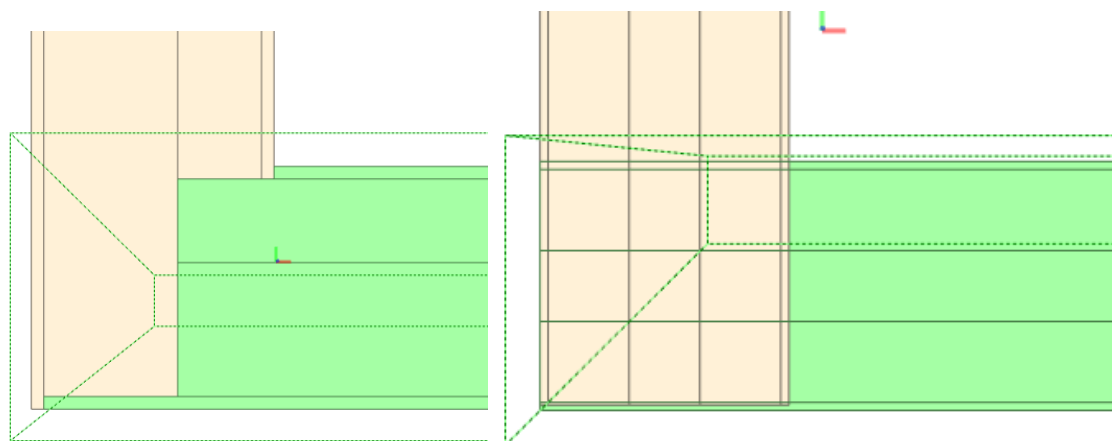


Abbildung 7-15: Draufsicht einer Gebäudeecke mit detaillierter Modellierung vor der Modifikation (Links) und daraus resultierender Modellierung nach der Modifikation (Rechts) in *BIMvision*

Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Platzierung der Bauteile durch `IfcLocalPlacement`. Diese ist stark an die Art und Weise der Modellierung der Bauteile gebunden. Beispielsweise kann eine Wand als horizontales Bauteil modelliert und anschließend mithilfe der `IfcLocalPlacement` in eine vertikale Position gedreht wer-

den. Umgekehrt gilt dies auch für Decken. Wie genau die Platzierung bei einer Modifikation erfolgt hängt daher nicht nur von der ursprünglichen Position ab, sondern insbesondere auch von der Art und Weise, wie das modifizierte Bauteil erstellt wird.

Bei der Erstellung von Bauteilen auf Grundlage der in *VaB* hinterlegten Kürzeln entsteht ein Problem bei Materialien, die als charakteristische Größe nicht die Dicke hinterlegt haben. Aus diesem Kürzel lässt sich nicht schließen, wie dick die Schicht ist. Daher ist eine Eingabe durch die Nutzenden nötig.

Des Weiteren erlaubt *Xbim* nicht, vorhandene Entitäten innerhalb der Programmierumgebung aus dem IFC-Modell zu löschen. Ist beispielsweise eine ursprüngliche Modellierung der Geometrie obsolet, so kann der Verweis auf sie gelöscht werden, jedoch nicht die Entität selbst. Dies führt dazu, dass nicht verwendete Zeilen in der IFC-Datei verbleiben.

7.2.4 Lösungsvorschlag

Um die Probleme durch die Modifizierung des Modells zu beheben, wurde ein Lösungsvorschlag entwickelt. Dieser soll sicherstellen, dass das modifizierte Modell die Qualitätskriterien erfüllt.

Bei dem Model Healing im Rahmen dieser Arbeit werden die Bauteile auf Grundlage ihrer Fläche ersetzt. Dafür werden die zwei größten der drei Dimensionen angenommen. Bei einer Wand entspricht dies also der Wandfläche, bei einer Decke die Bodenfläche. Diese Fläche wird durch die Modifikation nicht verändert. Die dritte (und kleinste) Dimension kann jedoch bei einem modifizierten Bauteil abweichen. So kann die neue Wand dicker oder dünner als die ursprüngliche sein. Dies führt im Modell zu den beschriebenen Problemen. Um diese zu beheben, müssen also die Auswirkungen der modifizierten Dicke bzw. Höhe berücksichtigt werden.

Ein möglicher Prozess dazu findet sich in Abbildung 7-16. Wie beschrieben wird zunächst das Bauteil durch ein modifiziertes Bauteil mit derselben Fläche ersetzt. Anschließend muss je nach Bauteil die Veränderung der Dicke bzw. Höhe bestimmt werden. Dabei muss nicht nur die Veränderung der Dimension, sondern auch die Richtung, in der diese Veränderung stattfindet, berücksichtigt werden. Diese ist immer in Richtung der lokalen y-Achse des Bauteils bei Wänden und in Richtung der globalen z-Achse bei Decken.

