

BIM-gestützter Planungsprozess zur Berechnung des Schallschutzes im Holzbau

Camille Ondine Ida Châteauevieux

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design
der Technischen Universität München zur Erlangung einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr. Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
2. Prof. Dr. Ulrich Schanda.

Die Dissertation wurde am 04.09.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 13.11.2023 angenommen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der rechnergestützten Schallschutzplanung von Gebäuden in Holzbauweise auf der Basis von digitalen Gebäudemodellen. Die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Datenaustausch für die Schallschutzplanung im Holzbau mit offenen Datenstandards werden aufgezeigt. Das entwickelte Konzept prüft zunächst die Qualität der Modelle und verbessert diese gegebenenfalls durch *model healing*. Anschließend wird eine Stoßstellenanalyse mittels semantischer und geometrischer Abfragen für die Schallschutzplanung durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse werden in einem akustischen Fachmodell gespeichert, für das verschiedene Möglichkeiten der Erstellung diskutiert werden.

Abstract

This paper deals with the computer-aided sound insulation planning of buildings in timber construction on the basis of digital building models. The prerequisites for a successful data exchange for sound insulation planning in timber construction with open data standards are shown. The developed concept first checks the quality of the models and improves them by model healing if necessary. Subsequently, a joint analysis is carried out by means of semantic and geometric queries for sound insulation planning. The results of the analysis are stored in a specialised acoustic model, for which different possibilities of creation are discussed.

Vorwort

Diese Arbeit entstand von Mai 2019 bis September 2023 im Rahmen des Forschungsvorhabens „Prognoseverfahren zum Schall- und Schwingungsschutz für die BIM-gekoppelte Gebäudeplanung“ an der TH Rosenheim und wurde vom BayWISS-Kolleg Infrastruktur, Bauen und Urbanisierung unterstützt.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein großer Dank für die gute Betreuung als Doktorvater gilt Prof. Dr.-Ing. André Borrmann, der mich als externe Doktorandin ebenso intensiv unterstützte wie andere Mitstreiter*Innen der TU München und mir so auch einen Einblick in seinen Lehrstuhl ermöglichte.

Prof. Dr. Ulrich Schanda danke ich neben der guten Betreuung vor allem für das in mich gesetzte Vertrauen dieses neue Forschungsgebiet in das Schalllabor der TH Rosenheim zu integrieren. Weiterhin danke ich meinem Mentor Prof. Dr. Andreas Rabold, der mich ermutigt hat, eine Promotion zu wagen; danke ich für den fachlichen und persönlichen Austausch bei vielen schönen Mittagessen.

Ich bedanke mich auch für die Unterstützung meiner Mitstreiter*Innen an der TU München, die mich immer herzlich aufgenommen haben und von denen ich viel lernen konnte. Insbesondere die Betreuung durch Dr. Jimmy Abualdenien war von unschätzbarem Wert. Nicht minder haben auch die Kollegen*Innen der TH Rosenheim für eine wunderbare Arbeitsatmosphäre gesorgt, die immer wieder sehr motivierend war.

Ich möchte mich auch bei Dr. Dzifa Vode bedanken: Ihr Coaching und ihre wunderbaren Schreibretreats haben einen großen Teil dazu beigetragen, dass ich dieses Projekt zu meinem Projekt machen und diese Arbeit schreiben konnte.

Ein besonderer Dank geht an Yvonne Weise, Simon Mecking und Yvonne Drese, die sich die Zeit genommen haben, meine Entwürfe zu lesen und zu kommentieren. Bei Yvonne Weise möchte ich mich zusätzlich für die Extra-Mühe, das Coaching und die vielen motivierenden Gespräche bedanken.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an alle Freunde aus nah und fern und an meine Familie, die mich in all den Jahren begleitet und unterstützt haben. Diese Menschen haben oft mehr an mich geglaubt, als ich an mich geglaubt habe. Allen voran meinen Eltern, vielen Dank dafür! Meinem Partner Sebastian danke ich für seine unendliche Geduld meine Höhen und Tiefen mitzerleben und seiner Familie dafür, dass sie immer mitgefiebert haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ausgangspunkt	2
1.3	Forschungsfragen	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Planungsprozess am Bau	5
2.1	Digitale Planungsprozesse	5
2.2	Planungsprozess im Holzbau	7
2.3	Digitale Planung im Schallschutz	9
2.4	Zusammenfassung Planungsprozesse	10
3	Schallschutz	11
3.1	Prognose der Luftschalldämmung	13
3.2	Prognose des Trittschallpegels	15
3.3	Stoßstellen und Flankenübertragung	16
3.4	Besonderheiten im Holzbau	18
3.4.1	Stoßstellentypen	20
3.4.2	Einfluss der Stoßstellendämm-Maße auf die Prognose	20
3.5	Zusammenfassung Schallschutz	24
4	Digitale Gebäudemodellierung	25
4.1	Objektorientierte Modellierung	25
4.2	Offene Datenstandards für die Bauindustrie	30
4.3	Industry Foundation Classes	34
4.3.1	Bauteile in IFC	36
4.3.2	Beziehungen und Attribute in IFC	40
4.3.3	Räumliche Struktur in IFC	42
4.3.4	Akustische Kenngrößen in IFC	48
4.3.5	Model View Definition	49
4.4	Semantic enrichment und model healing	50
4.5	Stand der Forschung: BIM in Holzbau und Schallschutz	53
4.5.1	BIM im Holzbau	53
4.5.2	BIM im Schallschutz	58
4.6	Zusammenfassung digitale Gebäudemodelle	61

5	Konzept zur Nutzung von open BIM für die schalltechnische Prognose	63
5.1	Gebäudemodelle für den Holzbau	64
5.1.1	Holzmassivbau	66
5.1.2	Holzleichtbau	70
5.1.3	Sonderaufbauten	70
5.2	Gebäudemodelle für die Schallschutzplanung	75
5.2.1	Räumliche Struktur	75
5.2.2	Stoßstellen in IFC	76
5.3	Model healing	81
5.3.1	Verweise auf Geschosse	81
5.3.2	Material und Bauteiltyp	82
5.3.3	Fußbodenaufbauten, Unterdecken und Vorsatzschalen	83
5.3.4	Kleinteilige Bauteile	85
5.4	Stoßstellenanalyse	87
5.4.1	Auswahl des trennenden Bauteils	87
5.4.2	Suche nach flankierenden Bauteilen	87
5.4.3	Analyse der Stoßstellen	101
5.4.4	Stoßstellentyp	107
5.5	Fachmodell Akustik	111
5.5.1	Erweiterung des IFC-Schemas	113
5.5.2	Fachmodell mit externen Daten	118
5.6	Zusammenfassung	122
6	Prototypische Umsetzung	124
6.1	Model healing	126
6.2	Stoßstellenanalyse	129
6.2.1	Verifizierung der Stoßstellen	129
6.2.2	KIT Office Building	130
6.2.3	Wohngebäude H4	131
6.3	Erstellung des Fachmodells	135
6.4	Zusammenfassung prototypische Umsetzung	137
7	Auswertung und Diskussion	138
8	Fazit	141
A	Anhang: Stoßstellendämm-Maße	142
B	Berechnungsbeispiel H4	145
B.1	Bauteilaufbauten	148
B.2	Eingangsdaten	150

B.3	Berechnungsergebnisse	152
C	Definition der junction box	155
C.1	Junction Box für Wände in Richtung (1/0/0)	155
C.2	Junction Box für Wände in Richtung (0/1/0)	156
C.3	Junction Box für Decken in Richtung (0/0/1)	157
D	Definition der Stoßstellentypen	158
E	IFC-Klassen für das Fachmodell Akustik	164
F	Test der Stoßstellenanalyse	166
G	Weitere Algorithmen	177
	Literaturverzeichnis	181

Abkürzungen

.bim	dotbim
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
API	<i>application programming interface</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BCF	<i>BIM Collaboration Format</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BOT	<i>Building Topology Ontology</i>
BPO	<i>Building Products Ontology</i>
BRep	<i>Boundary Representation</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CityGML	<i>City Geography Markup Language</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
COBie	<i>Construction-Operations Building Information Exchange</i>
CSG	<i>constructive solid geometry</i>
CSI	<i>Construction Specifications Institute</i>
CSTB	<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i>
DEGA	Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
DfMA	<i>Design for manufacture and assembly</i>
DWG	<i>Drawing File Format</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
ER	<i>Exchange Requirements</i>
FEM	Finite Elemente Methode
gbXML	<i>Green Building XML</i>
GUID	<i>Global Unique Identifier</i>
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IAI	<i>International Alliance for Interoperability</i>
IDM	<i>Information Delivery Manual</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LCA	<i>Life-Cycle Assessment</i>
LOD	<i>Level of Development</i>

LoD	<i>Level of Detail</i>
LOG	<i>Level of Geometry</i>
LOI	<i>Level of Information</i>
LOIN	<i>Level of Information Need</i>
MDG	Modelldetaillierungsgrad
MVD	<i>Model View Definition</i>
NCS	<i>United States National CAD Standard</i>
NURBS	<i>Nonuniforme Rationale B-Splines</i>
OWL	<i>Web Ontology Language</i>
QL4BIM	<i>Query Language for Building Information Models</i>
RDF	<i>Resource Description Framework</i>
SAF	<i>Structural Analysis Format</i>
SAREF	<i>Smart Appliances Reference Ontology</i>
SEA	statistische Energieanalyse
SPARQL	<i>Simple Protocol And RDF Query Language</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i>
TGA	technische Gebäudeausrüstung
VBA	<i>Visual Basic Application</i>
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i>
X3D	<i>Extensible 3D</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

Kapitel 1

Einführung

Die vorliegende Arbeit untersucht den rechnerunterstützten Planungsprozess für die Schallschutzplanung, insbesondere bei Gebäuden in Holzbauweise. Als Planungsgrundlage wird ein digitales Gebäudemodell verwendet, welches im offenen Datenformat *Industry Foundation Classes* (IFC) erstellt ist. Neben dem Extrahieren der Eingangsdaten für die vollständige Schallschutzplanung im Holzbau und der Stoßstellenanalyse wird untersucht, ob im Datenformat IFC ein Fachmodell für die Bauakustik erzeugt werden kann.

1.1 Motivation

Die Klimakrise stellt die größte Herausforderung unserer Zeit dar. Ein großer Einflussfaktor ist dabei die Baubranche, bei der nicht nur der Energieverbrauch des Gebäudes während seines Lebenszyklus, sondern auch der Verbrauch von Ressourcen beim Bauen signifikant ist. So kommen Gebäude in Holzbauweise ins Spiel, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, CO_2 binden, durch gute Wärmedämmung den Energieverbrauch senken (AJAYI et al., 2015; ANDERSEN et al., 2022; DODOO et al., 2014) und bei denen zusätzlich die Raumluftqualität und das Wohngefühl als sehr behaglich wahrgenommen werden (BODEMER et al., 2017; FÜRHAPPER et al., 2020; PLANET ARK, 2015). Ohne lange Trockenzeiten und mit hohem Vorfertigungsgrad können Gebäude in Holzbauweise zügiger errichtet werden, als Gebäude in Massivbauweise (CHERET et al., 2014; KREMER & SYMMONS, 2015). Das Bestreben vieler Architekten und Bauherren, ökologisch und nachhaltig zu bauen, hat den Holzbau in Deutschland in den vergangenen Jahren stark vorangetrieben (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021). Viele Projekte zeigen, dass das Potenzial der Holzbauweise im mehrgeschossigen Bauen oder im Aufstocken zur Verdichtung in Ballungsräumen liegt (CHERET et al., 2014; SALVADORI, 2019; SVATOŠ-RAŽNJEVIĆ et al., 2022; TUPÉNAITÉ et al., 2020). Die weltweite Nachfrage führte zu einer Weiterentwicklung dieser Bauweise.

Ein Nachteil des Holzbaus gegenüber herkömmlichen Bauweisen ist der Schallschutz. Der Schallschutz trägt nicht nur in Mehrfamilienhäusern, sondern auch in Bürogebäuden und Schulen in erheblichem Maße zu Komfort und Gesundheit (KAWADA, 2011; MOUDON, 2009) der Nutzer bei. Gegenüber der Massivbauweise aus Beton oder Mauerwerk wirkt sich die geringere Masse des Holzbaus negativ auf die Schalldämmung aus. Bei der Schallübertragung über flankierende Bauteile spielt ebenfalls die leichte Konstruktionsweise eine entscheidende Rolle. Bei richtiger Planung und Ausführung ist jedoch auch im Holzbau ein guter Schallschutz

möglich (BLÖDT et al., 2019). Bei fehlerhafter Planung kann es jedoch zu ungenügendem Schallschutz und infolgedessen zu aufwendigen und teuren Nachbesserungen im fertigen Gebäude kommen.

Die bisherigen Planungsabläufe erfordern ein hohes Maß an manueller Arbeit beim Übertragen von Informationen aus Zeichnungen und Konstruktionsplänen in die Planungssoftware der unterschiedlichen Gewerke. Die Nutzung digitaler Gebäudemodelle zum Austausch detaillierter Planungsdaten (*Building Information Modeling* (BIM)) ermöglicht die Abstimmung zwischen Planern, indem die vielfältigen Zeichen- und Planungstools kompatibel werden. Für eine effizientere Planung ist es daher sinnvoll, digitale Gebäudemodelle zu nutzen (RUUSKA & HÄKKINEN, 2016). Die Anbindung der Schallschutzplanung an BIM-Planungsprozesse ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich, da Methoden fehlen, um aus den Modellen hochwertige Informationen auszulesen und fachspezifische Informationen zu speichern. Diese sind jedoch notwendig, um einen Nutzen aus den digitalen Planungsprozessen zu ziehen. Insbesondere die Schallschutzplanung im Holzbau, die besonders aufwendig ist, würde hier von der Arbeitserleichterung profitieren.

1.2 Ausgangspunkt

Die heutigen Ingenieurverfahren zur Prognose des Schalldämm-Maßes und Trittschallpegels wurden für Gebäude in mineralischer Massivbauweise eingeführt und benötigen Anpassungen für den Leicht- und Holzbau. Im Projekt *Vibroakustik* stand daher die Weiterentwicklung der Prognosemodelle im Vordergrund (RABOLD, WOHLMUTH et al., 2018). Hierfür wurden Methoden der statistischen Energie Analyse (SEA) und der Finite Elemente Methode (FEM) verwendet. Zusätzlich wurden die theoretischen Modelle durch Daten aus Messungen in Prüfständen und Gebäuden validiert. Diese Datengrundlage wurde in einer Bauteildatenbank ¹ gespeichert und soll zukünftig noch weiter wachsen.

Die bisherigen Tools zur Schallschutzplanung in Gebäuden stehen derzeit nur als Insellösungen zur Verfügung. Dies führt zu einem großen Anteil manueller Aufgaben, bei denen Daten aus Plänen abgelesen und in die Planungstools übertragen werden müssen. Eine solche Arbeitsweise ist nicht nur zeitintensiv, sondern auch fehleranfällig.

Zu diesen manuellen Aufgaben gehört neben der Einschätzung der kritischen Raumsituationen, für die eine Prognose der Schalldämmung besonders wichtig ist, auch das Übertragen von Bauteil- und Raumabmessungen sowie der Bauteilaufbauten. Hier muss der Ingenieur manuell die Daten in eine Berechnungssoftware oder, für den Holzbau üblicher, in ein eigenes Berechnungstool übertragen. Dabei muss er auch die korrekten Stoßstellentypen aus den Plänen erarbeiten.

¹<https://www.vabdat.de/>

Eine weitere Herausforderung stellen die Eingangsdaten für eine frequenzabhängige Schallschutzplanung dar. Einerseits weil die Datengrundlage insgesamt noch große Lücken aufweist und andererseits, weil bei der Berechnung eine große Menge an Daten entsteht. Hier sind immer wieder Annahmen zu treffen, die einen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Um die Planungsergebnisse auch im späteren Verlauf überprüfen zu können, muss eine ausführliche Dokumentation der Eingangsdaten und Annahmen erfolgen.

Hier bietet es sich an, die Entwicklungen im Bereich BIM zu nutzen, um die Schallschutzplanung in diesen digitalen Planungsablauf zu integrieren. Dabei sollen nicht nur automatisierte Abfragen aus BIM-Modellen das manuelle Auslesen aus Plänen ersetzen, sondern auch Eingangsdaten und Berechnungsergebnisse modellbasiert dokumentiert werden.

1.3 Forschungsfragen

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit ist, dass ein Auslesen und Abstrahieren von Eingangsdaten für die Schallschutzprognose eines Holzbaugeschäftes anhand eines Gebäudemodells in einem offenen Datenstandard möglich ist. Dabei ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie sieht ein effizienter Planungsprozess mit offenem Datenstandard für die Schallschutzplanung im Holzbau aus?
- Welche Daten müssen im Gebäudemodell vorhanden sein, um die Schallschutzprognose durchführen zu können?
- Wie werden Daten aus dem Gebäudemodell extrahiert und für die Schallschutzprognose aufbereitet?
- Sind im offenen Datenstandard IFC alle notwendigen Informationen für die Schallschutzprognose enthalten? Wenn nicht, welche Ergänzungen sind nötig, um die Schallschutzprognose durchführen zu können?
- Können Holzbau-typische Stoßstellensituationen aus einem IFC-Modell abstrahiert und interpretiert werden?
- Wie werden Ergebnisse aus der Schallschutzprognose in oder mit dem Gebäudemodell gespeichert?

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer Methode, die flankierende Bauteile und deren Anschlüsse an das trennende Element ausliest und interpretiert. Sie basiert auf einem digitalen Gebäudemodell, welches bereits in der frühen Planungsphase erstellt wird, um die Schallschutzplanung für den Holzbau zur Zeit der Entwurfs- und Genehmigungsplanung durchführen zu können. Der Fokus der Arbeit liegt bei der Erkennung der Stoßstellen und Stoßstellentypen aus

dem Gebäudemodell. Zusätzlich wird ein Entwurf im offenen Datenformat IFC vorgeschlagen, mit dem sich die Stoßstellen und die zugehörigen Informationen für die Schallschutzplanung im Gebäudemodell speichern lassen. Die Interpretation der Stoßstellensituationen orientiert sich an den europäischen Schallschutznormen und an Holzbauweisen, die in Europa verbreitet sind.

1.4 Aufbau der Arbeit

Aus den Forschungsfragen ergibt sich der Aufbau dieser Arbeit. Zuerst wird in Kapitel 2 ein kurzer Abriss über die Planungsprozesse am Bau gemacht, um anschließend die Vorteile der digitalen Planungsprozesse sowie die Besonderheiten im Holzbau aufzuzeigen.

Kapitel 3 thematisiert die Schallschutzplanung in Gebäuden mit den notwendigen Eingangsdaten und Anforderungen. Hierbei handelt es sich nicht um eine tiefgründige bauphysikalische Untersuchung, sondern um die Grundlagen und spezifischen Schwierigkeiten der Schallschutzprognose im Holzbau, die bei einer modellbasierten Planung einbezogen werden müssen.

Im Kapitel 4 werden die wichtigsten Aspekte der Gebäudemodellierung behandelt. Nach einer theoretischen Einführung wird auf das Datenformat IFC näher eingegangen und die für den Holzbau und den Schallschutz wesentlichen Aspekte betrachtet.

In Kapitel 5 wird der Kern dieser Arbeit vorgestellt. Es zeigt zuerst, wie der Holzbau in digitalen Gebäudemodellen abgebildet werden kann sowie wichtige Details, um die Modelle auch für die Schallschutzplanung zu nutzen. Anschließend wird die Methode zur Stoßstellenanalyse vorgestellt. Zuletzt wird das Fachmodell Akustik erläutert, welches Daten vor und nach der Schallschutzprognose speichern kann. Die Umsetzung der Methodik erfolgt anhand verschiedener Fallbeispiele in Kapitel 6.

Die Arbeit endet mit der Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 7 und den Abschlussgedanken im Fazit in Kapitel 8.

Kapitel 2

Planungsprozess am Bau

Jede Bauplanung stellt für sich einen einzigartigen, interdisziplinären Prozess dar, da Gebäude, Lage und auch die Projektbeteiligten von Projekt zu Projekt variieren (PREIDEL, 2020). Die Bauplanung ist in Deutschland durch die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) geregelt. In Leistungsphase 1 und 2 werden die ersten Skizzen und Modelle zur Visualisierung des Gesamtkonzepts erarbeitet. In der Leistungsphase 3 erfolgt die Entwurfsplanung, in der Leistungsphase 4 die Genehmigungsplanung und wenn alle Genehmigungen vorliegen, wird das Projekt in der Ausführungsplanung verfeinert. Neben der Tragwerksplanung sind immer auch bauphysikalische Nachweise zum Brand-, Schall- und Wärmeschutz zu erbringen. Erst in Leistungsphase 5 ist die detaillierte Ausarbeitung der Planung in Begleitung der Bauabwicklung vorgesehen (HEBEL, 2021). Ähnliche Regelungen für die Bauplanung finden sich auch in anderen europäischen Ländern, z.B. in Großbritannien mit dem *RIBA Plan of Work* (RIBA, 2020).

Viele Bauprojekte zeichnen sich durch eine Überschreitung geplanter Zeit- und Budgetplanungen aus (ALJOHANI et al., 2017; KOSTKA & FIEDLER, 2016; OLAWALE & SUN, 2010; SHRESTHA et al., 2013). Deutsche Großprojekte erfahren im Durchschnitt eine Kostensteigerung von 44 % (HERTIE SCHOOL OF GOVERNANCE GMBH, 2015). Die Gründe hierfür sind neben mangelhafter Kostenplanung auch ein fehlerhafter Vorentwurf, ein Mangel an Detailgenauigkeit in der Planung und/oder schlechte Koordination zwischen den Gewerken sein (ALJOHANI et al., 2017). Die Qualität der Planung bezüglich Kosten, Zeitplan, Qualität der Leistung und Sicherheit entscheidet über den erfolgreichen Abschluss des Bauprojektes (ZWIKAEL, 2009). Dabei stellten Wissenschaftler in Großbritannien fest, dass Entwurfsänderungen die wichtigsten Faktoren sind, die nicht nur die Bauzeit, sondern auch die Kosten beeinflussen (OLAWALE & SUN, 2010).

2.1 Digitale Planungsprozesse

Der Einsatz durchgängiger digitaler Planungsprozesse soll die Planungsgenauigkeit und Kostensicherheit erhöhen sowie die Lebenszykluskosten optimieren (BRAMANN & MAY, 2015). In der BIM-Methodik werden Bauwerkinformationsmodelle (engl. *Building Information Model*) erstellt, die eine digitale Version des Bauprojekts vor Baubeginn abbilden. Sie enthalten neben der geometrischen Darstellung der Bauteile auch Informationen über Bauteiltypen, Materialien, weitere Eigenschaften und räumliche Zusammenhänge im Gebäude. Zudem ist die

Datenkonsistenz in einem gesamten 3D-Modell leichter zu erreichen als in einzelnen 2D-Plänen, die miteinander abgeglichen werden müssen. Da durch die Datenstruktur Bauteileigenschaften und Datenblätter direkt an die jeweiligen Bauteile angehängt werden können, wird der Informationsaustausch erleichtert. Die Vorteile der BIM-basierten Planung, die zu einer Qualitätssteigerung des Projekts und des errichteten Gebäudes führen, sind die Kostenreduktion über den gesamten Projektablauf, die Zeitersparnis durch übersichtliche Planungsabläufe, die Verbesserung der Kommunikation und die Koordination zwischen Projektbeteiligten und Gewerken (ARAYICI et al., 2009; GEORGIADOU, 2019; JUNG et al., 2018).

Obwohl die Anwendung von BIM in den vergangenen Jahren stetig gestiegen ist, bleibt die Nutzung in Deutschland primär bei Großprojekten angesiedelt (GALIĆ et al., 2017). Um die Arbeit mit BIM voranzutreiben, hat die Bundesregierung mit dem *Stufenplan Digitales Planen und Bauen* das Ziel, Verkehrsinfrastrukturprojekte seit 2020 mit der BIM-Methodik auszuführen (BRAMANN & MAY, 2015). Zusätzlich wurde im Oktober 2022 das BIM-Portal des Bundes freigeschaltet. Die VDI Richtlinienreihe 2552 soll die Implementierung von BIM vereinfachen (VDI 2552 BLATT 1:2020-07, 2020) und der BIMiD-Leitfaden auch mittelständische Unternehmen für BIM begeistern (BIMiD-KONSORTIUM, 2018). Abbildung 2.1 zeigt wie den Vorschlag der Architektenkammer für einen modellbasierten Planungsprozess, angelehnt an die HOAI (BUNDESARCHITEKTENKAMMER, 2020). Um die Akzeptanz und Nutzung von BIM zu erhöhen, sind vorrangig die Forschung und Entwicklung von Software-übergreifenden Konzepten auf nationaler und internationaler Ebene von Bedeutung, wobei die Softwareentwicklung selbst stets Aufgabe der Softwarehersteller bleibt.

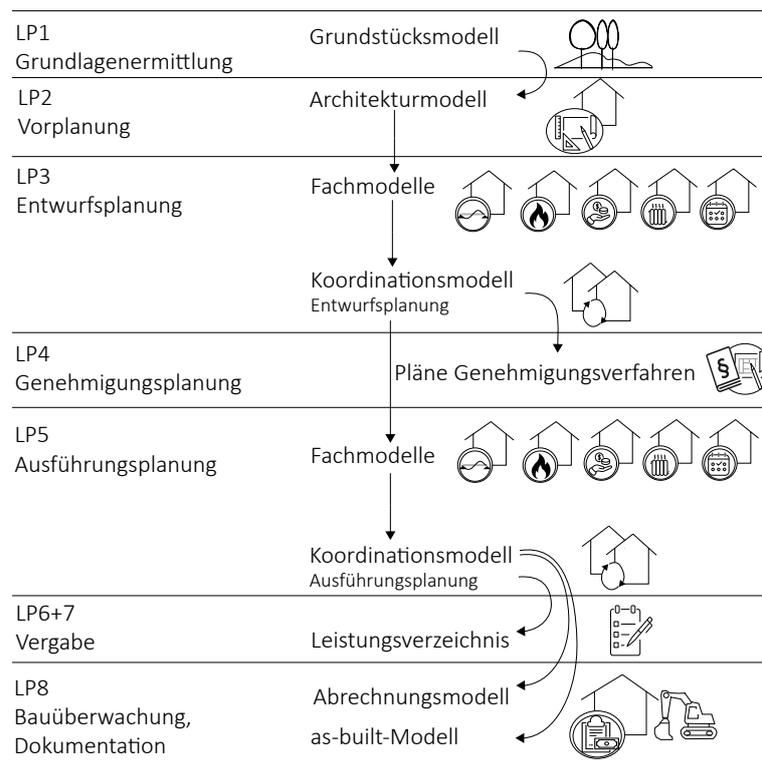


Abbildung 2.1: Modellbasierter Planungsprozess eines Gebäudes angelehnt an die HOAI (nach (BUNDESARCHITEKTENKAMMER, 2020))

2.2 Planungsprozess im Holzbau

Im Holzbau ist die Vorverlagerung der Detailplanung in die frühen Planungsphasen sinnvoll, da die Vorfertigung, die Transportlogistik sowie die Montage vor Ort einen Einfluss auf die Konstruktion und Gestaltung des geplanten Gebäudes hat. Durch die mehrschichtige Bauweise der Elemente wird auch ein Teil der Rohbau- und Ausbauplanung zusammengelegt. Dies entspricht jedoch nicht dem geplanten Vorgehen nach HOAI. (KAUFMANN et al., 2017)

Abbildung 2.2 verdeutlicht, wie ein idealer Planungsprozess für den Holzbau einen Einfluss auf den Übergabetermin haben kann: wird die „Holzbaukompetenz“ bereits in der frühen Planung berücksichtigt, muss kein Re-Design zwischen Werkstattplanung und Vorfertigung erfolgen. Die dadurch entstehende Verzögerung entfällt und die Werkplanung kann schneller in einer Vorfertigung münden (KAUFMANN et al., 2017). Die Verlagerung der Detailplanung sowie die frühzeitige Abstimmung zwischen Tragwerksplanung und Bauakustik in frühere Leistungsphasen sind Teil der BIM-Methodik.

Die Holzbaubranche ist von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägt. Wie Abbildung 2.3 zeigt, hat mehr als die Hälfte der Holzbau- und Zimmereibetriebe in Deutschland weniger als 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (KABELITZ-CIRÉ, 2021, 2022). Hier spielen sich traditionelle Arbeitsabläufe ab und die Werkplanung hat eine zentrale Rolle im gesamten

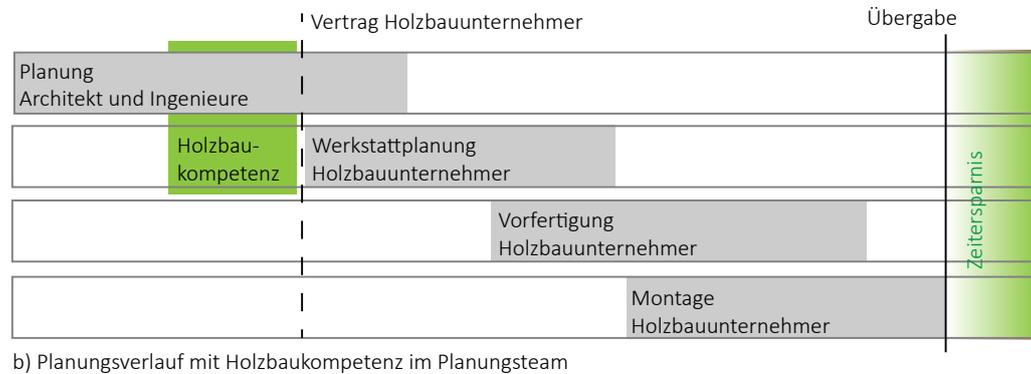
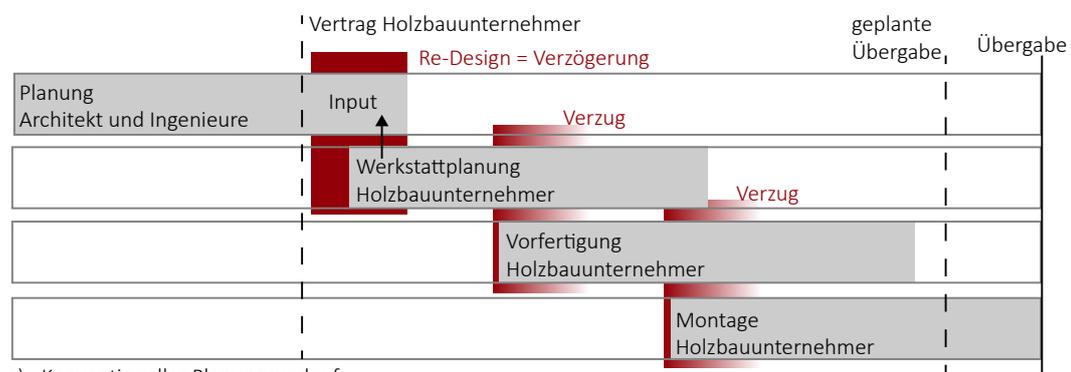


Abbildung 2.2: Vergleich zwischen einem konventionellen und einem idealen Projektverlauf für den Holzbau nach (KAUFMANN et al., 2017)

Bauablauf. Planungssoftware, die auf den Holzbau spezialisiert ist, setzt den Schwerpunkt häufig auf das rechnergestützte Konstruieren und die Maschinenanbindung (KOMZET BAU BÜHL, 2011). In *Computer-Aided Design* (CAD)- und *Computer-Aided Manufacturing* (CAM)-Systemen werden Gebäudemodelle erstellt, aus denen Stücklisten, Einzelteilzeichnungen, Montagepläne und die Maschinenansteuerung für den Abbund mit *Computerized Numerical Control* (CNC)-Maschinen generiert werden. Auf diese Funktionalität sind Modellierungs- und Planungssoftware im Holzbau spezialisiert (KOMZET BAU BÜHL, 2011). Noch fehlen geeignete Schnittstellen, um den Entwurf des Architekten nahtlos in die Holzbauplanung zu übernehmen (KESSEL et al., 2005). Bisher müssen BIM-Modelle erst mit einer CAD/CAM-Software bearbeitet werden, um sie für die Fertigungs- und Maschinenplanung nutzen zu können. Meist werden die Modelle für die Fertigung direkt aus 2D-Plänen erzeugt, um den hohen Anforderungen an Qualität und Informationstiefe für die Fertigung gerecht zu werden (HÜHNE, 2022).

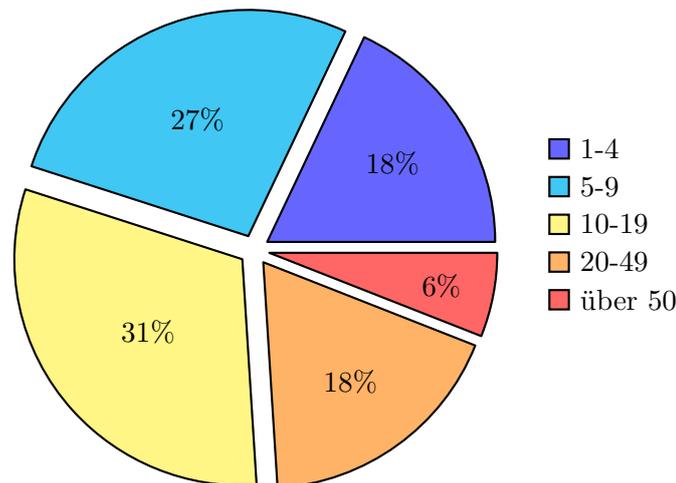


Abbildung 2.3: Anteil der deutschen Holzbau- und Zimmereibetriebe nach ihrer Anzahl an MitarbeiterInnen im Jahr 2021 nach (KABELITZ-CIRÉ, 2022)

2.3 Digitale Planung im Schallschutz

Der Vorteil bei der Nutzung von BIM zeigt sich insbesondere bei der Verbindung von BIM-Modellen mit weiteren Planungstools (MANZOOR et al., 2021). So können in einer früheren Planungsphase Analysen und Prognoserechnungen zur Tragwerksplanung und dem bauphysikalischen Verhalten des Gebäudes erstellt und zwischen verschiedenen Varianten das Optimum ausgewählt werden. Dies führt zu robusteren und besseren Lösungen. Diese *Early-Design*- oder *Performance-Based*-Methoden werden durch die Kombination von BIM-Modellen mit verschiedenen Algorithmen erreicht (HAMIDAVI et al., 2020; JUNG et al., 2018).

Während für die Planung der Raumakustik bereits Lösungen anhand von *application programming interface* (API) in Autorensoftware existieren (GIGLIO et al., 2020; PETERS et al., 2021; SUŠNIK et al., 2021; TAN et al., 2017; WU & CLAYTON, 2013), zeigt sich, dass die Integration der Schallschutzplanung noch keinen Einzug in die BIM-Methodik gefunden hat (BADINO et al., 2020). Die Software *SONarchitect* von *Sound of Numbers S.L.* erstellt zur Visualisierung ein 3D-Modell des zuvor händisch über 2D-Plänen nachgezeichneten Gebäudes. Die Software *CadnaR* der *DataKustik GmbH* bietet ebenfalls nur einen DWG/DXF-Import und das Gebäudemodell wird komplett von neuem erzeugt. Die Software *AcouBAT* von *CYPE Ingenieros* ist die einzige, bei der die Nutzung eines digitalen Gebäudemodells von Anfang an möglich ist. Allerdings werden auch hier keine Informationen zu Stoßstellen oder Raumkonstellationen verwendet und die Berechnungsergebnisse werden als PDF-Dateien ausgegeben und nicht modellbasiert weitergegeben.

Alle genannten Softwaretools fokussieren sich auf die Integration möglichst großer Datenbanken für Bauteile. Die Integration in einen BIM-Planungsprozess wird nicht oder nur begrenzt angeboten. Hinzu kommt, dass sie nicht auf den Holzbau spezialisiert sind und die Angabe der Stoßstellensituationen nur unzureichend möglich ist.

2.4 Zusammenfassung Planungsprozesse

Die Bauplanung ist ein komplexer Prozess, der die Qualität des Gebäudes maßgeblich prägt. Im Holzbau ist durch den hohen Grad an Vorfertigung eine Verlagerung der Detailplanung in frühe Planungsabläufe sinnvoll, auch wenn dies durch die bisherigen Regelungen nach der HOAI in Deutschland nicht vorgesehen ist.

Diese Verlagerung von Detailplanung in frühe Planungsphasen eignet sich für eine BIM-basierte Planung. Allerdings bleibt in Holzbaubetrieben der Fokus der Digitalisierung bisher auf die Anbindung der Bauteilfertigung mit CNC-Anlagen, für die in der Regel, Modelle firmenintern neu erstellt werden.

Die Schallschutzplanung ist ebenfalls weit davon entfernt, fester Bestandteil im BIM-Planungsprozess zu sein. Nur wenige Softwarelösungen ermöglichen eine komplette Schallschutzberechnung und häufig rechnen Ingenieurbüros mit eigenem Tool. Eine Integration des Schallschutzes in einen BIM-basierten Planungsablauf ist auch bisher nicht Bestandteil akademischer Forschung.

Kapitel 3

Schallschutz

Für die Schallschutzplanung wird eine Vielzahl von Normen und Richtlinien verwendet. In diesem Kapitel wird daher ein Überblick über die wichtigsten Berechnungsverfahren für die Planung des Schallschutzes im Gebäude gegeben. Die Abbildung 3.1 fasst die für die Schallschutzplanung relevanten Normen und Richtlinien zusammen.

In dieser Arbeit wird das Verfahren aus den europäischen Normen DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017 für die Prognose des Schalldämm-Maßes und DIN EN ISO 12354-2:2017-11, 2017 für die Prognose des Trittschallpegels verwendet. Die Mindestanforderungen an den Schallschutz in Gebäuden regelt in Deutschland die DIN 4109-1:2018-01, 2018. In der Richtlinie VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V., 2012 sind zusätzliche Anforderungen an einen erhöhten Schallschutz beschrieben. In der DIN 4109-2:2018-01, 2018 wird der rechnerische Nachweis erläutert, der in der DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017 und DIN EN ISO 12354-2:2017-11, 2017 auch frequenzabhängig beschrieben ist. Die Normen DIN EN ISO 717-1:2021-05, 2021 und DIN EN ISO 717-2:2021-05, 2021 erläutern die Ermittlung des Einzahlwertes aus frequenzabhängigen Werten, die sogenannte Bewertung. Diese Werte sind die Grundlage in allen Anforderungen.

Um Eingangsdaten zu ermitteln, werden Schallmessungen im Labor nach DIN EN ISO 10140-1:2021-09, 2021, DIN EN ISO 10140-2:2021-09, 2021 und DIN EN ISO 10140-3:2021-09, 2021 durchgeführt. Weitere Kennwerte für den Nachweis sind in Teilen der DIN 4109 zu finden (DIN 4109-31:2016-07, 2016; DIN 4109-32:2016-07, 2016; DIN 4109-33:2016-07, 2016; DIN 4109-34:2016-07, 2016; DIN 4109-35:2016-07, 2016; DIN 4109-36:2016-07, 2016). Zusätzlich können Messungen auch am Bau stattfinden, z. B. wenn die Einhaltung der Anforderungen überprüft wird. Die Messungen von Bauteilen am Bau regeln die Normen DIN EN ISO 16283-1:2018-04, 2018 und DIN EN ISO 16283-2:2020-11, 2020.

Im Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017 unterscheidet man zwischen Bauteilen der Bauart A (schwere Bauteile aus Beton, Ziegeln und zum Teil Massivholz wie Brettsperholz) und Bauart B (Leichtbauwände in Metall- oder Holzständerkonstruktionen). Die entscheidenden Kriterien sind die Körperschallnachhallzeit und die Ausbreitungsdämpfung der Bauteile (DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017). Bei einer frequenzabhängigen Betrachtung kann ein Bauteil in einem bestimmten Frequenzbereich der Bauart A und in einem anderen der Bauart B entsprechen.