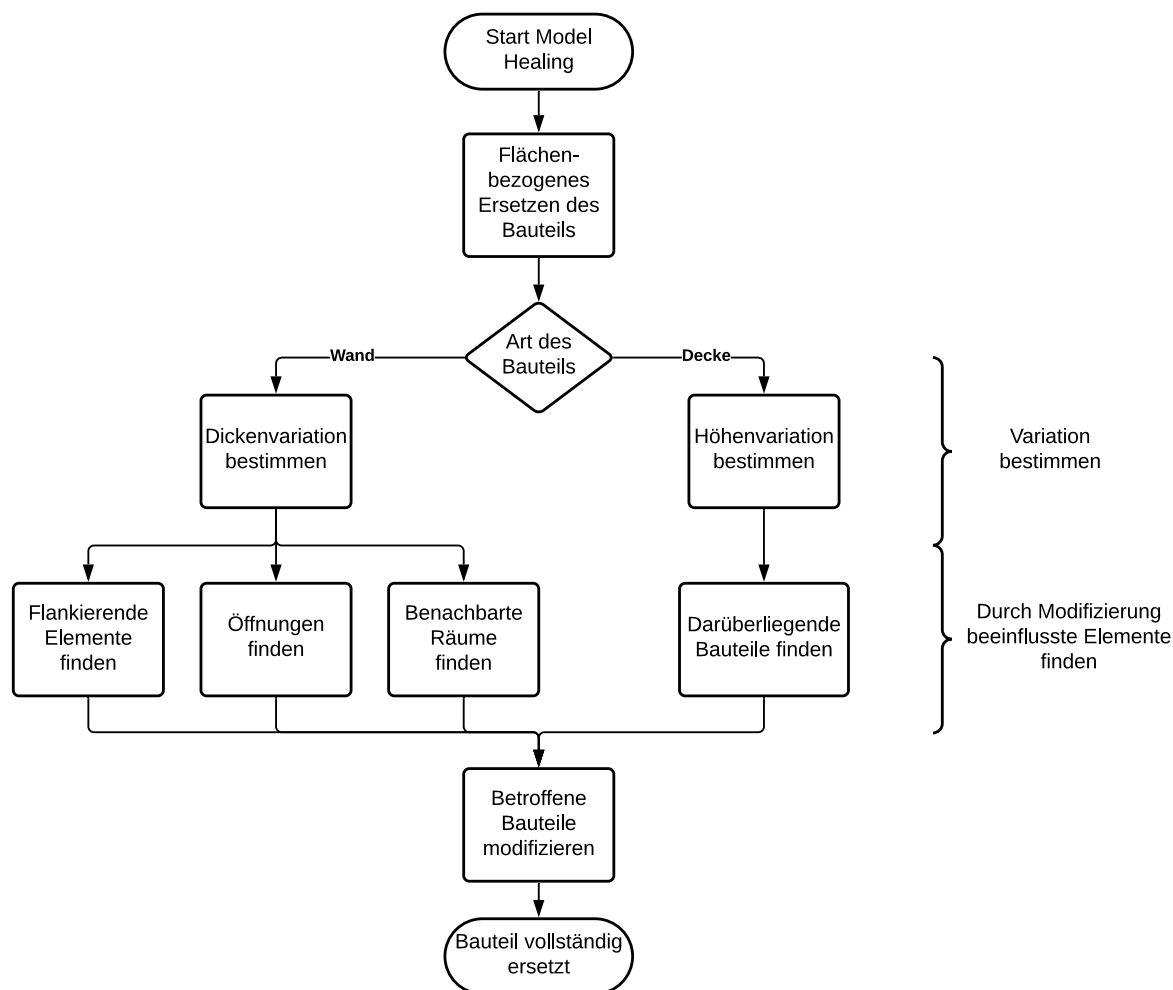


Abbildung 7-16: Schematischer Lösungsvorschlag für das Model Healing

Die Instanzen, die modifiziert werden müssen, unterscheiden sich je nach Bauteil. Bei Wänden müssen flankierende Bauteile, Öffnungen und benachbarte Räume angepasst werden. Bei Decken betrifft die Änderung alle räumlich darüberliegenden Bauteile. Flankierende Bauteile können über die Beziehung `IfcRelConnects(Path)Elements` gefunden werden. Diese ist jedoch oft nicht vorhanden bzw. kann die Positionierung der Elemente nicht eindeutig definieren. Zur Ermittlung des Stoßstellentyps schlagen Chateauvieux-Hellwig et al. eine Methodik vor (Chateauvieux-Hellwig et al., 2022). Hierdurch lassen sich anzupassende Bauteile ermitteln und deren Abmessungen anpassen. Öffnungen von Wänden lassen sich durch das Attribut `Openings` bestimmen. Gegebenenfalls müssen neben den Öffnungen auch Fenster und Türen, die die Öffnungen ausfüllen, angepasst werden. Diese sind durch die Beziehung `IfcRelVoidsElement` verbunden. Benachbarte Räume können durch das Attribut `ProvidesBoundaries` bestimmt werden. Auch hier muss bestimmt werden, ob der Raum durch die Richtung der Veränderung betroffen ist und gegebenenfalls durch den entsprechenden Betrag vergrößert oder verkleinert werden.

Bei einer Veränderung der Deckenhöhe sind Wände im selben Stockwerk, alle Elemente in Stockwerken darüber und je nach Modellierung die nächste Decke oder das Dach im selben Stockwerk betroffen. Bei der Modifizierung muss jeweils das Attribut `ObjectPlacement` aktualisiert werden. Ebenso betrifft die Veränderung die Höhen der `IfcStorey`. Hier muss festgelegt werden, ob die Gesamthöhe des Stockwerks oder die Höhe der Wände angepasst werden soll.

Darüber hinaus können weitere Beziehungen betroffen sein, sofern sie im Modell angelegt sind. Ein Beispiel hierfür ist, wenn über `IfcRelConnectsElements` eine Geometrie für die Stoßstelle zwischen zwei Bauteilen angegeben ist.

Zur Verifizierung des Ansatzes wird exemplarisch die Korrektur der Öffnungen und Fenster bzw. Türen implementiert. Der folgende Pseudocode zeigt die Vorgehensweise.

Algorithm 1: Window and Door Healing

```
Require: wall as IfcWall, previousThickness as double, newThickness as double  
var openings = wall.Openings;  
foreach(var opening in openings)  
    opening.YDim = newThickness;  
    opening.YCoordinate -= (previousThickness - newThickness)/2;  
    var filling = opening.Filling;  
    filling.YDim = newThickness;  
end
```

Wie in Abbildung 7-17 gezeigt wird, konnte die Modellierung der Fenster durch den Ansatz korrigiert werden.

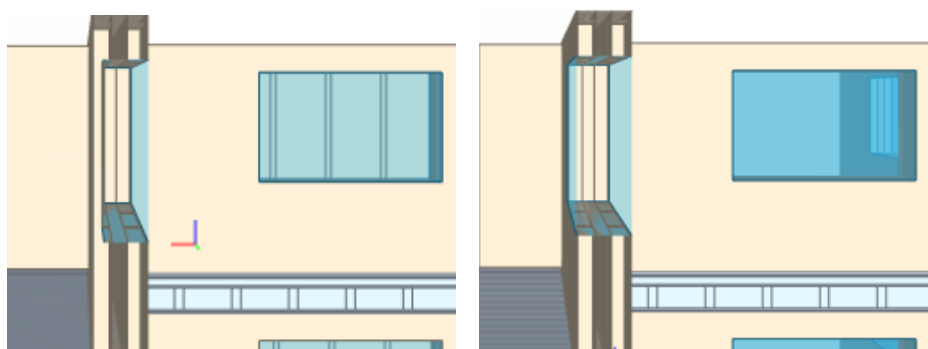


Abbildung 7-17: Vergleich Schnittansichten vor (Links) und nach (Rechts) dem Model Healing der Fenster und Türen dargestellt in *BIMvision*

8 Diskussion

Die Ergebnisse aus den beiden Teilen dieser Arbeit lassen einige Schlüsse über die Verwendung von IFC-Modellen im Holzbau zu, unter anderem für das Automated Code Compliance Checking. Sie werden in diesem Kapitel diskutiert.

8.1 IFC-Holzbaumodell

Diese Arbeit zeigt, dass es möglich ist, mithilfe von *Xbim* detaillierte IFC-Holzbaumodelle zu erstellen. Damit können alle elementaren Gebäudeteile wie Wände und Decken in einem hohen Detaillierungsgrad modelliert werden. Beispielsweise kann bei einer Holzständerwand der genaue Aufbau modelliert werden, ohne dass Schichten einzeln und nicht als Wandverbund dargestellt werden müssen, wie dies in anderer BIM-Software häufig der Fall ist. Darüber hinaus ist eine hohe Qualität des IFC-Modells möglich: Die gemäß einer Literaturrecherche definierten Qualitätskriterien für IFC-Dateien konnten erfüllt werden.

Ein großer Vorteil der direkten Erstellung von IFC-Modellen mittels *Xbim* gegenüber exportierten IFC-Modellen aus kommerzieller BIM-Software liegt in der großen Beeinflussbarkeit der enthaltenen Informationen und Bestandteile des Modells. Es kann sichergestellt werden, dass die im weiteren Verlauf benötigten Informationen fehlerfrei enthalten sind. Dies geht mit einem Mehraufwand bei der Erstellung einher, bietet jedoch auch eine erhöhte Sicherheit, dass das resultierende Modell mit den Erwartungen übereinstimmt. Darüber hinaus bietet das IFC-Datenformat viele Möglichkeiten zur anwendungsspezifischen Erweiterung der enthaltenen Informationen.