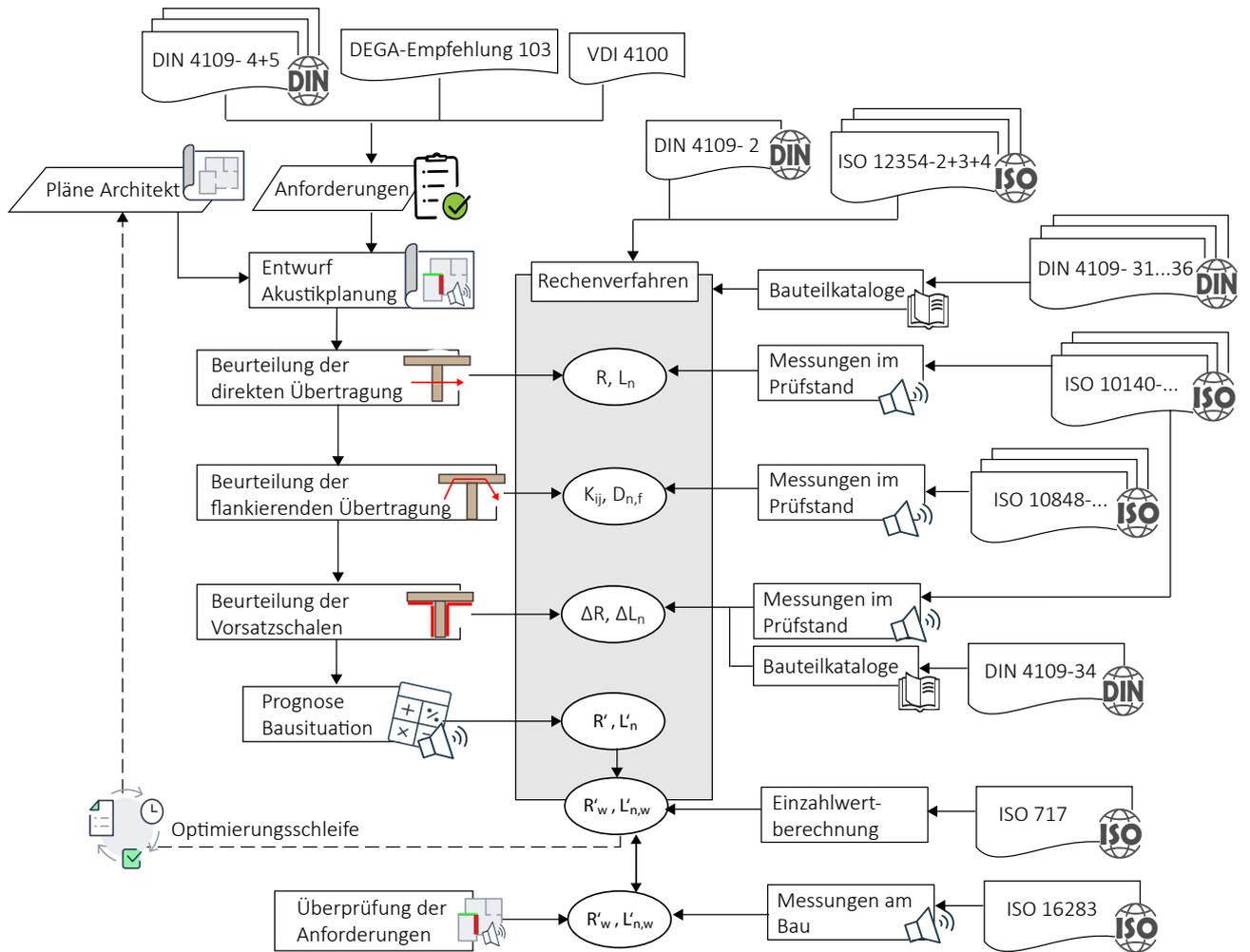


Abbildung 3.1: Schallschutzplanung mit geltenden Normen und Richtlinien zum Thema Kennwerte, Anforderungen, Mess- und Prüfverfahren

Die Unterscheidung nach Bauart A und B entscheidet über die Berechnungsweise. So wird beispielsweise in der Massivbauweise eine Vorsatzschale sowohl bei der Direktschalldämmung als auch bei der Flankenschalldämmung separat zum Grundbauteil behandelt. Im Leichtbau werden für die Flankenschalldämmung bei mehrschaligen Konstruktionen die Vorsatzkonstruktionen als Teil der Gesamtkonstruktion betrachtet. Infolgedessen muss im Holzbau nicht nur die Masse des gesamten Bauteils bekannt sein, sondern auch der Schichtaufbau und Information darüber, welches das Kernbauteil und welches die Vorsatzschale ist.

Die Schallübertragung erfolgt nicht nur auf direktem Weg durch ein trennendes Bauteil, sondern auch über flankierende Elemente. An Stoßstellen sind immer verschiedene Übertragungswege über die flankierenden Bauteile beteiligt: D_f , F_d und F_f (DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017). Abbildung 3.2 zeigt die Nebenwege für horizontale Situationen mit einer trennenden Wand und der vertikalen Situation mit einer Trenndecke. In der vertikalen Situation spielt im Holzbau die Schallübertragung über den Estrich in das flankierende Element im Senderraum und anschließend darüber in die Flanke des Empfangsraums eine wichtige Rolle. Dieser Übertragungsweg DF_f sollte immer zusätzlich betrachtet werden (RABOLD et al., 2017).

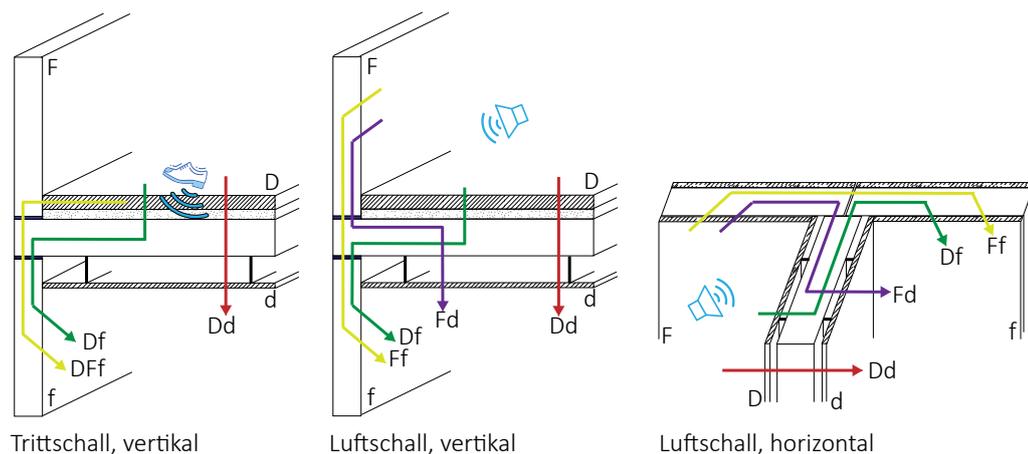


Abbildung 3.2: Direkter Übertragungsweg Dd und flankierende Übertragungswege D_f , F_d , F_f für den Luft- und Trittschall in vertikaler und horizontaler Richtung, sowie holzbautypischer Übertragungsweg DF_f

3.1 Prognose der Luftschalldämmung

Die Schalldämmung eines Bauteils am Bau setzt sich immer aus der Schalldämmung der Einzelelemente im Bauteil zusammen. Für die direkte Übertragung besteht das Schalldämmmaß R_{Dd} aus dem Schalldämmmaß des Kernbauteils R_s und den Verbesserungen durch Vorsatzschalen auf Seite des Senderraums ΔR_D und auf Seite des Empfangsraums ΔR_d nach Gleichung 3.1.

$$R_{Dd} = R_s + \Delta R_D + \Delta R_d \text{ dB} \quad (3.1)$$

Die Schallübertragung durch flankierende Bauteile ist gemäß Gleichung 3.2 zu berücksichtigen. Flankierende Bauteile sind alle Bauteile, die das trennende Bauteil an den Kanten einrahmen und an der Schallübertragung durch Abstrahlung im Empfangsraum mit beteiligt sind. Die Summe aller Übertragungswege ergibt das Bau-Schalldämm-Maß R' , also die Schalldämmung eines Bauteils im eingebauten Zustand unter Berücksichtigung aller flankierenden Elemente.

Abbildung 3.3 zeigt die geometrischen Kenngrößen, die in den folgenden Berechnungen verwendet werden: die gemeinsame Stoßstellenlänge l_{ij} zwischen den zwei Bauteilen, die Fläche des trennenden Elements S_s und die Flächen S_i bzw. S_j des Elements i bzw. j , die im Übertragungsweg ij betrachtet werden.

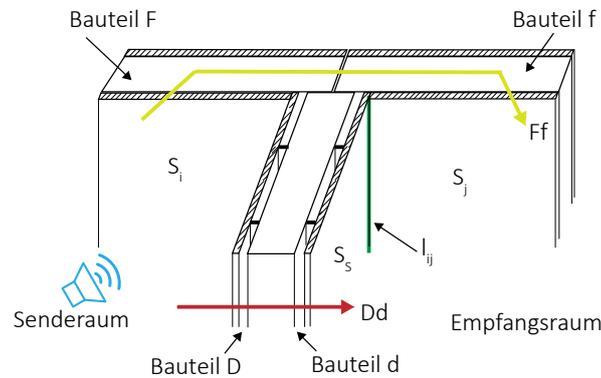


Abbildung 3.3: Geometrische Kenngrößen zur Berechnung des Schalldämm-Maßes in der Bau-Situation mit dem Übertragungsweg Ff über die flankierenden Elemente

Das Bau-Schalldämm-Maß setzt sich aus der direkten Übertragung und der Schallübertragung über die flankierenden Bauteile wird durch das Flankenschalldämm-Maß R_{ij} zusammen (Gleichung 3.2). Letzteres wird gemäß Gleichung 3.3 berechnet. Wird ein leichtes Bauteil (Bauart B) genutzt, kann die Flankenschalldämmung statt mit der Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$ mit der Norm-Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij,n}}$ berechnet werden (Gleichung 3.4) oder mit der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,ij}$ (Gleichung 3.5). Dabei ist l_{ij} die gemeinsame Länge der Bauteile, l_{lab} der Prüfstandswert als Bezugswert für l_{ij} , $l_0 = 1\text{m}$ die Bezugslänge und $A_0 = 10\text{m}^2$ die Bezugs-Absorptionsfläche.

$$R' = -10 \lg \left(10^{(-0,1 \cdot R_{Dd})} + \sum_{j=1}^n 10^{(-0,1 \cdot R_{ij})} \right) \text{ dB} \quad (3.2)$$

$$R_{ij} = \Delta R_i + \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_j + \overline{D_{v,ij}} + \left(10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \text{ dB} \quad (3.3)$$

mit

R_i dem Schalldämm-Maß des Elements i in dB (R_j für Element j),

S_S	der Fläche des Trennelements in m^2 ,
S_i	der Fläche der flankierenden Elemente i in m^2 (S_j für Element j),
ΔR_i	der Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch Vorsatzschalen, Unterdecken oder schwimmende Estriche auf der Seite des Senderraums i (auf der Seite S_j des Empfangsraums für ΔR_j) in dB,
$\overline{D_{v,ij}}$	der Schnellepegeldifferenz von Element i zu Element j in dB.

$$R_{ij} = \Delta R_i + \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_j + \overline{D_{v,ij,n}} + (10 \lg \frac{S_S}{\sqrt{l_{0l_{ij}}}}) \text{ dB} \quad (3.4)$$

$$R_{ij} = D_{n,f,ij} + (10 \lg \frac{S_S l_{\text{lab}}}{\sqrt{A_0 l_{ij}}}) \text{ dB} \quad (3.5)$$

3.2 Prognose des Trittschallpegels

Für Decken wird zusätzlich zur Luftschalldämmung auch der Norm-Trittschallpegel gemäß Gleichung 3.6 prognostiziert. Dieser wird für die Anregung durch Körperschall beim Gehen oder bei fallenden Objekten gebraucht. Auch hier wird zwischen der direkten Übertragung und der Übertragung des Schalls über die flankierenden Elemente unterschieden.

$$L'_n = 10 \lg \left(10^{0,1 \cdot L_{n,d}} + \sum_{j=1}^n 10^{(0,1 \cdot L_{n,ij})} \right) \text{ dB} \quad (3.6)$$

Bei der Berechnung des Norm-Trittschallpegels für ein Element wird die Trittschallminderung durch Deckenauflagen ΔL_n und Unterdecken ΔL_d nach Gleichung 3.7 berücksichtigt. Der Norm-Trittschallpegel für die Flankenübertragung $L_{n,ij}$ wird gemäß Gleichung 3.8 für Bauteile der Bauart A berechnet, wobei die Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$ analog zum Luftschalldämm-Maß berechnet wird. Für Bauteile der Bauart B wird $L_{n,ij}$ aus Gleichung 3.9 oder 3.10 ermittelt.

$$L_{n,d} = L_n - \Delta L_n - \Delta L_d \text{ dB} \quad (3.7)$$

$$L_{n,ij} = L_n - \Delta L_n + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij}} + (10 \lg \sqrt{\frac{S_i}{S_j}}) \text{ dB} \quad (3.8)$$

$$L_{n,ij} = L_{n,i} - \Delta L_n + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta R_j - \overline{D_{v,ij,n}} - (10 \lg (\frac{S_i}{l_{0l_{ij}}})) \text{ dB} \quad (3.9)$$

$$L_{n,ij} = L_{n,f,ij} - (10\lg(\frac{S_i \cdot l}{S_i \cdot l_{ij}})) \text{ dB} \quad (3.10)$$

Die DIN EN ISO 12354-2:2017-11, 2017 berücksichtigt bei der Berechnung des Trittschallpegels für die Flankenübertragung bisher nur den Übertragungsweg Df. Der Übertragungsweg Dff bildet sich bei leichten Konstruktionen durch Anregung des Fußbodens, indem Schall über den Estrichrand in das obere, flankierende Element fließt. Der Schall wird dann nach unten über den Flankenweg Ff weitergeleitet (RABOLD et al., 2017). Dabei erfolgt einer Trittschallminderung über den Estrichrand (ΔL_{edge}). Diese Werte hängen vom Anschluss der oberen Wand an das Deckenelement und dem Randdämmstreifen ab (RABOLD, WOHLMUTH et al., 2018).

$$L_{n,Dff} = L_{n,F} - \Delta L_{\text{edge}} + \frac{R_F - R_f}{2} - \overline{D_{v,Ff}} + (10\lg\sqrt{\frac{S_F}{S_f}}) \text{ dB} \quad (3.11)$$

3.3 Stoßstellen und Flankenübertragung

Die DIN 4109-32:2016-07 definiert Stoßstellen als „solche Bereiche im Ausbreitungsweg des Körperschalls [...], bei denen es auf Grund von Änderungen im Ausbreitungsweg zur Reflexion von Körperschall und damit zu einer Verminderung der Schallübertragung kommt“ (DIN 4109-32:2016-07, 2016). Eine Stoßstelle entspricht einer Bauteilverbindung aus L-, T- und X-Stößen. Auch Materialwechsel und Querschnittsveränderungen bilden akustisch eine Stoßstelle. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Stoßstelle immer die Verbindung von zwei oder mehr Bauteilen.

Wie groß der Einfluss der Flankenübertragung ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Bauweise, dem Stoßstellentyp und den verwendeten Verbindungsmitteln. Je besser die Schalldämmung des trennenden Elements ist, desto stärker wird auch der Einfluss der Flanken auf die Gesamtübertragung.

Die Flankenübertragung wird für den Holzmassivbau über das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} angegeben. Es kann auch über die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$ errechnet werden (siehe Gleichung 3.12). a_i und a_j sind die äquivalenten Absorptionslängen und werden mit der jeweiligen Körperschallnachhallzeit T_s des Bauteils i oder j berechnet. Die Körperschallnachhallzeit T_s hängt vom Gesamtverlustfaktor η_{tot} des Bauteils ab und ist ebenfalls ein frequenzabhängiger Wert.

$$\overline{D_{v,ij}} = K_{ij} - (10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}}) \text{ dB} \quad (3.12)$$

mit

a_i bzw. a_j die äquivalente Absorptionslänge von Bauteil i bzw. j in m nach Gleichung 3.13,

l_{ij} die gemeinsame Länge der Stoßstelle zwischen den Bauteilen i und j in m.

$$a_i = \frac{2,2 \pi^2 S}{c_0 T_{s,i}} \sqrt{\frac{1000 H z}{f}} \text{ m} \quad (3.13)$$

mit

$T_{s,i}$ der Körperschall-Nachhallzeit von Bauteil i (oder j) in s nach Gleichung 3.14,

S_S der Fläche des Bauteils in m^2 ,

f der Bandmittenfrequenz in Hz,

c_0 der Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s.

$$T_s = \frac{2,2}{\eta_{\text{tot}} \cdot f} \text{ s} \quad (3.14)$$

mit

η_{tot} der Verlustfaktor des Bauteils

c_0 der Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s.

Wird eine Mischbauweise verwendet, wird Gleichung 3.12 verwendet. Allerdings wird dann die äquivalente Schallabsorptionslänge a_i nach Gleichung 3.16 berechnet. Für reine Leichtbaukonstruktionen wird die Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$ aus der Norm-Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij,n}}$ gemäß Gleichung 3.15 ermittelt.

$$\overline{D_{v,ij}} = \overline{D_{v,ij,n}} - (10 \lg \frac{l_0 l_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}}) \text{ dB} \quad (3.15)$$

$$a_i = \frac{S_i}{1 \text{ m}} \quad (3.16)$$

Die Verwendung von $\overline{D_{v,ij}}$ statt K_{ij} gilt insbesondere für Holz- und Metallständerwände, die eine stark frequenzabhängige Schallübertragung aufweisen und bei denen die innere Schale die kritischste darstellt. Darunter fallen Elemente mit folgenden flächenbezogenen Massen m' (ohne Ständerkonstruktion):

- Decken bis zu 70 kg/m²,
- Fassaden bis zu 45 kg/m²,
- einschalige Innenwände bis zu 40 kg/m² und
- zweischalige Wände bis zu 75 kg/m² (DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017) .

3.4 Besonderheiten im Holzbau

Der Holzbau unterscheidet sich konstruktiv und somit auch akustisch von den massiven und monolithischen Konstruktionen aus Beton oder Mauerwerk. Bauteile aus Massivholz gelten als schwere Bauteile der Bauart A, während alle Holzständerkonstruktionen als leichte Bauteile der Bauart B gelten (DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017). Die nachfolgenden Aspekte fassen kurz zusammen, welche Besonderheiten bei der Schallschutzplanung für den Holzbau zu beachten sind. Für genauere Informationen steht weitere Literatur zur Verfügung (BLÖDT et al., 2019; HOLTZ et al., 2004; KOUYOUMJI et al., 2014; PEREZ & FUENTE, 2013; RABOLD, CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG & MECKING, 2018).

Monolithische Bauteile verhalten sich akustisch anders, als Bauteile, die aus mehreren Einzelteilen zusammengesetzt werden. Daher spielt im Holzbau neben der geringeren flächenbezogenen Masse auch der mehrschichtige Aufbau der Bauteile eine große Rolle. Das Material der Bauteile beeinflusst dabei nicht nur die direkte Schallübertragung, sondern auch die Flankenübertragung.

Besonders beim Trittschallpegel sind die tiefen Frequenzen im Holzbau kritisch. Die Abbildung 3.4 zeigt frequenzabhängige Verläufe des Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels unterschiedlicher Holzbauteile. Es ist deutlich zu sehen, wie sich der Bauteilaufbau auf den frequenzabhängigen Verlauf auswirkt.

Für Wände spielt im Holzbau auch die Art der Beplankung eine Rolle. So sind freistehende Vorsatzschalen anders zu bewerten als direkt montierte Beplankungen. Der Schalenabstand, die Art und Masse der Beplankungen, sowie die Hohlraumdämmung haben einen Einfluss auf die Schallübertragung. Je nach Art werden die Vorsatzschalen als zusätzliche Einflüsse durch ΔR_i betrachtet oder sind Teil des Grundaufbaus des Bauteils.

Bei den Decken spielt auch der Estrichaufbau mit der dynamischen Steifigkeit der Trittschalldämmung, der Rohdeckenbeschwerung und der Masse des Estrichs eine wichtige Rolle. Wird

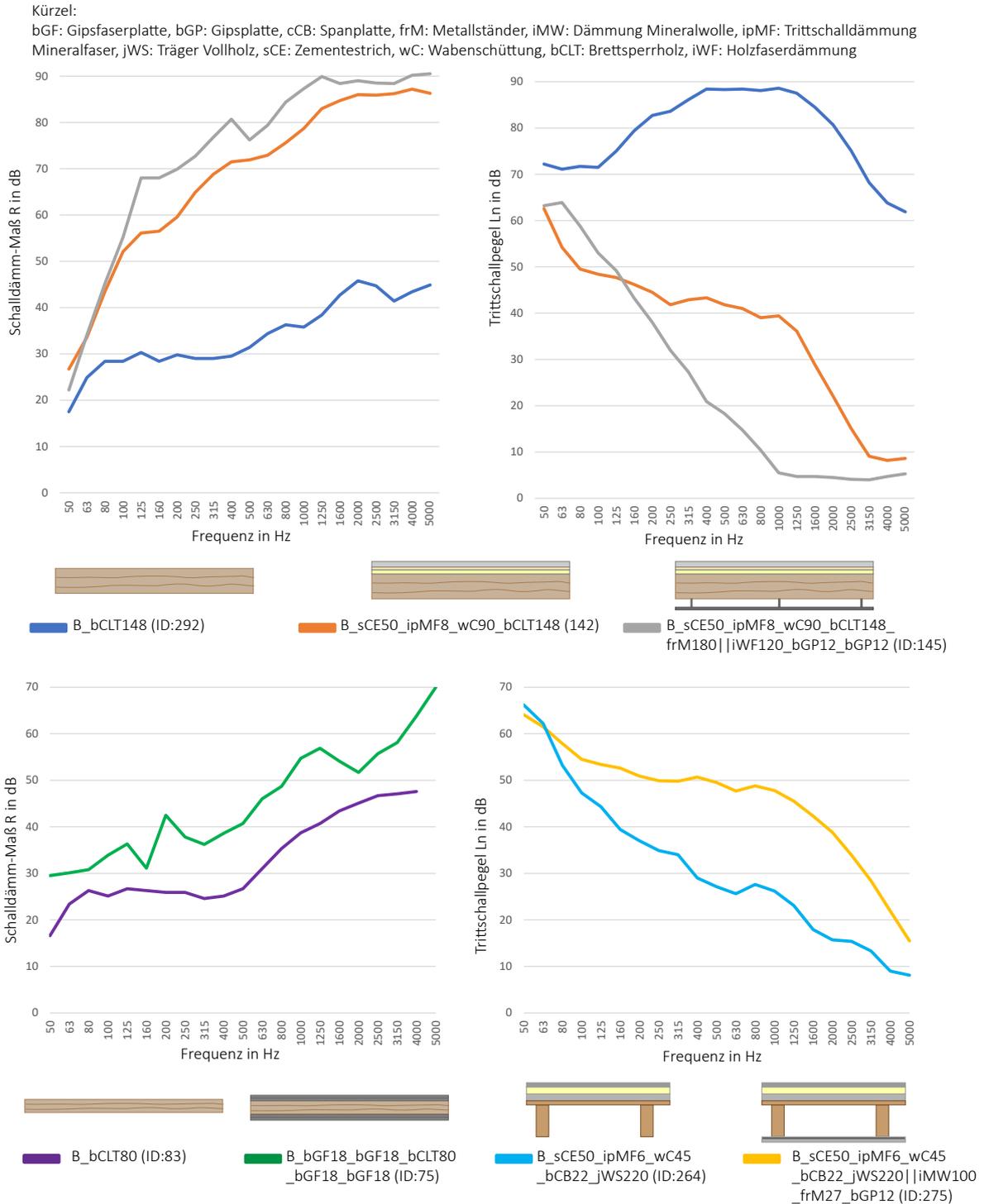


Abbildung 3.4: Frequenzabhängiger Verlauf des Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels für Aufbauten mit Brettsper Holzelementen (bCLT) und Holzbalken (jWS). Die Bauteil-ID und Bauteilkürzel sind aus der Bauteildatenbank *VaBDat* entnommen.

eine Unterdecke verwendet, haben die flächenbezogene Masse und die Steifigkeit der Beplankung sowie die Art der Aufhängung (direkt beplankt oder über Holzlattung, Federschielen, Direktabhängiger oder Direktschwingabhängiger) einen Einfluss. Bei der Schallübertragung zu den flankierenden Wänden kommt der Anschluss des Estrichs über den Randdämmstreifen und die Kopplung der Decke über die Deckenaufleger hinzu. Auch hier hat die Geometrie der Stoßstelle, also der Stoßstellentyp, einen Einfluss auf die Schallübertragung.

Das Stoßstellendämm-Maß ist von vielen Faktoren abhängig, aber der Stoßstellentyp ist hierbei maßgeblich, denn er berücksichtigt die Geometrie der Stoßstelle. Der Bauteilanschluss, also das Zusammenfügen von Bauteilen an Stoßstellen, wird durch die Wahl der Verbindungsmittel beeinflusst. Hier kann man zwischen starren und weichen Verbindungen unterscheiden. Die Verwendung elastischer Zwischenschichten zur Entkopplung beeinflusst ebenfalls das Stoßstellendämm-Maß.

3.4.1 Stoßstellentypen

In der DIN EN ISO 12354 wird für schwere Bauteile nur zwischen Ecken, Kreuzstößen und T-Stößen unterschieden. Für leichte Bauteile werden keine Werte für Stöße an Ecken genannt. Die Verbindung von Leichtbauwänden mit schweren Massivbauteilen wird durch das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} berücksichtigt. Die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$ für Holzständerwände ist nur in T- und Kreuzstößen aufgeteilt, wobei zwischen horizontalen und vertikalen Stößen unterschieden wird.

Eine Schwierigkeit im Holzbau ist die bis dato eher geringe Datengrundlage das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} oder die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,ij}}$. Um sie zu erweitern werden im Rahmen von Forschungsvorhaben und Produktentwicklungen immer wieder Messungen in Laboren und auf Baustellen durchgeführt (GERRETSEN, 2015; MORANDI et al., 2018; RABOLD et al., 2017), aber auch numerische Methoden verwendet (CRISPIN et al., 2014; POBLET-PUIG & GUIGOU-CARTER, 2015; SPÄH & WEBER, 2016; YANG et al., 2021). In früheren Forschungsprojekten an der TH Rosenheim wurden aus verschiedenen Projekten 15 Stoßstellentypen, wie in Abbildung 3.5 gezeigt, identifiziert und als Grundlage für die weitere Charakterisierung von Stoßstellen verwendet (TIMPTE, 2016). Zusätzlich wurde eine Stoßstelle Tv1-2-3 eingefügt, die der Stoßstelle Xv1-24-3 entspricht mit einem gekürzten Wandelement, sodass ein T-Stoß entsteht.

3.4.2 Einfluss der Stoßstellendämm-Maße auf die Prognose

Dieses Kapitel zeigt durch ein Rechenbeispiel mit den Einzahlwerten den Einfluss des Stoßstellentyps auf das Schalldämm-Maß und den Trittschallpegel bei der Prognose nach DIN EN ISO 12354-1:2017-11 bzw. DIN EN ISO 12354-2:2017-11. Die Abbildung 3.7 zeigt

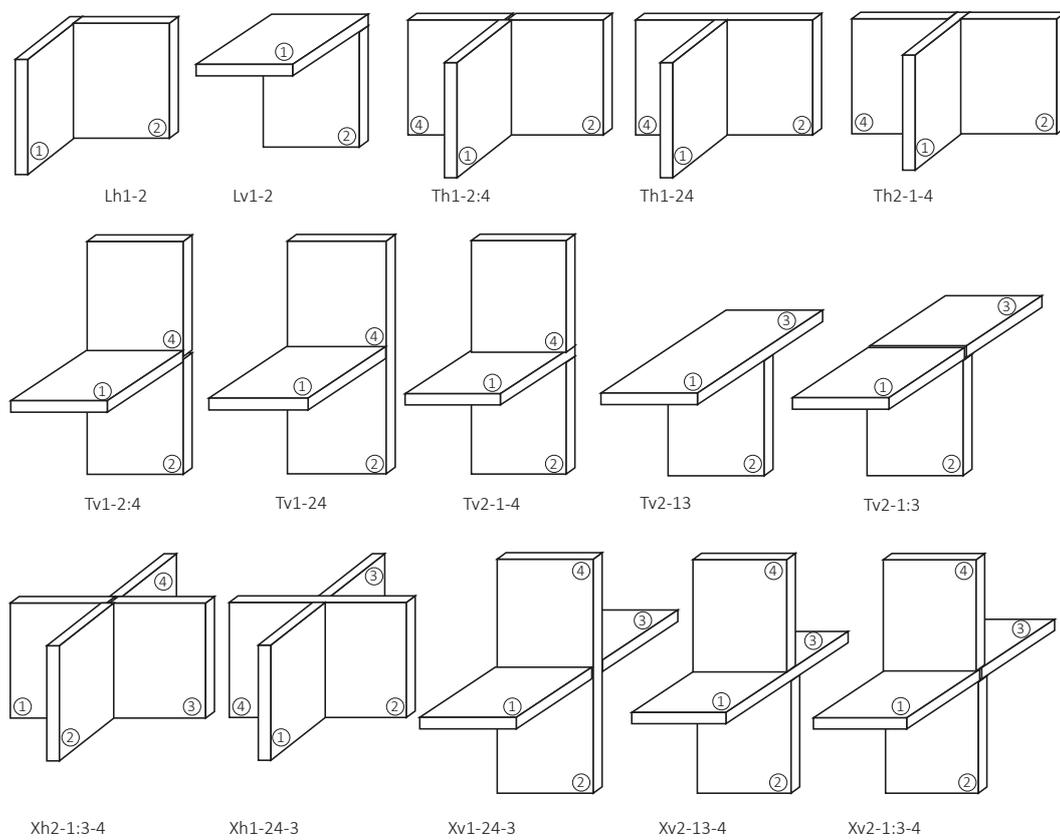


Abbildung 3.5: Darstellung der Stoßstellentypen nach (TIMPTE, 2016)

wie sich unterschiedliche Stoßstellendämm-Maße auf die Prognose des Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels einer Trenndecke auswirken, wenn die Eingangsdaten aus Tabelle 3.1 für die Schalldämm-Maße und aus Abbildung 3.6 für die Stoßstellendämm-Maße verwendet werden. Dabei wurde für das Stoßstellendämm-Maß von Flanke 1 und 2 jeweils dieselben Werte genommen, genauso wie für die Flanken 3 und 4. Für vier Situationen wurden die Werte für das Stoßstellendämm-Maß aus dem möglichen Wertebereich entnommen, der aus den unterschiedlichen Quellen je nach Stoßstellentyp angegeben ist. Die gesamte Berechnung ist in Anhang A zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Eingangsdaten für die Trenndecke und flankierenden Wände

Trenndecke		Flanke 1 & 2		Flanke 3		Flanke 4	
R_w	$L_{n,w}$	$R_{w,SR}$	$R_{w,ER}$	$R_{w,SR}$	$R_{w,ER}$	$R_{w,SR}$	$R_{w,ER}$
70 dB	38 dB	53 dB	53 dB	66 dB	54 dB	43 dB	31 dB

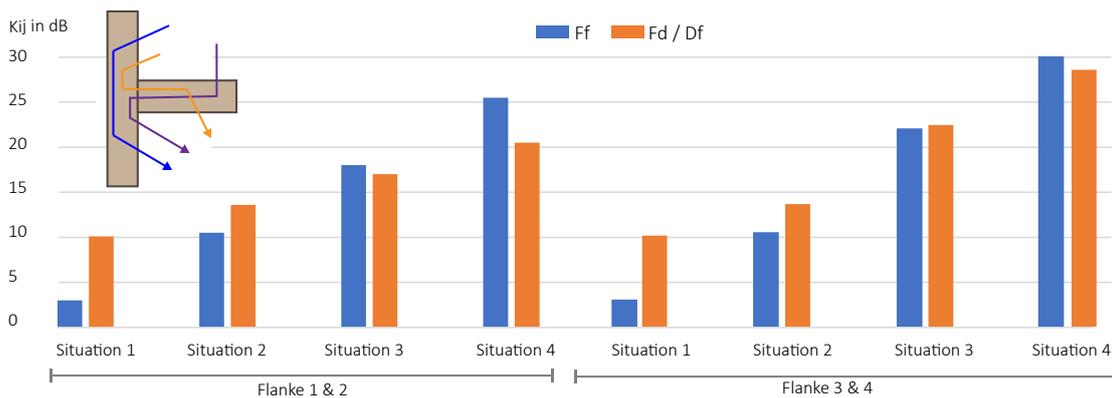


Abbildung 3.6: Gewählte Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} für die Situation 1 bis 4 zur Untersuchung des Einflusses auf das prognostizierte bewertete Schalldämm-Maß R'_w und den bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$

Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss auf das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w durch das Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} bei gleichem Eingangswert des bewerteten Schalldämm-Maß R_w der Bauteile. In dem aufgeführten Beispiel sind in Situation 1 die Stoßstellendämm-Maße sehr niedrig, sodass die Mindestanforderungen für den Schallschutz nach DIN 4109 in dieser Bausituation nicht erreicht werden würden. Verbessert man nur die Ausführung der Stoßstellen, erzeugt man mit den gleichen Bauteilen ein deutlich besseres Ergebnis. Situation 2 erfüllt dann die Mindestanforderungen. Situation 3 und 4 zeigen, dass sich sogar für die Schalldämmung und den Trittschallpegel die Anforderungen für Komfort erreichen lassen. Allerdings ist zwischen diesen Situationen keine große Verbesserung mehr vorhanden. Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass konstruktive Lösungen durch eine verbesserte Gestaltung der Stoßstellen ebenso zum Erfolg führen können wie eine Verbesserung der Bauteile selbst. Gleichzeitig bedeutet

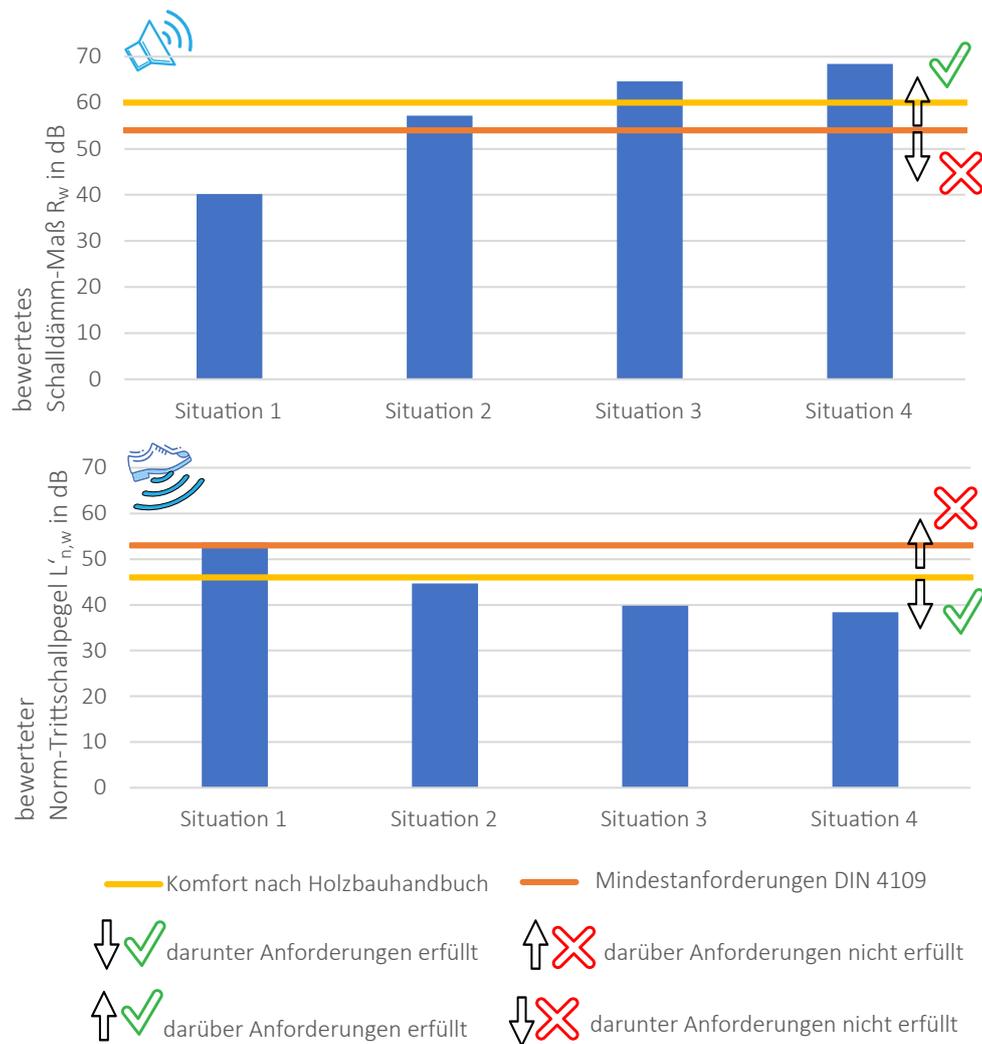


Abbildung 3.7: Einfluss unterschiedlicher Stoßstellendämm-Maße K_{ij} aus Abbildung 3.6 auf die Prognose des bewerteten Schalldämm-Maßes R'_w und des bewerteten Norm-Trittschallpegels $L'_{n,w}$ bei gleichbleibenden Werten für die Bauteile nach Tabelle 3.1: Situation 1 erfüllt als einzige nicht die Mindestanforderung nach (DIN 4109-1:2018-01, 2018). Situation 3 und 4 erfüllen auch die erhöhten Anforderungen nach (BLÖDT et al., 2019).

dies aber auch, dass eine Verbesserung des trennenden Bauteils ohne Berücksichtigung der flankierenden Bauteile und einer eventuell immer noch schlechten Ausführung der Stoßstelle nicht zielführend ist.

3.5 Zusammenfassung Schallschutz

Aus den gezeigten Berechnungen ergeben sich die Eingangsdaten, die für eine korrekte frequenzabhängige Schallschutzprognose notwendig sind. Es sind neben Geometrieinformationen auch Kenntnisse über Bauteilart, Materialauswahl und Position der Bauteile notwendig. Sinnvoll ist insbesondere im Holzbau eine frequenzabhängige Planung. Für die Prognose soll geprüft werden, ob aus dem Datenmodell folgende Informationen extrahierbar sind:

- Bauteiltyp: Wand oder Decke, also horizontale oder vertikale Situation
- Bauweise: Massivbau oder Leichtbau, sowie Material und Schichtaufbau
- Bauteilabmessungen: Länge und Breite des Trennbauteils und der flankierenden Bauteile
- Trennfläche: relevante Trennfläche zwischen dem Empfangs- und Senderraum
- Kantenlängen: gemeinsame Kantenlänge von Bauteilen in der Stoßstelle
- Stoßstellentyp: Geometrische Ausführung der Stoßstelle nach Abbildung 3.5

Vor allem der Stoßstellentyp bestimmt die weiteren Konstruktionsdetails wie Verbindungsmittel und legt fest, ob weitere Entkopplungsschichten durch Elastomere verwendet werden können. Daher sollen vor allem die Stoßstellentypen ermittelt werden, um einen erheblichen Mehrwert in der Schallschutzplanung zu generieren, da diese Informationen bis nur manuell ausgelesen werden können.

Kapitel 4

Digitale Gebäudemodellierung

Auch wenn die Entwicklung von BIM-fähiger Software in den letzten Jahren enorm zugenommen hat, ist die Idee von BIM nicht neu und bereits in den 1970er Jahren wurden erste Arbeiten zu digitalen Gebäudemodellen veröffentlicht. Aufgrund verschiedener Umstände setzten sich jedoch zunächst reine Zeichenprogramme durch (*Computer-Aided Design* (CAD)). Mit der Entwicklung leistungsfähigerer Computer wurde es möglich, ein semantisches Modell mit einer dreidimensionalen Modellierung zu verknüpfen. Erst mit einer Veröffentlichung im Jahre 2003 machte die Firma *Autodesk* den Begriff *Building Information Modeling* (BIM) weithin bekannt, obwohl dieser Begriff schon 1992 in wissenschaftlichen Veröffentlichungen auftauchte (BORRMANN et al., 2015).

Ein BIM-Modell entsteht, wenn neben der Geometrie noch weitere Informationen im Gebäudemodell integriert sind. Laut TOLMAN, 1999 stellen Informationen sogar eins der wichtigsten „Baumaterialien“ dar. Ein Gebäudemodell soll nicht nur Angaben über Form (Geometrie und Topologie), sondern auch über Funktion und Verhalten (z. B. Lastwiderstand) von Objekten beinhalten, sodass aus dem semantisch angereicherten Modell Informationen für verschiedene Planungszwecke abgeleitet werden können (TOLMAN, 1999).

In diesem Kapitel wird auf den theoretischen Hintergrund digitaler Gebäudemodellierung eingegangen. Kapitel 4.1 beschreibt Grundlagen der objektorientierten Modellierung, insbesondere die Rolle des Detaillierungsgrades. Anschließend wird in Kapitel 4.2 eine Kurzfassung offener Datenformate für die Bauindustrie gegeben. Im Kapitel 4.3 wird dann näher auf das offene Datenformat IFC eingegangen: Relationen, Bauteile, Geometrie, räumliche Struktur, sowie Eigenschaftensätze und verschiedene *Model View Definition* werden erläutert. In Kapitel 4.4 folgt eine Definition von *semantic enrichment* und *model healing*, wie es in dieser Arbeit verwendet wird. Dieses Kapitel endet mit einer Analyse zum Stand der Forschung von BIM im Holzbau und BIM im Schallschutz (Kapitel 4.5).

4.1 Objektorientierte Modellierung

Die Basis objektorientierter Programmierung oder Modellierung ist immer das Objekt selbst, dem Eigenschaften und Funktionen zugeordnet werden. Auf diese Art können auch Gebäude modelliert werden, wobei jedes Bauteil einem Objekt entspricht. Zusätzlich bilden räumliche

Objekte oder Kombinationen aus Bauteilen wie Gebäude, Geschosse oder Räume eigene Objekte.

Ein Gebäudemodell sollte nach GARRETT et al., 1989 folgende Informationen enthalten:

- die Form, Position und Orientierung physikalischer Elemente im Gebäude,
- ihre Materialzusammensetzung und Materialeigenschaften,
- eine hierarchische Gliederung von Räumen sowie die Identifizierung der Elemente in Räumen oder an den Raumgrenzen und
- eine Beziehung zwischen dem Subsystem von einem Element zu dem Subsystem eines anderen Elements.

Die Autoren in GARRETT et al., 1989 fügen neben der reinen Repräsentation physikalischer Elemente und Räume auch räumliche Begrenzungen (*spatial constraints*), funktionale Begrenzungen (*functional constraints*) und geometrisch-funktionale Begrenzungen (*form-function constraints*) hinzu. Sie unterteilen das Modell auch in der räumlichen und funktionalen Darstellung (GARRETT et al., 1989). Neuere Gebäudemodelle können zudem noch Informationen über den Herstellungsprozess, den Bauablauf, die Nutzung von Räumen und den Anforderungen beinhalten (BORRMANN et al., 2015).

Detaillierungsgrad von Gebäudemodellen

Die benötigte Informationstiefe in einem Modell hängt von den Anwendungszielen, der Planungs- bzw. Bauphase und den beteiligten Akteuren ab. Auf der einen Seite sollte ein Modell alle Informationen beinhalten, die für die jeweilige Aufgabe notwendig sind, auf der anderen Seite jedoch kein Übermaß an Informationen beinhalten, die den Informationsfluss und die Verarbeitung der Modelle unnötig komplex machen.

Der Detaillierungsgrad kann dabei sowohl die Geometrie als auch die Semantik einzelner Bauteilgruppen oder des gesamten Gebäudes betreffen. Manche Systeme zur Beschreibung des Detaillierungsgrades binden auch die Planungsphasen oder den Planmaßstab mit ein. Man unterscheidet zwischen *Level of Detail* (LoD), *Level of Development* (LOD), Modelldetaillierungsgrad (MDG), *Level of Geometry* (LOG), *Level of Information* (LOI) und *Level of Information Need* (LOIN) (ABUALDENIEN & BORRMANN, 2019, 2022). Mangelnde einheitliche Regelungen und Mehrfachnutzung von Abkürzungen in Veröffentlichungen erschweren die Kommunikation von Projektbeteiligten und sollen hier kurz zusammengefasst werden.

(DIN EN 17412-1:2021-06, 2021) unterscheidet explizit zwischen geometrischen (LOG) und alphanumerischen Informationen (LOI), die unabhängig voneinander definiert werden. Die geometrischen Informationen bestehen aus Detaillierung, räumlicher Dimension, Lage,

visueller Darstellung und parametrischem Verhalten. Die alphanumerischen Informationen beinhalten die Identifikation eines Objekts innerhalb einer Gliederungsstruktur und dessen Merkmale. LOG und LOI lassen sich dabei unabhängig voneinander definieren und sind von Leistungsphasen losgelöst.

Das Konzept LoD wurde bereits Anfang der 2000er Jahre veröffentlicht (ABUALDENIEN & BORRMANN, 2019). Es beschreibt die semantische und geometrische Detaillierungstiefe eines digitalen Gebäudemodells in verschiedenen Stufen, unabhängig ihrer Zuverlässigkeit und Überprüfbarkeit. Anschließend baute das *American Institute of Architects* (AIA) auf diesem Konzept auf und schuf den LOD. Dieser hat fünf Stufen: LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400, LOD 500. Der große Unterschied zwischen LoD und LOD ist, dass bei LOD nur durch die Projektbeteiligten als gültig angesehene und geprüfte Informationen in das Modell eingebracht werden. Im LoD dagegen können noch nicht überprüfte Details modelliert sein.

Dabei stellt LOD 100 einen sehr wagen Entwurf dar, während LOD 500 das *as-built* Modell darstellt. In neueren Veröffentlichungen des BIM Forums¹ wird zusätzlich ein LOD 350 als Zwischenstufe eingeführt, die eine Ergänzung zur präzisen Geometrie des LOD 300 darstellt (BEDRICK et al., 2021). Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft die graphische Darstellung der Detaillierungsgrade für unterschiedliche Bauteile.

Zusätzlich definiert die Informationsbedarfstiefe (LOIN) spezifische Austauschforderungen, die nicht nur das Gebäudemodell, sondern auch alle dazugehörigen Informationen aus externen Dateien betreffen (DIN EN ISO 19650-1:2019-08, 2019). Diese Dateien werden als „unstrukturierte Daten“ bezeichnet (DIN EN ISO 19650-1:2019-08, 2019).

Das Konzept des Modelldetaillierungsgrades (MDG) wurde für Deutschland vom *Verband beratender Ingenieure* (VBI) an die Leistungsphasen der HOAI gekoppelt (BOROWIETZ et al., 2016), ohne jedoch einen detaillierten Bauteilkatalog zu liefern. Der MDG startet bei MDG 010 für die Grundlagenermittlung und endet bei MDG 510 für die Objektbetreuung bzw. MDG 600 für den Betrieb. Der Detaillierungsgrad ist zwischen der Entwurfsplanung und dem Bestandsmodell deutlich feingliedriger als der LOD (BOROWIETZ et al., 2016; RICHERT, 2022).

Die Arbeit ABUALDENIEN und BORRMANN, 2022 zeigt auf, dass auf internationaler Ebene viele weitere Konzepte existieren. Italien hat zum Beispiel ein Stufenkonzept von A bis G eingeführt. Daraus ergibt sich eine Vielzahl von Definitionen für den Detaillierungsgrad. Insbesondere die Unterscheidung zwischen *Level of Detail* oder *Level of Development* ist auch in der Fachliteratur nicht immer eindeutig (ABUALDENIEN & BORRMANN, 2022). Hier ist für jedes Projekt im Vorfeld eine klare Definition notwendig, um Missverständnisse und fehlerhafte Datenübergaben zu vermeiden.

¹<https://bimforum.org/resources/>

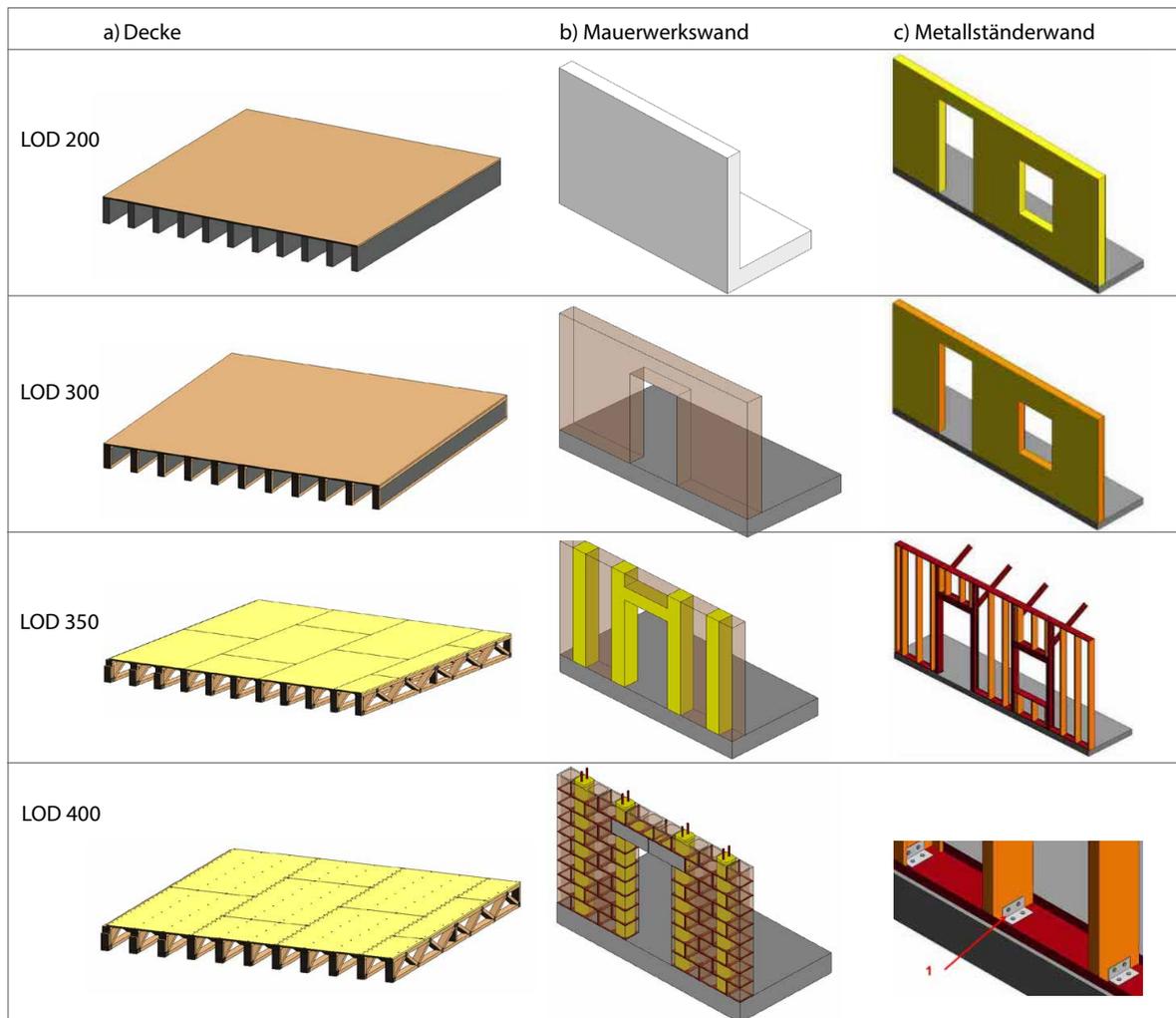


Abbildung 4.1: Detaillierungsgrade verschiedener Bauteile für a) eine Decke und b) eine Mauerwerkswand nach (ABUALDENIEN, 2023) und für eine Metallständerwand c) nach (BEDRICK et al., 2021)

Zeichen- und Modellierungsrichtlinien sind weitere Versuche, Modelle zu vereinheitlichen. Die Richtlinie *United States National CAD Standard* (NCS) zum Beispiel definiert wie Layer in CAD Programmen benannt werden sollen, welche Abkürzungen zu verwenden sind und wie CAD in den BIM-Prozess einzubinden ist. Der Modellierungsleitfaden der Bergischen Universität Wuppertal und der Technischen Universität Darmstadt geht näher auf die Modellierung von Räumen und Bauelementen in BIM ein und fordert, Bauelemente nach einem im Projekt vereinbarten Klassifizierungssystem einzuordnen (HELMUS et al., 2021a, 2021b, 2021c, 2021d). Bei der Modellierung mehrschichtiger Elemente unterscheidet die Richtlinie nach der Einzelschicht-Modellierweise, der Hybrid-Modellierweise und der Mehrschicht-Modellierweise.

Eine weitere Richtlinie stammt vom *BIM Forum* und definiert tabellarisch die Informationstiefe und Geometriedarstellung von Bauteilen in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad (BEDRICK et al., 2021) wie auch in Abbildung 4.1 dargestellt. Softwarehersteller bieten neben Schulungen auch Handbücher zur Erstellung von BIM-Modellen an (MENSCH UND MASCHINE, 2017).

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit dem Konzept *Level of Development* (LOD) gearbeitet, das immer Geometrie und Semantik separat betrachtet. Dieses LOD bezieht sich nicht auf das Gesamtmodell, sondern auf die Bauteile innerhalb des Modells, die unterschiedliche Detaillierungsgrade aufweisen können. Diese Definition von LOD nutzt auch das *BIM Forum* (BEDRICK et al., 2021).

Da in den gängigen Beschreibungen des Detaillierungsgrads nicht auf die semantische Beschreibung der Bauteile eingegangen wird, wird in Kapitel 5.1 erläutert, wie sich unterschiedliche LOD auf Modelle für den Holzbau auswirken und wie diese Modelle mit IFC beschrieben werden.

4.2 Offene Datenstandards für die Bauindustrie

Seit der Entwicklung von CAD/CAM-Software ist das Problem des Datenaustauschs bekannt. Das Format *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES) ist ein herstellernerutrales Datenformat, das bereits 1979 durch die amerikanische *Air Force, Army, Navy*, die *NASA* und die Firmen *Boeing* und *General Electric* initiiert wurde. Es eignet sich besonders für den Austausch von Bauplänen zwischen CAD/CAM-Software (NAGEL et al., 1980) und kann bis heute von fast allen gängigen CAD-Programmen gelesen und geschrieben werden. Da es allerdings nicht mehr weiterentwickelt wird, haben sich *Drawing Exchange Format* (DXF) und *Drawing File Format* (DWG) als sehr populär herausgestellt. Diese sind jedoch proprietäre Formate des Herstellers *Autodesk*.

Zusammen mit der Entwicklung graphischer Oberflächen für Internetseiten wurde 1995 das Format *Virtual Reality Modeling Language* (VRML) entwickelt. Es sollte 3D-Modelle mit

Lichtquellen und Oberflächen möglichst realistisch darstellen. Dieses Format wurde weitgehend von *Extensible 3D* (X3D) ersetzt, welches normiert ist (ISO/IEC 19775-1:2013-11, 2013; ISO/IEC 19776-2:2015-12, 2015; ISO/IEC 19776-3:2015-10, 2015) und Dinge wie die Geometrie, die Laufzeitumgebung sowie eine API spezifiziert (DALY & BRUTZMAN, 2007). Gebäude, die in diesem Format dargestellt werden, können für virtuelle Realitäten genutzt werden, enthalten jedoch keine Bauteilinformationen, sondern nur die Geometrie, Position und Oberflächendarstellung der Objekte (PAVIOT et al., 2020).

Für BIM-Modelle mit Geometrie und Semantik ist keines dieser Dateiformate geeignet. Der Austausch von Modellen zwischen Softwareanwendungen verschiedener Anbieter ist nur mit einem funktionsfähigen, herstellerneutralen Datenformat möglich. Offene Datenformate vereinfachen langfristig den Einsatz und die Entwicklung von Softwaretools, da nicht eine Schnittstelle von jeder Software zu jeder anderen Software, sondern nur eine Schnittstelle zu einem offenen Datenformat benötigt wird (RAMAJI et al., 2014).

Die Art des Datenaustauschs in BIM-Abläufen führt zur Unterscheidung zwischen closed BIM und open BIM. Bei closed BIM wird der Datenaustausch nicht oder nur in nativen Formaten durchgeführt, wohingegen open BIM mit offenen Datenstandards arbeitet (siehe Abbildung 4.2). Dies ermöglicht die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Planern und Gewerken, die Modelle in unterschiedlichen Anwendungsprogrammen erstellen, visualisieren und bearbeiten können. Diese Interoperabilität schafft die Flexibilität für Projektteilnehmer, auf ihren gewerkspezifischen Plattformen zu arbeiten, um somit auch die Qualität der Planung zu erhalten. In dieser Arbeit wird auf Basis des open BIM Gedanken gearbeitet.

Für den offenen Datenaustausch müssen Objekte anhand ihrer Funktion und Art eindeutig identifizierbar sein. Um dies zu erreichen wurden Klassifizierungssysteme erstellt: *MasterFormat*, *NatSpec*, *OmniClass*, *UniClass*, *UniFormat* und *Construction-Operations Building Information Exchange* (COBie). *OmniClass*, *MasterFormat* und *UniFormat* stammen vom *Construction Specifications Institute* (CSI) und sind für den nordamerikanischen Markt gedacht. *Uniclass* wurde vom *NBS Enterprises Ltd* in Großbritannien erstellt. Viele dieser Formate basieren auf der ISO 12006-2:2015-05, 2015 und bilden einen Baustein im Prozess der Digitalisierung.

Im Gegensatz zu Klassifizierungssystemen spezifizieren Ontologien nicht das Objekt selbst, sondern seine Funktion in einer spezifischen Umgebung, indem sie die Beziehung der Objekte zueinander beschreiben. Insbesondere im Bereich *semantic web* wird auf gemeinsame Datenformate, Austauschprotokolle und Ontologien gesetzt. So wird dem Modell eine gewisse Intelligenz gegeben, aus der Informationen maschinell abgeleitet werden können. Verbreitete Formate hierfür sind *Resource Description Framework* (RDF), *Simple Protocol And RDF Query Language* (SPARQL) und *Turtle*. Klassen, Eigenschaften und Verbindungen werden in *Web Ontology Language* (OWL) beschrieben.

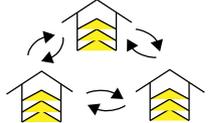
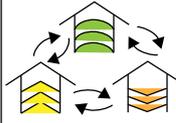
	closed BIM	open BIM
little BIM	 <ul style="list-style-type: none"> - Modellerstellung: eine Plattform - Datenaustausch: keiner 	 <ul style="list-style-type: none"> - Modellerstellung: eine Plattform - Datenaustausch: offener Datenstandard
big BIM	 <ul style="list-style-type: none"> - Modellerstellung: mehrere Plattformen - Datenaustausch: native Formate 	 <ul style="list-style-type: none"> - Modellerstellung: mehrere Plattformen - Datenaustausch: offener Datenstandard

Abbildung 4.2: Unterschiedliche Konzepte des Datenaustauschs bei der Verwendung von BIM: little BIM auf einer Plattform zur Modellerstellung, big BIM auf mehreren Plattformen zur Modellerstellung, closed BIM ohne Datenaustausch oder nur mit nativen Formaten und open BIM mit einem Datenaustausch in offenem Datenstandard

Um ein standardisiertes offenes Datenschema für den Baubereich anzubieten, wurden in den letzten Jahren einige Projekte in diesem Bereich durchgeführt. Die Projekte *Brick* und *project Haystack* nutzten diese Methodik für die Gebäudeautomatisierung (BALAJI et al., 2018; CHARPENAY et al., 2015; QUINN & MCARTHUR, 2021). Ergänzend setzt die *Building Topology Ontology* (BOT) den Fokus auf die Topologie von Gelände, Geschossen, Zonen sowie Räumen und kann mit *Brick* kombiniert werden. Die *Building Products Ontology* (BPO) ist eine Ontologie zur Beschreibung von (Bau-)Produkten und die *Smart Appliances Reference Ontology* (SAREF) für smarte Haushaltsgeräte, Licht- und Temperatursensoren (DANIELE et al., 2015). Im Bereich der Gebäudeautomation stehen noch viele weitere spezialisierte Ontologien zur Verfügung (PAUEN et al., 2020; PRITONI et al., 2021).

Green Building Studio hat das Format *Green Building XML* (gbXML) eingeführt, das *Extensible Markup Language* (XML) zur Beschreibung dreidimensionaler Gebäude nutzt. Es ist eines der am weitesten verbreiteten Formate für die Bauindustrie und vor allem auf den Datenaustausch zwischen BIM-Modell und Energiesimulationstools spezialisiert. Die Geometriedarstellung ist jedoch eingeschränkt, da nur rechteckige Elemente visualisiert werden können (DONG et al., 2007).

Das Format *dotbim* (.bim) ist ein minimalistisches Schema für die Darstellung von Gebäudegeometrien. Es ist deshalb so kompakt, weil es jede Geometrie als Mesh darstellt und nur eine reduzierte Menge an Informationen über Bauteile als *Dictionary* weitergibt. Auch *hypar*² setzt mit ihrer Plattform-unabhängigen Bibliothek auf nur wenige Klassen. Hier sollen Gebäudemodelle anhand von Code in *Python* oder *C#* generiert werden.

²<https://hypar-io.github.io/Elements/index.html>

Seit 2018 wird auf Initiative der *Nemetschek Group* das *Structural Analysis Format* (SAF) für die Tragwerksplanung entwickelt (ZOTKIN et al., 2016). Es handelt sich um ein Open-Source Vorhaben mit einer relationalen Datenbank für Bauwerksdaten zur Tragwerksplanung, die als Excel-basiertes Dokument gespeichert werden (DLUBAL, 2021; ŠONKA, 2022).

Das Format *Standard for the Exchange of Product Model Data* (STEP) ist ein in der ISO 10303 definierter Standard zur Abbildung von Produktdaten während eines gesamten Lebenszyklus. Es kann sowohl die Geometrie als auch die Bauteilinformationen, also die Semantik, darstellen. 1994 wurde STEP das erste Mal veröffentlicht und wird seitdem ständig erweitert (PRATT, 2001). Das dafür verwendete Dateiformat ist *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). Die verwendeten Klassen, Beziehungen und Beschränkungen (*Constraints*) werden in einem EXPRESS-Schema festgelegt (ISO 10303-11:2014-11, 2004). EXPRESS-G ermöglicht eine graphische Darstellung des Schemas und ist vor allem hilfreich, um einen schnellen Überblick über die Klassen und Zusammenhänge zu bekommen (URBAN et al., 2000). Viele internationale Forschungsprojekte wie CIMSTEEL, COMBI, COMBINE, ATLAS, RISESTEP oder VEGA haben die Entwicklung von STEP für das Baugewerbe zusätzlich vorangetrieben (POYET et al., 2002).

Auf STEP basiert auch das weit verbreitete Format *Industry Foundation Classes* (IFC), das von der *International Alliance for Interoperability* (IAI) Mitte der 1990er Jahre ins Leben gerufen wurde. IFC ist das umfangreichste offene Datenformat, um dreidimensionale Gebäudemodelle abzubilden. Es beinhaltet neben umfangreichen geometrischen Darstellungsmöglichkeiten auch die Nutzung einer Gebäudehierarchie und Beziehungen zwischen Objekten. Das nächste Kapitel beschäftigt sich ausführlich mit diesem Format.

4.3 Industry Foundation Classes

Das open BIM-Konzept, das BIM zu einem kollaborativen und offenen Prozess macht, zeichnet sich durch die Verwendung herstellerneutraler Formate wie IFC, *BIM Collaboration Format* (BCF), COBie, *City Geography Markup Language* (CityGML) etc. aus (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023c). Bereits 1986 wurde eine Arbeitsgruppe für das Baugewerk gegründet, die sich mit dem STEP-Format beschäftigen sollte (TOLMAN, 1999). In den USA wurde im Jahr 1994 die IAI gegründet (BAZJANAC & CRAWLEY, 1997) aus der sich später *buildingSMART* entwickeln sollte, deren Aufgabe die Entwicklung offener digitaler Methoden für die Baubranche ist. Die internationale Organisation *buildingSMART* verwaltet und entwickelt bis heute das Format IFC.

IFC ist das vorherrschende offene Datenformat, um dreidimensionale Gebäudemodelle abzubilden und beinhaltet neben umfangreichen geometrischen Darstellungsmöglichkeiten auch semantische Informationen wie die Gebäudehierarchie, Beziehungen zwischen Objekten und spezifische Eigenschaften von Objekten. Zusätzlich werden durch die Vererbungshierarchie Eigenschaften von übergeordneten Klassen an die tiefer liegenden Klassen übergeben. Innerhalb eines Objekts kann auf weitere Objekte, Eigenschaften oder auf Beziehungen (*IfcRelationship*) verwiesen werden. IFC ermöglicht den Datenaustausch für die objektorientierte Modellierung, wie sie bereits von GARRETT et al. Ende der 1980er Jahre gefordert wurde (GARRETT et al., 1989).

Das IFC-Schema ist in der Datenmodellierungssprache EXPRESS geschrieben, welches standardisiert ist (ISO 10303-11:2014-11, 2004). Als Grundlage dienen neben den *IFC specifications* von *buildingSMART* (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023b) auch Normen und Richtlinien. Das IFC-Schema ermöglicht eine standardisierte, digitale Beschreibung von Gebäuden und Infrastruktur (ISO 16739-1:2018-11, 2018). Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über weitere relevante Normen rund um BIM.

Basierend auf dem IFC-Schema werden verschiedene Dateiformate verwendet. Die Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten, IFC-Daten zu verarbeiten. Mit *ifcXML* wird eine leichter lesbare Version geschaffen, die die Vorteile von XML nutzt. Um die Dateigröße zu reduzieren, können IFC-Daten in eine *ZIP*-Datei eingebettet werden. Für die webbasierte Nutzung steht *ifcJSON* zur Verfügung (AFSARI et al., 2017) und für Technologien wie *semantic web* und *linked data* wird *ifcOWL* entwickelt (PAUWELS & TERKAJ, 2016; PRITONI et al., 2021). Um die Extraktion von Daten aus einer IFC-Datei zu beschleunigen wird zusätzlich am Format *ifcHDF5* gearbeitet (KRIJNEN & BEETZ, 2020).

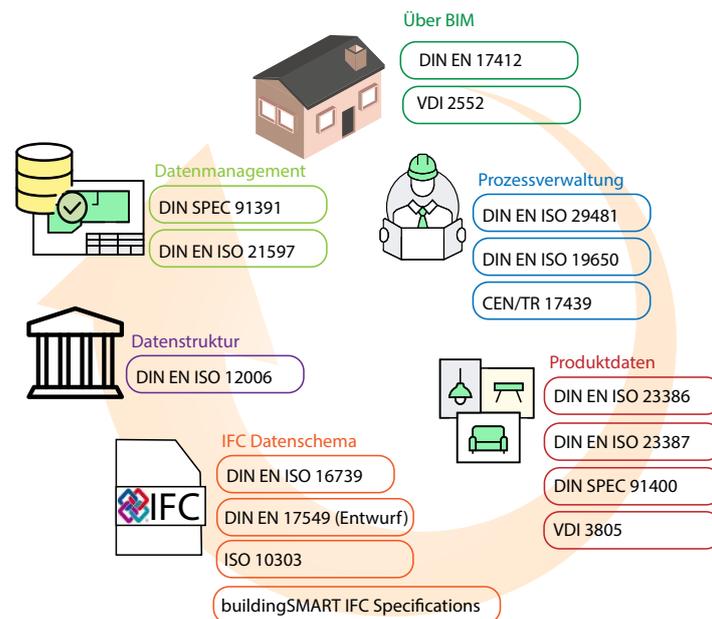


Abbildung 4.3: Normen und Richtlinien rund um BIM für die Prozessverwaltung, die Produktdaten, das IFC Datenschema, die Datenstruktur und das Datenmanagement

Tabelle 4.1: Darstellung verschiedener Formate zur Nutzung des IFC-Schemas nach (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023a)

Format	Beschreibung
STEP Physical File .ifc	Standardformat zur Nutzung des IFC-Schemas
Extensible Markup Language (XML) .ifcXML	Verbesserte Lesbarkeit, basierend auf ISO 10303-28
ZIP .ifcZIP	In ZIP-Dateien eingebettete IFC-Daten, mit deutlich reduzierter Dateigröße
Web Ontology Language (OWL) ifcOWL	Darstellung des IFC-Schemas in OWL. Kann auch in den Formaten .rdf und .ttl verwendet werden.
JavaScript Object Notation (JSON) .json	Vorläufiges Format mit verbesserter Lesbarkeit
Hierarchical Data Format (HDF) .hdf	Vorläufiges Format zum Speichern von IFC-Daten in einer hierarchischen Datenbank
SQLite .sqlite	Speichert IFC-Daten in eine relationale Datenbank, bisher nicht von buildingSMART unterstützt

Das IFC-Datenmodell ist in vier Layern strukturiert (siehe Abbildung 4.4): der *Ressource Layer* beinhaltet die wichtigsten Ressource-Schemata (z.B. Geometrie, Material und Topologie). Der *Core Layer* beinhaltet die grundlegenden Klassen des Schemas zur Beschreibung von Produkten und Prozessen (*control*, *product* und *process extension*) sowie das Kernel-Schema, welches die abstrakten Klassen (z. B. *IfcRoot*, *IfcProduct*) für die Datenstruktur zur Verfügung stellt. Der *Interoperability Layer* beschreibt Klassen, die aus dem *Core Layer* abgeleitet

und in mehreren Disziplinen angewendet werden. Übergeordnet bildet der *Domain Layer* die Definitionen domänenspezifischer, spezialisierter Produkte und Prozesse. Die nächsten Abschnitte gehen genauer auf einzelne Klassen ein.

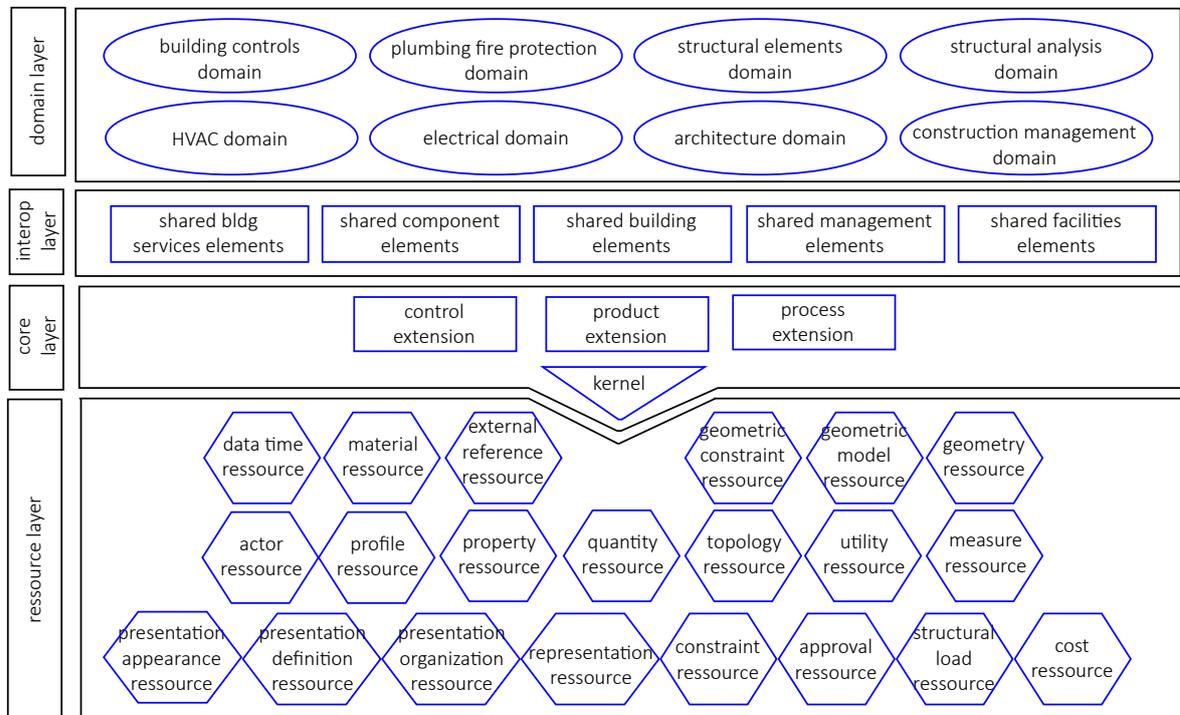


Abbildung 4.4: Architektur des IFC-Schemas in vier Layern nach (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023a)

4.3.1 Bauteile in IFC

Bauteile sind in der Klasse *IfcBuiltElement* (in früheren Versionen *IfcBuildingElement*) enthalten. Sie sind Teil des *Core Layer* und abgeleitete Klassen von *IfcProduct* (siehe Abbildung 4.5). Bauteile können immer auf einer semantischen und einer geometrischen Ebene dargestellt werden.

Bauteilgeometrie in IFC

Die geometrische Darstellung der Bauteile ist für diese Forschungsarbeit essenziell, da aus der Geometrie und der Position der Objekte die Stoßstellen abgeleitet werden sollen. In IFC wird die Geometrie unabhängig von der Semantik betrachtet. Die Verbindung zwischen Bauteil und Geometrie erfolgt in der Ebene von *IfcProduct* durch *IfcProductRepresentation*. Zur Darstellung stehen sowohl topologische (*IfcTopologicalItem*) als auch geometrische (*IfcGeometricRepresentationItem*) Objekte zur Verfügung. Abbildung 4.6 gibt einen Überblick über Methoden zur Darstellung dreidimensionaler Objekte und ihre zugehörigen Klassen in IFC.

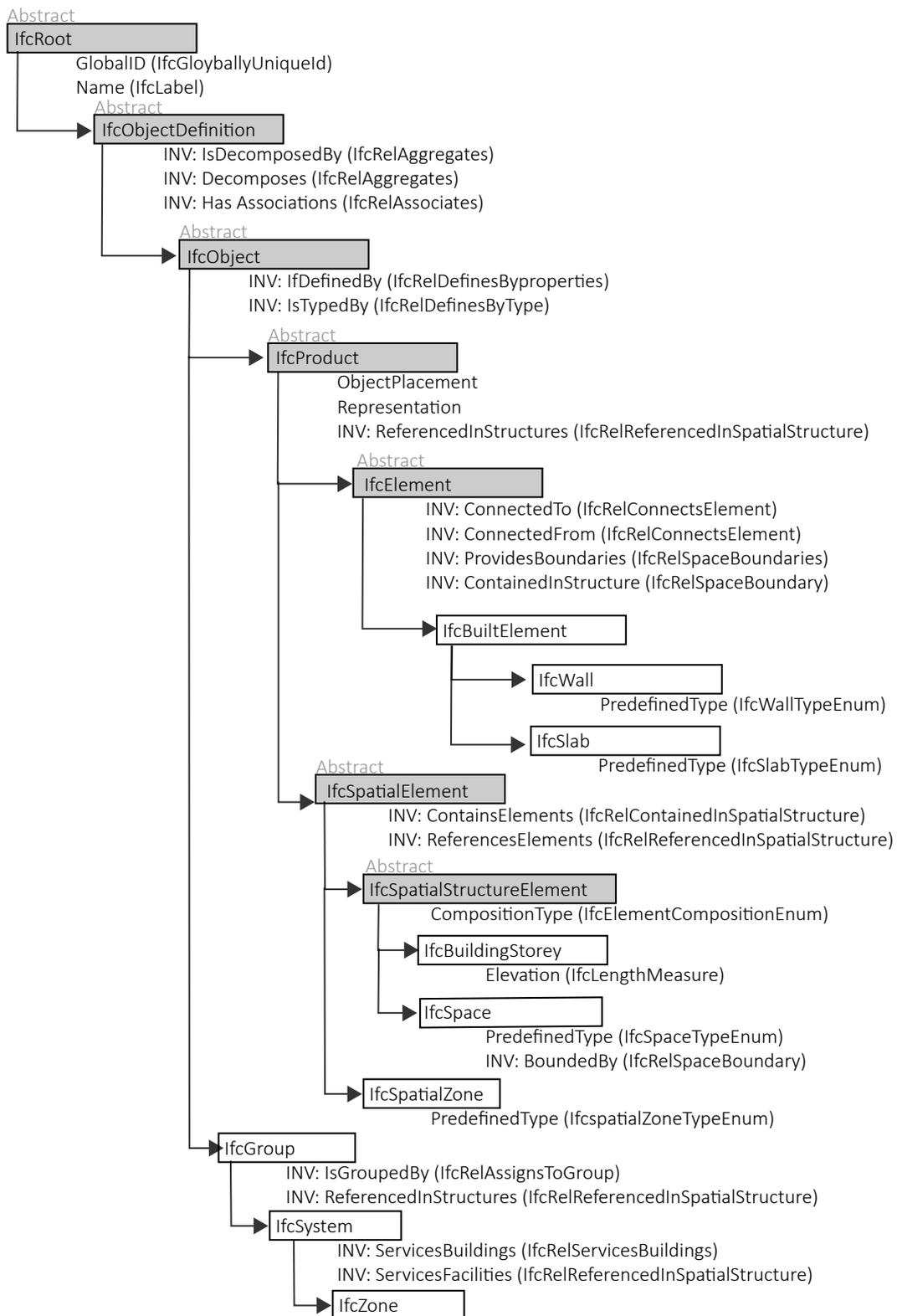


Abbildung 4.5: Ausschnitt aus der Vererbungshierarchie für Bauteile und Räume

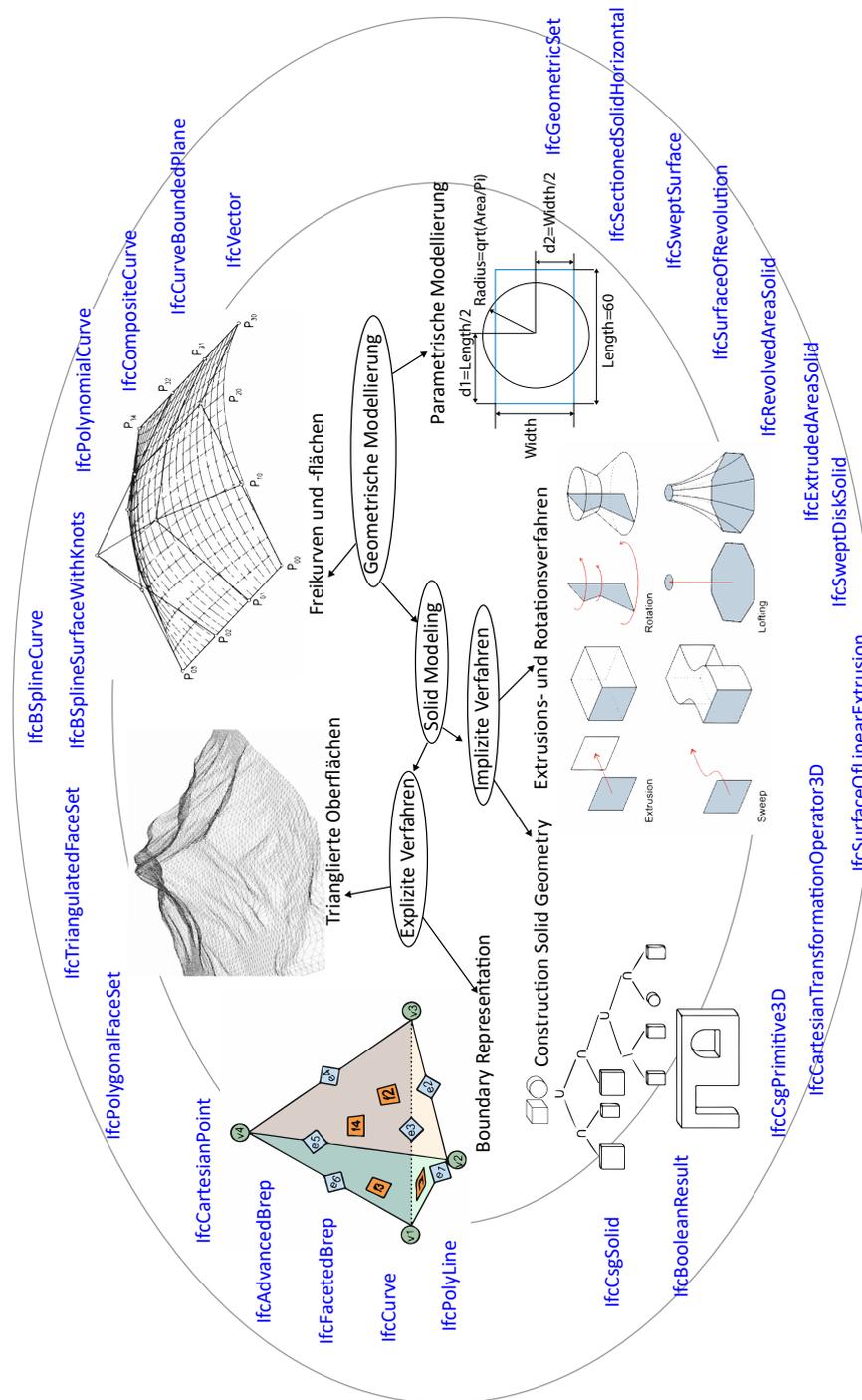


Abbildung 4.6: Überblick über Methoden zur Darstellung dreidimensionaler Objekte nach BORRMANN et al., 2015 und ihre zugehörigen Klassen in IFC mit zugehörigen IFC Klassen (Ausschnitt)

Es gibt viele Möglichkeiten, dreidimensionale Elemente darzustellen, die auch von IFC unterstützt werden. Bei der Modellierung beschreiben explizite Verfahren die Oberfläche der Körper, während die impliziten Verfahren die Konstruktionsschritte zur Erstellung des Körpers aufzeichnen. Um Objekte in unterschiedlicher Software nicht nur importieren, sondern auch bearbeiten zu können, verwendet man die prozedurale Geometriebeschreibung, bei der die Erstellungs- und Bearbeitungsoptionen gespeichert werden (MÄNTYLÄ, 1988). Diese parametrischen Modelle können auch mehrfach verändert werden (MONEDERO, 2000). Hierfür unterstützt IFC unter anderem *constructive solid geometry* (CSG), Extrusions- sowie Rotationsverfahren in den abgeleiteten Klassen von *IfcShapeRepresentation*.