Jedoch hat die Verwendung von *Xbim* auch Grenzen. Um die oben beschriebene Qualität des IFC-Modells zu erhalten, ist ein hoher Grad an Kenntnissen über die Bestandteile des IFC-Formates und der Programmierung nötig. Inkonsistenzen werden von *Xbim* nicht verhindert und Anforderungen an die Qualität des Modells müssen selbst überprüft werden. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass Beispiele und Leitfäden zu einer guten Modellierung von IFC kaum oder gar nicht vorhanden sind. Das IFC Schema von *buildingSMART* hat zwar gewisse Vorgaben, die jedoch viele Optionen zur Modellierung freilassen. Die Abbildungen zu Modellierungen des IFC-Schemas in dieser Arbeit sollen Anhaltspunkte für die Verbindungen zwischen den Instanzen liefern. Eine Konsequenz der fehlenden Leitfäden ist, dass Softwarehersteller ihre eigenen Kriterien formulieren, diese jedoch nicht öffentlich kommunizieren.

Darüber hinaus erweist sich eine parametrische Modellierung ganzer Gebäude mit *Xbim* als nur mit viel Aufwand realisierbar. Grund hierfür ist unter anderem die hohe Anzahl an Parametern insbesondere bezüglich der Positionierung von Bauteilen, welche ohne grafische Oberfläche nur schwer handhabbar ist. Eine parametrische Modellierung einzelner Bauteile konnte jedoch umgesetzt werden.

Als Ergebnis des ersten Teils dieser Arbeit ist ein mehrstöckiges IFC-Modell in Holzbauweise entstanden. Es enthält Holzmassiv- und Holzleichtbauelemente. Schalleigenschaften von schalltechnisch relevanten Bauteilen sind als Einzahlwerte und frequenzabhängige Werte hinterlegt. Verbindungen zwischen den Bauteilen sind entsprechend den Möglichkeiten des IFC4 dargestellt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm, sowie die Code-Bestandteile können für das Erstellen weiterer Modelle verwendet werden. So konnte die Library „*XbimBuildingComponentLibrary*“ auch für das Model Healing im zweiten Teil dieser Arbeit verwendet werden.

8.2 ACCC für den Schallschutz

Das Automated Code Compliance Checking dient der automatisierten Überprüfung von Anforderungen wie Normen auf der Basis von digitalen Modellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Ablauf für den Schallschutznachweis für IFC-Holzbaumodelle untersucht. Die Nachweise stellen erhöhte Anforderungen an das Gebäudedesign im Vergleich zur Norm, um einen üblichen Standard an Komfort zu erreichen. Der Schallschutznachweis wird in der Praxis erst spät in den Designprozess eingebunden. Dadurch wirken sich eventuelle Änderungen stark auf die Kosten und den Zeitablauf aus. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ablauf auf der Basis von IFC-Dateien vereinfacht und beschleunigt die Schallschutzüberprüfung eines Gebäudes maßgeblich. Dadurch kann schon zu früheren Planungszeitpunkten eine Überprüfung auf einfache Weise erfolgen. Durch die Einbindung in den digitalen Prozess und die Verwendung von IFC-Modellen benötigt sie keinen großen Mehraufwand.

Jedoch sind einige Voraussetzungen nötig, um die Überprüfungen durchführen zu können. Zunächst sind dies die Anforderungen an das IFC-Modell. Neben der Erfüllung allgemeiner Qualitätskriterien sind einige spezifische Informationen erforderlich. Diese betreffen eine detaillierte Modellierung von Schichten und deren Materialien. Dabei ist eine spezifische Benennung der Materialien notwendig, um den Aufbau eindeutig analysieren zu können. Außerdem muss durch hinterlegte Attribute und Instanzen ermög-

licht werden, dass die Funktionsweise von Bauteilen identifiziert werden kann. Beispielsweise müssen Innen- von Wohnungstrennwänden unterschieden werden können, um die entsprechenden schalltechnischen Anforderungen abfragen zu können. Auch die Geometrie und die Verbindungen zu benachbarten Bauteilen müssen genau hinterlegt sein, um den Nachweis führen zu können.

Darüber hinaus sind Informationen zu den schalltechnischen Eigenschaften der Bauteile erforderlich. Diese können in IFC-Modellen angelegt werden, jedoch existiert keine einheitliche Vorgabe zur Hinterlegung dieser, weshalb sie in der Regel nicht automatisiert verwendet werden können. Daher wurde die Datenbank *VaBDat* als externe Quelle verwendet. Sie enthält vibroakustische Informationen für Holzbauteile. Diese Arbeit beschränkt sich auf den Holzbau, die Methodik ist darüber hinaus aber auch auf andere Bauweisen und Datenquellen anwendbar. Durch die Verwendung einer Datenbank als Informationsquelle ist der Prozess auf die dort enthaltenen Datensätze und deren Qualität beschränkt. Dies macht eine manuelle Überprüfung durch Expert*innen nötig. Diese müssen überprüfen, ob das in der Datenbank gefundene Bauteil dem tatsächlichen entspricht oder eine gute Abschätzung darstellt. Expert*inneninput kann aufgrund der Komplexität eines Schallnachweises nicht umgangen werden. Dies bietet aber auch Vorteile, da es die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse erhöht.

Neben der Analyse der Bauteile erfordert der Schallschutznachweis auch eine Betrachtung der Umgebungssituation, also der benachbarten Bauteile und die dadurch entstehenden Schallnebenwege. Die Quantifizierung dieser Flankenübertragungen basieren auf einer aufwändigen Berechnung, welche sich für die Umsetzung in digitalen Modellen zum Teil noch in Arbeit befindet. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit nur ein modellhafter Ablauf durchgeführt, in welchem die Berücksichtigung der Flankenübertragung durch eine externe Berechnung und anschließende manuelle Eingabe erfolgt. Sie kann jedoch nachträglich in den Prozess eingebunden werden.

Eine Einschränkung bei der Verwendung des entwickelten Prozesses ist der iterative Ansatz, der aufgrund des Nachweisverfahrens nicht umgangen werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Berechnung von mehreren, nicht linear voneinander abhängigen Parametern, abhängt. Es wird also auf einen Parameter optimiert, mit der Annahme, dass die anderen konstant bleiben. Anschließend werden alle Parameter neu berechnet und verifiziert, ob der Nachweis eingehalten ist.

Ein großes Potenzial der Verwendung von *Xbim* bei der automatisierten Schallschutzüberprüfung ist die Möglichkeit der Rückführung von Optimierungen, das Model Healing, in das IFC-Modell. Bei Bauteilen, die der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Modellierung entsprechen, konnten verbesserte Bauteile erstellt, und in das Modell rückgeführt werden. Die Bauteile basieren dabei auf den Bauteilkürzeln aus *VabDat* und werden mithilfe der Methoden aus dem ersten Teil dieser Arbeit erstellt. Bei einer Eins-zu-eins-Ersetzung der Bauteile ergeben sich jedoch mögliche geometrische Konflikte im Modell, wie Überlappungen von Bauteilen. Um diesen zu begegnen, wurde in Abschnitt 7.2.4 ein Konzept entwickelt und anhand eines Beispiels verifiziert.

9 Fazit

Die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen spielt eine große Rolle bei der Transformation des Bausektors hin zu mehr Nachhaltigkeit. Dazu kann der Holzbau einen signifikanten Beitrag leisten. Um seine Verwendung zu erhöhen, können digitale Methoden eingesetzt werden, die den Designprozess unterstützen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten von IFC für Holzkonstruktionen evaluiert und beispielhaft mithilfe von *Xbim* implementiert. Es zeigt sich, dass die Methodik detailliert modellierte Holzbaugebäude erlaubt, welche zuvor definierte Qualitätskriterien erfüllen. Der Prozess benötigt jedoch eine große Kenntnis über das IFC-Schema, welche derzeit nur schwer erworben werden kann. Beispiele und Leitfäden, wie sie in dieser Arbeit gezeigt werden, können den Zugang erleichtern.

Sind detaillierte Modelle vorhanden, so können sie im Weiteren für andere Zwecke verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei die Überprüfung des Gebäudes auf Übereinstimmung mit Schallschutzanforderungen untersucht. Es zeigt sich, dass der gewählte Ablauf eine schnelle Überprüfung ermöglicht. Durch den geringen Aufwand können die Schallschutzanforderungen früher in den Planungsprozess eingebunden werden und somit den Designprozess optimieren. Wenn der Nachweis nicht eingehalten ist, können mithilfe von *Xbim* zudem modifizierte Bauteile in das Modell rückgeführt werden.

In der Verwendung von *Xbim*, insbesondere für das Model Healing, liegt großes Potenzial für weitere Forschungsarbeiten. Es ermöglicht, den Arbeitsablauf der Gebäudeplanung weiter zu optimieren. Auf den Erkenntnissen dieser Arbeit zur Modellierung und Modifizierung mit *Xbim* kann dabei aufgebaut werden. Ebenso kann das entstandene IFC-Holzbaumodell für zukünftige Forschung verwendet werden, um den digitalen Designprozess von Holzgebäuden weiter voranzubringen.

Literaturverzeichnis

- Allplan. (2020, 27. Oktober). *BIM im Holzbau*. <https://blog.allplan.com/de/bim-im-holzbau>
- BIM Forum (Hrsg.). (Dezember 2020). *Level Of Development (LOD) Specification Part I & Commentary: For Building Information Models and Data*. <https://bimforum.org/resources/Documents/LOD%20Spec%202020%20Part%20I%202020-12-31.pdf#%5B%7B%22num%22%3A103%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%7D%2C353%2C154%2C0%5D>
- Blödt, A., Rabold, A. & Halstenberg, M. (2019). *Schallschutz im Holzbau: Grundlagen und Vorbemessung*. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R03_T03_F01_Schallschutz_Grundlagen_Vorbemessung_2019.pdf
- Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (Hrsg.). (2015). *VDI-Buch. Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg.
- Bruderverlag GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2021, 13. April). *TU München: Forschungsprojekt BIMwood entwickelt holzbaugerechtes BIM*. <https://www.bauenmitholz.de/tu-muenchen/150/72570/>
- buildingSMART. (2020). *Industry Foundation Classes 4.0.2.1: Version 4.0 - Addendum 2 - Technical Corrigendum 1*. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/link/annex-d.htm
- buildingSMART International. (2019, 6. Juni). *Industry Foundation Classes (IFC): An Introduction*. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>
- buildingSMART Technical. (2020, 9. April). *IFC String Encoding: String Encoding & Decoding*. <https://technical.buildingsmart.org/resources/ifcimplementationguidance/string-encoding/>
- Chateauvieux-Hellwig, C., Abualdenien, J. & Borrmann, A. (2022). Analysis of the early-design timber models for sound insulation analysis. *Under Review*.

- Châteauvieux-Hellwig, C., Abualdenien, J. & Borrmann, A. (2020). *Towards semantic enrichment of early-design timber models for noise and vibration analysis*.
- Châteauvieux-Hellwig, C., Abualdenien, J. & Borrmann, A. (2021). Analysis of the early-design timber models for sound insulation analysis. In *EG-ICE 2021*. https://www.researchgate.net/profile/camille-chateauvieux-hellwig/publication/353259379_analysis_of_the_early-design_timber_models_for_sound_insulation_analysis
- Chong, C. S., Senthil Kumar, A. & Lee, H. P. (2007). Automatic mesh-healing technique for model repair and finite element model generation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(15), 1109–1119. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.009>
- dataholz.eu. (2021). *Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile*. <https://www.dataholz.eu/>
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *Schallschutz im Hochbau: Teil 1: Mindestanforderungen* (DIN 4109-1:2018-01).
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017a). *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-1:2017)* (DIN EN ISO 12354-1:2017).
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017b). *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-2:2017)* (DIN EN ISO 12354-2:2017).
- Hafner, A., Rüter, S., Ebert, S., Schäfer, S., König, H., Cristofaro, L., Diederichs, S., Kleinhenz, M. & Krechel, M. (2017). *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)*.
- International Energy Agency (Hrsg.). (2009). *World energy Outlook*. Paris.
- Ismail, A. S., Ali, K. N. & Iahad, N. A. (2017). A Review on BIM-based automated code compliance checking system. In *Social transformation through data science:*

- ICRIIS 2017 : 5th International Conference on Research and Innovation in Information Systems : Adya Hotel, Langkawi, Kedah, 16-17th July 2017* (S. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRIIS.2017.8002486>
- Kaufmann, H., Huß, W., Schuster, S. & Stieglmeier, M. (2017). *leanWOOD: Optimierte Planungsprozesse für Gebäude in vorgefertigter Holzbauweise*. Technische Universität München.
- Kaufmann, H., Krötsch, S. & Winter, S. (2017). *Atlas: Mehrgeschossiger Holzbau* (erste Auflage). Detail Business Information GmbH.
- Kaufmann, H., Schuster, S., Stieglmeier, M. & Ammer, C. (2019). *Holz&BIM - Building Information Modelling (BIM) als Planungsmethode im modernen Holzbau – eine Standortbestimmung zur Identifizierung von Anforderungen und Hemmnissen: Schlussbericht zum Vorhaben*.
- Lignumdata (Hrsg.). (2019, 30. Januar). *Begriffe und Berechnungen im Lignum Bauteilkatalog*. https://lignumdata.s3.eu-west-1.amazonaws.com/impresum_pdf/BeDE.pdf
- LIGNUM-Holzwirtschaft Schweiz. (2021, 14. April). *Lignumdata*. www.lignumdata.ch
- Lockley, S., Benghi, C. & Černý, M. (2017). Xbim.Essentials: a library for interoperable building information applications. *The Journal of Open Source Software*, 2(20), 473. <https://doi.org/10.21105/joss.00473>
- Maier, S. (2019, 29. Dezember). *BIMwood - Forschung für den modernen Holzbau*. <https://www.konstruktiver-holzbau.de/2019/12/29/bimwood-forschung-fuer-den-modernen-holzbau/>
- NATSPEC. (2016). *NATSPEC National BIM Guide*.
- Nawari, N. O. (2018). *Building Information Modeling : Automated Code Checking and Compliance Processes*. Taylor & Francis Group. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/munchentech/detail.action?docID=5288042>
- Passchier-Vermeer, W. & Passchier, W. F. (2000). Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives*, 108 Suppl 1, 123–131. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s1123>