Zu den expliziten Verfahren gehört die *Boundary Representation* Methode, bei der aus Punkten Linien geformt und zu einer Fläche geschlossen werden. Dadurch entsteht eine Topologie, die sich durch Graphen beschreiben lässt (*Vertex-Edge-Face-Graph*). In IFC werden die topologischen Informationen durch die abgeleiteten Klassen von *IfcTopologicalRepresentationItem* verwendet. Diese Methode ist für gerade, eckige Bauteile effizient, jedoch nicht bei gestalterisch anspruchsvollen, gekrümmten Körpern. Hier kommen Freiformkurven und -flächen zum Einsatz. Freiformkurven sind durch die mathematische Beschreibung von Koordinaten und einem Raumparameter definiert (Bézier-Kurven, B-Splines, *Nonuniforme Rationale B-Splines* (NURBS)). Bei Freiformflächen wird die Beschreibung der Kurven durch einen weiteren Parameter zu einer Fläche ergänzt. Die Definition über Randflächen mit *Boundary Representation* (BRep) oder NURBS wird ebenfalls in IFC unterstützt (DAUM, 2018).

Allerdings ist zu betonen, dass ein IFC-Modell an sich kein parametrisiertes Modell ist. Veränderungen können immer nur durch das Erstellen einer neuen IFC-Datei erreicht werden.

Material in IFC

Ein Bauteil kann grundsätzlich ohne jegliche Materialinformationen erstellt werden. Eine Modellierung der einzelnen Schichten kann wiederum auch rein semantisch erfolgen, d. h. ohne dass diese geometrisch dargestellt werden. Das Bauteil ist dann weiterhin ein Hüllkörper mit Abmessungen. Diese Semantik ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Einem Bauteil sollte ein Bauteiltyp zugeordnet werden. Dieser Bauteiltyp enthält die Informationen, wie die einzelnen Schichten zusammengesetzt sind, in der Klasse *IfcMaterialLayerSet*. Dort wird festgelegt, welche Schichten (*IfcMaterialLayer*) in welcher Reihenfolge verwendet werden. In der jeweiligen Schicht wird dann auf das Material (*IfcMaterial*) verwiesen. Nun muss noch die Richtung festgelegt werden, in der die Schichten des *IfcMaterialLayerSet* auf das jeweilige Bauteil wirken. Dies geschieht über die Klasse *IfcMaterialLayerSetUsage*, in der die Achse der Bauteildicke *LayerSetDirection* und die Reihenfolge (positiv oder negativ) der Schichten (*DirectionSense*) definiert werden. Auf diese Weise werden mehrlagige Strukturen unabhängig von der Bauteilrichtung definiert.

Da im Holzbau fast ausschließlich mit mehrschichtigen Aufbauten gearbeitet wird, erläutert dieses Kapitel besonders die Semantik des Material- und Schichtaufbaus im IFC-Schema. Später legt Kapitel 5.1 fest, wie Bauteile im Holzbau in unterschiedlichen Detaillierungsgraden genau aufgebaut werden.

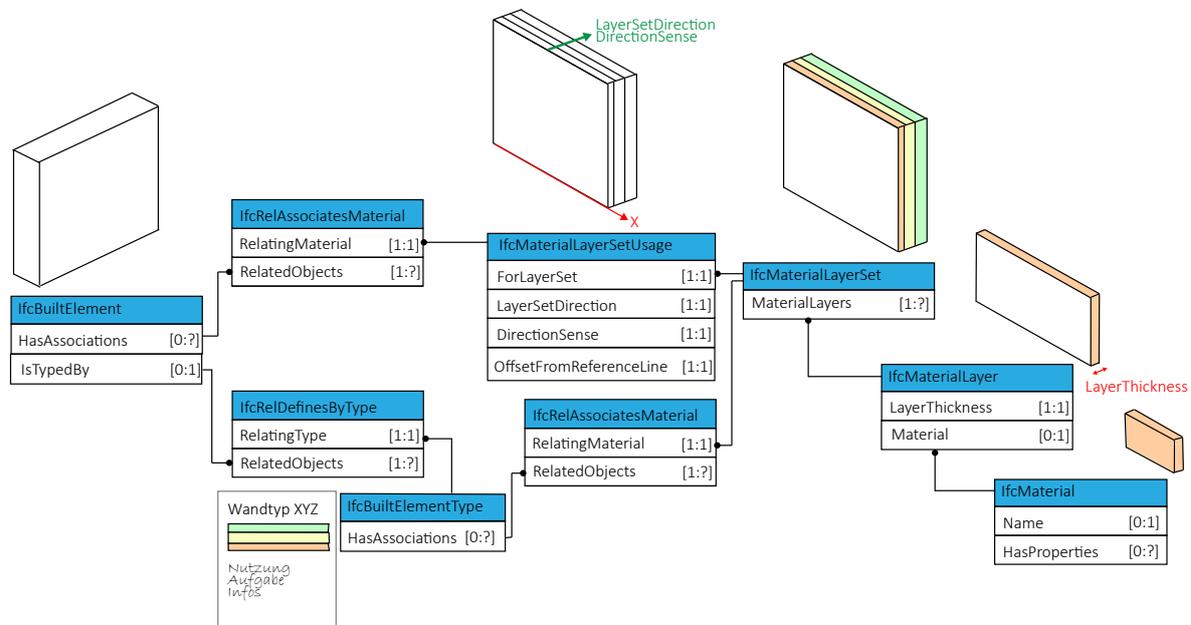


Abbildung 4.7: Zuordnung von Materialschichten *IfcMaterialLayer* und Bauteiltyp *IfcBuiltElementType* an ein beliebiges Bauteil *IfcBuiltElement* durch Verwendung von *IfcRelAssociatesMaterial*

4.3.2 Beziehungen und Attribute in IFC

Beziehungen zwischen Elementen können in IFC sowohl mit einer direkten Referenzierung als auch einer objektivierten Referenzierung erfolgen (DAUM, 2018). Die direkte Referenzierung ist zum Beispiel der Fall bei der Angabe des *IfcMaterial* aus dem *IfcMaterialLayer* über das Attribut *Material*. Die objektifizierte Referenzierung erfolgt über ein Element, das die Beziehung darstellt. Das ist zum Beispiel bei der Verbindung von Elementen über *IfcRelConnectsPathElements* der Fall. Dabei kann der Relation jeweils nur ein Element als *RelatingElement* und nur eins als *RelatedElement* angegeben werden. Bei manchen Relationen ist es auch möglich, mehrere Elemente anzuhängen, wie es bei *IfcRelAssociatesMaterial* mit *RelatedObjects* der Fall ist. Dies ist im IFC-Schema durch die Kardinalität definiert (`[0:1]`, `[1:1]`, `[0:?]`, `[1:?]`).

Um bidirektional durch die Elemente und ihre Attribute zu navigieren, existiert noch ein inverses Attribut (INV), das vom Element zur Relation verweist. Abbildung 4.8 zeigt die verschiedenen Relationstypen und jeweils ein Beispiel aus IFC mit Attributen, inversen Attributen und Kardinalität. Insgesamt existieren in IFC4 zum Stand dieser Arbeit 38

verschiedene Relationen, die den Klassen *IfcRelAssigns*, *IfcRelAssociates*, *IfcRelConnects*, *IfcRelDefines*, *IfcRelDecomposes* und *IfcRelDeclares* untergeordnet sind.

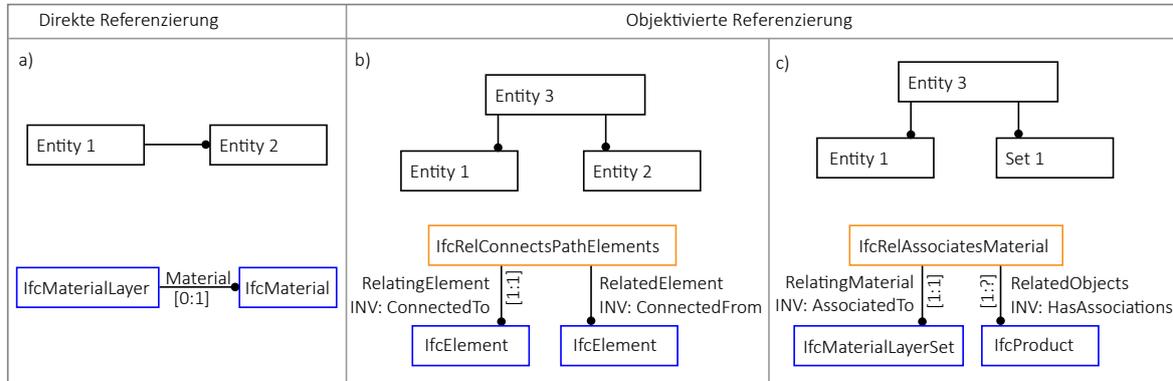


Abbildung 4.8: Unterschiedliche Arten von Objektrelationen mit ihren Attributen, inversen Attributen und Kardinalität: direkte Referenzierung (a) und objektivierter Beziehungen (b, c) (Abbildung aus (DAUM, 2018) ergänzt)

Abbildung 4.9 gibt einen Überblick über die Beziehungen, die für diese Arbeit relevant sind. Als abgeleitete Klasse von *IfcRelAssociates* spielt vor allem *IfcRelAssociatesMaterial* bei der Zuordnung eines Materials an ein Bauteil oder einen Bauteiltyp, sowie *IfcRelAssociatesDocument* bei der Zuordnung von externen Dokumenten eine wichtige Rolle. Die abgeleiteten Klassen von *IfcRelConnects* erstellen unter anderem die Verbindungen zwischen Bauteilen (*IfcRelConnectsElements*), die räumliche Struktur (*IfcRelContainedInSpatialStructure*, *IfcRelReferencedInSpatialStructure*), die Raumbegrenzungen (*IfcRelSpaceBoundary*) und die Füllung von Öffnungen (*IfcRelFillsElement*). Bauteiltypen und Eigenschaften (*IfcPropertySet*) bindet man mit Hilfe von *IfcRelDefinesByType* und *IfcRelDefinesByProperties* an Elemente. Diese Beziehungen sind abgeleitete Klassen von *IfcRelDefines*.

Die Klasse *IfcRelDecomposes* besteht aus Unterklassen, die die Zerlegung eines Bauteils in einzelne Elemente definieren. Die Klasse *IfcRelVoidsElement* ordnet den Bauteilen die Öffnungen für Fenster oder Türen zu. Mit der Relation *IfcRelAggregates* werden Bauteile in einzelne Elemente zerlegt, was insbesondere bei mehrschichtigen Aufbauten mit Vorsatzschalen eine wichtige Rolle spielt. Die Klasse *IfcRelNests* wird in gleicher Weise für Prozesse verwendet.

Die Klasse *IfcRelConnects* dient dazu, Objekte miteinander zu verbinden. Das können Bauteile sein (mit *IfcRelConnectsElements*), statisch relevante Konstruktionen (mit *IfcRelConnectsStructuralMember*), Rohrleitungen (*IfcDistributionPort*) untereinander (mit *IfcRelConnectsPorts*), Verkleidungen und Vorsatzschalen (mit *IfcRelCoversBldgElements*) und Bauteile mit Räumen (mit *IfcRelSpaceBoundary* und *IfcRelContainedInSpatialStructure*).

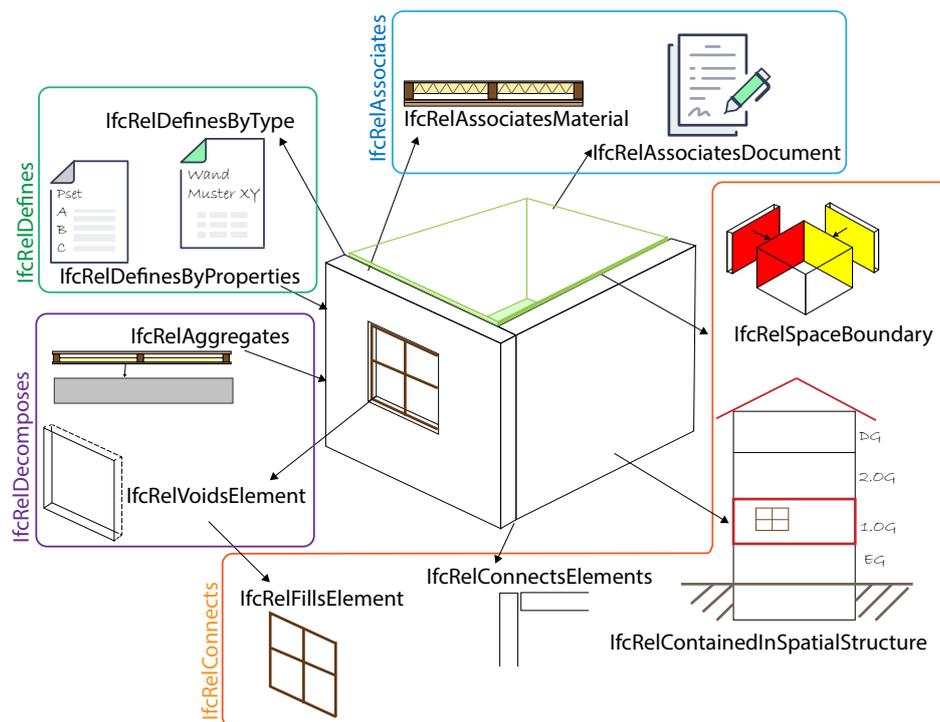


Abbildung 4.9: Ausschnitt gängiger Objektrelationen in *IfcRelationships* mit ihren vererbten Klassen *IfcRelConnects*, *IfcRelDecomposes*, *IfcRelDefines* und *IfcRelAssociates* und deren vererbten Klassen

4.3.3 Räumliche Struktur in IFC

Die räumliche Struktur der geplanten Gebäude ist Kern der architektonischen Planung (EASTMAN, 2009). IFC bietet die Möglichkeit, Gebäude (*IfcBuilding*) innerhalb einer Baustelle (*IfcSite*) zu positionieren und anschließend das Gebäude selbst in verschiedene Geschosse (*IfcBuildingStorey*), Zonen (*IfcZone*) und Räume (*IfcSpace*) zu unterteilen. Innerhalb dieser räumlichen Aufteilung werden dann Bauteile platziert. Abbildung 4.10 verdeutlicht an einem Beispiel wie Bauteile in der räumlichen Struktur angeordnet werden. Zusätzlich zeigt Abbildung 4.11 die unterschiedlichen Arten von Raumbegrenzungen mit der Relation *IfcRelSpaceBoundary*, die im IFC-Schema möglich sind.

Räumliche Elemente werden wie Bauelemente als abgeleitete Klassen von *IfcProduct* in der Klasse *IfcSpatialElement* aufgeführt. Räume (*IfcSpace*) und Geschosse (*IfcBuildingStorey*) sind abgeleitete Klassen von *IfcSpatialStructureElement*, während *IfcSpatialZone* direkt von *IfcSpatialElement* abgeleitet ist. Eine *IfcSpatialZone* kann durch diese Anordnung in der Vererbungshierarchie eine eigene geometrische Repräsentation und Position haben, wodurch es sich von *IfcZone* unterscheidet. Letzteres erbt von *IfcObject*, *IfcGroup* und *IfcSystem*. Es kann also einen Typ und eine Gruppierung erhalten, aber keine eigene geometrische Abbildung oder eigene Raumbegrenzungen.

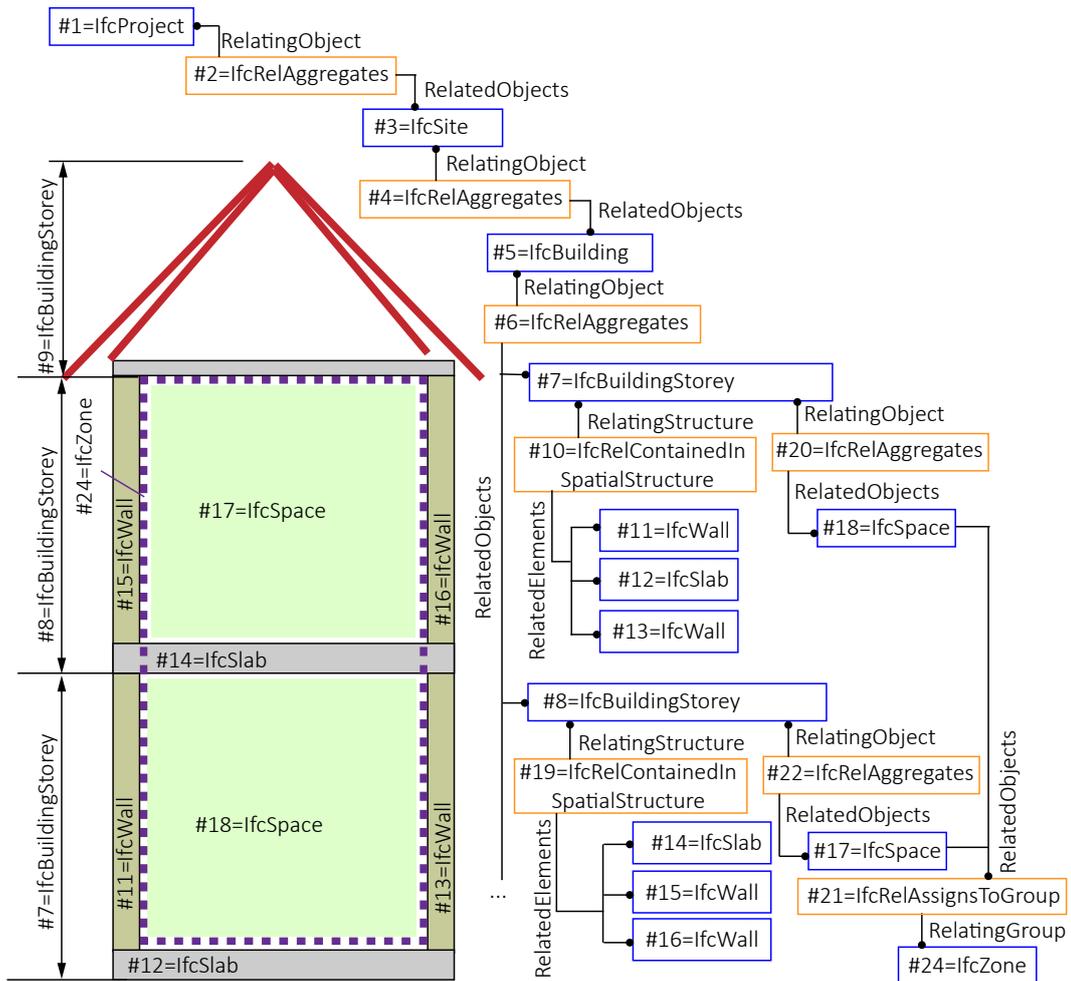


Abbildung 4.10: Räumliche Hierarchie von der Baustelle *IfcSite* zum Gebäude *IfcBuilding* mit Geschossen (*IfcBuildingStorey*), Räumen (*IfcSpace*), Zonen (*IfcZone*) und Bauteilen wie zum Beispiel Wände (*IfcWall*) und Decken (*IfcSlab*)

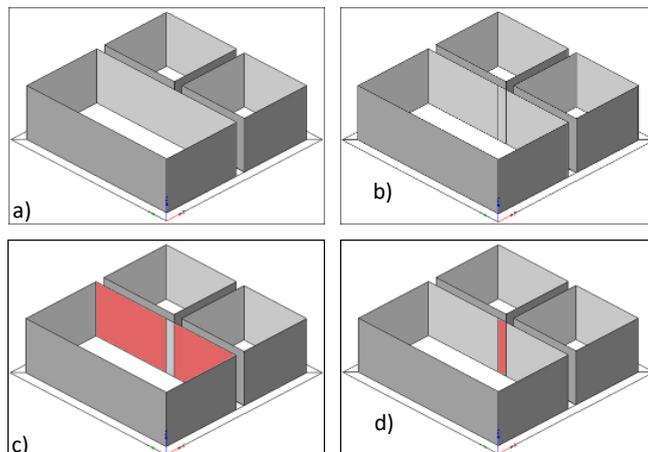


Abbildung 4.11: Arten der Raumbegrenzungen: *1st Level Space Boundary* (a), *2nd Level Space Boundary* (b), *2nd Level Space Boundary Typ A* (c), *2nd Level Space Boundary Typ B* (d) (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023a)

Was das IFC-Schema nicht bietet, ist eine Betrachtung der Position der Elemente zueinander. Es kann zwar angegeben, dass sich ein Objekt in einem Raum befindet, das sich in einem Geschoss befindet, welches wiederum in einem Gebäude ist. Genaue Informationen wie die Bauteile oder Räume zueinanderstehen müssen über deren Geometrie und die abgeleiteten Koordinatensysteme bezogen werden. Die Koordinaten der Bauteile sind üblicherweise nicht als globale Koordinaten angegeben, sondern beziehen sich auf das lokale Koordinatensystem der Gebäudegeschosse. Dieses wiederum nimmt Bezug auf das lokale Koordinatensystem des Gebäudes, welches sich dann auf ein globales Koordinatensystem von *IfcSite* bezieht (siehe Abbildung 4.12). Die Unterteilung kann beliebig feingliedrig erfolgen. D. h. alle verwendeten Bauteil- und Raumgeometrien müssen immer unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten betrachtet werden.

Beim Export aus der Autorensoftware in das IFC-Modell können Probleme mit der räumlichen Struktur auftreten. In diesem Fall muss vor dem Export auf eine korrekte Modellierung geachtet werden. Ein Beispiel ist in den Abbildungen 4.13 und 4.14 dargestellt. Hier wurden innerhalb von *Autodesk Revit* fünf identische Wände modelliert, die zwar alle auf derselben Höhe liegen, jedoch bei der Modellierung mit verschiedenen Abhängigkeiten entstanden sind. Dies wird erreicht, indem die Bauteile in einer Geschossebene platziert, aber mit den Einstellungen zum Versatz beliebig verschoben werden. Abbildung 4.13 zeigt das Ergebnis des Exports, wenn alle vorhandenen Ebenen auch als Geschossebenen definiert werden: für jede Geschossebene in *Autodesk Revit* wird also eine eigene Instanz *IfcBuildingStorey* im IFC-Modell erstellt. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4.14 das IFC-Modell, wenn nur Ebene 0 und Ebene 1 als Geschossebenen gewählt wurden. Hier wird nur noch eine Wand fehlerhaft in der nächsthöheren Ebene erstellt, da ihre Positionierung bei der Modellierung in der nächsthöheren Ebene liegt mit einem Versatz in der Höhe des Geschosses (Wand #541 in Abbildung 4.14). An diesem einfachen Beispiel wird deutlich, dass die Art der Modellierung, in Kombination mit den Exporteinstellungen der Autorensoftware, einen erheblichen Einfluss auf die räumliche Struktur im IFC-Modell hat.

Eine weitere Herausforderung, die bei der Arbeit mit IFC auftritt ist, dass viele Beziehungen, die im IFC-Schema vorgesehen sind, durch die Autorensoftware nicht in das IFC-Modell übertragen werden (BORRMANN & RANK, 2009a). Zusätzlich ist eine direkte Abfrage aus der IFC-Datei nach in der Nähe liegenden Elementen nicht möglich. Um diesem Defizit entgegenzuwirken, wurde *Query Language for Building Information Models* (QL4BIM) entwickelt, eine Abfragesprache, die eine räumliche Positionierung von Elementen untereinander anhand topologischer Prädikate ermöglicht (DAUM, 2018; DAUM & BORRMANN, 2014).

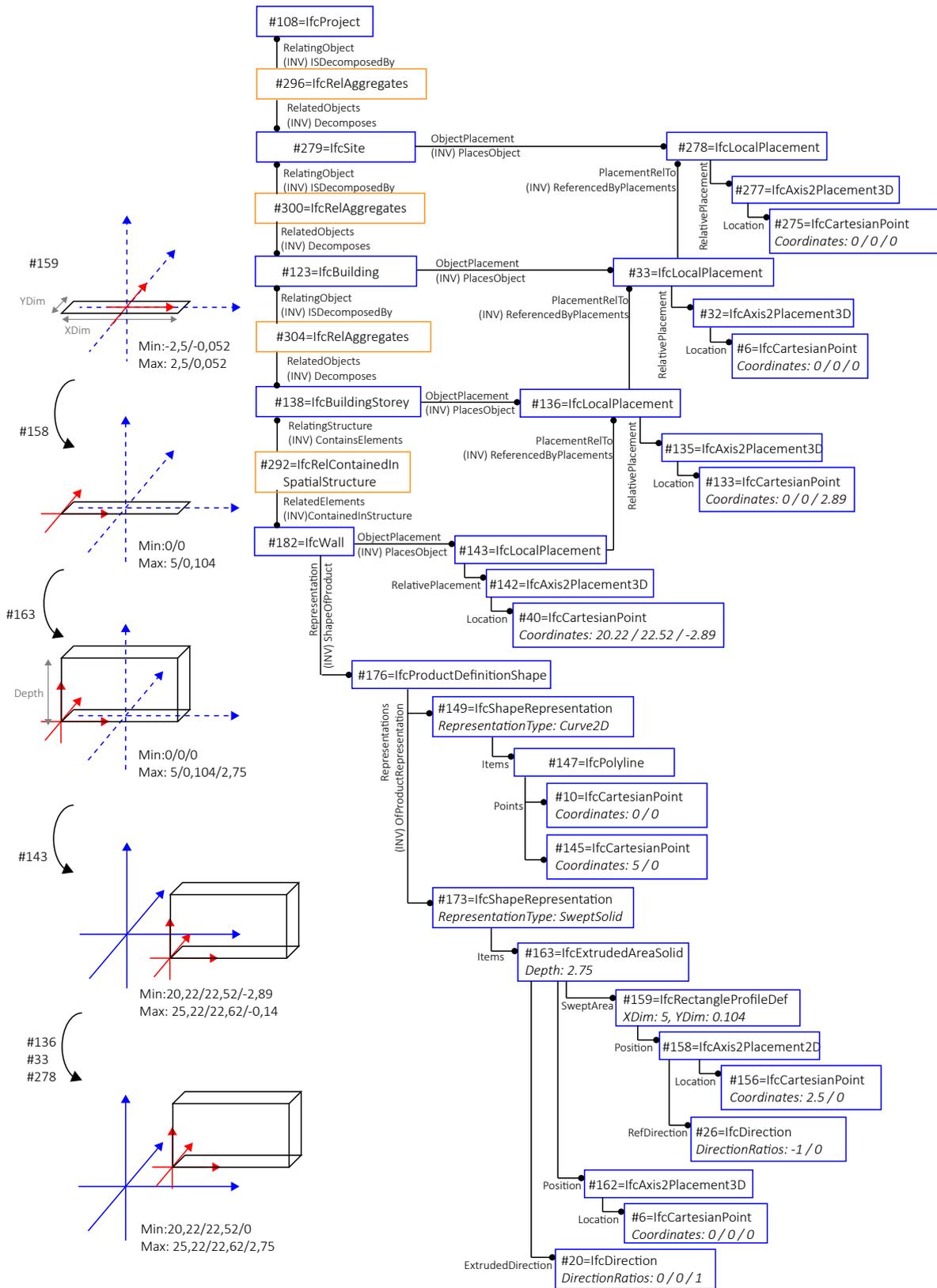
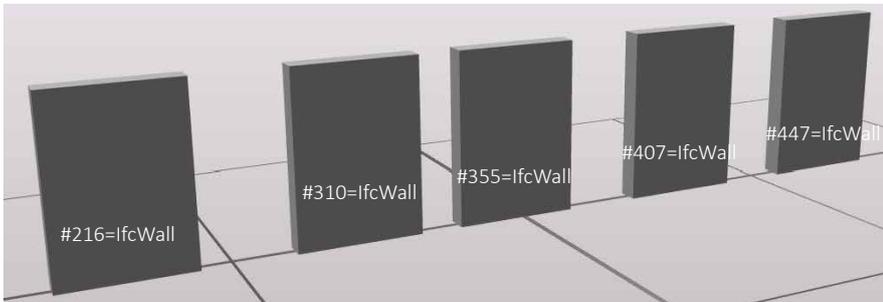
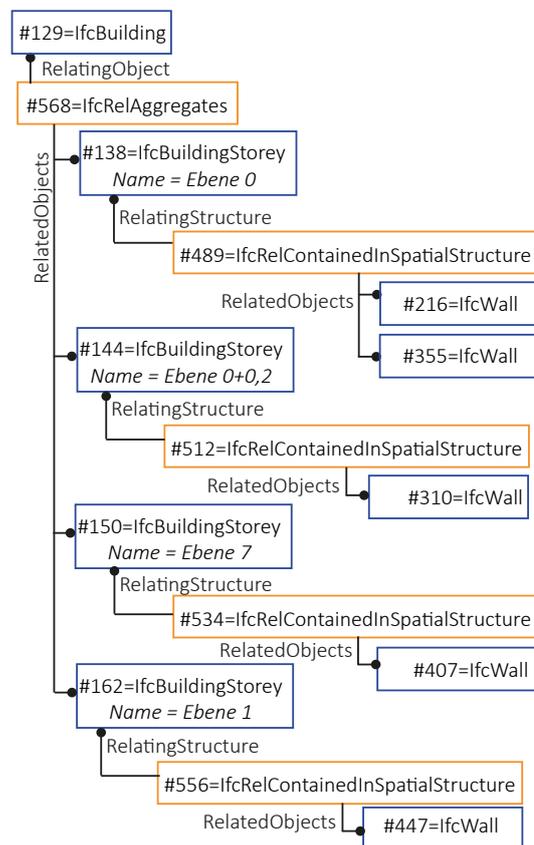


Abbildung 4.12: Instanzendiagramm zur Positionierung einer Wand *IfcWall* mit dem globalen Koordinatensystem des Projekts bis hin zum Koordinatensystem eines Bauteils über die Klasse *IfcLocalPlacement* mit dem Attribut *RelativePlacement*

Ansicht aller Wände in Revit



Ausschnitt aus dem IFC-Modell



Auswahl der Gebäudegeschosse in Revit

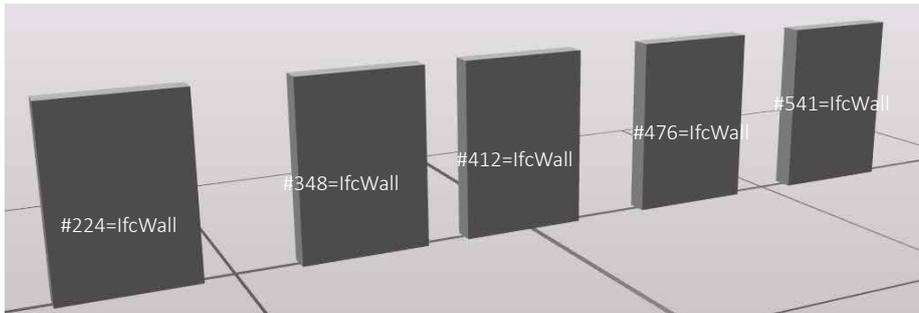


Abhängigkeiten der Wände bei der Modellierung in Revit

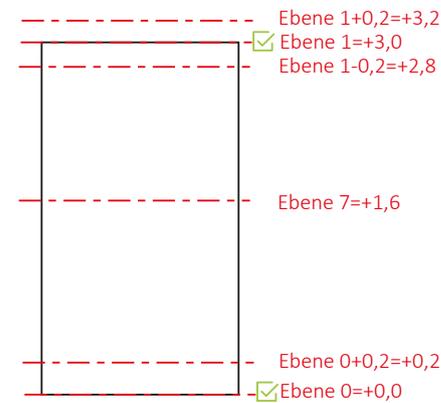
IfcWall	Abhängigkeit unten (Versatz)	Abhängigkeit oben (Versatz)
#401	Ebene 7 (-1,60 m)	Ebene 1
#355	Ebene 0	Ebene 1+0,2 (-0,2m)
#310	Ebene 0+0,2 (-0,2m)	Manuell (Höhe 3,0m)
#216	Ebene 0	Ebene 1
#447	Ebene 1 (-3,0m)	Ebene 1

Abbildung 4.13: Abbildung der räumlichen Struktur im IFC-Modell in Abhängigkeit der Modellierung in der Autorensoftware Revit bei einer großen Auswahl an Gebäudegeschossen: es werden viele überflüssige Instanzen von *IfcBuildingStorey* erstellt

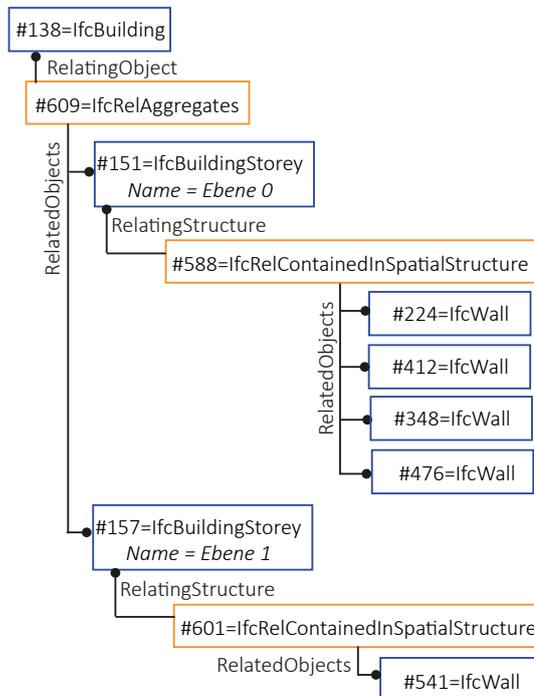
Ansicht aller Wände in Revit



Auswahl der Gebäudegeschosse in Revit



Ausschnitt aus dem IFC-Modell



Abhängigkeiten der Wände bei der Modellierung in Revit

ifcWall	Abhängigkeit unten (Versatz)	Abhängigkeit oben (Versatz)
#476	Ebene 7 (-1,60 m)	Ebene 1
#412	Ebene 0	Ebene 1+0,2 (-0,2m)
#348	Ebene 0+0,2 (-0,2m)	Manuell (Höhe 3,0m)
#224	Ebene 0	Ebene 1
#541	Ebene 1 (-3,0m)	Ebene 1

Abbildung 4.14: Abbildung der räumlichen Struktur im IFC-Modell in Abhängigkeit der Modellierung in der Autorensoftware Revit bei einer gezielten Auswahl an Gebäudegeschossen: es werden nur die ausgewählten Gebäudegeschosse zu Instanzen von *IfcBuildingStorey* und bilden somit ein leichter nutzbares und übersichtlicheres Datenmodell

4.3.4 Akustische Kenngrößen in IFC

Im IFC-Schema existieren einige Klassen, die akustische Kenngrößen abbilden. Sie finden sich als abgeleitete Klassen von *IfcMeasureResource* und sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Zusätzlich gibt es Eigenschaftensätze (*IfcPropertySet*), die akustische Kennwerte nutzen: *Pset_SoundAttenuation* und *Pset_SoundGeneration*. Allerdings sind diese Eigenschaften für Bauteile der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) wie Lüftungskanäle und Ventilatoren (*IfcDistributionFlowElement*) gedacht und nicht für den Schallschutz trennender Bauteile.

Es gibt in den Eigenschaften für Wände (*Pset_WallCommon*) und Decken (*Pset_SlabCommon*) die Möglichkeit, eine Schallschutzklasse bei dem Attribut *AcousticRating* anzugeben. Allerdings ist die Nutzung von Schallschutzklassen für den Schallschutznachweis in Deutschland nicht relevant. Einige Schallschutzklassen werden vom VDI (VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V., 2012) und der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) (DEGA EMPFEHLUNG 103, 2018) zwar vorgeschlagen, allerdings sind sie nicht als Anforderungen normativ festgelegt. Hinzu kommt, dass die Schallschutzklassen für Wohneinheiten oder ganze Gebäude gedacht sind und nicht für einzelne Bauteile.

Für die frequenzabhängige Angabe des Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels ist noch keine Möglichkeit im bisherigen IFC-Schema vorgesehen. Hierzu müssen neue Eigenschaftensätze erstellt werden. Ein Vorschlag dazu wird in Kapitel 5.5 präsentiert.

Tabelle 4.2: Akustische Klassen mit ihren Einheiten in IFC4

IFC Klasse	Zweck	Einheit in IFC
<i>IfcSoundPressureMeasure</i>	Schalldruck	<i>IfcSIUnitName.PASCAL</i>
<i>IfcSoundPressureLevelMeasure</i>	Schalldruckpegel	<i>IfcDerivedUnitEnum. SOUND-PRESSURELEVELUNIT</i>
<i>IfcSoundPowerMeasure</i>	Schalleistung	<i>IfcDerivedUnitEnum. SOUND-POWERUNIT</i>
<i>IfcSoundPowerLevelMeasure</i>	Schalleistungspegel	<i>IfcDerivedUnitEnum. SOUND-POWERLEVELUNIT</i>

4.3.5 Model View Definition

Digitale Planungsprozesse sind nur dann erfolgreich, wenn sie weitgehend ohne Datenverlust funktionieren (siehe Kapitel 2). Von *buildingSMART* wurden daher verschiedene Bausteine zum IFC-Schema ergänzt, welche die Zusammenarbeit zwischen Bauherren, Architekten, Fachplanern und ausführenden Gewerken genau definieren sollen.

Der Informationsaustausch wird über das *Information Delivery Manual* (IDM) für jedes Projekt geregelt. Dort ist festgelegt, zu welchem Zeitpunkt im Planungsprozess welche In-

formationen von welchen Projektbeteiligten in welcher Form zur Verfügung gestellt werden. Durch diese Vorbereitung wird sichergestellt, dass die nächste Partei alle Informationen erhält, um im Zeitplan zu bleiben. Dieser Prozess wurde auch in der DIN EN ISO 29481-1:2018-01 festgeschrieben. Das IDM nutzt Prozesslandkarten (engl. *Process Map*), Austauschforderungen (engl. *Exchange Requirements* (ER)) und IFC-spezifische Informationen (DIN EN ISO 29481-1:2018-01, 2018).

Das IFC-Datenschema ist extrem umfangreich. Je nach Anwendung ist nicht jede Darstellung von Bauteilen sinnvoll und es werden auch nicht alle Klassen benötigt. Daher wurden für spezifische Anwendungen die *Model View Definition* (MVD) entwickelt, die nur eine Teilmenge aller IFC-Klassen abbilden (ABUALDENIEN et al., 2019; BAUMGÄRTEL & PIRNBAUM, 2016).

Ein MVD bildet einen Ausschnitt aus IFC, der für die Implementierung in eine Software von Bedeutung ist, während die ER für eine domänenspezifische Anwendung oder ein Projekt von Bedeutung sind. Die technische Umsetzung der MVD erfolgt mit Hilfe des Formats mvdXML.

Für die aktuelle Version von IFC4 stehen vielfältige MVD zur Verfügung. Die *Reference View* und *Design Transfer View* bilden dabei eine Basis, die in fast jedem Modellierungstool zur Verfügung steht und auch von Anwendungssoftware gelesen werden sollte. Sie unterscheiden sich folgendermaßen:

Reference View für die Koordination von Modellen, z. B. bei der Kollisionsprüfung. In diesem MVD sind die Geometrien vereinfacht dargestellt. Es entspricht in etwa der *coordination view* aus IFC2x3. Die vereinfachte Geometriedarstellung ermöglicht die Planung mit dem Modell, aber keine Veränderung vorhandener Bauteile.