- Preidel, C. & Borrmann, A. (2015). Automated code compliance checking based on a visual language and building information modeling. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*(Vol. 32).
- Solihin, Eastman, C [Charles] & Lee, Y.-C. (2015). Toward robust and quantifiable automated IFC quality validation. *Advanced Engineering Informatics*, 29(3), 739–756. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.07.006>
- Solihin, W. & Eastman, C [C.] (2015). Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*, 53, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>
- Statista (Hrsg.). (2021, 27. Juli). *Anzahl der genehmigten Wohngebäude in Holzbauweise in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2020*. Holzbau Deutschland. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/456626/umfrage/anzahl-der-genehmigten-wohngebäude-in-holzbauweise-in-deutschland/>
- Steiger, L. (2013). *Basics Holzbau*. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035612561>
- Technische Hochschule Rosenheim. (2021, 20. April). *VaBDat*. <https://www.vab-dat.de/>
- Temel, B. A. & Başağa, H. B. (2020). Investigation of IFC file format for BIM based automated code compliance checking. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 3(2), 113–130. <https://doi.org/10.31462/jcemi.2020.02113130>
- Ürge-Vorsatz, D., Harvey, L., Mirasgedis, S. & Levine, M. D. (2011, August). Mitigating CO2 emissions from energy use in the world's buildings. *Building Research & Information*(Vol. 35), S. 379-398.
- Wand, Y. & Wang, R. Y. (1996). Anchoring data quality dimensions in ontological foundations. *Communications of the ACM*, 39(11), 86–95. <https://doi.org/10.1145/240455.240479>
- Willems, W. M., Wagner, A. & Stricker, D. (2020). *Schallschutz: Bauakustik: Grundlagen – Luftschallschutz – Trittschallschutz* (2. Aufl.). *Detailwissen Bauphysik*. Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28454-1>

-
- Winter, S. (2018, 18. Oktober). *Holzbau Ergänzungsmodul: V01: Einführung in die Bauweisen*. Technische Universität München. Vorlesung Holzbau Ergänzungsmodul,
- World Health Organization. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*.
- xbim ltd. (2021, 22. Juni). *Proper Wall in 3D*. <https://docs.xbim.net/examples/proper-wall-in-3d.html>

Anhang A: Funktionsbeschreibungen

A.1 XbimBuildingComponentLibrary

Die Library „XbimBuildingComponentLibrary“ enthält allgemeine Funktionalitäten, auf die Projekte zugreifen können. Die 7 enthaltenen Skripte werden im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge mit ihren Bestandteilen vorgestellt.

GeometryHandler.cs

Funktion `GenerateRectProfile`: Erstellt ein `IfcRectangleProfileDef` mit den gegebenen Dimensionen

Funktion `GenerateBodyFromRect`: Erstellt ein `IfcExtrudedAreaSolid` aus dem gegebenen `IfcProfileDef` als Extrusion in gegebener Richtung und Extrusionshöhe und Positionierung

MemberHandler.cs

Funktion `GenerateContinuousMember`: Erstellt ein `IfcMember` mit gegebenen Dimensionen und Positionierung mit kontinuierlichem Aussehen aus hintereinandergesetzten Elementen gegebener Länge (z.B. für Tragelement einer Massivholzwand)

Funktion `GenerateFrameMember`: Erstellt ein `IfcMember` als tragender Teil eines Holzständerwerks mit gewünschtem Abstand zwischen den Ständern und oberem und unteren Riegel falls angegeben

Funktion `GenerateFillingMember`: Erstellt ein `IfcMember` als Füllmaterial (typischerweise Dämmung) zwischen einem Holzständerwerk mit gegebenen Dimensionen und Positionierung

OrientationHandler.cs

Funktion `SetOrientation`: Gibt abhängig von der gegebenen Richtung ein `IfcDirection` aus den Standardkoordinaten zurück

PlacementHandler.cs

Funktion `GenerateLp`: Erstellt ein `IfcLocalPlacement` abhängig vom Input bezogen auf Standard- oder eingegebene Werte

Funktion `GenerateAx3D`: Erstellt ein `IfcAxis2Placement3D` mit gegebenem Punkt und zwei Achsen (in z-Richtung und x-Richtung)

PlateHandler.cs

Funktion `GeneratePlate`: Erstellt ein `IfcPlate` mit den gegebenen Dimensionen und Positionierung

StandardCoordinates.cs

Klasse `StandardCoordinates`: Enthält alle Standardkoordinaten wie Ursprung, alle Achsen in positive und negative Richtung

Struct.cs

Enumeration `Direction`: Richtungen von Wänden (`posX`, `negX`, `posY`, `negY`)

Enumeration `MemberVaryingParam`: Art der Positionierung von Ständern im Ständerwerk, wenn die Gesamtlänge nicht ein Vielfaches des gewünschten Abstandes ist (`varyDistance` für Tragstruktur, `varyMember` für Füllung dazwischen; `Regular` für eine konstante Länge mit ungefähr der gewünschten Länge, `Symmetric` für gewünschte Länge innerhalb der Wand und abweichende Längen im ersten und letzten Feld (symmetrisch))

A.2 IfcWoodBuilding

Das Projekt „IfcWoodBuilding“ besteht aus 15 Skripten mit Funktionen oder Enumerationen. Diese Unterdateien werden im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt und die enthaltenen Funktionen kurz erläutert.

BuildingHandler.cs

Funktion `CreateBuilding`: Erstellt ein `IfcBuilding` im gegebenen `IfcStore` mit gegebenem Namen

Funktion `DefineOutline`: Erstellt eine `IfcPolyline` in 2D als L-förmigen Umriss mit zwei Abmessungen in x- und zwei Abmessungen in y-Richtung

Funktion `SetupFloorPolyline`: Erstellt eine `IfcPolyline` in 3D aus der gegebenen `IfcPolyline` und einer Höhe

Funktion `CreateBuildingStorey`: Erstellt ein `IfcBuildingStorey` im gegebenen `IfcStore` mit übergebenem Namen und in definierter Höhe

Constants.cs

Enumeration `ConstructionType`: Definition, ob das Bauteil eine Ständerwand (`StudWall`) oder Massivholzwand (`CompactWall`) ist

Enumeration `ModelingDetail`: Definition, ob der Beginn (`Start`), das Ende (`End`) oder keines davon (`Without`) einer Wand genau modelliert sein soll

DoorHandler.cs

Funktion `GenerateDoor`: Erstellt eine `IfcDoor` an gegebener Position (Koordinaten und Wand) mit gegebener Dicke

FindingHandler.cs

Funktion `FindCorrespondingSlab`: Findet die erste Instanz von `IfcSlab` im gegebenen `IfcBuildingStorey`

Funktion `FindExteriorWalls`: Findet alle Außenwände im gegebenen `IfcBuildingStorey`

Funktion `FindInteriorWalls`: Findet alle Innenwände im gegebenen `IfcBuildingStorey`

Funktion `FindThickness`: Findet die Dicke des gegebenen `IfcBuildingElement`

MaterialHandler.cs

Funktion `AddMaterialSlab`: Fügt dem gegebenen Bodentyp vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialFloor`: Fügt dem gegebenen Deckentyp vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialFlatRoof`: Fügt dem gegebenen Flachdachtyp vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialStudWall`: Fügt dem gegebenen Wandtyp als Ständerwand vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialCompactWall`: Fügt dem gegebenen Wandtyp als Massivholzwand Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialInteriorWall`: Fügt dem gegebenen Wandtyp als Innenwand Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialWindow`: Fügt dem gegebenen Fenstertyp vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `AddMaterialDoor`: Fügt dem gegebenen Türtyp vordefinierte Materialien hinzu

Funktion `MatchMaterialFloor`: Ordnet der gegebenen Decke entsprechend ihres Deckentyps die Materialien zu

Funktion `MatchMaterialFlatRoof`: Ordnet dem gegebenen Flachdach entsprechend seines Dachtyps die Materialien zu

Funktion `MatchMaterialStudWall`: Ordnet der gegebenen Wand als Ständerwand entsprechend ihres Wandtyps die Materialien zu

Funktion `MatchMaterialCompactWall`: Ordnet der gegebenen Wand als Massivholzwand entsprechend ihres Wandtyps die Materialien zu

Funktion `MatchMaterialInteriorWall`: Ordnet der gegebenen Wand als Innenwand entsprechend ihres Wandtyps die Materialien zu

ModelHandler.cs

Funktion `CreateandInitModel`: Erstellt `Credentials`, definiert Einheiten und erstellt damit ein `IfcStore` mit einem `IfcProject`

PropertySetHandler.cs

Funktion `FloorPropertySets`: Generiert ein `IfcPropertySet` mit vordefinierten Werten für eine (spezifische) Decke

Funktion `FlatRoofPropertySets`: Generiert ein `IfcPropertySet` mit vordefinierten Werten für ein (spezifisches) Flachdach

Funktion `StudWallPropertySets`: Generiert ein `IfcPropertySet` mit vordefinierten Werten für eine (spezifische) Ständerwand

Funktion `CompactWallPropertySets`: Generiert ein `IfcPropertySet` mit vordefinierten Werten für eine (spezifische) Massivholzwand

Funktion `IntWallPropertySets`: Generiert ein `IfcPropertySet` mit vordefinierten Werten für eine (spezifische) Innenwand

Funktion `WallCommonPropertySets`: Generiert ein standardisiertes `IfcPropertySet` „Pset_Wall-Common“ mit den gegebenen Inputparametern „IsExterior“ und „LoadBearing“ für eine Wand

RelationshipHandler.cs

Funktion `ConnectConsecutiveWalls`: Erstellt ein `IfcRelConnectsPathElements` für zwei aufeinanderfolgende Wände

Funktion `ConnectInteriorWall`: Erstellt ein `IfcRelConnectsPathElements` für eine Innenwand mit gegebenem Verbindungstyp und eine Außenwand mit Verbindung „AtPath“ (entlang der Wand)

SlabHandler.cs

Funktion `CreateSlab`: Erstellt einen Boden als `IfcSlab` aus einem geschlossenen Profil und Extrusionshöhe

Funktion `CreateFloor`: Erstellt eine Decke als `IfcSlab` mit den gegebenen Dimensionen an der gegebenen Position

Funktion `CreateFlatRoof`: Erstellt ein Flachdach als `IfcSlab` mit den gegebenen Dimensionen an der gegebenen Position

SlabSetupHandler.cs

Funktion `SetupComposedSlab`: Erstellt einen zusammengesetzten `IfcSlab` mit den gegebenen Dimensionen und die Art des `IfcSlabs` durch einen `function delegate`

Funktion `SetupCompleteFloorFromArbitraryProfile`: Erstellt einen `IfcSlab` basierend auf einem `IfcArbitraryClosedProfileDef`, definiert durch einen `function delegate`

SpaceHandler.cs

Funktion `GenerateSpaces`: Erstellt `IfcSpaces` im gegebenen Stockwerk bezogen auf die gegebenen Dimensionen

TypeHandler.cs

Funktion `SetupFunction`: Ruft alle nachfolgenden typenerstellenden Funktionen auf

Funktion `CreateSlabType`: Erstellt einen `IfcSlabType` für eine Bodenplatte

Funktion `CreateFloorType`: Erstellt einen `IfcSlabType` für eine Decke

Funktion `CreateFlatRoofType`: Erstellt einen `IfcSlabType` für ein Flachdach

Funktion `CreateStudWallType`: Erstellt einen `IfcWallType` für eine Ständerwand

Funktion `CreateCompactWallType`: Erstellt einen `IfcWallType` für eine Massivholzwand

Funktion `CreateInteriorWallType`: Erstellt einen `IfcWallType` für eine Massivholzzinnenwand

Funktion `CreateWindowType`: Erstellt einen `IfcWindowType` für ein Fenster

Funktion `CreateDoorType`: Erstellt einen `IfcDoorType` für eine Tür

WallHandler.cs

Funktion `CreateWall`: Erstellt je nach Input eine Ständer- oder Massivholzwand (Außenwand) mit den gegebenen Dimensionen, Modellierungsdetails und Positionierung

Funktion `CreateStudWall`: Fügt einer `IfcWall` die Geometrie einer Ständerwand (Außenwand) mit den gegebenen Dimensionen und Modellierungsdetails hinzu

Funktion `CreateCompactWall`: Fügt einer `IfcWall` die Geometrie einer Massivholzwand (Außenwand) mit den gegebenen Dimensionen und Modellierungsdetails hinzu

Funktion `CreateInteriorWall`: Erstellt eine Massivholzzinnenwand mit den gegebenen Dimensionen, Positionierung und angrenzenden Bauteilen

WallSetupHandler.cs

Funktion `SetupWallStorey`: Erstellen aller Wände in einem Stockwerk mit den gegebenen Dimensionen und Art der Wände

Funktion `SetupWindowsDoors`: Erstellen aller Fenster und Türen in einem Stockwerk an vordefinierten Stellen

WindowHandler.cs

Funktion `GenerateWindow`: Erstellt ein `IfcWindow` an gegebener Stelle mit vordefinierten Abmessungen

A.3 CodeComplianceCheck

Das Projekt "CodeComplianceCheck" führt einen automatisierten Code Compliance Check für den Schallschutz durch. Dafür werden die fünf Phasen des ACCC durchlaufen. Der Code wird in 5 Unterordner strukturiert: Ein Ordner mit allgemeinen Klassen

und Funktionen und jeweils ein Ordner für die Phasen des ACCC, abgesehen von Phase 4 (diese ist im Main-Programm integriert). Die Skripte werden strukturiert nach den Unterordnern und dann alphabetisch aufgelistet.