Design Transfer View für die weitere Gestaltung und Entwicklung des Modells. Geometrien werden detaillierter dargestellt, damit verschiedene Modellautoren mit dieser Datei am Entwurf arbeiten und Bauteile verändern können.

Daneben gibt es eine Vielzahl domänenspezifischer MVD wie *IFC4Precast* für den Austausch geometrischer Informationen zwischen BIM und Fertigungsleitsystem für vorgefertigte Bauteile, die *Quantity Takeoff View* für die Mengenermittlung und Abschätzung der Baukosten oder die *Energy Analysis View* für die Energieanalyse.

Tabelle 4.3 vergleicht ausschnittsweise welche Klassen in den unterschiedlichen MVD vorhanden sind. Es zeigt sich, dass in IFC4x3 alle in diesem Kapitel genannten Klassen dokumentiert sind, diese Klassen jedoch weder in der *Coordination View* von IFC2x3 noch in der *Reference View* von IFC4 enthalten sind. Zum Stand dieser Arbeit ist die *Design Transfer View* für IFC4 noch nicht veröffentlicht.

Tabelle 4.3: Vergleich anwendbarer Klassen für IFC 2x3 Coordination View (CV) (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2013) und IFC 4 Reference View (RV) (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2019) im Vergleich zur letzten Dokumentation in IFC4x3 (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023b)

IFC Entität	IFC 2x3 CV	IFC 4 RV	IFC 4x3 Documentation
IfcMaterialLayerSetUsage	ja	nein	ja
IfcRelConnectsElements	ja	nein	ja
IfcRelConnectsPath-Elements	ja	nein	ja
IfcRelConnectsWithRealizingElements	ja	nein	ja
IfcRelReferencedInSpatialStructure	nein	nein	ja
IfcRelSpaceBoundary	nein	nein	ja
IfcRelSpaceBoundary1stLevel	nein	nein	ja
IfcRelSpaceBoundary2ndLevel	nein	nein	ja
IfcVirtualElement	nein	nein	ja
IfcWall	ja	ja	ja
IfcWallElementedCase	nein	nein	nein
IfcWallStandardCase	ja	nein	DEPRECATED
IfcZone	ja	ja	ja

4.4 Semantic enrichment und model healing

Die Modellqualität ist für die Analysen oder Simulationen im Planungsprozess von entscheidender Bedeutung. Leider ist die gewünschte Qualität und der nötige Informationsgehalt nicht immer in den Gebäudemodellen vorhanden. Dafür gibt es verschiedene Erklärungen. Die Art und Weise, wie Informationen aus der Autorensoftware in eine IFC-Datei geschrieben werden, variiert je nach Software. Zusätzlich können Anwender in der Autorensoftware manche Bauteile auf unterschiedliche Art modellieren. Vielfältige Einstellungsmöglichkeiten und verschiedene MVD im IFC-Export erschweren es, eine beständige Qualität zu erhalten. Zudem ist das IFC-Schema sehr komplex und nicht immer eindeutig, da es sich nach wie vor in der Entwicklung befindet.

Die Idee von MVD besteht darin, für festgelegte Anwendungsfälle die verwendeten IFC-Klassen zu definieren. So ist nur ein Teilabschnitt des gesamten IFC-Schemas für dieses Modell gültig und anwendbar. In der Forschung wurden bereits mehrere Arbeiten in diesem Gebiet durchgeführt, bei denen unter anderem geprüft wurde, ob IFC-Modelle mit bestimmten Vorgaben aus MVD übereinstimmen (BAUMGÄRTEL & PIRNBAUM, 2016; LUTTUN & KRIJNEN,

2021; PINHEIRO et al., 2018). Da es nicht möglich ist, für jeden Anwendungsfall MVDs zu erstellen und in der Autorensoftware zu implementieren, muss für spezielle Anwendungen auf bereits vorhandene MVDs zurückgegriffen und die daraus resultierende IFC-Datei bei Bedarf nachbearbeitet werden.

Zusätzlich soll das Gebäudemodell im Laufe des Planungsprozesses mit neuen und detaillierteren Informationen angereichert werden können. Zum Teil müssen auch bereits vorhandene Informationen verändert werden, ohne Verbindungen zu anderen Bauteilen bzw. Informationen zu verlieren. Es ist essenziell redundante sowie sich widersprechende Informationen zu identifizieren und aus den Modellen einen fachspezifischen Mehrwert abzuleiten. Um dies durch automatische oder semi-automatische Methoden zu erreichen, können verschiedene Techniken wie Regelverarbeitung oder Methoden der künstlichen Intelligenz verwendet werden (COLLINS et al., 2022; DINIS et al., 2022).

Für die Modellaufbereitung werden die Begriffe *pre-processing* (PREIDEL et al., 2018), *semantic enrichment* (BELSKY et al., 2015; SACKS et al., 2017) und *model healing* (COLLINS et al., 2022) verwendet. Mit diesen Verfahren kann die Einhaltung der Modellierungsrichtlinien oder die Vollständigkeit der zugewiesenen Attribute überprüft werden. Auch semantische Informationen können aus einfachen, geometrischen Modellen extrahiert werden, um z. B. topologische Beziehungen zwischen Objekten zu ermitteln (SACKS et al., 2017). Durch die Aufbereitung von Modellen werden aus *Point Cloud Data* Bauteile modelliert, aus denen ganze BIM-Modelle erstellt werden (BLOCH, 2022). Es werden auch Ontologien und Abfragen (*query*) entwickelt, die durch implizite Modelldaten spezifische Abfragen in den Modellen ermöglichen (LIU et al., 2016). Ein *pre-processing* von Gebäudemodellen ist häufig auch für die Erzeugung von Räumen und deren Raumgrenzen erforderlich (FICHTER et al., 2021). BOGDAHN und COORS betonen, dass bei diesen Methoden immer klar bleiben muss, was eine reine Qualitätsprüfung ist und was eine Änderung im Modell darstellt (BOGDAHN & COORS, 2010).

In dieser Arbeit unterscheiden wir zwischen der Qualitätsprüfung und Modellanreicherung. Diese Verfahren unterscheiden sich auch durch ihre zeitliche Einordnung im Planungsprozess. Wir definieren:

model healing überprüft ein Modell nach festgelegten Qualitätskriterien und bearbeitet es nach Bedarf, wenn es die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt, um die Schallschutzplanung zu gewährleisten. Dabei liegt der Fokus auf Modellierungsfehler und semantische Unstimmigkeiten, die zu Problemen in der weiteren Analyse führen könnten.

semantic enrichment erweitert das Gebäudemodell um neue Informationen, nachdem die Schallschutzplanung durchgeführt wurde. Durch eine Berechnung, Simulation oder Planung werden neue Informationen generiert und die semantischen Daten in das IFC-Modell eingefügt. Dadurch bereichern sie das Modell.

4.5 Stand der Forschung: BIM in Holzbau und Schallschutz

In der Literatur sind Themen rund um die Nutzung und Entwicklung open BIM-basierter Methoden für den Holzbau oder die Schallschutzplanung nicht häufig vertreten. Vor allem die Suchbegriffe der Fachgebiete Holzbau und Schallschutz führen eher zu Literatur, die FEM oder statistische Energie Analyse (SEA) nutzen, mit denen Schwingungen betrachtet werden (FLODÉN et al., 2016). Die Anbindung der Modelle an ein digitales Gebäudemodell ist dabei nicht im Fokus, sondern bildet eher einen Randaspekt (FRISCHMANN et al., 2014). Im Folgenden wird daher separat der Stand BIM im Holzbau bzw. BIM im Schallschutz betrachtet.

4.5.1 BIM im Holzbau

Wie in Kapitel 2 gezeigt, ist der Planungsprozess im Holzbau geprägt durch die Möglichkeit der maschinellen Vorfertigung, welche besonders für große, mehrgeschossige Bauvorhaben eine wichtige Rolle spielt. Die Vorfertigung großer Bauteile und die Detaillierung der Bauteilan-schlüsse dominieren die Planung.

Während für Beton- und Stahlbauten bereits zahlreiche BIM-Lösungen für die Planung existieren, fehlen diese bislang für den Holzbau (LE ROUX et al., 2016; SHIBANI et al., 2021). Vor allem die Notwendigkeit der Erstellung detaillierter Gebäudemodelle im frühen Planungsprozess, aber auch die mangelnde Interoperabilität zwischen BIM-Software und gängigen CAD/CAM-Lösungen beschränken die Weiterentwicklung des Holzbaus (RUUSKA & HÄKKINEN, 2016). Die fehlenden Schnittstellen führen zu einem erheblichen Mehraufwand, dadurch dass Gebäude komplett neu modelliert werden müssen, obwohl auch im Holzbau dreidimensionale, detaillierte Gebäudemodelle für die Werkplanung üblich sind (LATTKE & HERNANDEZ-MAETSCHL, 2016). Abbildung 4.15 zeigt die Vielfalt der Datenformate, die in der Planung von Holzbauten verwendet werden und verdeutlicht, dass Interoperabilität ein großes Thema ist (DAY et al., 2019).

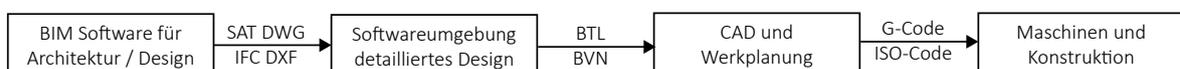


Abbildung 4.15: Digitale Anwendungen und ihr jeweiliges Datenaustauschformat im Arbeitsablauf der Bauindustrie für Holzgebäude (DAY et al., 2019)

Eine Lösung, um Daten für die Steuerung von CNC-Maschinen direkt aus der Autorensoftware des BIM-Modells für die Werkplanung zu nutzen, wird von DARWISH et al. in Form eines Plug-Ins für *Autodesk Revit* vorgestellt (DARWISH et al., 2022). Allerdings müssen in diesem Fall die Anforderungen der Maschine genau bekannt sein und im Plug-In angegeben werden.

Natürlich müssen auch die Informationen, die gebraucht werden, bereits in dem Gebäudemodell enthalten sein, d. h. es muss detailliert genug modelliert werden.

Digitale Gebäudemodelle, die bereits in der Planung genutzt werden, bieten viele Möglichkeiten, den Planungsprozess zu beschleunigen, z. B. durch die Nutzung von *knowledge-based Design*. Dabei werden Anforderungen, Beziehungen und Einschränkungen (*constraints*) definiert, die für einzelne Elemente wie Ständer, Riegel und Pfosten gelten und aus denen das Modell abgeleitet wird. Dieser Ansatz wird beim *Design for manufacture and assembly* (DfMA) ebenfalls genutzt. So kann bei einem hohen Vorfertigungsgrad von Holzleichtbauwänden beispielsweise die Aufteilung der Unterkonstruktion und Beplankung automatisiert geplant werden (LIU et al., 2021). Neben der Fertigung beeinflussen auch Montage und Logistik die Gestaltung von Gebäuden in Holzbauweise (LIU et al., 2021). Die Einbindung der Holzbauplanung in den BIM-basierten Planungsablauf wird seit einigen Jahren immer intensiver betrachtet (ALFIERI et al., 2020; ALWISY et al., 2019; BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY AND BRYDEN WOOD, 2016; LIU et al., 2021; POIRIER et al., 2022; STAUB-FRENCH et al., 2021). Allerdings ist die Detaillierungstiefe, die für die Vorfertigung notwendig ist, nicht aus dem Planungsmodell zu erwarten (LIU et al., 2021). Dennoch würde das Übernehmen der Informationen aus der Entwurfsplanung eine sinnvolle Aufwertung des Planungsprozesses für den Holzbauspezialisten darstellen. Dies zeigt die Firma *Hickory* aus Australien eindrucksvoll, indem sie DfMA mit digitalen Planungsmodellen in Stahl- und Betonbauweise erfolgreich kombiniert (LANGSTON & ZHANG, 2021).

Einer der kritischsten Punkte in der Planung von Gebäuden in Holzbauweise sind die Anschlussdetails. Diese sind nicht nur in der Tragwerksplanung und bauakustischen Planung eine Herausforderung, sondern auch schon in der Modellierung. Ein extremes Beispiel zeigt sich in traditionellen Bauweisen aus Korea und Japan. Ein Lösungsansatz ist hier durch parametrische Modellierung Bibliotheken für Holzbaudetails anzulegen (CHO et al., 2016; HAIYAN et al., 2021; SHIN & LEE, B., YOON, J., 2016). Aber auch weniger komplexe Details, wie sie in Europa verwendet werden, müssen in BIM-Modellen beispielsweise für die Tragwerksplanung abgebildet werden können. Hier zeigt sich, dass ein Datenaustausch mit herstellerneutralen Formaten noch nicht machbar ist und dass sich die Forschung auf bestimmte Softwarepakete beschränkt (LIVINGSTONE et al., 2016; LIVINGSTONE et al., 2015; PATLAKAS et al., 2018). NAWARI fasst zusammen: „Currently, BIM platforms are lacking [...] requirements for designing wood structures“ (NAWARI, 2012).

BIM-basierte Planungsprozesse werden zudem viel für Lebenszyklusanalysen (*Life-Cycle Assessment* (LCA)) und energetische Bewertungen von Gebäuden verwendet. Auch der Rückbau eines Gebäudes in einer Kreislaufwirtschaft kann anhand von BIM-Modellen untersucht werden (FINCH et al., 2020). In diesen Bereichen wird der Holzbau als nachhaltiges Baumaterial gerne verwendet (AJAYI et al., 2015; FINCH et al., 2020; SAJJADIAN et al., 2021; SOUST-VERDAGUER et al., 2020). In keiner dieser Veröffentlichungen wird auf die BIM-Methodik selbst eingegan-

gen. Es werden nur die Ergebnisse der LCA vorgestellt, die den Holzbau als nachhaltiges Material bestätigen. Wie die BIM-Modelle entstanden sind, welche Softwaretools genutzt wurden oder in welchem Detaillierungsgrad die Modelle erstellt wurden, wird offengelassen. SOUST-VERDAGUER et al. erwähnen, dass das Modell in der Modellierungssoftware *ArchiCAD* von *Graphisoft* mit einem LOD 300 nach der Bauphase nachmodelliert und die Materialliste für die LCA direkt aus *ArchiCAD* erstellt wurde (SOUST-VERDAGUER et al., 2020). Sie beziehen sich auf eine Methodik, bei der das Gebäudemodell in *Autodesk Revit* erstellt wurde, um die Materialliste direkt auszulesen (GOMES et al., 2019). Allerdings erzeugt die Extraktion der tragenden Holzelemente und Einzelteile aus Holzständerwänden aus den Modellen fehlerhafte Mengenangaben (HOULIHAN WIBERG et al., 2014). Ein Software-unabhängiger BIM-Prozess wurde von keinem der Autoren angestrebt, da bereits die Software-interne Lösung problembehaftet war.

Für die Energieanalyse von Gebäuden wird zum Teil mit offenem Datenstandard gearbeitet, wie zum Beispiel im Projekt *bertim* (BERTIM PROJECT TEAM, 2019). Darin wurde auf Grundlage von Laserscans ein Gebäudemodell in *Autodesk Revit* erstellt und in IFC exportiert. Aus diesem Modell wurde dann eine neue Fassade in Holzbauweise generiert. Die entwickelte Anwendung *RenoBIM* übernimmt die Daten aus dem IFC-Modell für die Konfiguration der Fassade und gibt das Ergebnis für die CAD/CAM-Bearbeitung aus. Die neue vorgesezte Fassade wird in einer neuen IFC-Datei als *IfcWallStandardCase* mit Öffnungen für Türen und Fenster (*IfcOpeningElement*) eingefügt. Die Weiterverarbeitung des Modells erfolgt dann in der Holzbau-spezifischen Software *Dietrich's* von *Dietrich's Technology GmbH*. (MEDIIVILLA, 2019; MEDIIVILLA et al., 2017; SEBESI et al., 2016)

Der Anschluss der frühen Gebäudemodelle aus dem BIM-Planungsprozess an die CAD/CAM-Software spielt ebenfalls eine wichtige Rolle in den Veröffentlichungen (CHANG et al., 2021). In BREIT et al., 2010 werden Fassaden in Holzbauweise mit dem Schwerpunkt auf den Planungsprozess und der Datenübergabe zwischen dem BIM-Modell aus *Autodesk Revit* und der Werksplanung in *cadwork* von *cadwork informatik Software GmbH* betrachtet. Zusätzlich wurde eine Energieanalyse anhand eines Plug-Ins in *Revit* (Design Performance Viewer) erstellt (BREIT et al., 2010; SCHLUETER & THESSELING, 2009). Auch in HEIKKINEN et al., 2010 wurden Fassaden in Holzbauweise für die Energiesanierung erstellt. Im Rahmen des Bauprojekts erwies sich die Übergabe des 3D-Modells als IFC-Datei zur CAD/CAM-Software (*cadwork*) als nicht realisierbar und die Planer griffen auf die etablierte Methode der kompletten Neuerstellung der Modelle aus Zeichnungen zurück (HEIKKINEN et al., 2010). Auch in den neueren Softwareversionen ist das Importieren/Exportieren von IFC-Dateien in/aus CAD/CAM-Software noch mit viel manueller Arbeit verbunden, wobei zumindest Hüllkörper der Bauteile importiert werden können (CADWORK, 2022).

In den bisher genannten Arbeiten zeigt sich, dass die industrielle Vorfertigung im Holzbau ein großes Potenzial bietet, BIM-basierte Planungsabläufe zu integrieren. Die automatisierten

Planungsprozesse bringen vor allem bei einer großen Anzahl gleichbleibender Abläufe Vorteile und so ist die Modulbauweise prädestiniert für BIM-basierte Planungsprozesse (PROFESSNER & RHOMBERG, 2016; SEBESI et al., 2016). In ALWISY et al., 2019 wurde für Holzmodulbauten eine Methode unter Verwendung von *Visual Basic Application* (VBA) in einer CAD-Umgebung entwickelt, um aus technischen 2D-Plänen ein geometrisch korrektes BIM-Modell zu erstellen, aus dem anschließend Pläne für die Fertigung und die entsprechenden Stücklisten für das Material erstellt werden.

In ALWISY et al., 2019 wurde mit VBA ein geometrisch korrektes BIM-Modell für Holzmodulbauten aus technischen 2D-Plänen erstellt, aus dem anschließend Fertigungszeichnungen und entsprechende Materialstücklisten generiert wurden. Durch diese Arbeit konnte der Zeitaufwand für die Planung und Erstellung der Konstruktionszeichnungen erheblich reduziert werden. Auch in SEBESI et al., 2016 beschäftigen sich die Autoren in der Werkplanung von Holzmodulbauten mit BIM-Modellen, die an die CAD/CAM-Software übergeben werden. In OSTROWSKA-WAWRYNIUK, 2021 wird das Design von Einfamilienhäusern durch parametrische Modellierung mit einer Reihe von Regeln und Begrenzungen ermittelt. So werden aus festgelegten kleinteiligen Massivholzbauteilen verschiedene Häuser erstellt, die zu einem sehr hohen Anteil vorgefertigt werden können (OSTROWSKA-WAWRYNIUK, 2021).

Die Verwendung der BIM-Methodik für den Holzbau wird auch für weitere Planungsaspekte verwendet, z. B. bei gebäudetechnischen Anlagen (GAUDRY et al., 2019), Brandschutz (KINCELOVA et al., 2019, 2020) oder dem Einfluss der Verbindungsmittel auf die Gesundheit der ausführenden Handwerker (BUHAMDAN et al., 2021). In einigen Bereichen steht der Holzbau im Fokus, in anderen steht mehr die Planungsmethodik im Mittelpunkt. Allerdings zeigt sich eine große Gemeinsamkeit aller Veröffentlichungen: die Nutzung offener Datenformate zum Austausch zwischen den Planungstools ist nicht vorgesehen. Die entwickelten Methoden werden in Form von Plug-Ins in existierende Autorensoftware eingebaut und arbeiten nur mit diesen internen Datenformaten. So bestätigt die Untersuchung von LE ROUX et al., dass die Implementierung von BIM-Prozessen im Stahl- und Betonbau bereits verbreitet ist und der Holzbau deutlich hinterherhinkt (LE ROUX et al., 2016). Auch der Mangel an Modellierungsrichtlinien für den Holzbau stellt eine Hürde für einen gelungenen Datenaustausch in offenen Datenstandards dar (LE ROUX et al., 2016).

Die vielfältigen Projekte der letzten Jahre zeigen den Willen, mehrgeschossige Holzbauten zu realisieren. Der Holzbau wird für Wohn- und Bürogebäude, Schulen und andere öffentliche Gebäude eingesetzt (PLANET ARK, 2015; WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018). Einige Projekte wurden wissenschaftlich begleitet, um die Nutzung der BIM-Planung bei großen Projekte in Holzbauweise zu untersuchen: das Wohngebäude Wenlock Road in England (A. SMITH, 2014) (Abbildung 4.16, b), das Studierendenwohnheim Brock Commons auf dem Campus der University of British Columbia (FALLAHI et al., 2016; POIRIER et al., 2022; STAUB-FRENCH et al., 2021) (Abbildung 4.16, d) oder das Bürogebäude Finansparken Bjergsted, in

Stavanger, Norwegen (RANDO et al., 2017) oder der neue Studierenden Campus in Rosenheim (HEIDELAUF, 2022) (Abbildung 4.16, e) (GINEIGER, 2022; HEIDELAUF, 2022; SCHACHNER, 2022). Eine Vielzahl anderer Großprojekte in Holzbauweise, die nicht wissenschaftlich begleitet wurden, zeigen das weltweite Interesse an dieser Bauweise: das Krankenhaus Thunder Bay Regional Health Sciences Centre in Ontario, Kanada (Abbildung 4.16, a) oder die Bibliothek der Candlebark School bei Melbourne, Australien (Abbildung 4.16, c). Diese und mehr Projekte zeigen, dass mehrgeschossige Holzbauten möglich und auch gefragt sind. Die Planungstools und Methoden für eine effiziente und erfolgreiche Planung müssen in Zukunft der Nachfrage gerecht werden.

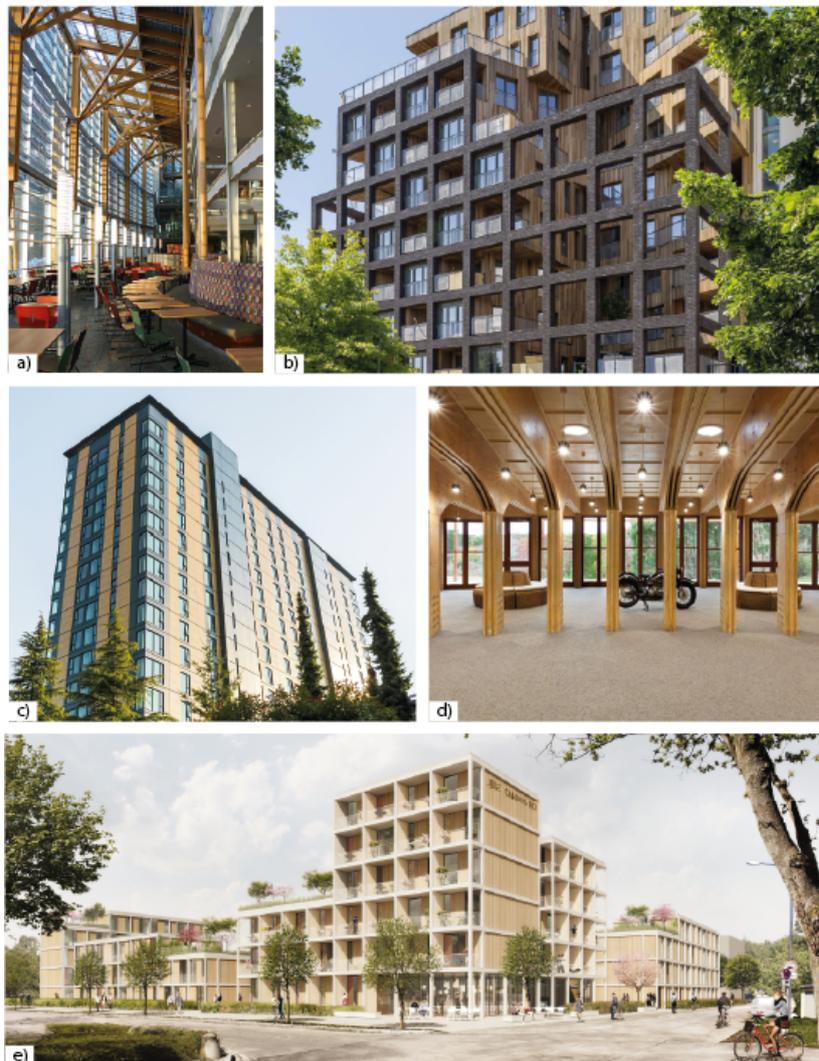


Abbildung 4.16: Mehrgeschossige Gebäude aus Holz oder Holzverbundwerkstoffen: a) Thunder Bay Regional Health Sciences Centre (ARCHITECTURE-EXCELLENCE.ORG, 2023), b) Wenlock Road (BINDERHOLZ.COM, 2019), c) Brock Commons (THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, n. d.), d) Candlebark School Library (ARCHITECTUREAU.COM, n. d.), e) Campus Rosenheim (GRUBER, 2021)

4.5.2 BIM im Schallschutz

Durch die Einbindung der Schallschutzplanung in frühere Planungsphasen können zeit- und kostenintensive nachträgliche Änderungen aufgrund eines unzureichenden Schallschutzes verhindert werden. Man sollte zwischen der Planung des Schallschutzes, der Raumakustik und der Schwingungsberechnung unterscheiden. Die Raumakustik und der Schwingungsschutz benötigen andere Informationen aus dem BIM-Modell als der Schallschutz. Die Nutzung von BIM-Modellen, auf deren Grundlage Eingangsdaten ausgelesen werden, ist für alle drei Bereiche ein großer Vorteil gegenüber der manuellen Planung wie sie bisher stattfindet, vor allem bei größeren Gebäudekomplexen.

In der Raumakustik wird seit vielen Jahren mit geometrischen Computermodellen die Nachhallzeit von Räumen ermittelt und für die jeweilige Nutzung angepasst (MOORER, 1979; SCHROEDER, 1962), sodass die Implementierung der Raumakustik in den BIM-Prozess nahe liegt (JUNG et al., 2018; SUŠNIK et al., 2021). In der Simulation von Schwingungen mit Hilfe von FEM oder SEA werden zwar auch geometrische Modelle genutzt (CLASEN & LANGER, 2007; FLODÉN et al., 2016; QIAN et al., 2019), die jedoch als völlig unabhängige Berechnungen weder im Planungsprozess mit eingebunden sind noch an bereits vorhandene BIM-Modelle anknüpfen. Nur in FRISCHMANN et al., 2013 und FRISCHMANN et al., 2014 wird erstmals ein Ansatz genutzt, um IFC-Modelle als Grundlage für die Simulationen zu nutzen.

Für den Bereich des Schallschutzes ist die Integration von BIM-Modellen noch nicht in Aussicht (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ et al., 2021). Weder bieten existierende Softwarelösungen einen vollständigen open BIM Ansatz, noch ist die Forschung in diesem Bereich sehr aktiv: auf den wichtigsten wissenschaftlichen Konferenzen für Akustik taucht der Begriff BIM erst 2017 auf der ICSV (SQUADRONE & BACCHI, 2017) und 2019 auf der Internoise (AGUILAR-AGUILERA et al., 2019; MASTINO, CONCU et al., 2019) auf. Erst 2021 gab es auf der Euronoise erstmals eine Session für BIM in der Akustik mit sechs Vorträgen (CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG et al., 2021; DI BELLA, 2021; MASTINO et al., 2021; MONTEIRO et al., 2021; MONTENEGRO et al., 2021; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ et al., 2021).

Ein Teil der Literatur beschäftigt sich beim Schallschutz mit der Ermittlung der Schallschutzanforderungen. SQUADRONE und BACCHI betrachten Industriegebäude und möchten aus dem BIM-Prozess durch die Klassifikation der Gebäude Anforderungen für Bauteile ermitteln (SQUADRONE & BACCHI, 2017). Durch *Code Compliance Checking* ermitteln auch MASTINO, CONCU et al. die Anforderungen und gleichen sie mit den Messergebnissen ab (MASTINO, BACCOLI, FRATTOLILLO, MARINI & SALARIS, 2019; MASTINO, CONCU et al., 2019). AGUILAR-AGUILERA et al. binden die Berechnung des Schallschutzes in einen BIM-Workflow ein, indem sie aus *Autodesk Revit* die Modelle mit Hilfe des graphischen Programmierinterface *Dynamo* analysieren: das Modell wird in Zonen unterteilt, die Geometrie der Bauteile ausgelesen und daraus die Schallschutzprognose erstellt (AGUILAR-AGUILERA et al., 2019). Allerdings

wird in der Literatur nicht erläutert, wie die Stoßstellen ermittelt werden und wie bestimmt wird, welche Werte die Stoßstellendämm-Maße und Flankenübertragungswege erhalten. Hinzu kommt, dass die Methodik nur für Räume auf demselben Geschoss gilt, was die Berechnung der Trittschallübertragung ausschließt.

Eine weitere Anwendung von *Code Compliance Checking* nutzt *semantic web*-Technologien, um aus IFC-Dateien mehr Informationen zu generieren (PAUWELS et al., 2011). Als Anwendungsfall wird ein Ausschnitt aus der EN ISO 12354 verwendet, bei dem eine Unterscheidung der Fläche der Bauteile die Berechnungsart des Transmissionsgrades bestimmt (PAUWELS et al., 2011). Dieser Ausschnitt ist bei weitem nicht ausreichend, um eine vollständige Schallschutzprognose zu erstellen und dient nur zur Veranschaulichung der Methode. In LORENZ, 2007 und GAUDRY et al., 2019 wird der Schallschutz nur als einer von vielen Parametern im Rahmen eines BIM-Planungsprozesses angeschnitten. In allen genannten Veröffentlichungen wird nur ein Bruchteil der Problematik aus dem Schallschutz betrachtet und mit starken Vereinfachungen gerechnet.

Nur ein Teil der Literatur setzt den Schwerpunkt auf die Schallschutzprognose, also die Ermittlung der Schalldämm-Maße und Trittschallpegel. Die Arbeit von MASTINO et al. fokussiert sich stark auf die Erstellung von akustischen Zonen im Gebäude (MASTINO et al., 2021). Zusätzlich sollen durch Informationen aus *CityGML*-Dateien die Berechnung der Schallimmissionen und des Schallschutzes nach außen ermöglicht werden (MASTINO et al., 2021). In MONTENEGRO et al., 2021 nutzen die Autoren die Technologie von *BIMserver.center*³, um ein Modell in der Software *CYPE Architecture*⁴ zu bearbeiten. Anschließend wird das Modell in das Tool *Open BIM Analytical Model*⁵ geladen, wo es für die Schallschutzberechnung aufbereitet wird. Die benötigten Eingangsdaten werden als *JavaScript Object Notation* (JSON)-Datei an *CYPE AcouBAT*⁶ übergeben. Die Räume und die Raumnutzung müssen dann manuell zugeordnet werden. Die Bauteile werden ebenfalls manuell aus einer Datenbank mit Messwerten des *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB) ausgesucht (MONTENEGRO et al., 2021). Dieses Verfahren nutzt nur manuelle Eingaben und ist nicht in der Lage mit unterschiedlichen Stoßstellensituationen, wie sie im Holzbau vorkommen, umzugehen.

Mehrere Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass die bisherigen Informationen aus einem IFC-Modell nicht ausreichen, um eine vollständige Schallschutzprognose durchzuführen (DI BELLA, 2021; MASTINO et al., 2017; MONTEIRO et al., 2021). MONTEIRO et al. listet die Attribute auf, die für die Berechnung des Schallschutzes und der Raumakustik in einem IFC-Modell vorhanden sein müssten (MONTEIRO et al., 2021). Es werden jedoch in keiner der Arbeiten eine Erweiterung der IFC-Klassen vorgeschlagen, fehlende Attribute formalisiert oder detaillierter auf existierende Klassen eingegangen.

³<https://bimserver.center/de>

⁴<https://info.cype.com/en/solutions/professionals/architecture/>

⁵https://store.bimserver.center/en/app/259/open_bim_analytical_model

⁶https://store.bimserver.center/en/app/16/acoubat_by_cype

4.6 Zusammenfassung digitale Gebäudemodelle

Grundlage digitaler Gebäudemodelle ist eine objektorientierte Modellierung, die den Objekten nicht nur Geometrie, sondern auch Semantik zuweist. Durch die Verwendung herstellernerneutraler Formate können auch Daten zwischen verschiedenen Autoren- und Planungssoftwaresystemen ausgetauscht werden. Genau hier steckt jedoch noch weiteres Entwicklungs- und Forschungspotenzial, um den Verlust an Informationen durch den Datenaustausch weiter zu minimieren.

Zusätzlich zum Informationsverlust bei der Datenübergabe ist der Detaillierungsgrad der Modelle ein wichtiges Thema. Dieser muss projekt- aber auch phasenbezogen betrachtet werden und kann sich sowohl auf die Geometrie als auch auf die Semantik beziehen und einzelne Bauteile oder ganze Gebäude beschreiben. In dieser Arbeit wird der Detaillierungsgrad immer bauteilbezogen für die Semantik und Geometrie betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf der semantischen Abbildung in IFC liegt.

Das Datenformat IFC bietet als herstellernerneutrales Format die Möglichkeit, digitale Bauwerksmodelle zu beschreiben. Seine Struktur und Vererbungshierarchie ergeben ein sehr komplexes Schema, das viele Details der Gebäudeplanung enthalten kann. Die Modelle der Autorensoftware werden in nativen Formaten gespeichert und über definierte MVD in IFC-Modelle exportiert. Bisher ist keine der bestehenden MVD dazu ausgelegt, sowohl Bauteilverbindungen als auch Raumbegrenzungen zu exportieren. Die Qualität der Modelle kann jedoch durch *Model Healing* verbessert werden.

Sowohl der Holzbau als auch der Schallschutz sind noch unzureichend in einen Planungsprozess mit BIM integriert. Eine Einbindung von Simulationen wie die Schwingungsanalyse in einen BIM-Planungsprozess ist noch nicht Thema der Forschung und wird auch in der Praxis noch nicht verwendet. Auch wenn BIM im Holzbau noch nicht verbreitet ist, zeigt sich durch die Anwendung von CAD/CAM mit CNC-Technologie seit Jahren, dass die Branche für innovative Verfahren offen ist, aber auf ausgereifte Produkte wartet.

Im Bereich der Bauakustik zeigt sich, dass es nicht nur an Lösungen für die Anbindung von BIM-Modellen mittels offener Datenstandards mangelt, sondern auch, dass zu diesem Thema noch wenig geforscht wird. Dementsprechend zeigt sich eine große Forschungslücke in der Kombination von Schallschutz, Holzbau und BIM. Diese Arbeit setzt genau hier an und zeigt auf, wie die Schallschutzprognose im Holzbau durch den Einsatz von IFC zu einem sinnvollen Datenaustausch und Mehrwert gelangen kann. Offene Datenformate für den Austausch vom BIM-Modell zur akustischen Berechnung sind dringend erforderlich. Hier müssen Methoden entwickelt werden, die nicht nur Raumgeometrien, sondern auch komplexere Informationen wie Stoßstellenlage und Stoßstellentyp auslesen können.

Kapitel 5

Konzept zur Nutzung von open BIM für die schalltechnische Prognose

Nachdem der theoretische Hintergrund erläutert wurde, geht dieses Kapitel auf die entwickelte Methodik ein, um die Schallschutzprognose in einen open BIM Planungsprozess für den Holzbau zu integrieren. Dazu werden die Besonderheiten, die bei der Erstellung eines digitalen Bauwerksmodells im Holzbau ermittelt wurden, betrachtet. Die Detaillierungsgrade für ein Holzbaumodell in IFC werden festgelegt, sowie entsprechende Anforderungen an die Modellierung gestellt. Anschließend wird der Kern der Methodik erläutert wie aus einem Gebäudemodell die Eingangsdaten für die Schallprognose ermittelt werden. Diese Arbeit besteht aus der Ermittlung der flankierenden Bauteile und der Zuordnung der Stoßstellentypen, sowie der Ermittlung der Übertragungswege. Die so gewonnenen Informationen bilden dann das erarbeitete Fachmodell Akustik. Es wird auch untersucht, wie Daten an und aus dem Prognosetool *VBAcoustic* übergeben werden können.

Für diese Arbeit wurde die Verwendung des digitalen Gebäudemodells im herstellerneutralen Format IFC gewählt. Kapitel 4.3 liefert den theoretischen Hintergrund zu IFC, auf dem dieses Kapitel aufbaut. Die folgenden Abschnitte beziehen sich immer auf die Datenstruktur von IFC. Ein komplettes Gebäude direkt als IFC-Modell zu erstellen ist zwar theoretisch möglich (STOCKER, 2021), aber praktisch kaum umsetzbar. Daher ist es sinnvoll, eine Autorensoftware als Grundlage für die Modellierung zu verwenden und das exportierte IFC-Modell anschließend (semi-)automatisch oder sogar manuell zu korrigieren oder zu ergänzen.

Die in diesem Kapitel erarbeitete Methodik wird in Kapitel 6 anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert.

5.1 Gebäudemodelle für den Holzbau

Das Datenschema IFC bietet die Möglichkeit, Informationen über Gebäudemodelle in einem weiten Detailspektrum zu transportieren. Im Holzbau werden bereits in frühen Planungsphasen detaillierte Modelle erstellt. Die semantische Korrektheit dieser Detaillierungstiefe zu gewährleisten, ist nicht selbsterklärend. Es hat sich gezeigt, dass viele Autorensoftware inkonsistente IFC-Modelle exportieren oder einen Teil der modellierten Informationen nicht übergeben.

Für diese Arbeit war es wichtig zu definieren, welche Anforderungen, Modelle im Holzbau erfüllen müssen. Daher wird in diesem Kapitel anhand der Definitionen im IFC-Standard von *buildingSMART* erarbeitet, wie typische Holzbauteile in unterschiedlichen LOD erzeugt werden können.

Im Holzbau wird unterschieden zwischen der Holzmassivbauweise mit Grundelementen aus Brettsperrholz oder Brettstapel und der Holzrahmenbauweise mit einer Unterkonstruktion aus Massivholzständern und im Gefach liegender Dämmung. Sonderaufbauten wie Hohlkastenelemente und zusammengesetzte Rippen- oder Flächenelemente ähneln Massivholzbauerelementen, verwenden jedoch durch konstruktive Aussparungen weniger Material und ermöglichen das Einbringen von Dämmung und Beschwerung direkt im Element.

Für das digitale Gebäudemodell mit mehrschichtigen Holzbauelementen müssen bei einem IFC-Modell folgende Punkte erfüllt sein:

- Alle Einzelteile eines Elements wie Platten, Lattungen, Dämmung oder ähnliches müssen als Teil eines gesamten Bauteils definiert sein (*IfcRelAggregates*).
- Vorsatzschalen, Unterdecken oder Fußbodenaufbauten oberhalb der Rohdecke müssen als *IfcCovering* instanziiert sein und sind dem tragenden Bauteil über *Decomposes* mit der Klasse *IfcRelAggregates* zuzuordnen.
- Zu jedem Bauteil muss ein Bauteiltyp einer angeleiteten Klasse von *IfcBuildingElementType* gehören. Im Bauteiltyp ist der Materialaufbau mit *IfcMaterialLayerSet* festzulegen.
- Die Richtung der Materialschichten für jedes Bauteil regelt die Klasse *IfcMaterialLayerSetUsage* im Bauteil selbst. Das Attribut *ForLayerSet* verweist auf die Klasse *IfcMaterialLayerSet* im Bauteiltyp.
- Die Benennung des Materials im Attribut *Name* der Klasse *IfcMaterial* sollte eindeutig sein und der Benennung in einer verwendeten Bauteildatenbank entsprechen.
- Die Kernschicht sollte im Attribut *Category* im *IfcMaterialLayer* mit *LoadBearing* gekennzeichnet sein.

- Nach Möglichkeit sollen Bauteile einer eindeutigen Klasse zugeordnet werden. Die Verwendung von *IfcBuildingElementProxy* ist zu vermeiden.

In IFC4 entfällt die semantische Unterscheidung für Bauteile über *StandardCase* und *ElementedCase* bei Elementen aus massiven Konstruktionen oder denen aus zusammengesetzten Einzelteilen. Zusammengesetzte Bauteile sollen nun über die Klassen *IfcElementAssembly* und *IfcRelAggregates* zusammengesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass bei niedrigen Detaillierungsgraden semantisch nicht mehr zwischen Holzmassivbauteilen und Ständerkonstruktionen unterschieden werden kann, da die Unterkonstruktion erst ab einem höheren Detaillierungsgrad modelliert wird. Darunter muss die Unterkonstruktion nur semantisch über den Schichtaufbau (Schichtname und Material) ersichtlich sein.

Ebenfalls seit IFC4 ist zu beachten, dass die Klasse *IfcCovering* nicht mehr mit der Beziehung *IfcRelCoversBldgElements* einem Bauteil zugeordnet werden, sondern dafür die Beziehung *IfcRelAggregates* zu nutzen ist (siehe Abbildung 5.1). Allerdings ist zum Stand dieser Arbeit in der Dokumentation von IFC4 noch immer bei *IfcCovering* das inverse Attribut *CoversElement* definiert (siehe Abbildung 5.2). Korrekt ist die Zuordnung in IFC4 per inversem Attribut *Decomposes*.

In Detaillierungsgraden über LOD 400 können auch Befestigungsmittel wie Winkel und Schrauben abgebildet werden. Dies ist erst für die Fertigung notwendig und sollte gut überlegt sein, da die Dateigröße dadurch stark erhöht wird.

Keine der Veröffentlichungen aus Abschnitt 4.1 betrachtet den Detaillierungsgrad bezogen auf das IFC-Schema. Daher soll in den folgenden Abschnitten an Bauteilen, die für den Holzbau relevante Konstruktionsweisen aufweisen, die Modellierung nach IFC-Schema in unterschiedlichen Detaillierungsgraden erfolgen. Der Fokus liegt auf der Semantik und nicht auf der geometrischen Darstellung, die hier außen vorgelassen wird. Die Definition wird aus BEDRICK et al., 2021 abgeleitet und für die Holzbauweise detailliert aufgearbeitet.



Abbildung 5.1: Anmerkung zur Verwendung von *IfcRelAggregates* für die Zuordnung von *IfcCovering* zu Bauteilen statt *IfcRelCoversBldgElements*, die jedoch noch nicht im EXPRESS-Schema umgesetzt ist (siehe Abbildung 5.2) (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023a), Stand August 2023

6.1.3.12.7 Formal representation [↗](#)

```

1 ENTITY IfcCovering
2 SUBTYPE OF (IfcBuiltElement);
3   PredefinedType : OPTIONAL IfcCoveringTypeEnum;
4 INVERSE
5   CoversSpaces : SET [0:1] OF IfcRelCoversSpaces FOR RelatedCoverings;
6   CoversElements : SET [0:1] OF IfcRelCoversBldgElements FOR RelatedCoverings;
7 WHERE
8   CorrectPredefinedType : NOT(EXISTS(PredefinedType)) OR
9   (PredefinedType <> IfcCoveringTypeEnum.USERDEFINED) OR
10  ((PredefinedType = IfcCoveringTypeEnum.USERDEFINED) AND EXISTS (SELF\IfcObject.ObjectType));
11   CorrectTypeAssigned : (SIZEOF(IsTypedBy) = 0) OR
12   ('IFC4X3_DEV_9f90c1f0.IFCCOVERINGTYPE' IN TYPEOF(SELF\IfcObject.IsTypedBy[1].RelatingType));
13 END_ENTITY;

```

Abbildung 5.2: Fehlerhafte Definition von *IfcCovering* samt inversem Attribut *CoversElement* in EXPRESS, da *IfcRelCoversBldgElements* und *IfcRelCoversSpaces* den Status *DEPRECATED* aufweisen (siehe Abbildung 5.1), (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2023a), Stand August 2023

5.1.1 Holzmassivbau

In den Holzmassivbau werden alle Elemente einsortiert, die aus einzelnen Schichten verleimt werden. Diese Schichten können kreuzweise verleimte Brettlagen (Brettsperrholz bzw. *Cross Laminated Timber* (CLT)), hochkant verleimte Kanthölzer und Bretter (Brettstapel), sowie mit Stabdübeln verbundene Brettlagen sein (Dübelholz). Bei der Modellierung eines Bauteils mit IFC werden die Schichten um die Massivholzwand vorwiegend durch die semantische Information im *IfcMaterialLayer* vorgegeben.

Im LOD 100 ist noch keine Information über das Material vorhanden. Hier wird nur der Wandtyp mit *IfcRelDefinesByType* angehängt (siehe Abbildung 5.3). In LOD 200 wird dem Wandtyp die Information über die Materialschichten gegeben, ohne diese Schichten geometrisch darzustellen (siehe Abbildung 5.4). Die Darstellung der einzelnen Schichten kommt erst bei LOD 300 hinzu (siehe Abbildung 5.5) und entspricht bei Massivholzelementen ohne Vorsatzschalen oder ähnlichen Unterkonstruktionen der aus LOD 350. Erst ab LOD 400 werden einzelne Details in den Schichten erstellt, wie z. B. die Beplankung. Ab LOD 450 werden die Platten der Beplankung und Teile der Massivholzelemente einzeln modelliert. Diese Einzelteile werden mit den Schichten im *IfcMaterialLayer* verbunden, um das Material und die Schichtdicke semantisch auslesen zu können (siehe Abbildung 5.6). Obwohl ab LOD 400 einzelne Platten und Elemente modelliert werden, ist eine Unterteilung der verleimten Schichten, die das Massivholzelement bilden, nicht zielführend.

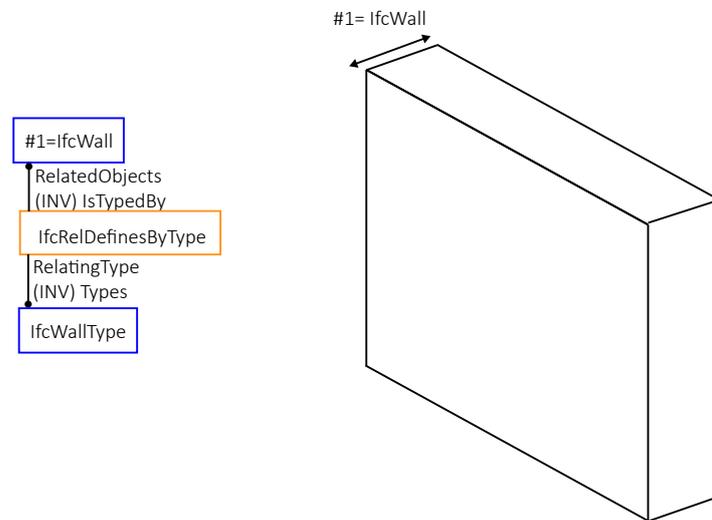


Abbildung 5.3: Massivholzwand mit einem Kern aus CLT mit einseitiger Bepunktung und Wärmedämmverbundsystem außen im LOD 100

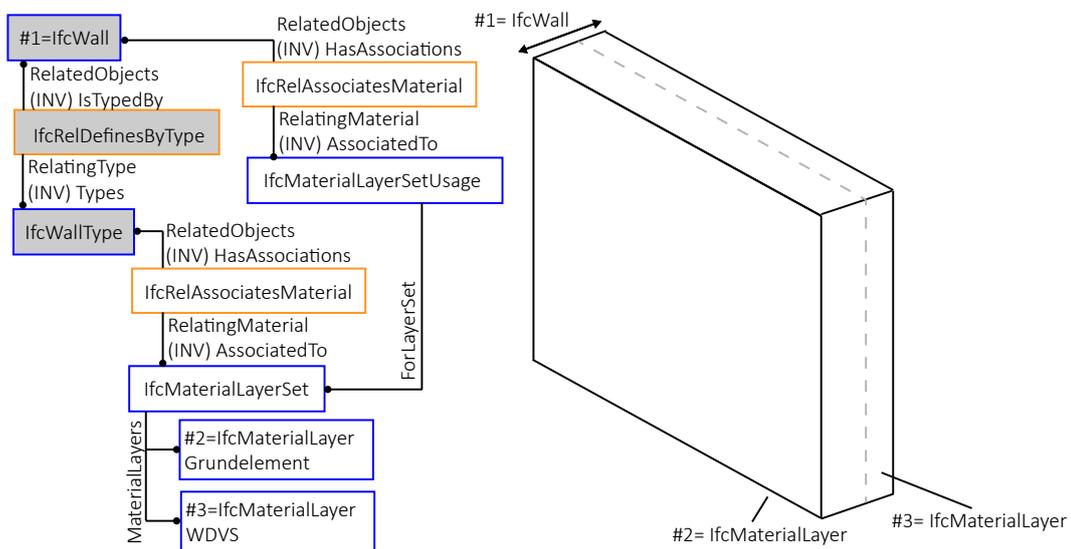


Abbildung 5.4: Massivholzwand mit einem Kern aus CLT mit einseitiger Bepunktung und Wärmedämmverbundsystem außen im LOD 200: Einfache Materialinformationen kommen hinzu. Die grau hinterlegten Klassen waren bereits in LOD 100.

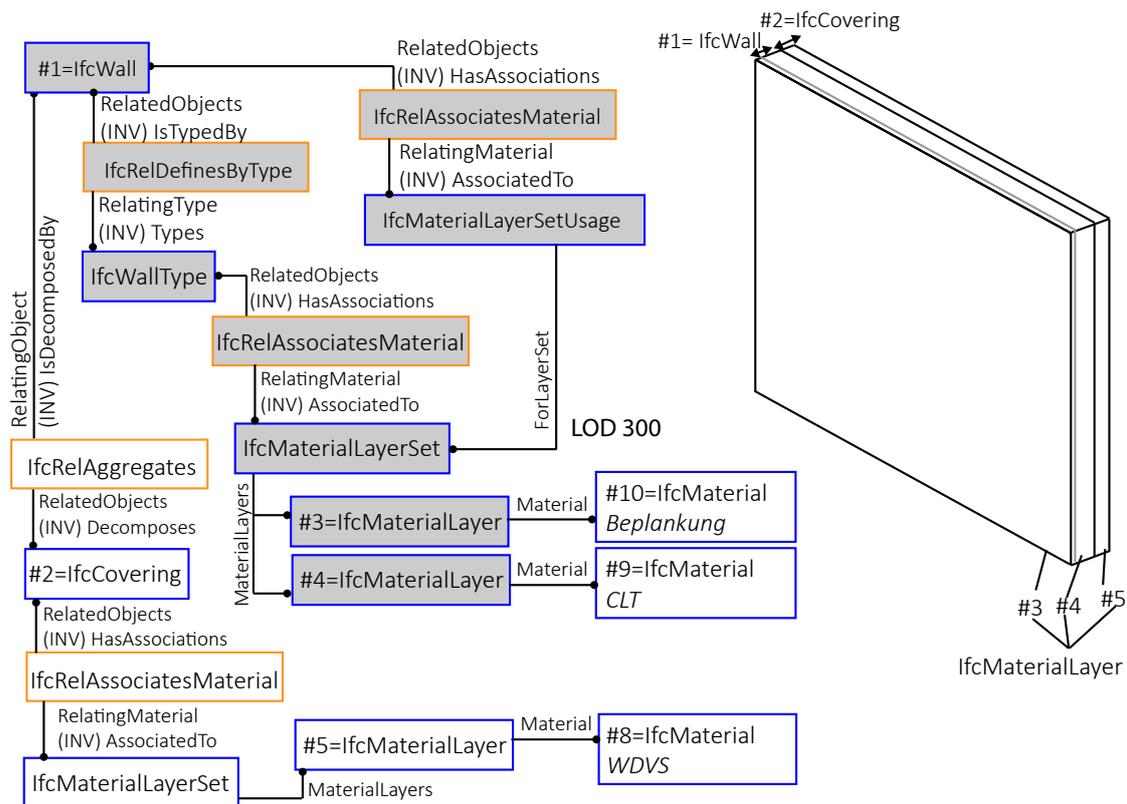


Abbildung 5.5: Massivholzwand mit einem Kern aus CLT mit einseitiger Beplankung und Wärmedämmverbundsystem außen im LOD 300 bzw. 350: es wird zwischen Kernelement und Vorsatzschale (*IfcCovering*) unterschieden und die Materialschichten können genauer angegeben werden. Die grau hinterlegten Klassen waren bereits Bestandteil von LOD 100 und LOD 200.

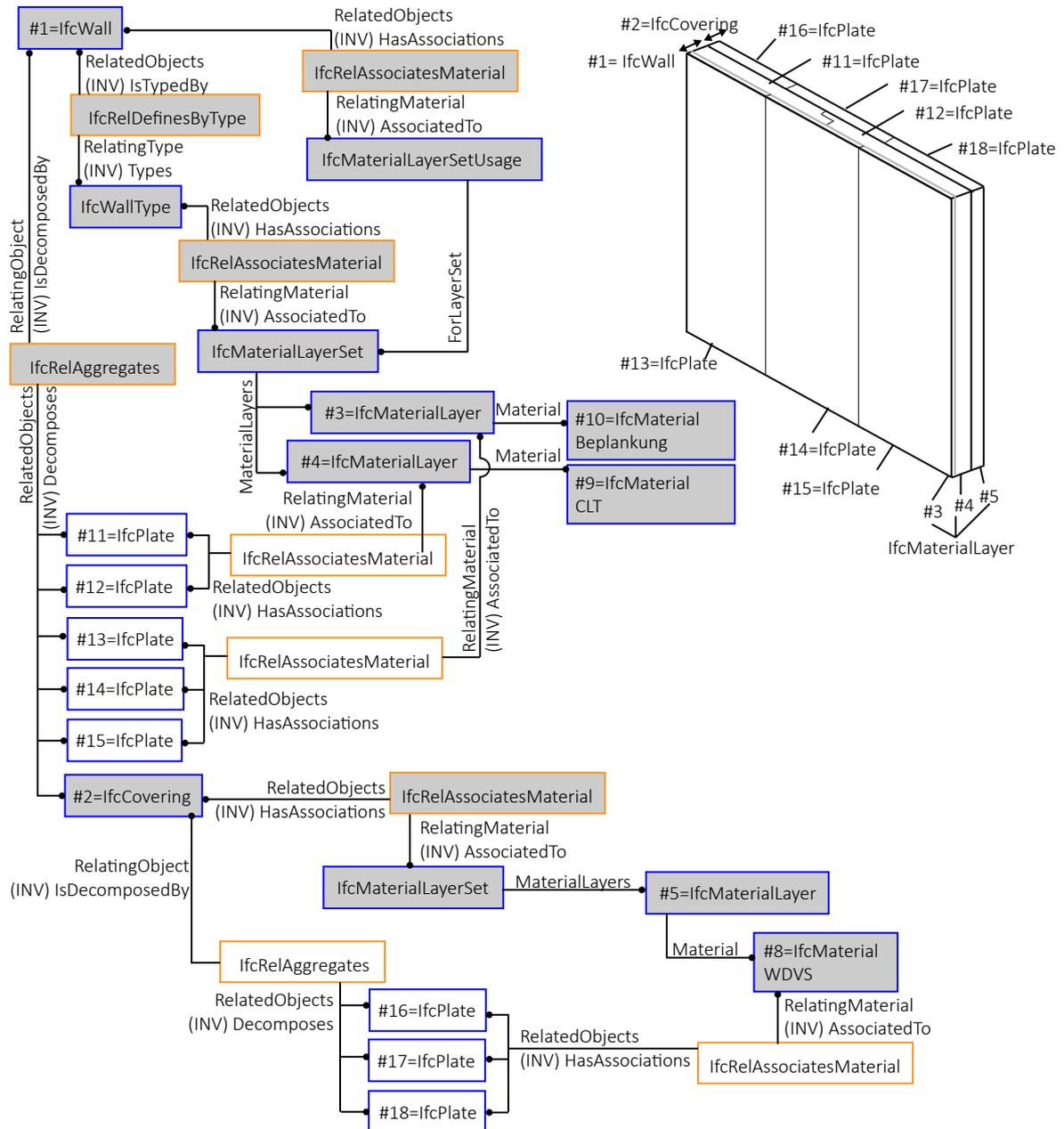


Abbildung 5.6: Massivholzwand mit einem Kern aus CLT mit einseitiger Beplankung und Wärmedämmverbundsystem außen im LOD 400. Die grau hinterlegten Klassen waren bereits Bestandteil von LOD 100, LOD 200 und LOD 300. Einzelne Bauteile, wie die Platten für die Beplankung oder die einzelnen Elemente der Kernschicht, werden semantisch und geometrisch erstellt.

5.1.2 Holzleichtbau

Unter Holzleichtbau versteht man alle Bauweisen, bei denen die Bauteile aus einer Holzunterkonstruktion und aus Platten bestehen. Dazu gehören alle Holzrahmen-, Skelett- und Holztafelbauweisen.

In den BIM-Modellen des Holzleichtbaus besteht der Unterschied zum Holzmassivbau in der Darstellung der Unterkonstruktion. Diese wird bis LOD 200 als eine semantische Schicht betrachtet (siehe Abbildung 5.7) mit eigenem *IfcMaterialLayer*. Erst in LOD 300 kann in der Schicht auch die Unterkonstruktion angegeben werden. Diese ist jedoch nur über den Namen der Schicht oder des Materials als solche erkennbar (siehe Abbildung 5.8). In LOD 350 werden dann einzelne Ständer, Pfosten und Riegel der Unterkonstruktion auch geometrisch dargestellt (siehe Abbildung 5.9). In LOD 400 werden die Plattenelemente einzeln modelliert (siehe Abbildung 5.10).

Die Abbildungen 5.8 bis 5.10 zeigen, wie auch der Vorsatzschale als Instanz von *IfcCovering* ein eigener Typ (*IfcCoveringType*) zugeordnet wird. Dies kann notwendig sein, wenn sich z. B. die Außenwand durch unterschiedliche Fassadenbekleidungen auszeichnet. Dann kann die Außenwand selbst immer demselben Wandtyp zugeordnet werden und die Fassade erhält dann ihren eigenen Typ. Diese Aufteilung ist auch für die Fertigung und Mengenermittlung sinnvoll.

5.1.3 Sonderaufbauten

Gebäudemodelle mit Sonderkonstruktionen wie Hohlkasten- und Rippenelemente werden wie Massivholzelemente mit geringerem Detaillierungsgrad behandelt. Sie werden als vorgefertigte Elemente auf die Baustelle geliefert und somit auch als vollständige Objekte im Modell erzeugt. In höheren Detaillierungsgraden werden Bauteile aus diesen Einzelteilen über *IfcRelAggregates* zusammengesetzt. Vormodellierte Objekte können bei Bedarf ab LOD 400 von den jeweiligen Produktherstellern zur Verfügung gestellt werden.

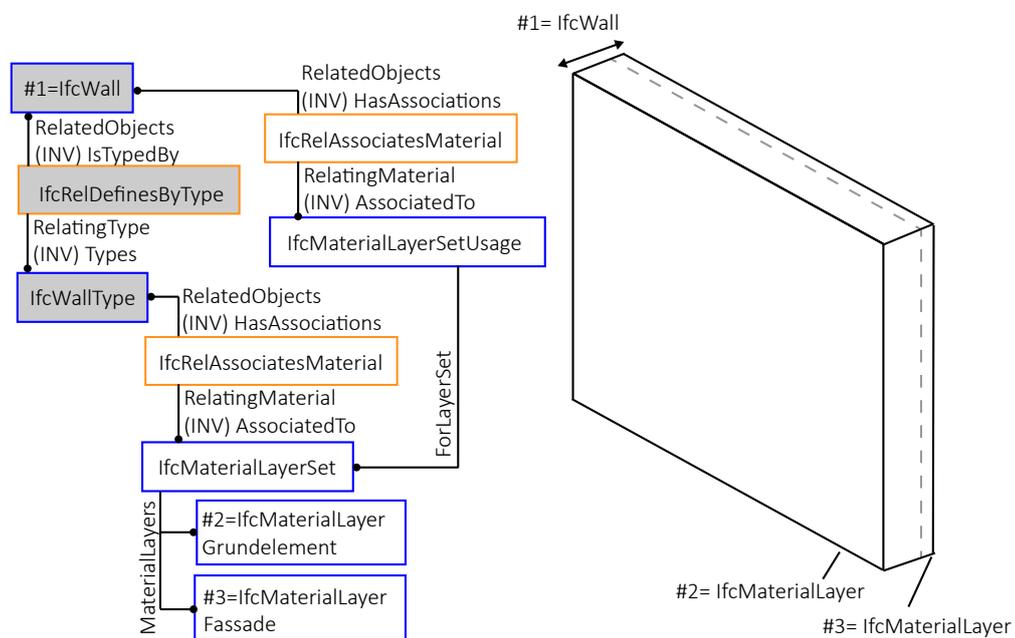


Abbildung 5.7: Wand in Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale im LOD 200 mit Materialzuordnung

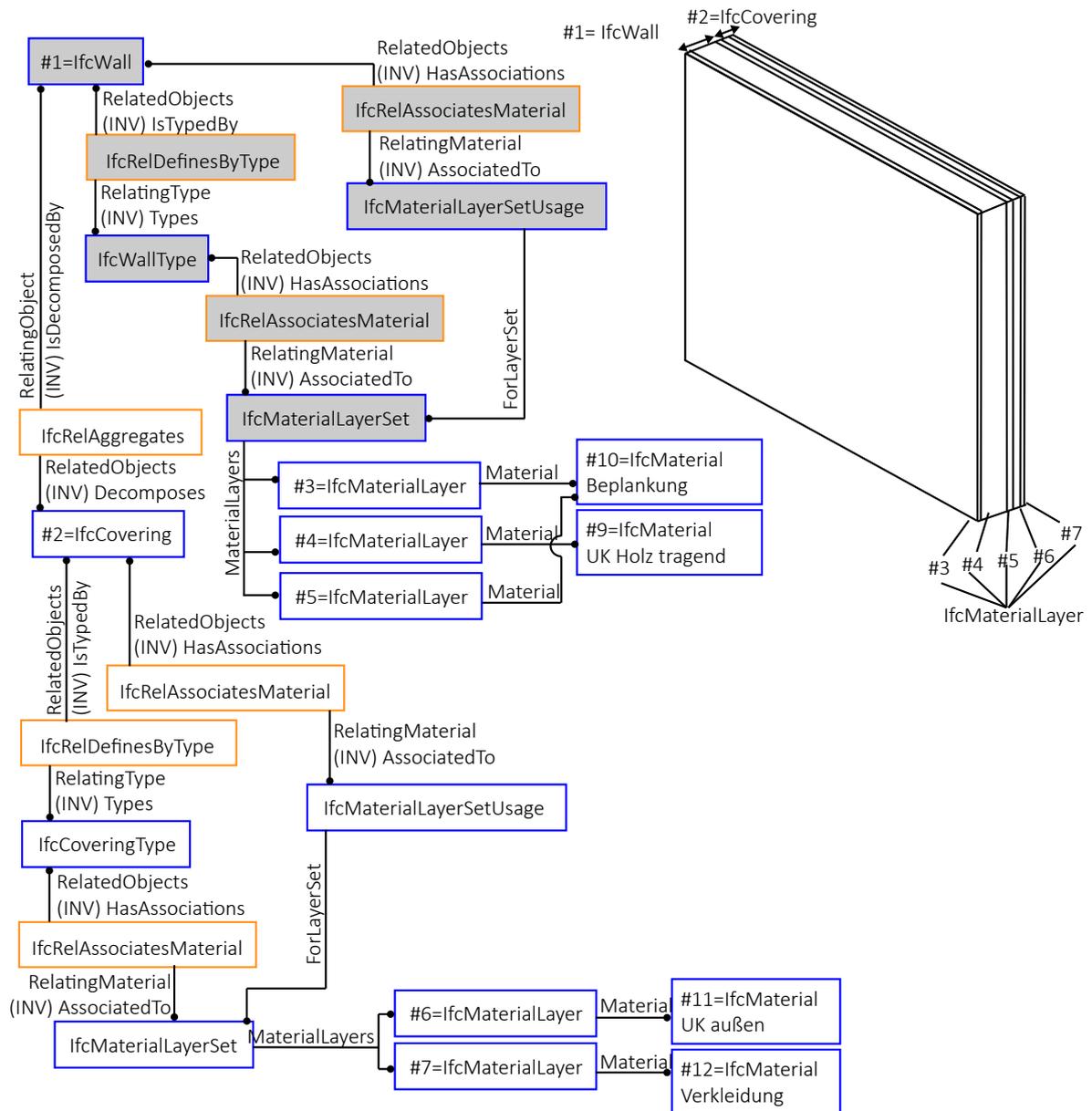


Abbildung 5.8: Wand in Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale im LOD 300 mit detaillierteren Beschreibungen der Schichten und separater Vorsatzschale *IfcCovering*. Die grau hinterlegten Klassen waren bereits Bestandteil von LOD 200.

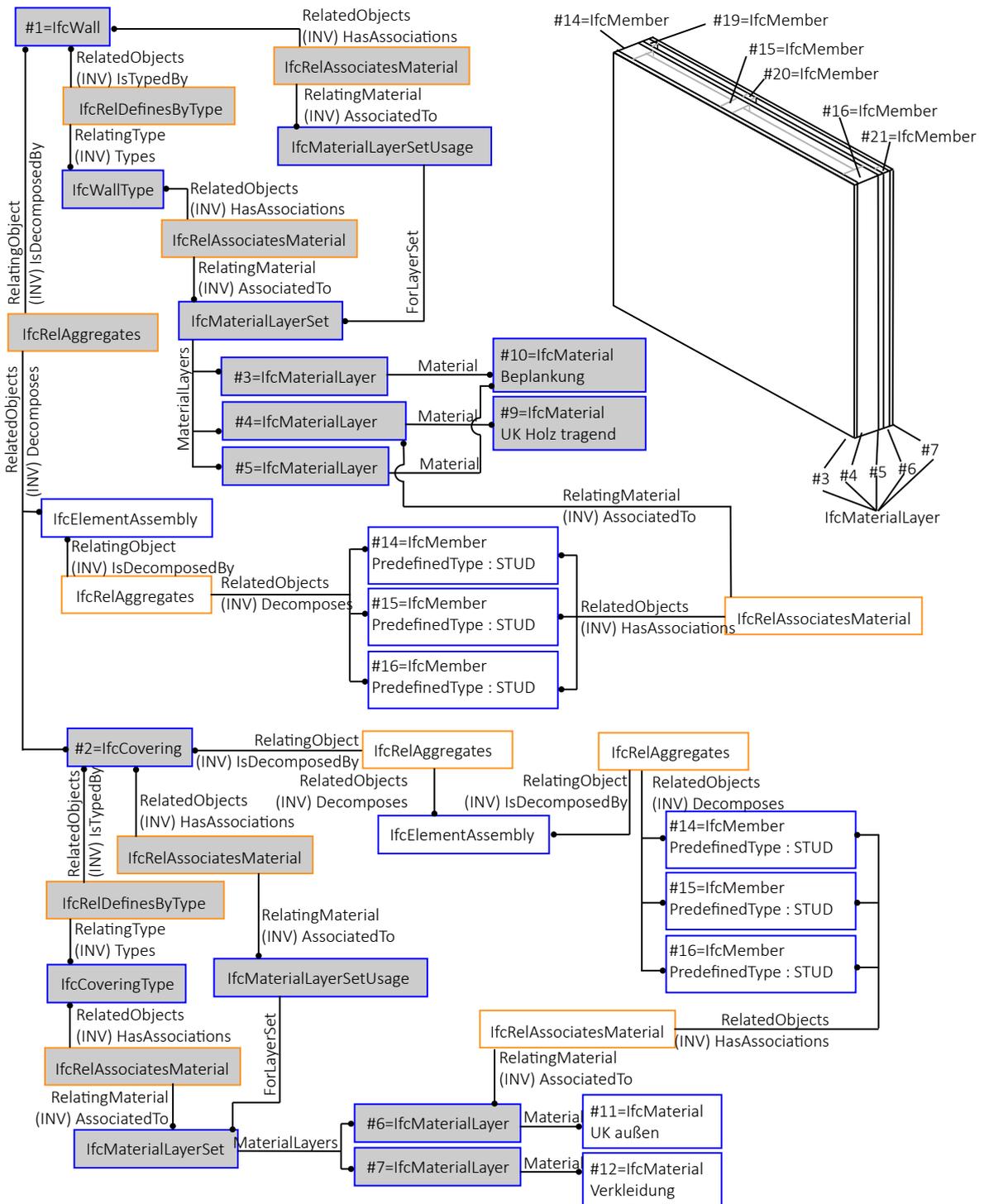


Abbildung 5.9: Wand in Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale im LOD 350. Die grau hinterlegten Klassen waren bereits Bestandteil von LOD 200 und LOD 300. Neu ist die Detaillierung der Unterkonstruktion als eine Schicht aus mehreren Bauteilen (*IfcElementAssembly*)

5.2 Gebäudemodelle für die Schallschutzplanung

Auch für die Schallschutzplanung müssen Gebäudemodelle bestimmte Anforderungen erfüllen. Dieses Kapitel definiert diese Anforderungen. Vor allem die Qualität der räumlichen Hierarchie des Gebäudemodells ist für die Schallschutzplanung zu gewährleisten. Über die Bauteile selbst müssen vor allem semantische Informationen vorhanden sein, dazu zählen neben dem Schichtaufbau auch die Bauteilverbindungen.

5.2.1 Räumliche Struktur

Die räumliche Struktur ist ein Kernelement des IFC-Schemas. Gebäude werden in Geschosse unterteilt und darin werden sowohl Bauteile als auch Räume platziert. Dabei ist Folgendes zu beachten:

- Bauteile müssen eine übergeordnete Hülle besitzen, die mit dem Attribut *IsDecomposedBy* alle Einzelteile über die Klasse *IfcRelAggregates* zusammensetzt.
- Wie für ein Modell in Holzbauweise beschrieben, sollte die tragende Schicht einer Wand oder Decke identifizierbar sein und über das Attribut *Category* im *IfcMaterialLayer* auf *LoadBearing* gesetzt werden.
- Nur die tragenden Bauteile sind Teil der räumlichen Hierarchie. Sie müssen einem *IfcBuildingStorey* zugeordnet sein, ihre Einzelteile im Attribut *IsDecomposedBy* dürfen es jedoch nicht sein.
- *IfcReferencedInSpatialStructure* ergänzt die räumliche Hierarchie für alle Elemente, die auf mehrere Geschosse (*IfcBuildingStorey*) verteilt sind.
- Räume werden mit der Klasse *IfcSpace* instanziiert und ihre Raumbegrenzungen als *IfcRelSpaceBoundary*. Raumbegrenzungen können auch durch virtuelle Elemente der Klasse *IfcVirtualElement* erzeugt werden.
- Bei zusammengesetzten Bauteilen muss immer das Element die Raumbegrenzung *IfcRelSpaceBoundary* bilden, das auch auf der raumzugewandten Seite des Bauteils liegt. Dies betrifft Elemente mit Vorsatzschalen (*IfcCovering*) oder Elemente, die aus mehreren Bauteilen zusammengesetzt wurden.

Die räumliche Hierarchie muss für die Schallschutzplanung korrekt angelegt sein. Abbildung 4.10 aus Kapitel 4.3.3 zeigte bereits wie diese Zuordnung stattfinden sollte. Alle Bauteile müssen in einem festen Geschoss (*IfcBuildingStorey*) platziert sein. Die einzige Ausnahme bilden Bauteile, die Teil einer Aggregation sind. In diesem Fall wird nur das übergeordnete

Bauteil räumlich zugeordnet (siehe Abbildung 5.11). Bauteile, die über mehrere Geschosse gehen, müssen am untersten Geschoss platziert und über *IfcReferencedInSpatialStructure* auf die anderen Geschosse aufgeteilt werden. Die Zuordnung über *IfcRelContainedInSpatialStructure* ist nur zu einem *IfcBuildingStorey* pro Bauteil erlaubt.

Abbildung 5.11 zeigt auch wie Raumbegrenzungen mit *IfcRelSpaceBoundary* zwischen Bauteilen und Räumen erzeugt werden. Elemente, die als *IfcCovering* instanziiert wurden, können über das inverse Attribut *ProvidesBoundaries* auf die Raumbegrenzung *IfcRelSpaceBoundary* verweisen.

Soll zusätzlich zur Prognose auch ein Abgleich mit den geforderten Normwerten durchgeführt werden, muss das Gebäudemodell in unterschiedliche Nutzungseinheiten aufgeteilt sein. Nutzungseinheiten können mehrere Räume beinhalten, die zu Zonen (*IfcZone*) zusammengefasst werden. Die Nutzungseinheiten erhalten keine eigene Geometrie oder Positionierung.

Bei der Aufteilung der Räume und der Raumbegrenzungen muss mindestens mit den *IfcRelSpaceBoundary* gearbeitet werden. Bei Bauteilen, die jedoch mehrere Räume begrenzen, ist diese Zuordnung ungenau. Idealerweise sollte daher mit *IfcRelSpaceBoundary2ndLevel* gearbeitet werden. Da diese Art der Raumbegrenzungen jedoch selten von Autorensoftware in IFC exportiert wird, muss diese Information häufig nachträglich eingefügt werden. Diese Aufgabe wird bereits für den Bereich Energiesimulation untersucht (BAZJANAC, 2010; LILIS et al., 2017; ROSE & BAZJANAC, 2015) und ist daher nicht Teil dieser Arbeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit der Klasse *IfcRelSpaceBoundary* gearbeitet, auch wenn diese ungenauer sein kann.

5.2.2 Stoßstellen in IFC

Bisher gibt es nur eingeschränkte Darstellungsmöglichkeiten für Stoßstellen in IFC-Modellen, obwohl sie für den Schallschutz von besonderer Bedeutung sind. Die Klasse *IfcRelConnectsElements* ermöglicht eine 1:1 Verbindung von Bauteilen, die sowohl geometrisch als auch nur semantisch stattfinden kann. Eine gemeinsame Verbindungsgeometrie kann optional mit dem Attribut *ConnectionGeometry* hinzugefügt werden. Durch die Einschränkung auf zwei Bauteile ist sie für Stoßstellen, die bis zu vier Elemente beinhalten können, sehr umständlich: an einer Stoßstelle mit drei Elementen entstehen auch drei Instanzen von *IfcRelConnectsElements* und bei einer Stoßstelle mit vier Elementen sogar sechs. So würden die Stoßstellen eines Deckenelementes, welches mitten im Gebäude von vier X-Stößen umgeben ist, durch insgesamt 24 Verbindungen abgebildet werden.

Hinzu kommt, dass aus der semantischen Information einer Verbindung nicht auf den Stoßstellentyp geschlossen werden kann, da die von *IfcRelConnectsElements* abgeleitete Klasse *IfcRelConnectsPathElements* zwar einen Verbindungstyp (*IfcConnectionTypeEnum*) aufweisen kann, dieser aber nur eingeschränkte Verbindungsmöglichkeiten listet: *AtStart*, *AtEnd* und

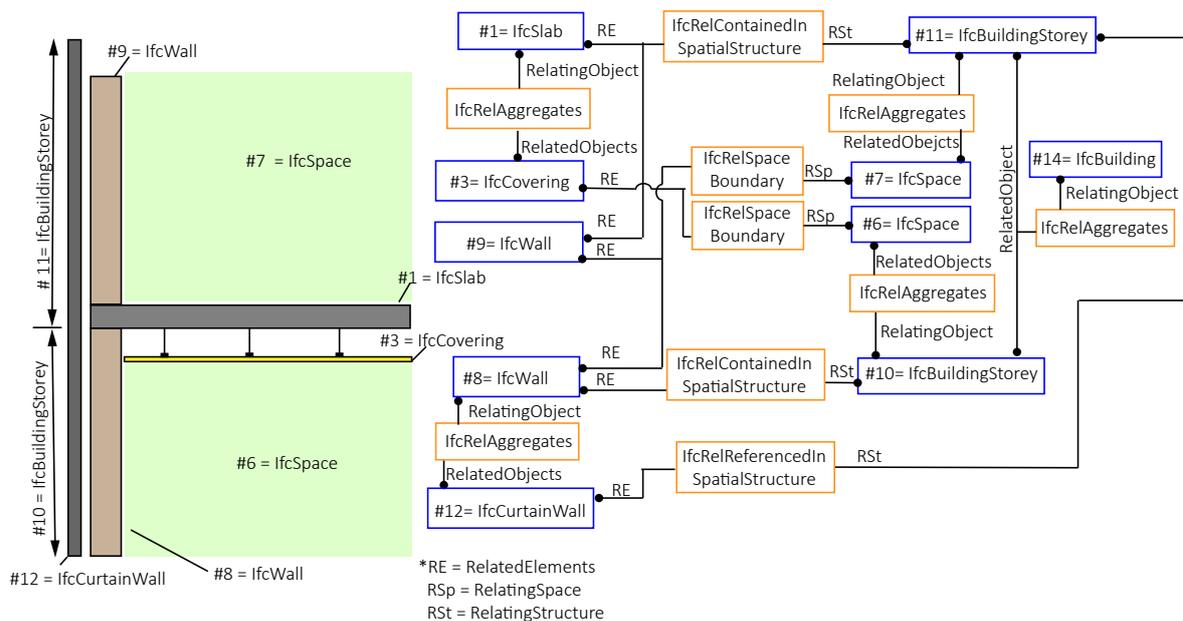


Abbildung 5.11: Beispiel der räumlichen Gebäudestruktur für Bauteile und Räume mit ihren jeweiligen Raumbegrenzungen

AtPath. Laut IFC-Dokumentation wird nicht unterschieden, ob ein Element auf der Stirnseite oder auf dem flächigen Teil des Elements verbunden ist. Beides wird mit *AtStart* oder *AtEnd* bezeichnet, je nachdem wie das Element modelliert wurde.

Tabelle 5.1 zeigt, mit welchen IFC-Definitionen die verschiedenen Stoßstellentypen erstellt werden können. Es wird deutlich, dass eine eindeutige Identifikation des Stoßstellentyps nur aus dieser Information nicht möglich ist. Erschwerend hinzu kommt, dass diese Verbindungsinformation selten von Autorensoftware exportiert wird. Zum Teil liegt es daran, dass die MVD diese Klassen nicht beinhalten (siehe Abschnitt 4.3). Zum anderen liegt es an der Autorensoftware selbst. In *Autodesk Revit* z. B. müssen Bauteile explizit miteinander verbunden sein und die Software ist auch nur in der Lage, eine Verbindung zwischen ähnlichen Wänden herzustellen.

Die mangelnden Verbindungsmöglichkeiten zwischen Bauteilen sind nicht nur für den Schallschutz eine Herausforderung, sondern auch für die Tragwerksplanung. In SIBENIK et al., 2020 werden die Elemente zuerst in Flächen und Linien umgewandelt und erst anschließend für die statischen Berechnungen miteinander verbunden, damit aus dem IFC-Modell ein analytisches Modell entstehen kann (SIBENIK et al., 2020).

Dieses Problem wurde im Rahmen begleitender, studentischer Abschlussarbeiten an der TH Rosenheim näher betrachtet (BODENSCHLÄGEL, 2021; LAUSCHKE, 2021). Die vorgeschlagene Lösung besteht darin, mit der Verbindung *IfcRelConnectsWithRealizingElements* und virtuellen Elementen (*IfcVirtualElement*) zu arbeiten. Die Klasse *IfcRelConnectsWithRealizingElements* kann zwei Bauteile mit einem zusätzlichen Verbindungsmittel *RealizingElement*

Tabelle 5.1: Möglichkeiten Stoßstellentypen im IFC-Schema mit *IfcRelConnectsPathElements* abzubilden durch die Attribute *RelatedElement*, *RelatingElement*, *RelatedConnectionType* und *RelatingConnectionType*

Stoßstellentyp	Related-Element	Relating-Element	RelatedConnectionType	RelatingConnectionType
Tv1-24 , Tv2-13 , Th1-24	A	B	AtPath	AtStart / AtEnd
Lv1-2 , Lh1-2	A	B	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
Xv1-24-3,	A	B	AtPath	AtStart / AtEnd
Xh1-24-3,	A	C	AtPath	AtStart / AtEnd
Xv2-13-4	B	C	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
Th2-1-4, Th1-2:4,	A	B	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
Tv2-1:3, Tv1-2:4,	A	C	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
Tv2-1-4	B	C	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
	A	B	AtPath	AtStart / AtEnd
	A	C	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
Xv2-1:3-4,	A	D	AtPath	AtStart / AtEnd
Xh2-1:3-4	B	C	AtStart / AtEnd	AtPath
	B	D	AtStart / AtEnd	AtStart / AtEnd
	C	D	AtPath	AtStart / AtEnd

verbinden. Die Klasse *IfcVirtualElement* wird eigentlich dazu genutzt, Raumbegrenzungen darzustellen, wenn ein Raum nicht durch ein Bauteil abgegrenzt ist oder auch als Platzhalter für echte Objekte. Virtuelle Elemente könnten mit einer Geometrie versehen werden, welche die Stoßstelle nachbildet.