0 General

BuildingComponent.cs

Klasse `BuildingComponent`: Abstrakte Klasse, die von `BuildingComponentDefinition` erbt

BuildingComponentDefinition.cs

Klasse `BuildingComponentDefinition`: Abstrakte Klasse als Überklasse für alle Bauteile und Bauteiltypen

BuildingComponentType.cs

Klasse `BuildingComponentType`: Abstrakte Klasse, die von `BuildingComponentDefinition` erbt

CSVHandler.cs

Funktion `ReadFromCSV`: Liest alle Zeilen der gegebenen CSV-Datei ein und gibt sie als Liste von `String`-Arrays zurück

Funktion `ReadMap`: Liest alle Zeilen der gegebenen CSV-Datei ein und gibt sie als Instanz der Klasse `Map` zurück

Enums.cs

Enumeration `SoundInsulationComplianceChecks`: Definition, um welche Art von Schallschutznachweis es sich handelt (`Rw`, `Rw_C50_5000`, `Rw_Ctr50_5000`, `Lnw`, `Lnw_Ci50_2500`)

Enumeration `BuildingComponentPosition`: Definition, ob das Bauteil in horizontaler oder vertikaler Position ist

Enumeration `BuildingComponentFunctionality`: Definition, welche Funktionalität ein Bauteil erfüllt (Außenwand, Gebäudetrennwand, Wohnungstrennwand, Wohnungstrenndecke, Innenwand, Innentrenndecke)

Floor.cs

Klasse `Floor`: Klasse für Decken, die von `BuildingComponent` erbt

FloorType.cs

Klasse `FloorType`: Klasse für Deckentypen, die von `BuildingComponentType` erbt

Map.cs

Klasse `Map`: Klasse für Mappings

MaterialLayerHandler.cs

Funktion `GetMaterialLayers`: Ermittelt die `IfcMaterialLayers` für ein Objekt des Typs `IfcObjectDefinition`

StringHandler.cs

Funktion `RemoveDigits`: Gibt den Inputstring ohne Ziffern und Sonderzeichen zurück

Funktion `GetDigitsInUnit`: Gibt die Zahl im Input-String in der gewünschten Einheit zurück

Funktion `GetCapitalLetters`: Gibt alle Großbuchstaben im Input-String zurück

Funktion `GetSmallLetters`: Gibt alle Kleinbuchstaben im Input-String zurück

UnitHandler.cs

Funktion `GetUnit`: Ermittelt die Einheit des gegebenen `IfcStore`

Funktion `GetThicknessInMM`: Gibt die gegebene Dicke in mm zurück

Enumeration `Unit`: Definition möglicher Einheiten eines `IfcStore` (`Metre`, `Millimetre`, `NotDefined`)

VaBDatBuildingComponent.cs

Klasse `VaBDatBuildingComponent`: Klasse für Einträge (Bauteile) der `VaBDat`-Datenbank

Wall.cs

Klasse `Wall`: Klasse für Wände, die von `BuildingComponent` erbt

WallType.cs

Klasse `WallType`: Klasse für Wandtypen, die von `BuildingComponentType` erbt

1 PrepareRequirements**SoundInsulationThreshold.cs**

Klasse `SoundInsulationThreshold`: Klasse für Schallschutzgrenzwerte

ThresholdHandler.cs

Funktion `SetupThresholdsCsv`: Setzt die Schallschutzgrenzwerte auf der Basis von CSV-Dateien auf

2 PrepareModel**APIHandler.cs**

Funktion `CallAPI`: Ruft die `VaBDat-API` auf und gibt alle Einträge als `VaBDatBuildingComponents` zurück

DbComparisonHandler.cs

Funktion `CompareBuildingComponent`: Vergleicht das Input-Bauteil auf verschiedene Arten und Weisen (siehe weitere Funktionen dieses Skriptes) mit den Datensätzen aus *VaBDat* und gibt die Informationen für den Export zurück

Funktion `FindIdentical`: Gibt wenn möglich ein identisches *VaBDat*-Bauteil zum Input-Bauteil zurück

Funktion `FindIdenticalExceptInsulationType`: Gibt wenn möglich ein identisches *VaBDat*-Bauteil abgesehen vom Dämmstoff zum Input-Bauteil zurück

Funktion `FindIdenticalExceptThicknesses`: Gibt wenn möglich ein identisches *VaBDat*-Bauteil abgesehen von den Schichtdicken zum Input-Bauteil zurück

Funktion `FindSupportingStructureOnly`: Gibt wenn möglich ein *VaBDat*-Bauteil bestehend aus nur der Tragstruktur des Input-Bauteils zurück

Funktion `FindBWithSupportingStructure`: Gibt alle *VaBDat*-Bauteile zurück, die die Tragstruktur des Input-Bauteils enthalten

FunctionalityAnalysisHandler.cs

Funktion `GetWallFunctionality`: Gibt die Funktionalität der Input-Wand zurück

Funktion `GetFloorFunctionality`: Gibt die Funktionalität der Input-Decke zurück

GetPropertyHandler.cs

Funktion `GetWallExterior`: Gibt mittels booleschen Operators zurück, ob die Input-Wand die Eigenschaft „außen“ besitzt

Funktion `GetSlabType`: Gibt `IfcSlabTypeEnum` des Input-Bodens zurück

GetSlabsHandler.cs

Funktion `GetFloors`: Gibt eine Liste von allen Decken im Modell zurück

Funktion `GetFloorTypes`: Gibt eine Liste von allen Deckentypen im Modell zurück

GetWallsHandler.cs

Funktion `GetWalls`: Gibt eine Liste von allen Wänden im Modell zurück

Funktion `GetWallTypes`: Gibt eine Liste von allen Wandtypen im Modell zurück

MaterialAnalysisHandler.cs

Funktion `MaterialMapping`: Ordnet jedem Input-`IfcMaterialLayer` das entsprechende *VaBDat*-Kürzel zu (entsprechend der Klassifizierung) und gibt diese als Liste zurück

Funktion `NameStringMapping`: Findet die Klassifizierung für einen Input-String

Funktion `StringContains`: Überprüft ob ein der eine Input-String im anderen enthalten ist

3 Checking

CheckingHandler.cs

Funktion `CheckWall`: Überprüft eine Wand auf Übereinstimmung mit den nötigen Nachweisen und modifiziert falls nicht eingehalten (siehe 5 Feedback)

Funktion `CheckFloor`: Überprüft eine Decke auf Übereinstimmung mit den nötigen Nachweisen und modifiziert falls nicht eingehalten (siehe 5 Feedback)

5 Feedback

ComplyingComponentHandler.cs

Funktion `FindComplyingComponent`: Findet einen Datensatz aus `VaBData`, der den Nachweis erfüllt

ComponentBuildHandler.cs

Funktion `BuildMaterialLayers`: Erstellt eine Liste von `IfcMaterialLayers` entsprechend dem gegebenen `VaBData`-Kürzel

Funktion `BuildPlatesAndMembers`: Erstellt `IfcPlate` und `IfcMember` entsprechend dem gegebenen `VaBData`-Kürzel

Funktion `MatchMaterialsAndPlates`: Ordnet die Materialien den Schichtengeometrien zu

Funktion `SetupType`: Erstellt einen neuen `IfcBuildingElementType` für das erstellte Bauteil

ComponentComparer.cs

Funktion `CompareComponents`: Vergleicht quantitativ wie ähnlich ein Bauteil dem originalen Bauteil ist

ComponentReplacementHandler.cs

Funktion `GetPlacementOfComponent`: Ermittelt das `IfcLocalPlacement` des gegebenen Bauteils

Funktion `GetSurfaceDimensionsOfComponent`: Ermittelt die Dimensionen der größten Fläche des gegebenen Bauteils

Funktion `GetType`: Bestimmt den Typ des gegebenen Bauteils als `String`

Funktion `ReplaceComponent`: Ersetzt die Geometrie und Materialien des gegebenen Bauteils mit den Modifizierten

FeedBackHandler.cs

Funktion `FeedBackUpdate`: Überfunktion, die das Rückführen eines modifizierten Bauteils durchführt

ModelHealing.cs

Funktion `HealWindows`: Behebt die Probleme bei den Fenstern, die durch das Modifizieren der Bauteile entstehen

Anhang B: Zuweisungstabellen

Im Rahmen dieser Arbeit werden aufgrund von Stichworten Kategorien und Varianten bestimmt. Die hierfür benötigten Zuweisungstabellen werden im Folgenden aufgeführt.