Abbildung 5.12 zeigt wie eine Stoßstelle nach BODENSCHLÄGEL, 2021 erzeugt werden kann. Die Bauteile der Stoßstelle werden mit dem virtuellen Element verbunden. Zusätzlich wird als Attribut *RealizingElement* kein Bauteil, sondern ein weiteres virtuelles Element erstellt, das den Anschluss repräsentiert und dazu dient ihn zu nummerieren. Diese Nummerierung wird im Eigenschaftensatz *Pset_Uebertragungsweg* im Attribut *Uebertragung* verwendet um die Übertragungswege zu definieren.

Da die Klasse *IfcVirtualElement* eine von *IfcProduct* abgeleitete Klasse ist, kann es eine geometrische Darstellung beinhalten. Daraus ließe sich ohne Semantik durch Schnitttests ermitteln, welche Bauteile in der Stoßstelle liegen.

Allerdings wird in dieser Arbeit eine Lösung angestrebt, die Stoßstellen vor allem als semantische Informationen vorhält und das Modell nicht mit weiteren geometrischen Objekten überlädt. Auch wenn die Lösung nach BODENSCHLÄGEL, 2021 den Vorteil bietet, von Viewern meistens unterstützt zu werden, hat sie den großen Nachteil, dass Klassen anders verwendet werden, als sie definiert sind. Hier ist also für Software, die diese Modelle im Anschluss erhält, ein großes Potenzial Informationen falsch zu interpretieren, wenn sie auf genau diese Klassen zugreifen müssen. Hinzu kommt, dass die Angabe der Übertragungswege nur anhand von Labeln in *PropertySets* stattfindet. Dadurch wird das Auslesen der Informationen sehr verschachtelt und fehleranfällig, da auf Text zugegriffen wird, statt auf einen Verweis auf Bauteile.

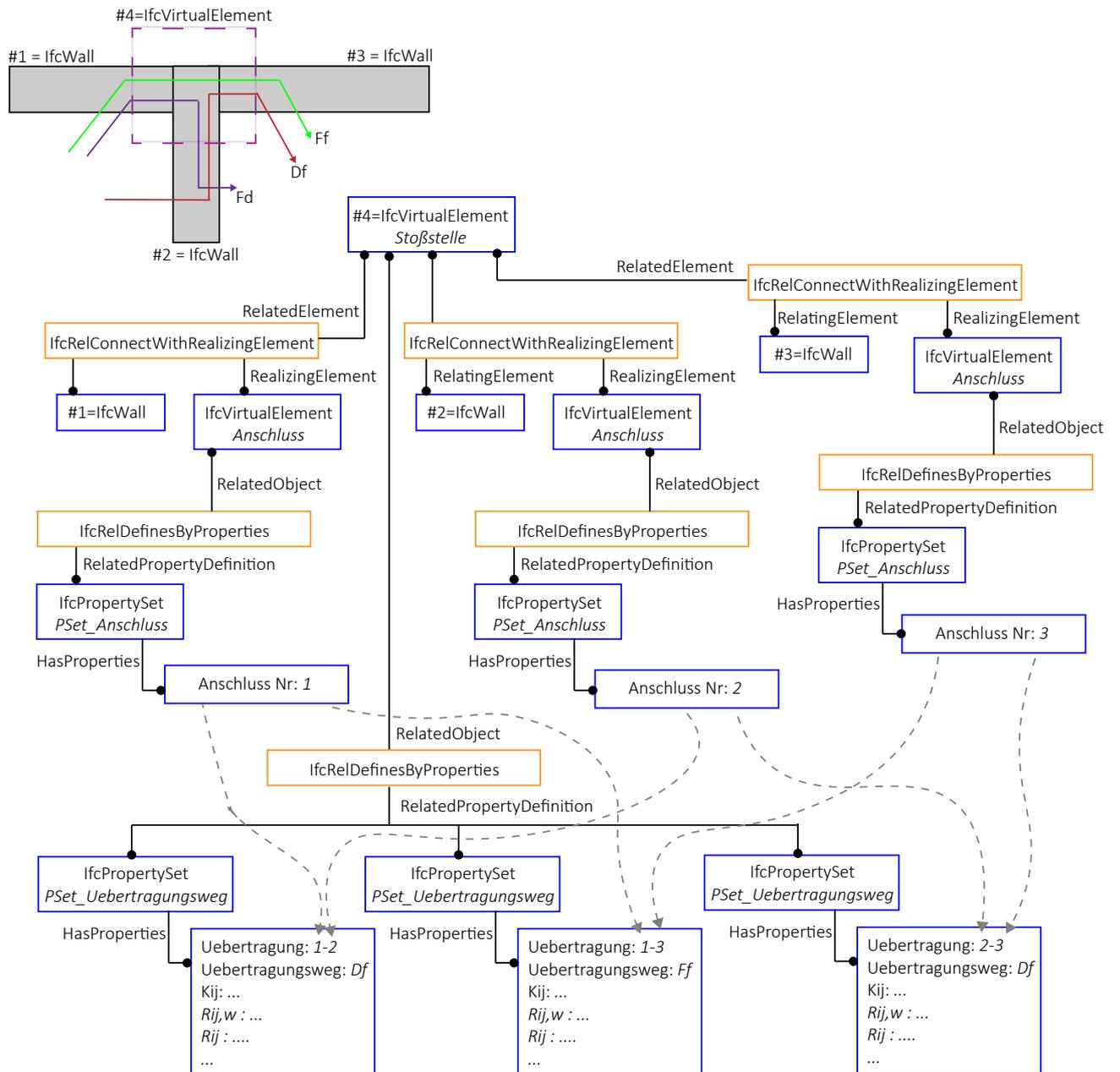


Abbildung 5.12: Abbildung von Stoßstellen durch virtuelle Elemente und der Klasse *IfcRelConnectsWithRealizingElements* sowie *PropertySets* nach (BODENSCHLÄGEL, 2021)

5.3 Model healing

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, prüft und korrigiert *model healing* ein Gebäudemodell, welches die erforderlichen Qualitätsanforderungen für nachfolgende Analysen nicht erfüllt. Dabei werden Fehler und Unstimmigkeiten, die zu Problemen in der weiteren Analyse führen könnten, zuvor aus dem Modell bereinigt. Die für diese Arbeit entwickelten Algorithmen haben nicht das Ziel ein perfektes Modell zu erzeugen, sondern die Modellqualität vor der Stoßstellenanalyse zu optimieren, damit sich die Anzahl der Fehler bei der Analyse selbst minimiert.

Mit einem LOD 300 sollten die meisten Modelle für die Analyse nutzbar sein (siehe Kapitel 5.1). Dabei muss nicht jedes Element diese Genauigkeit besitzen. Fenster sowie Türen sind beispielsweise nur als einfache Geometrie mit semantischer Information ausreichend; Geländer oder Möblierung nicht relevant, da nur die Bauteile des Gebäudemodells betrachtet werden, die für die Schallschutzplanung relevant sind (Wände (*IfcWall*), Decken (*IfcSlab*), Fassaden (*IfcCurtainWall*), Vorsatzschalen (*IfcCovering*)). Das *model healing* betrifft folgende Aspekte:

- Referenzierung von Bauteilen zu Geschossen über die Attribute *ContainedInStructure* und *ReferencedInStructures*,
- Zuordnung von Materialien an Bauteilen über den Bauteiltyp anhand von *IfcMaterialLayerSet*,
- Konvertierung von Bauteilen zu Vorsatzschalen (*IfcCovering*) und
- Zusammenführung kleinteiliger Bauteile mit *IfcRelAggregates*.

Die folgenden Abschnitte erläutern, wie das *model healing* für ein IFC-Datenmodell vor der Analyse für die Schallschutzprognose durchgeführt wird. Die Umsetzung im Prototyp ist im Kapitel 6 beschrieben.

5.3.1 Verweise auf Geschosse

Für alle akustisch relevanten Bauteile (*IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcCurtainWall*) sollte eine Zuordnung in die Geschosshierarchie über das Attribut *ContainedInStructure* zu einer Instanz von *IfcRelContainedInSpatialStructure* vorhanden sein. Zusätzlich sollten Bauteile, die über mehrere Geschosse gehen, auch über mehrere Geschosse referenziert werden (Attribut *ReferencedInStructures*). Diese Zuordnung wird für alle Instanzen von *IfcWall* und *IfcCurtainWall* geprüft. Dazu wird die Position im globalen Koordinatensystem und die Höhe des Bauteils bzw. seiner *bounding box* verwendet. Im Attribut *Elevation* der Geschosse *IfcBuildingStorey* ist deren

Höhe gespeichert. Aus diesen Angaben kann die Position der Bauteile in der Geschossstruktur ermittelt werden.

Da ein Bauteil noch als Teil der Stoßstelle gilt, wenn es näher als 0,5 m an der Stoßstelle ist (DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017), werden Bauteile erst im nächsthöheren Geschoss mit *IfcRelReferencedInSpatialStructure* referenziert, wenn sie mehr als 0,5 m in das nächsthöhere Geschoss reichen (siehe Abbildung 5.13).

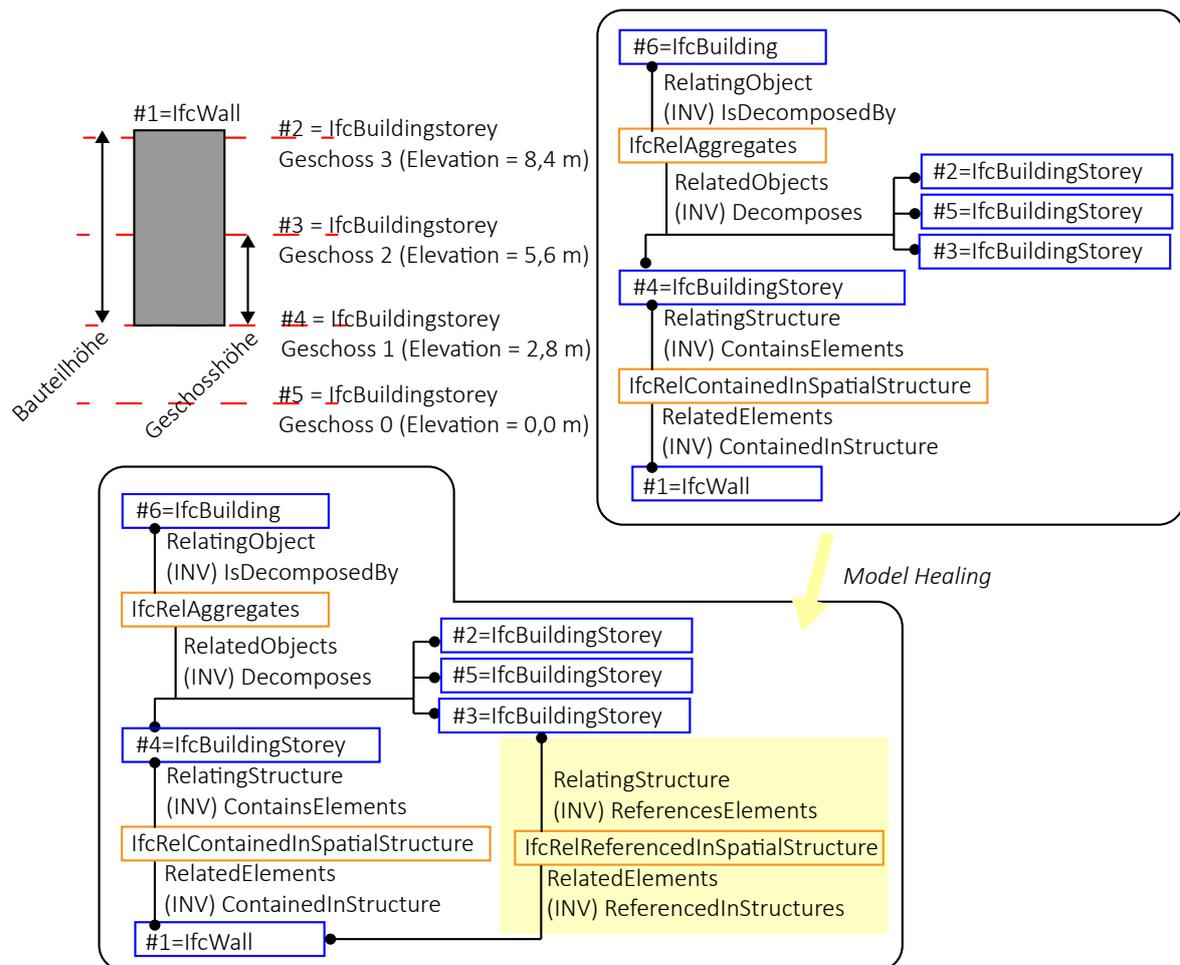


Abbildung 5.13: *Model Healing* zum Einfügen einer Referenz auf ein Geschoss mit *IfcRelReferencedInBuildingStorey*

5.3.2 Material und Bauteiltyp

Die korrekte Materialzuordnung ist wichtig, um einerseits die tragende Schicht zu erkennen, die die Stoßstelle bildet und andererseits um die Schalldämm-Maße und Trittschallpegel der Bauteile aus Datenbanken oder Normen zu ermitteln. Zusätzlich ist die Materialinformation wichtig, um festzulegen, ob das Berechnungsverfahren für schwere oder leichte Bauteile verwendet werden muss. Das grundlegende Konzept der Materialzuordnung wurde bereits

in Kapitel 4.3.1 in Abbildung 4.7 gezeigt. Im Anhang G ist der entwickelte Algorithmus 4 hinterlegt.

Abbildung 5.14 zeigt verschiedene Fälle für das *model healing* zur korrekten Materialzuordnung. Um festzustellen, ob das IFC-Modell die richtige Materialzuordnung inklusive Bauteiltyp enthält, wird zuerst für alle relevanten Bauteile (*IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcCurtainWall*) mit dem Attribut *IsTypedBy* nach dem passenden Bauteiltyp gesucht. Ist kein Bauteiltyp vorhanden, wird das Element vermerkt und es wird nach Materialangaben im Bauteil selbst gesucht. Wenn über das Attribut *HasAssociations* ein Verweis auf *IfcRelAssociatesMaterial* mit einem *RelatingMaterial* als Verweis zu *IfcMaterialLayerSet* oder *IfcMaterialLayerSetUsage* gefunden wird, wird geprüft, ob ein existierender Bauteiltyp mit demselben *IfcMaterialLayerSet* existiert. Wenn ja, wird das Bauteil ebenfalls diesem Bauteiltyp zugeordnet. Ist kein anderer Bauteiltyp mit passendem Materialaufbau im Modell vorhanden, muss sowohl ein neuer Bauteiltyp als auch ein passender Materialaufbau erzeugt und im Modell hinzugefügt werden.

Hat das Bauteil bereits einen Bauteiltyp wird geprüft, ob diesem Bauteiltyp ein *IfcMaterialLayerSet* zugeordnet ist. Ist dies nicht der Fall, wird das zugehörige Bauteil nach Materialangaben durchsucht. Werden auch dort keine Materialdaten gefunden, muss das Modell stark ausgebessert werden. Wird im Bauteil eine Materialzuweisung gefunden, wird diese für den Bauteiltyp übernommen. Das *IfcMaterialLayerSetUsage* bleibt beim Bauteil selbst. Bauteile ohne *IfcMaterialLayerSetUsage* bekommen die Standarddefinition *LayerSetDirection = AXIS3* und *DirectionSense = POSITIVE*.

5.3.3 Fußbodenaufbauten, Unterdecken und Vorsatzschalen

Elemente, die akustisch als Vorsatzschalen betrachtet werden, sollten als *IfcCovering* über eine Aggregation Teil eines Bauteils sein. Erfahrungsgemäß ist dies bei Exporten aus AutoCAD-Software nicht der Fall. Abbildung 5.15 zeigt am Beispiel einer Wand, wie das Modell in diesem Fall angepasst werden muss. Sind bereits Vorsatzschalen als *IfcCovering* instanziiert, wird geprüft, ob sie mit der Klasse *IfcRelAggregates* an ein Bauteil gebunden sind. Wenn nicht, muss die Vorsatzschale über *IfcRelAggregates* einem Bauteil zugeordnet werden. Anschließend müssen die Raumbegrenzungen des Bauteils auf die Vorsatzschale übergehen und Verweise auf das Geschoss, die an der Vorsatzschale verknüpft waren, können entfernt werden. Die Suche nach losen *IfcCovering* wurde automatisiert, allerdings muss für die Verbindung zum Bauteil die entsprechende *Global Unique Identifier* (GUID) des Bauteils manuell ausgegeben werden. Dies könnte durch eine Abfrage paralleler, naher Bauteile ebenfalls noch automatisiert werden.

Ein weiteres Problem sind Bauteile, die eigentlich ein einziges Bauteil darstellen, aber als Einzelteile modelliert sind, ohne dabei in einem übergeordneten Bauteil mit *IfcRelAggregates* zusammengefasst worden zu sein. Für den Prototypen wurden die Modelle auf solche Probleme

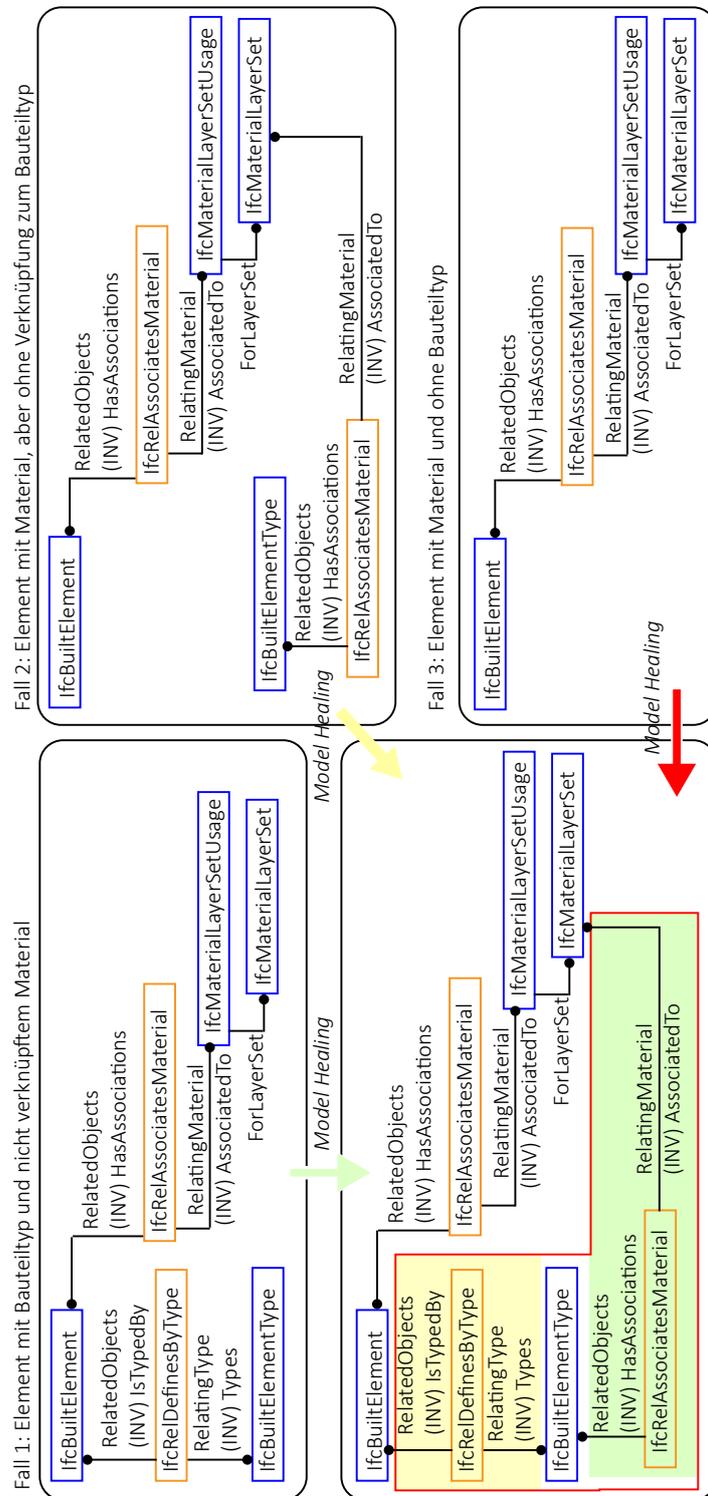


Abbildung 5.14: *Model healing* für Bauteile und ihr Material mit Verknüpfung zu ihrem Bauteiltyp (siehe auch Algorithmus 4 in Anhang G)

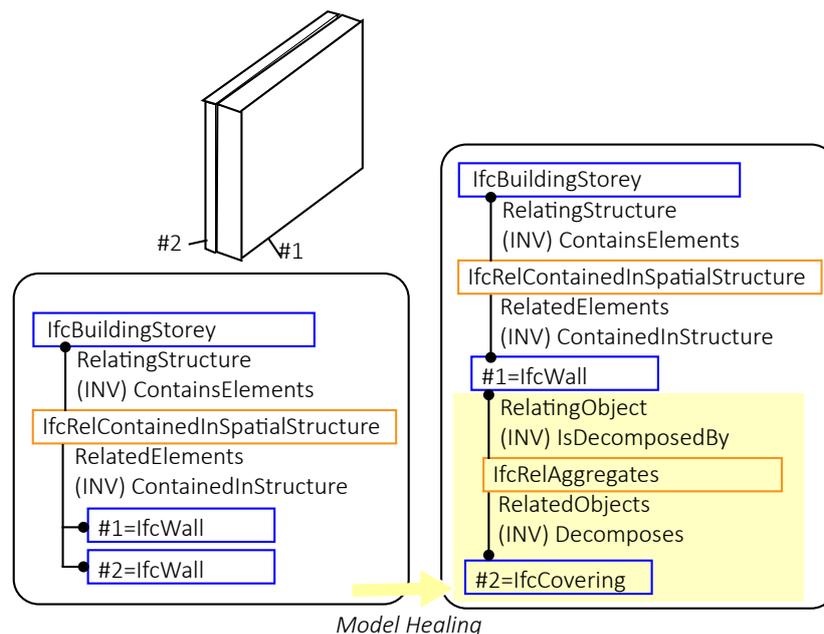


Abbildung 5.15: *Model healing* für Bauteile mit Vorsatzschalen am Beispiel einer Wand (*IfcWall*)

hin manuell geprüft und wenn nötig manuell angepasst. Hier könnte für eine Automatisierung dieselbe Methodik wie im nachfolgenden Abschnitt für kleinteilige Bauteile genutzt werden.

5.3.4 Kleinteilige Bauteile

Wurde ein Modell sehr detailliert erstellt, können Wände und Decken insbesondere im Massivholzbau elementiert dargestellt werden: die Wand oder Decke besteht dann aus vielen Einzelteilen. Abbildung 5.16 zeigt wie ein Wandelement durch Aggregation aus mehreren Einzelteilen zusammengesetzt werden muss. Im *model healing* wurde nur eine manuelle Abfrage eingefügt, die es erlaubt, immer zwei Bauteile miteinander zu verbinden, unabhängig von der Position der Bauteile. Dabei müssen die Verweise auf Geschosse und Bauteiltypen an das neue übergeordnete Bauteil übergeben werden (siehe Abbildung 5.16).

Ein ähnliches Problem mit vorgefertigten Deckenelementen wurde in BELSKY et al., 2015 betrachtet: Als *IfcBeam* exportierte Deckenelemente wurden zu einem größeren *IfcSlab* verbunden (BELSKY et al., 2015). Da diese Methodik funktionsfähig ist, wird sie in dieser Arbeit nicht zusätzlich implementiert. Die Methode von BELSKY et al. könnte auch angepasst werden, um parallele Elemente, wie sie im vorherigen Abschnitt 5.3.3 erwähnt wurden, zu finden und zu korrigieren.

Ein weiteres Problem bilden kleinere, lose Bauteile, die für die Analyse ausgeschlossen werden müssen. Dieses Problem sollte jedoch nur bei Modellen mit einem Detaillierungsgrad größer als LOD 350 auftreten. Abbildung 5.17 zeigt ein Beispiel, bei dem es zu Problemen kommen

kann. Hier wurden die Randrippen oberhalb der Massivholzwände durch gekürzte Wände modelliert und erscheinen in der IFC-Datei als *IfcWallStandardCase*. Allerdings bilden sie einen Teil der unteren Wand und müssten daher mit dieser Wand zusammengefügt werden.

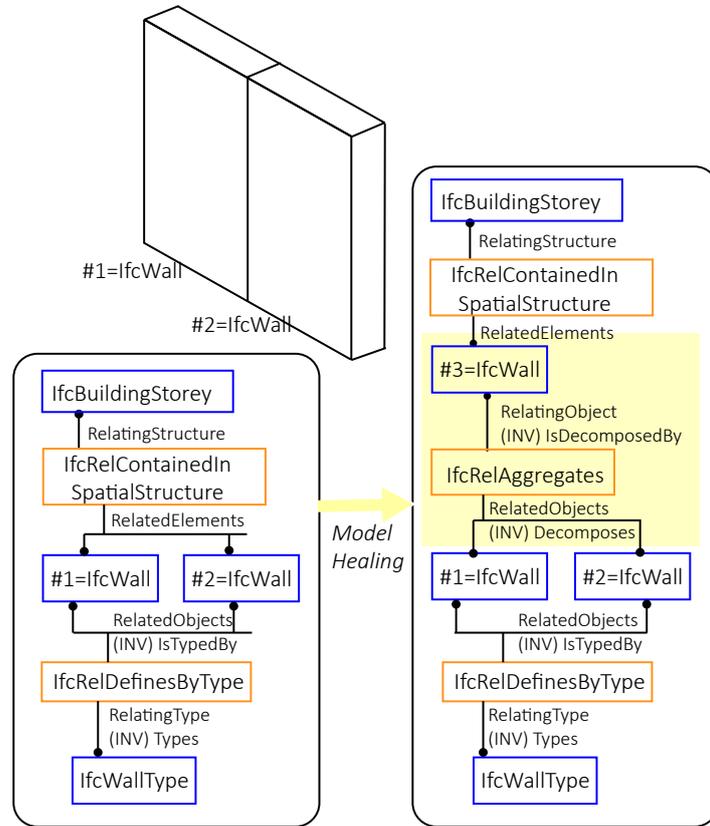


Abbildung 5.16: Zusammenführen von Bauteilen am Beispiel von zwei Wandelementen

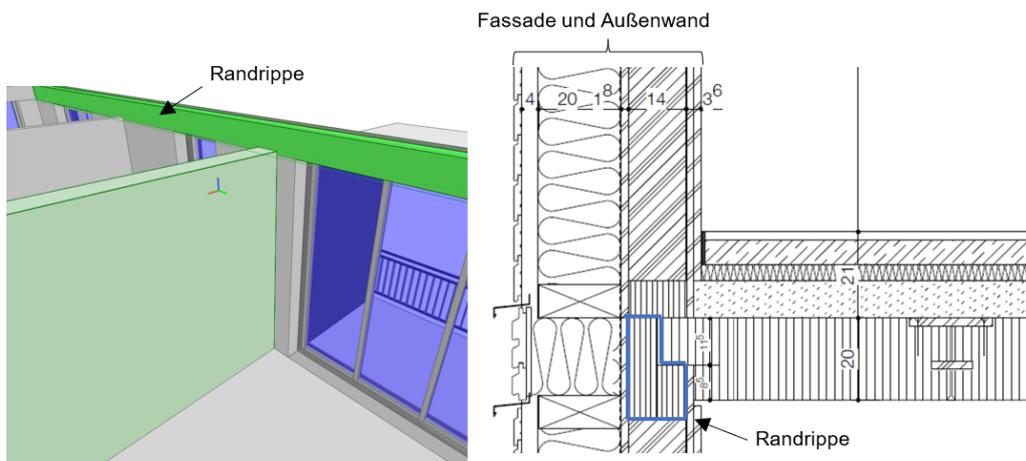


Abbildung 5.17: Einzelteile einer Wand mit *IfcRelAggregates* zusammengefügt: links Darstellung im IFC-Modell, rechts Ausschnitt aus Detailzeichnung (HESSINGER & RABOLD, 2010)

5.4 Stoßstellenanalyse

In diesem Kapitel soll es um den Kern der entwickelten Methodik gehen. Die zentrale Frage ist, ob aus einem IFC-Modell Stoßstellen für die Prognoseberechnung der Schalldämmung von Bauteilen am Bau ermittelt werden können. Dazu ist es notwendig, zwischen dem trennenden Bauteil und den flankierenden Bauteilen zu unterscheiden, die sich an gemeinsamen Stoßstellen treffen.

Die Prognose des Schallschutzes wird für diese Arbeit nur innerhalb des Gebäudes betrachtet. Das Schalldämm-Maß oder der Trittschallpegel werden also zwischen zwei Räumen ermittelt, einem Sende- und einem Empfangsraum. Das dazwischen liegende Bauteil wird als Trennelement bezeichnet. Alle Elemente, die mit diesem Element an den Stoßstellen zu beiden Räumen zusammentreffen, werden als flankierende Elemente bezeichnet. Eine Stoßstelle entsteht, wenn mindestens zwei Bauteile aufeinandertreffen.

Bei einem Standardfall mit rechteckigem Trennelement entstehen vier Stoßstellen, bei denen die flankierenden Bauteile bestimmt werden müssen. Anschließend kann über die geometrische Position ausgelesen werden, welcher akustisch relevante Stoßstellentyp gegeben ist.

5.4.1 Auswahl des trennenden Bauteils

Das trennende Bauteil kann eine Wand oder eine Decke sein, die bauakustisch untersucht werden soll. Da diese Arbeit den Fokus auf die Schallübertragung innerhalb des Gebäudes legt, werden keine Außenbauteile als trennende Elemente akzeptiert. Hierfür wird die Eigenschaft des Bauteils *IsExternal* auf *false* geprüft. Nur dann ist eine weitere Suche flankierender Elemente und eine Stoßstellenanalyse sinnvoll.

Es gibt zwei Möglichkeiten, ein Trennelement zu definieren. Einerseits kann eine direkte Auswahl des Elements über seine im Modell angegebene GUID erfolgen, andererseits kann auch eine Raumsituation aus Sende- und Empfangsraum angegeben werden. Dann wird anhand der Raumbegrenzungen das gemeinsame Element als trennendes Bauteil ermittelt, wobei bei durchgehenden flankierenden Elementen eine Auswahl an Bauteilen vorgeschlagen wird.

5.4.2 Suche nach flankierenden Bauteilen

Flankierende Bauteile treffen an den Stoßstellen auf das trennende Bauteil. Als Bauteile werden Wände, Vorsatzschalen oder Fassaden betrachtet, die flächig sind und einen Raumabschluss bilden. Eine einzelne Säule oder ein Balken kann zwar Schall übertragen, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht als flankierendes Bauteil definiert.

Ebenso muss ein flankierendes Bauteil das trennende Bauteil nicht direkt berühren (siehe Abbildung 5.19). Dies kann aufgrund detaillierter Modellierung entstehen, wenn z. B. Bauteilanschlüsse mit Dichtungsbändern ausgeführt werden (siehe Abbildung 5.18). Zusätzlich gilt ein Element auch als flankierendes Element, wenn es gegenüber dem trennenden Element steht, jedoch ein Bauteil dazwischen liegt (siehe Abbildung 5.19, Fall a). Dies ist bei Stoßstellen mit drei oder vier Bauteilen der Fall.

Auch aufgrund fehlerhafter Modellierung oder beim Export des IFC-Modells können Bauteilkoordinaten ungenau werden, wenn Werte bis auf das 1'000'000stel oder noch feiner aufgetragen werden. Daher ist ein topologisches Prädikat *touch*, wie es in der Literatur beispielsweise bei NGUYEN und OLOUFA, 2002 und BORRMANN und RANK, 2009b verwendet wird nicht zuverlässig anwendbar. Zudem erfordert diese Art der topologischen Analyse aufwendige Methoden z. B. über Bäume, bei denen alle Bauteile im Modell zuerst aufbereitet werden müssen (BORRMANN & RANK, 2009a; EHMANN & LIN, 2001).

Für diese Arbeit wird das flankierende Element als solches erkannt, wenn es mit einem Abstand maximal 0,5 m neben dem Trennbauteil liegt. Die Suche nach flankierenden Bauteilen erfolgt in zwei Schritten. Der erste Teil der Suche erfolgt durch semantische Abfragen der Bauteile und erst im zweiten Schritt wird aus der dort ermittelten Teilmenge an Objekten eine geometrische Abfrage durchgeführt. So reduziert sich die Anzahl möglicher flankierender Bauteile im Modell nach jedem Schritt. Dies unterscheidet diese Arbeit wesentlich von bisherigen Veröffentlichungen in denen vor allem geometrische Analysen ohne Berücksichtigung der Semantik durchgeführt wurden.

Semantische Filterung

Die semantische Filterung des Modells erfolgt zuerst auf Bauteilebene. Als flankierende Bauteile kommen nur Wände (*IfcWall*) und Decken (*IfcSlab*) sowie Fassaden (*IfcCurtainWall*) in Frage. Da Vorsatzschalen als *IfcCovering* über eine Aggregation mit den Grundbauteilen verbunden sind, müssen sie nicht explizit mit ausgelesen werden.

Im zweiten Schritt werden semantische Verbindungen der Klasse *IfcRelConnectsElements* (und ihre abgeleiteten Klassen) zwischen dem Trennelement und anderen Bauteilen gesucht. Dabei muss sowohl das Attribut *ConnectionFrom* als auch das Attribut *ConnectionTo* abgefragt werden.

Deutlich zuverlässiger als die Klasse *IfcRelConnectsElements* ist die räumliche Hierarchie hinterlegt. D. h. es kann zum Beispiel nach Geschossen (*IfcBuildingStorey*) oder angrenzenden Räumen (*IfcRelSpaceBoundary*) gefiltert werden. Die Filterung von Elementen ist vom Bauteiltyp abhängig. Bei einer Wand als Trennelement müssen alle Elemente betrachtet werden, die im selben Geschoss und im Geschoss darüber liegen, sowie Decken, die im Geschoss

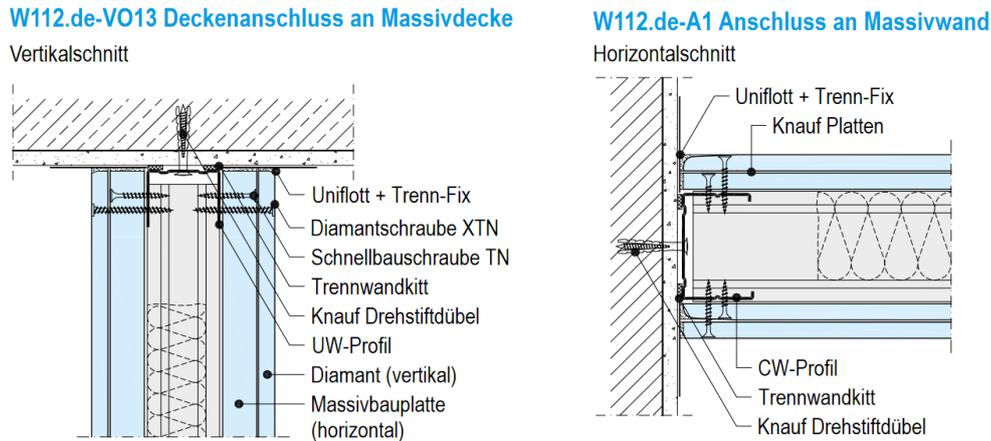


Abbildung 5.18: Trennwandanschlüsse ohne Berührung der Bauteile aus (KNAUF GIPS KG, 2020)

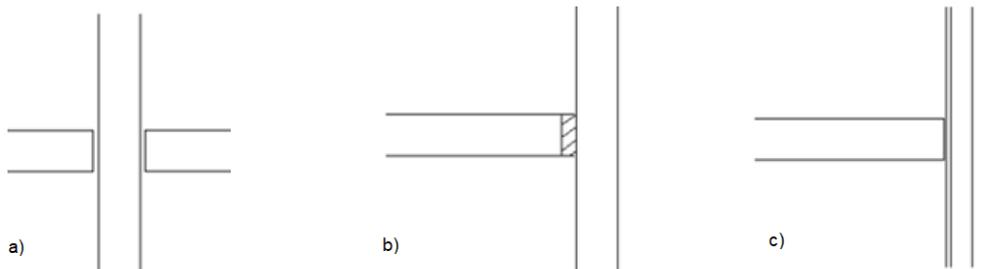


Abbildung 5.19: Flankierendes Element mit einem Abstand von $d < 0,5$ m zum Trennelement durch a) Zwischenelemente, b) elastische Zwischenschichten wie in Abbildung 5.18 oder c) Elemente mit Vorsatzschalen

darunter liegen. Ist das Trennelement dagegen eine Decke müssen alle Elemente im selben Geschoss betrachtet werden, sowie Wände im Geschosse darunter. Abbildung 5.20 zeigt ein Beispiel für eine Wand als Trennbauteil. Bei dieser Filterung darf nicht nur die direkte Verbindung zum Geschoss mit *IfcRelContainedInSpatialStructure* berücksichtigt werden, sondern die Referenzierung mit *IfcRelReferencedInSpatialStructure* zu den jeweiligen Geschossen.

Zuletzt kann auch anhand von Raumbegrenzungen (*IfcRelSpaceBoundary*) nach flankierenden Elementen gesucht werden. Hier wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Der erste Fall tritt ein, wenn die Bauteile dieselben Abmessungen wie die Räume selbst haben (Abbildung 5.21). Dann existieren genau zwei *IfcRelSpaceBoundary* für das Trennelement und alle Bauteile, die an dem Send- und Empfangsraum angrenzen, können als mögliche Flanken identifiziert werden. Durch die Abfrage nach dem Abstand zum Trennbauteil im Nachgang werden Bauteile, die keine echten flankierenden Elemente sind, noch entfernt.

Der zweite Fall betrifft Bauteile, die größer sind als die Raumabmessungen, sodass die gemeinsame Trennfläche beider Räume kleiner ist als die Fläche des Trennbauteils (Abbildung 5.22).

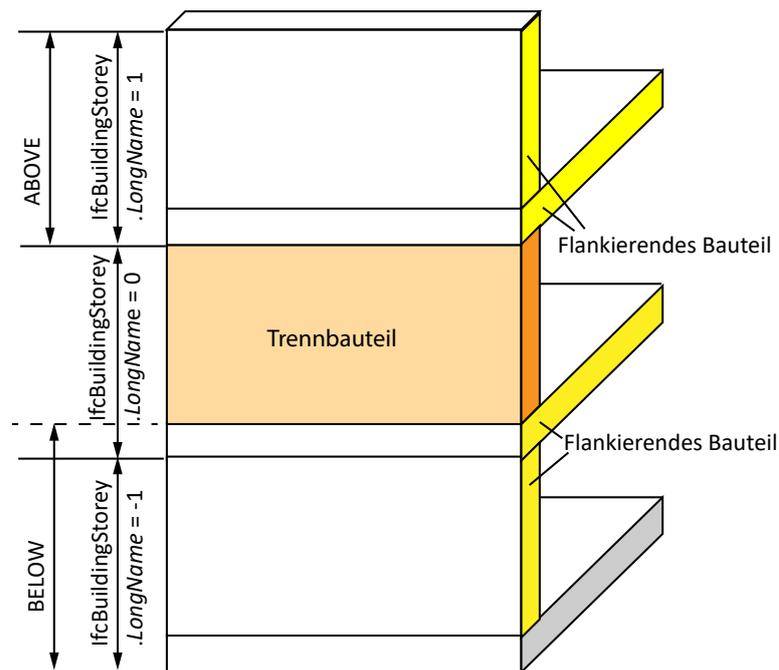


Abbildung 5.20: Vorfilterung der flankierenden Bauteile nach Stockwerken am Beispiel einer Wand als Trennbauteil. *ABOVE*: Wände und Decken aus dem Geschoss darüber, *BELOW*: Decken aus demselben Geschoss und Wände aus dem Geschoss darunter.