B.1 Zuweisung Stichworte zu Kategorie

Tabelle B-1: Zuweisung Stichworte zu Kategorie

Kategorie	Stichwort
a	Luftschicht
a	air layer
a	Luft
b	Werkstoffplatte
b	board
b	Beplankung
b	Platte
b	Auflage
e	Elastisches Zwischenlager
e	Elast. Zwischenlager
e	elastic interlayer
f	Folie
f	foil
f	membran
fr	Ständerwerk
fr	framework
i	Dämmung
i	insulation
i	Dämmstoff

Kategorie	Stichwort
ip	Trittschalldämmung
ip	impact sound insulation
j	Träger
j	Rippen
j	joist
j	ribbed
j	Balken
j	Lattung
o	andere
o	other
p	Putz
p	plaster
r	Dachbedeckung
r	roof cover
s	Estrich
s	screed
w	Beschwerung
w	weight

B.2 Zuweisung Stichworte zu Variante

Tabelle B-2: Zuweisung Stichworte zu Variante

Variante	Stichwort
AH	Anhydrid-Estrich
AH	anhydride
AL	Aluminium
AL	aluminium
AS	Gussasphalt-Estrich
AS	asphalt
B	Bitumenbahnen
B	bitumen sheeting
B	Schüttung, gebunden
B	fill bounded
BST	Brettstapel
C	closed
C	geschlossen
C	Schüttung in Waben
C	fill in combs
CB	chipboard
CB	Spanplatte
CBC	Spanplatte, zement
CBC	chipboard, cement
CE	Zementputz
CE	cement plaster
CE	Betondachsteine
CE	concrete bricks
CE	Zementestrich
CE	cement
CF	Zellulosefaser

Variante	Stichwort
CF	cellulose fibre
CL	Lehmputz
CL	clay plaster
CL	Tonziegel
CL	clay bricks
CLT	Brettsperrholz
CLT	cross laminated timber
CLT	BSP
CO	Betonplatte
CO	concrete
COR	Kork
COR	cork
CW	Baumwolle
CW	cotton wool
DRY	Trockenestrich
DRY	dry
EPS	Expandiertes Polystyrol
EPS	expanded Polystyrene
GF	Gipsfaserplatte
GF	gypsum fibre board
GL	Glas
GP	Gipsplatte
GP	gypsum board
GP	Gipskartonplatte
GP	Gipsputz
GP	gypsum plaster

Variante	Stichwort
HB	Hohlkastenelement Holz
HB	hollow box grid
HBC	Hohlkastenelement Beton
HBC	hollow box concrete
HF	Hanfaser
HF	hemp fibre
JF	Jutefaser
JF	jute fibre
L	lose Schüttung
L	fill loose
M	Metall-Ständerwerk
M	metal framework
MDF	MDF-Platte
MDF	medium-density fibreboard
MF	Mineralfaser
MF	mineral fibre
MW	Mineralwolle
MW	mineral wool
O	offen
O	open
OSB	OSB
OSB	OSB-Platte
OSB	oriented strand board
PE	Polyethylen
PE	polyethylene
PL	Dielen
PL	plank
PO	Polyolefin

Variante	Stichwort
PO	polyolefin
PP	Polypropylen
PP	polypropylen
PUR	Polyurethan
PUR	polyurethane
PW	Sperrholz
PW	plywood
RCO	Stahlbeton
RCO	reinforced concrete
RIB	Rippenelement
RIB	ribbed element
RW	Steinwolle
RW	rock wool
SG	Seegras
SG	sea gras
ST	Steinbeschwerung
ST	stones
T	Holz-Ständerwerk
T	timber framework
TJI	Doppelstegträger
TJI	i-joist
WCC	Holz-Beton-Verbund
WCC	wood-concrete composite
WF	Holzfaserplatte
WF	wood fibre board
WF	Holzwerkstoffplatte
WF	Holzfaserdämmung
WF	wood fibre

Variante	Stichwort
WF	Holzfaser
WF	wood fibre
WF	Holzfaserdämmstoff
WS	Vollholz
WS	wood solid
WS	Holzbalken

Variante	Stichwort
WS	Kantholz
WS	Balken
WS	Latte
WS	Lattung
WS	Holzlatte

B.3 Zuweisung Varianten zu Kategorien

Tabelle B-3: Zuweisung Variante zu Kategorie

Kategorie	Varianten
a	O
a	C
b	BST
b	CB
b	CBC
b	CLT
b	CO
b	GP
b	GF
b	GL
b	MDF
b	OSB
b	PL
b	PW
b	RCO
b	WF
e	COR

Kategorie	Varianten
e	PUR
f	B
f	PE
f	PO
f	PP
fr	M
fr	T
i	CF
i	CW
i	EPS
i	HF
i	JF
i	MW
i	SG
i	WF
ip	MF
ip	RW

Kategorie	Varianten
ip	WF
ip	EPS
j	HB
j	HBC
j	RIB
j	TJI
j	WS
o	WCC
o	PP
p	CE
p	CL
p	GP
r	AL
r	CE
r	CL
s	AH
s	AS
s	CE
s	DRY
w	B
w	C
w	L
w	ST
a	O
a	C
b	BST
b	CB
b	CBC

Kategorie	Varianten
b	CLT
b	CO
b	GP
b	GF
b	GL
b	MDF
b	OSB
b	PL
b	PW
b	RCO
b	WF
e	COR
e	PUR
f	B
f	PE
f	PO
f	PP
fr	M
fr	T
i	CF
i	CW
i	EPS
i	HF
i	JF
i	MW
i	SG
i	WF
ip	MF

Kategorie	Varianten
ip	RW
ip	WF
ip	EPS
j	HB
j	HBC
j	RIB
j	TJI
j	WS
o	WCC
o	PP
p	CE
p	CL

Kategorie	Varianten
p	GP
r	AL
r	CE
r	CL
s	AH
s	AS
s	CE
s	DRY
w	B
w	C
w	L
w	ST

Anhang C: Datenpaket-Inhalt

In dem dieser Arbeit beigefügten Datenpaket ist folgender Inhalt gespeichert:

- Die vorliegende Masterarbeit im PDF-Format
- Der Stand des Git-Repository als ZIP-Datei zum Zeitpunkt der Abgabe mit den entstandenen Programmen, der Library, den Zuweisungstabellen, Schallschutzanforderungstabellen und den generierten Modellen

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Master-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 25. Oktober 2021

Tanja Stocker

Tanja Stocker

Tanja.Stocker@tum.de