Dann ist das Trennelement größer als die gemeinsame Trennfläche zwischen beiden Räumen, d. h. es existieren auch mehr als zwei *IfcRelSpaceBoundary* für das Trennelement. Hier kann anhand der *ConnectionGeometry* die Trennfläche ausgelesen werden, wenn sie hinterlegt ist. Wurde das Modell bereits für andere Analysen so aufgearbeitet, dass die *2nd Level Space Boundaries* vorhanden sind, kann auch direkt auf diese zugegriffen werden. Dann sind die vom Typ A hinterlegten Raumbegrenzungen relevant (siehe Kapitel 4.3.3, Abbildung 4.11). Ist im Modell *IfcRelSpaceBoundary2ndLevel* hinterlegt, verweist das Attribut *Corresponding-Boundary* bzw. sein inverses Attribut *Corresponds* auf die Raumbegrenzung im gewünschten Raum.

Allerdings hat die Methode der Raumbegrenzungen, unabhängig davon ob *1st Level* oder *2nd Level*, einen erheblichen Nachteil, sobald X-Stöße auftreten: hier wird immer das dem Trennbauteil im Stoß gegenüberliegende Bauteil mit dieser einfachen Abfrage nicht gefunden. Sollte nur dieser Filter verwendet werden, kann näherungsweise nur mit T-Stößen gearbeitet werden.

Durch die Kombination verschiedener semantischer Vorfilterungen entsteht eine Liste möglicher flankierender Bauteile. Mit diesem reduzierten Satz an möglichen flankierenden Bauteilen kann die geometrische Analyse die echten flankierenden Elemente identifizieren.

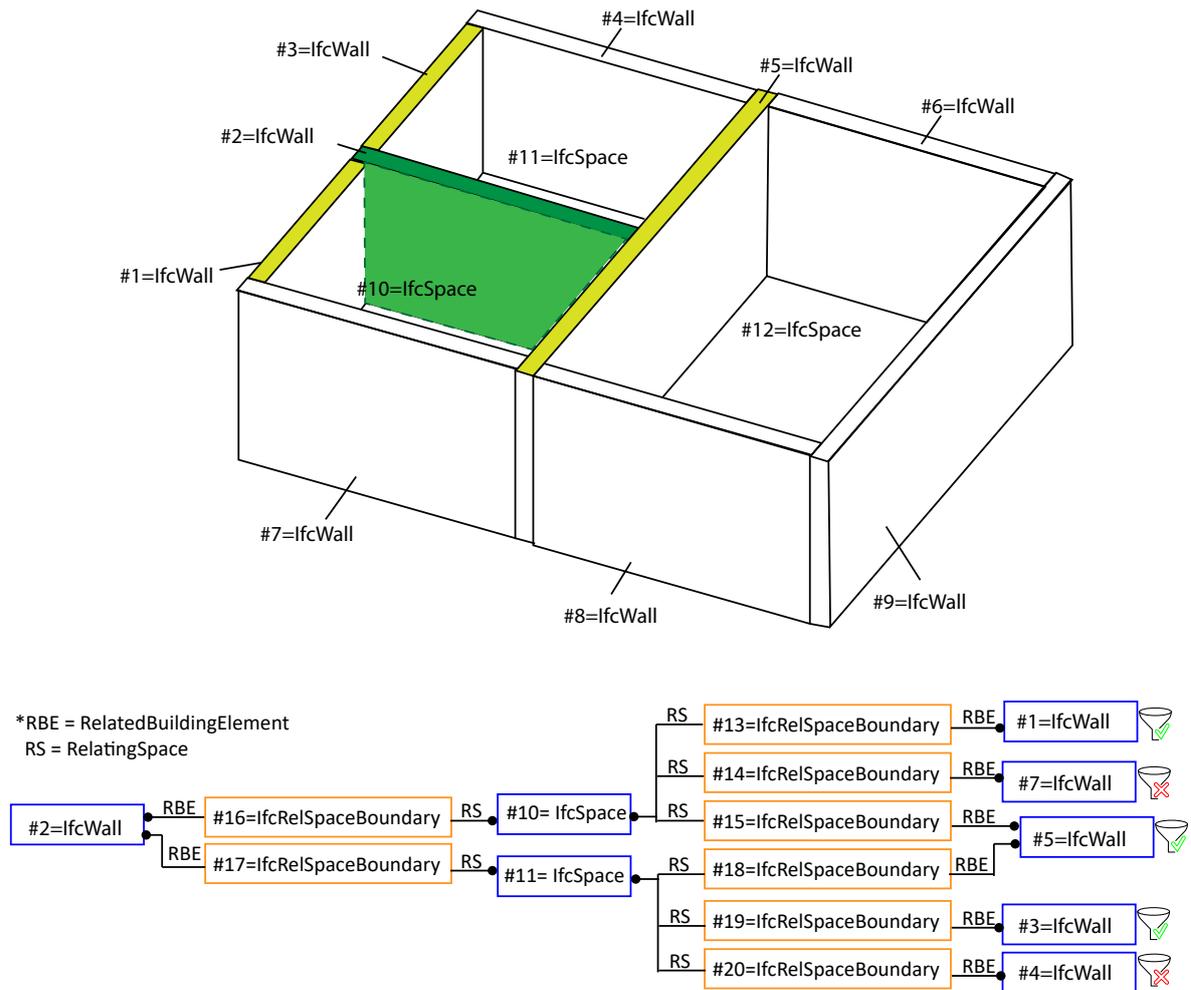


Abbildung 5.21: Trennbauteil ($\#2=IfcWall$) mit seinen zugehörigen *1st Level Space Boundaries* und daraus ermittelten möglichen flankierenden Bauteilen ($\#1=IfcWall$, $\#3=IfcWall$, $\#5=IfcWall$)

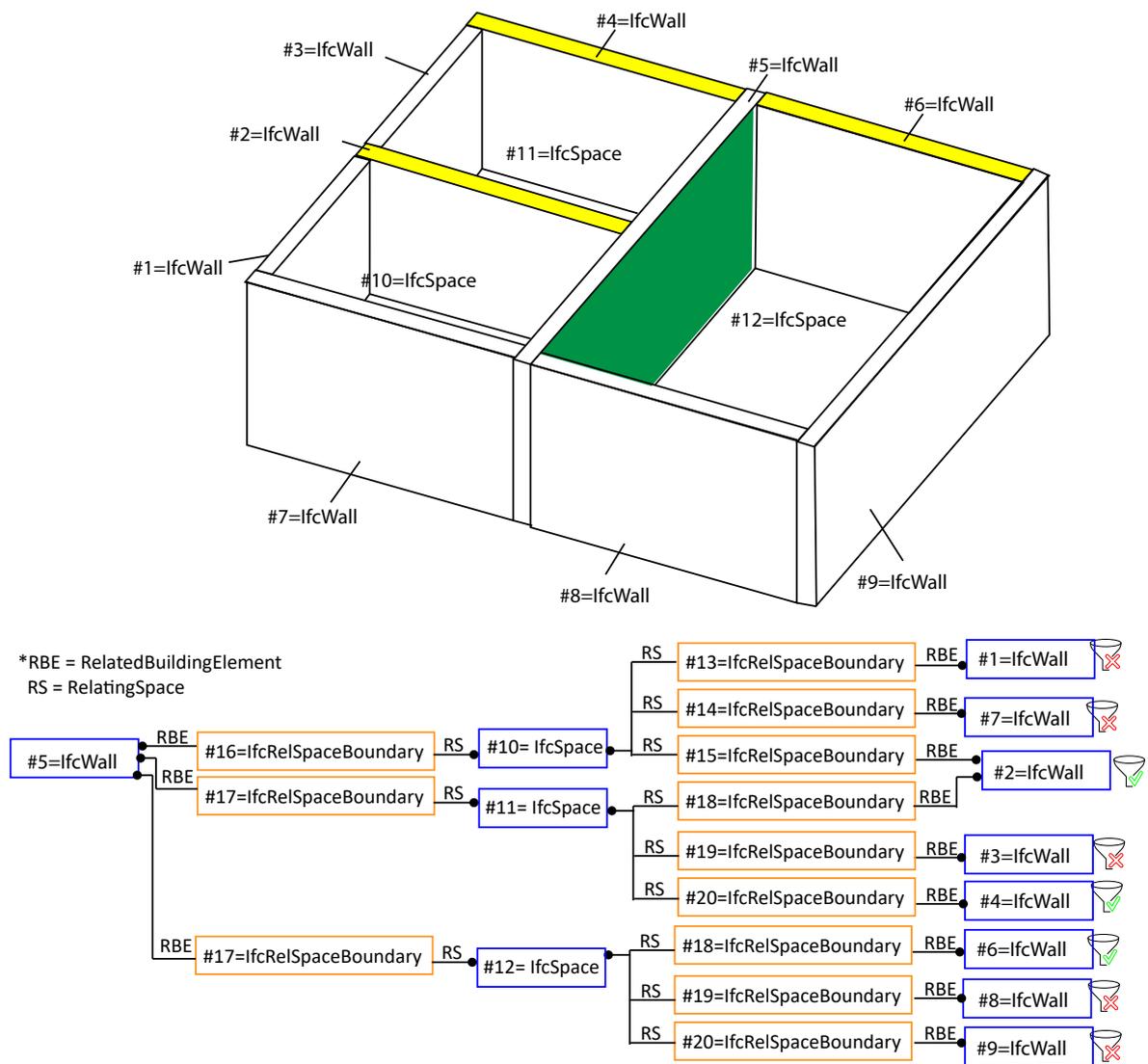


Abbildung 5.22: Trennbauteil (#5=IfcWall) mit seinen zugehörigen 1st Level Space Boundaries und daraus ermittelten möglichen flankierenden Bauteilen (#2=IfcWall, #4=IfcWall, #6=IfcWall)

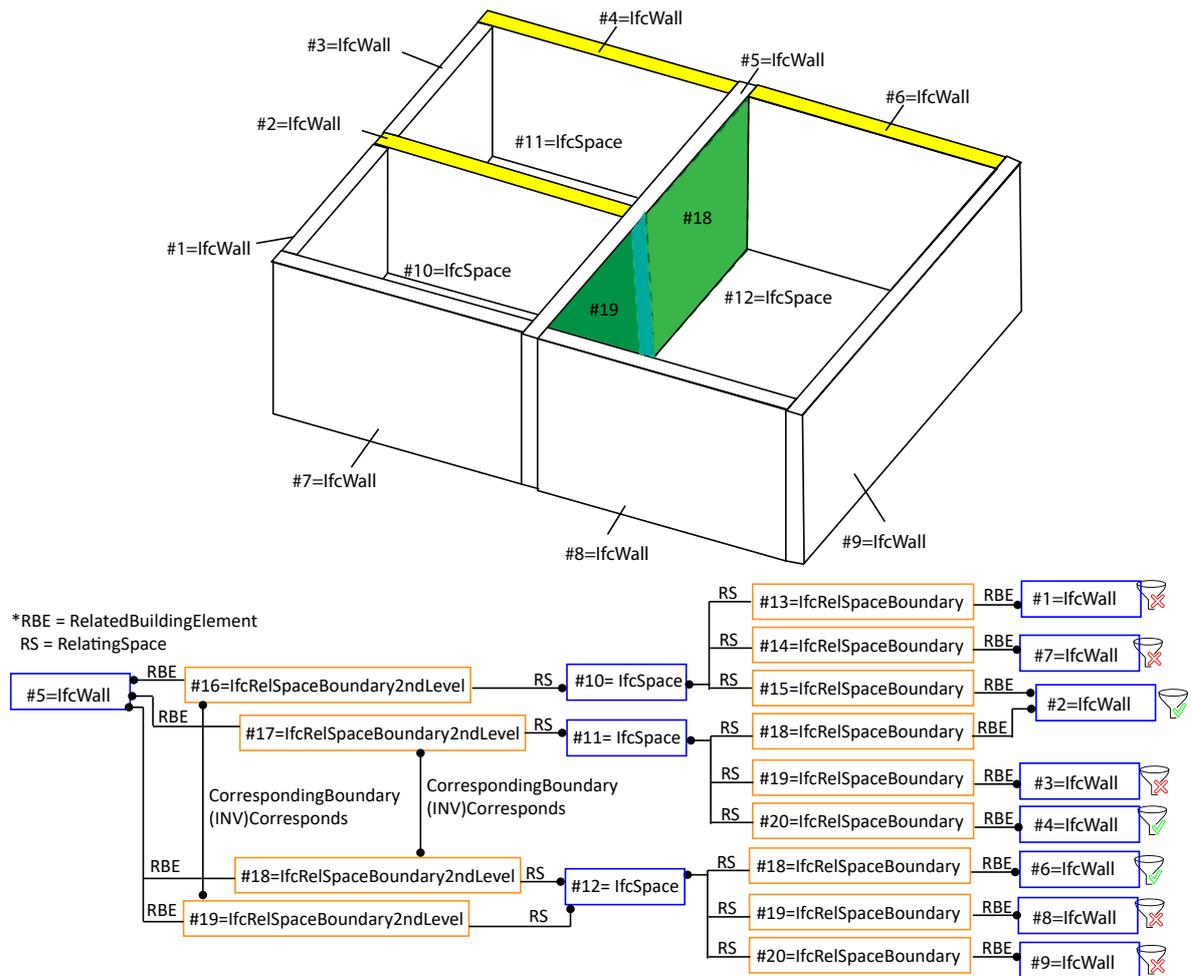


Abbildung 5.23: Trennbauteil (#5=IfcWall) mit seinen zugehörigen 2nd Level Space Boundaries und daraus ermittelten möglichen flankierenden Bauteilen (#2=IfcWall, #4=IfcWall, #6=IfcWall)

Geometrische Filterung

Die geometrische Filterung nutzt die Liste möglicher flankierender Bauteile aus der semantischen Filterung. Es werden mehrere Bauteileinformationen ausgelesen: die Geometrie des Bauteils angegeben durch die Punkte für Minimum und Maximum, die daraus ermittelte Dicke d des Bauteils, sowie seine Richtung \vec{n} (siehe Abbildung 5.24). Aus diesen Angaben wird der Abstand D (*distance*) zum Trennelement ermittelt und die Richtung \vec{DD} in der das Bauteil liegt (*distance direction*). Wie Abbildung 5.25 zeigt, ergeben sich die Richtungen aus dem Koordinatensystem: X_{plus} , X_{minus} , Y_{plus} , Y_{minus} , Z_{plus} , Z_{minus} . Liegt ein Bauteil über Eck, hat es automatisch keine gemeinsame Fläche mit dem Trennelement und ist somit kein gültiges flankierendes Bauteil.

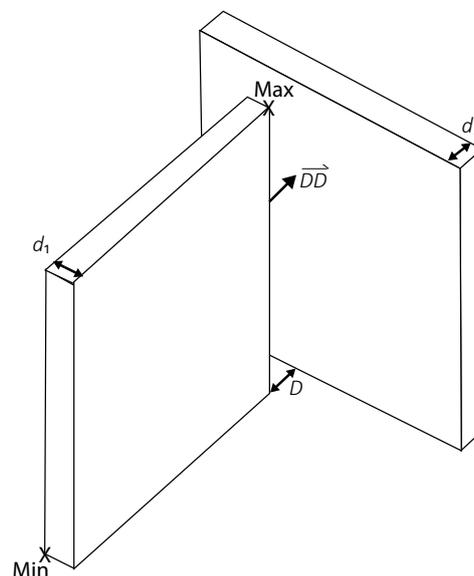


Abbildung 5.24: Geometrische Kenngrößen für die Stoßstellenanalyse: Abmessung des Bauteils (Min, Max), Dicke der Bauteile d_1 und d_2 , Richtung des Bauteils \vec{n} , Richtung von Bauteilen zueinander \vec{DD} , Abstand von zwei Bauteilen D

Da für die Schallschutzberechnung nach DIN EN ISO 12354 nur rechteckige Bauteile behandelt werden, die mit 90° aufeinandertreffen, wird die der Geometrie vereinfacht betrachtet: von jedem Bauteil wird eine *bounding box* erstellt und alle Abfragen werden anhand des Minimums und Maximums dieser *bounding box* durchgeführt. Türen- und Fensteröffnungen werden ignoriert, da sie für die schalltechnische Analyse der Stoßstellen nicht relevant sind.

Bei Bauteilen mit einer Aggregation wird eine übergreifende *bounding box* erstellt, die das gesamte Bauteil beschreibt: Minimum und Maximum werden aus allen Bauteilen, aus denen die Aggregation besteht, gebildet. Alternativ wird die *bounding box* nur mit dem Kernelement gebildet und die Schichten der Vorsatzschalen werden aus dieser Betrachtung ausgenommen (siehe Kapitel 5.4.3).

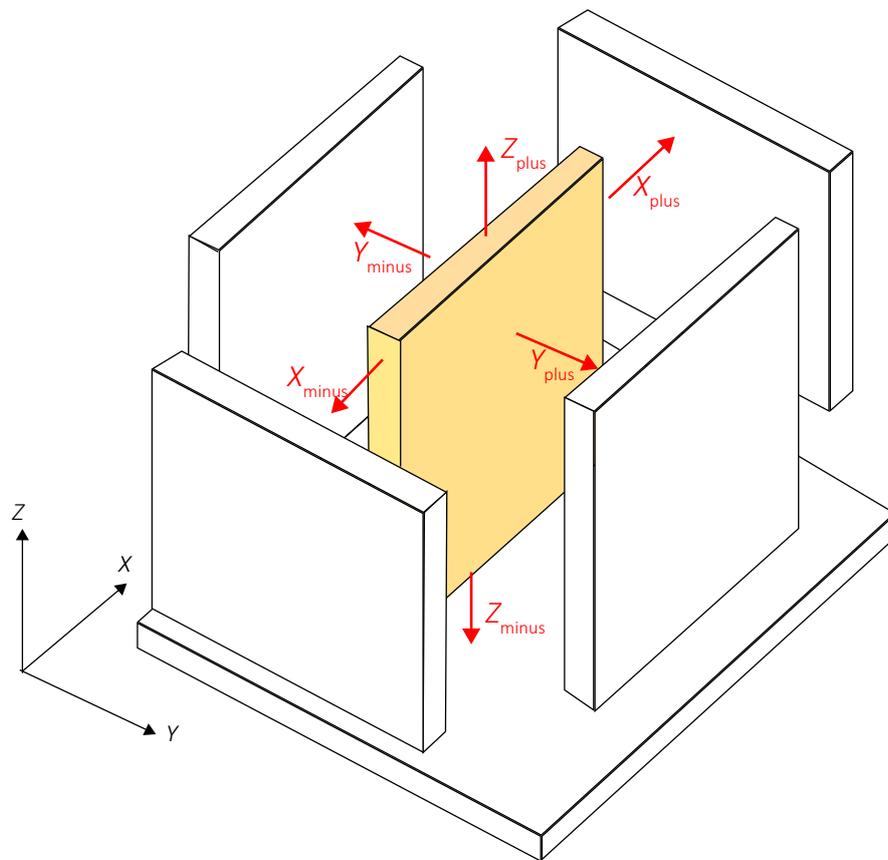


Abbildung 5.25: Definition der Abstandsrichtungen in einem dreidimensionalen Raum (*distance direction*)

Die Richtung des Bauteils hängt von der Richtung der größten Fläche ab. Bei einem Quader sind es sechs Flächen, von denen jeweils zwei parallel zueinander sind. Die Richtung des Bauteils \vec{n} ergibt sich aus den Punkten Minimum $P_{\min}(X_{\min}/Y_{\min}/Z_{\min})$ und Maximum $P_{\max}(X_{\max}/Y_{\max}/Z_{\max})$ der *bounding box*. Das Minimum P_{\min} und Maximum P_{\max} für ein Element A wird bestimmt über

$$\begin{aligned}
 P_{\min} &= (\text{Min}(P_1.X, P_2.X, P_3.X, P_4.X, P_5.X, P_6.X)/ \\
 &\quad \text{Min}(P_1.Y, P_2.Y, P_3.Y, P_4.Y, P_5.Y, P_6.Y)/ \\
 &\quad \text{Min}(P_1.Z, P_2.Z, P_3.Z, P_4.Z, P_5.Z, P_6.Z)) \\
 P_{\max} &= (\text{Max}(P_1.X, P_2.X, P_3.X, P_4.X, P_5.X, P_6.X)/ \\
 &\quad \text{Max}(P_1.Y, P_2.Y, P_3.Y, P_4.Y, P_5.Y, P_6.Y)/ \\
 &\quad \text{Max}(P_1.Z, P_2.Z, P_3.Z, P_4.Z, P_5.Z, P_6.Z))
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

mit der Fläche A des Bauteils aus:

$$\begin{aligned}
 A1 &= (X_{\max} - X_{\min}) \cdot (Z_{\max} - Z_{\min}), \\
 A2 &= (X_{\max} - X_{\min}) \cdot (Y_{\max} - Y_{\min}) \text{ und} \\
 A3 &= (Z_{\max} - Z_{\min}) \cdot (Y_{\max} - Y_{\min}) \text{ zu} \\
 A &= \text{Max}(A1, A2, A3).
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Die Richtung \vec{n} ergibt sich aus dem Kreuzprodukt der Vektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 , wobei die \vec{v}_1 und \vec{v}_2 von der gewählten Fläche A abhängig sind (siehe Abbildung 5.26, 5.27 und 5.28).

für $A = A1$:

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_1 &= \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\min} \\ Y_{\min} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\min} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 \vec{v}_2 &= \begin{pmatrix} X_{\min} - X_{\min} \\ Y_{\min} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{\max} - Z_{\min} \end{pmatrix} \\
 \vec{n} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

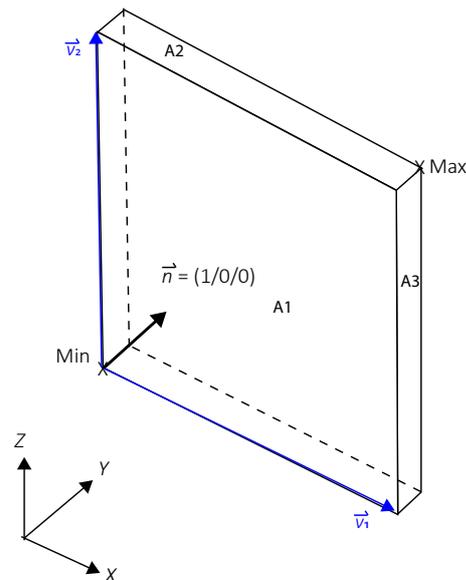


Abbildung 5.26: Definition der Bauteilrichtung für ein Bauteil mit größter Fläche $A = A1 = (X_{\max} - X_{\min}) \cdot (Z_{\max} - Z_{\min})$

für $A = A2$:

$$\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\min} \\ Y_{\min} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\min} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_2 = \begin{pmatrix} X_{\min} - X_{\min} \\ Y_{\max} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_{\max} - Y_{\min} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{o} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

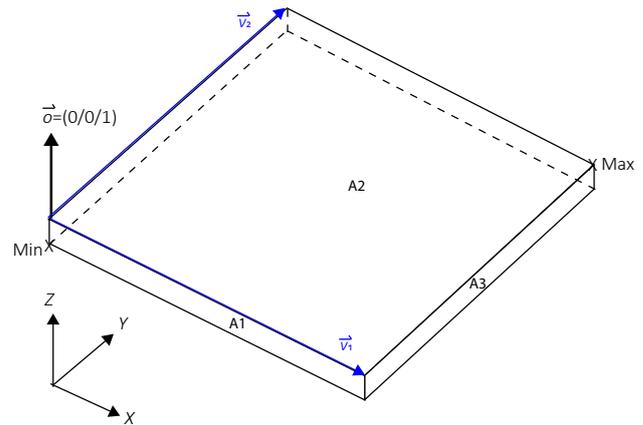


Abbildung 5.27: Definition der Bauteilrichtung für ein Bauteil mit größter Fläche $A = A2 = (X_{\max} - X_{\min}) \cdot (Y_{\max} - Y_{\min})$

für $A = A3$:

$$\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\max} \\ Y_{\max} - Y_{\min} \\ Z_{\min} - Z_{\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_{\max} - Y_{\min} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_2 = \begin{pmatrix} X_{\max} - X_{\max} \\ Y_{\min} - Y_{\min} \\ Z_{\max} - Z_{\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{\max} - Z_{\min} \end{pmatrix}$$

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

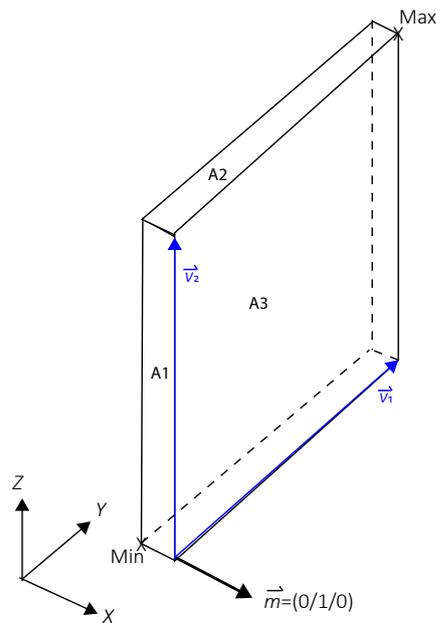


Abbildung 5.28: Definition der Bauteilrichtung für ein Bauteil mit größter Fläche $A = A3 = (Z_{\max} - Z_{\min}) \cdot (Y_{\max} - Y_{\min})$

Der korrekte Abstand zwischen den Elementen A und B mit den Punkten Minimum $(X_{A,\min}/Y_{A,\min}/Z_{A,\min})$, $(X_{B,\min}/Y_{B,\min}/Z_{B,\min})$ und Maximum $(X_{A,\max}/Y_{A,\max}/Z_{A,\max})$, $(X_{B,\max}/Y_{B,\max}/Z_{B,\max})$ wird bestimmt aus

$$d(A, B) = \text{Min}((X_{A,\min} - X_{B,\max}), (X_{B,\min} - X_{A,\max}), (Y_{A,\min} - Y_{B,\max}), (Y_{B,\min} - Y_{A,\max}), (Z_{A,\min} - Z_{B,\max}), (Z_{B,\min} - Z_{A,\max})) \quad (5.3)$$

Statt des topologischen Prädikats *touch* wird der Term *close to* wie folgt definiert: Für zwei Elemente A und B muss der Abstand $d(A, B) < 0,5$ m sein, damit Element B das flankierende Element zu Trennelement A ist. Dieser Abstand ist notwendig, um ungenaue Modellierungen sowie konstruktiv notwendige Abstände zu integrieren, wie bereits zuvor in Abschnitt 5.4.2, Abbildung 5.19 beschrieben wurde.

Beim Abstand der Bauteile zueinander wird immer auch die Richtung der Bauteile zueinander bestimmt. Die Abbildungen 5.29, 5.30 und 5.31 zeigen schematisch, wie die Berechnungen durchgeführt werden. Die dazugehörigen Algorithmen sind im Anhang G aufgeführt.

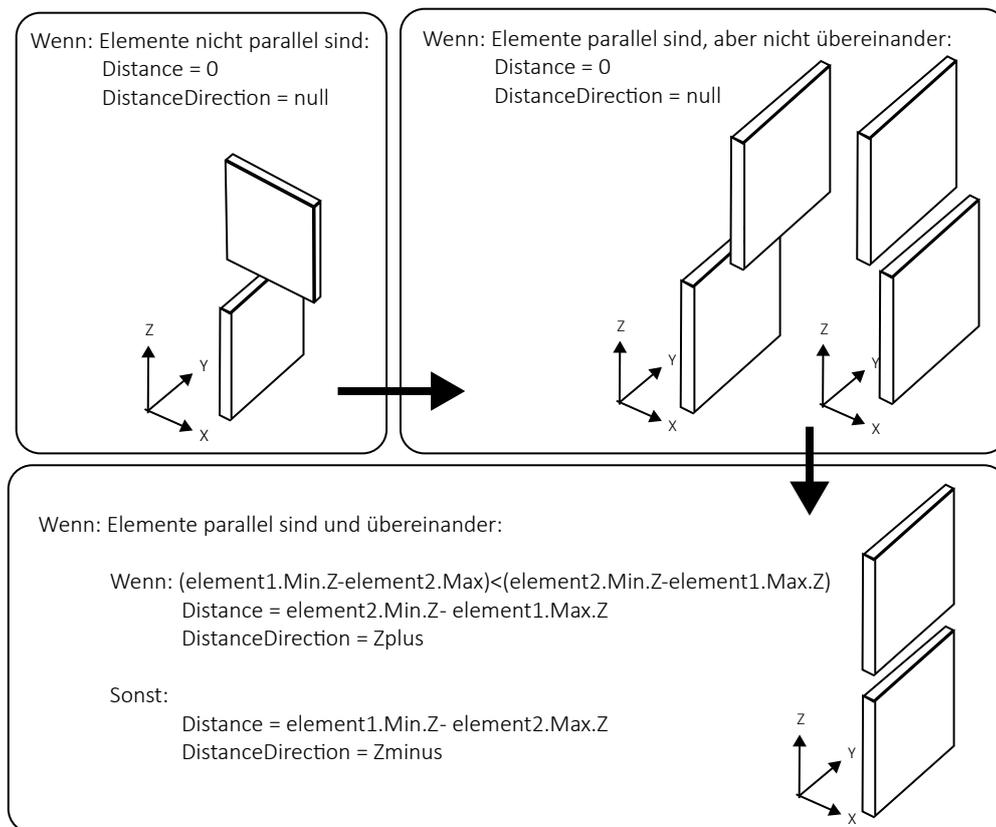


Abbildung 5.29: Schema des Algorithmus zur Abstandsberechnung zwischen zwei übereinander liegenden Bauteilen (siehe Algorithmus 5 in Anhang G)

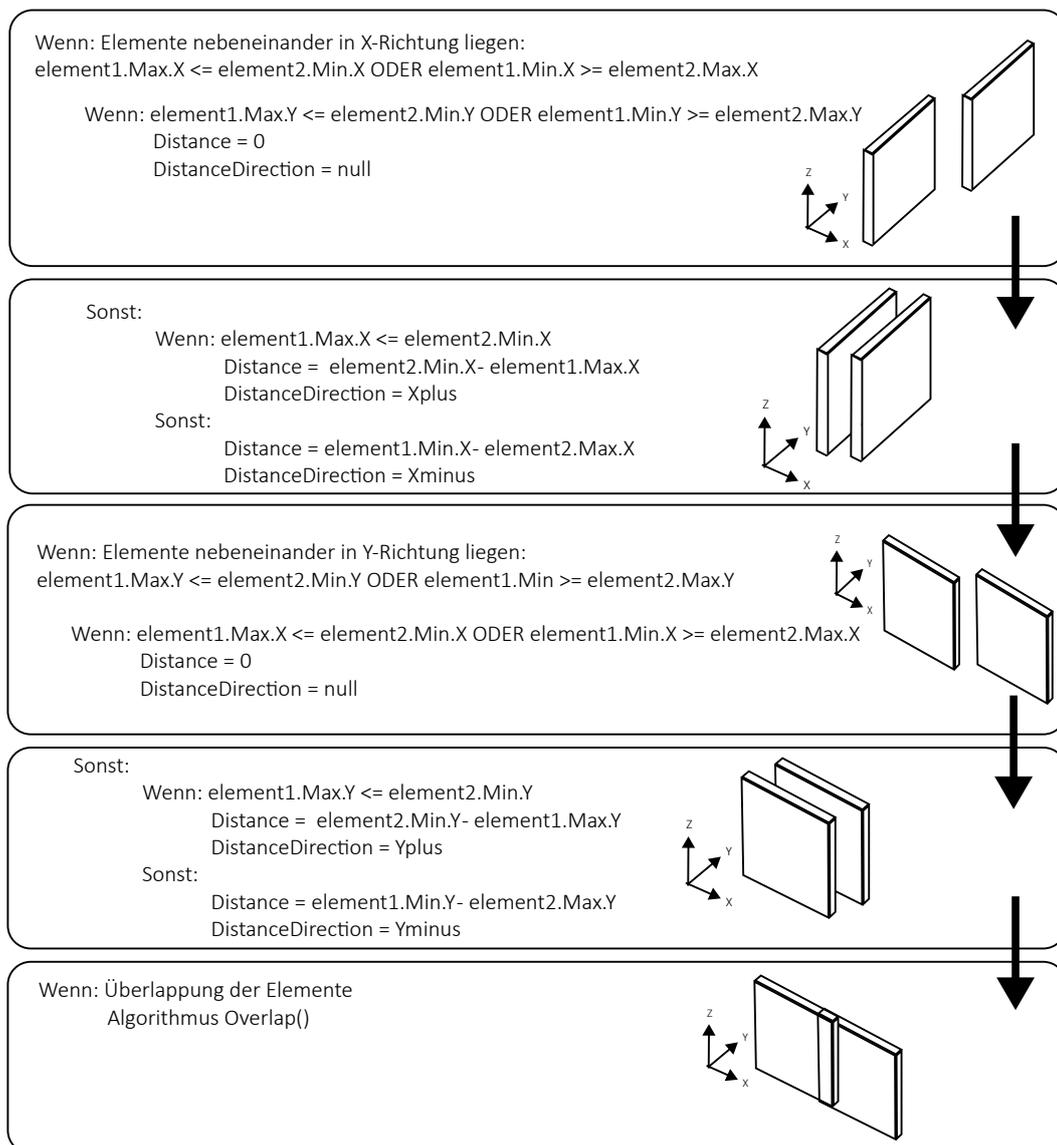


Abbildung 5.30: Schema des Algorithmus zur Abstandsberechnung zwischen zwei Bauteilen, die auf selber Höhe liegen (siehe Algorithmus 6 in Anhang G)

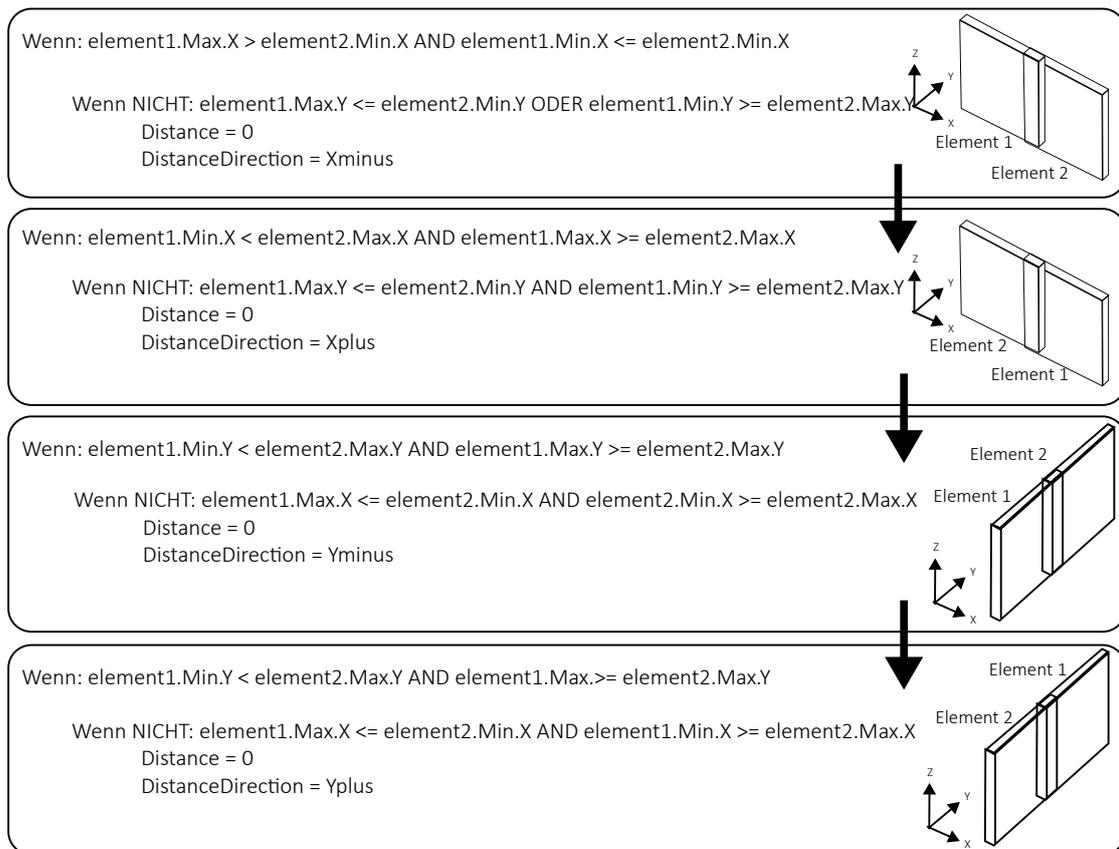


Abbildung 5.31: Schema des Algorithmus zur Abstandsberechnung bei zwei sich überlappenden Bauteilen (siehe Algorithmus 7 in Anhang G)

5.4.3 Analyse der Stoßstellen

Der Bauteilaufbau sollte wie in Kapitel 5.1 gezeigt erfolgen. Dies hat auch für die Schallschutzplanung Vorteile, da sich die Stoßstellentypen immer auf das Grundbauteil beziehen. Vorsatzschalen, Unterdecken und schwimmende Estriche werden mit ΔR in der Prognose berücksichtigt. Bei flankierenden Bauteilen, die eine Außenwand bzw. Fassade darstellen, werden außenliegende Vorsatzschalen beim Schalldämm-Maß nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für zweischalige Haustrennwände, die baulich voneinander getrennt sind. Aus den verschiedenen bauphysikalischen Eingangswerten lassen sich Bauteile in drei Schichten einteilen: Grundbauteil und zwei äußere Schichten, die die Verbesserungen durch Vorsatzschalen darstellen. Abbildung 5.32 zeigt das Drei-Schicht-Modell für Massivholz- und Holzständerwände sowie Massivholzdecken. Die äußere und die innere Schicht werden akustisch durch die Verbesserungen ΔR bzw. ΔL_n beschrieben und sind im IFC-Modell als Klassen *IfcCovering* zu instanziiieren.

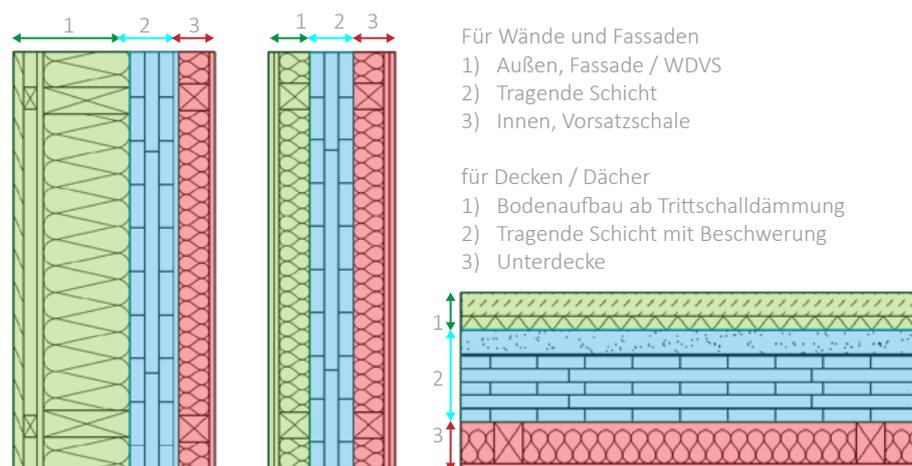


Abbildung 5.32: 3-Schicht-Modell für die Bauakustik für Wände und Decken mit der tragenden Schicht in blau und den „akustischen“ Vorsatzschalen in grün und rot

Ist ein Bauteil als echte Flanke identifiziert worden, kann für die weitere Bearbeitung mit dem ganzen Bauteil oder nur mit dem *Core Layer* gearbeitet werden. Der *Core Layer* ist der tragende Teil eines Bauteils, der auch für die Übertragung des Schalls in der Stoßstelle am meisten Einfluss hat. Da Leichtbau- und Massivholzelemente jedoch sehr unterschiedlich im Aufbau sind, kann nicht anhand der Schichtdicke auf einen *Core Layer* geschlossen werden, sondern nur anhand der Materialinformationen. Bisher gibt es keine standardisierten Vorgaben für die Benennung der Materialschichten in der Klasse *IfcMaterial*, sodass hier manuell die richtige Schicht ausgewählt werden muss.

Alle ermittelten flankierenden Bauteile müssen ihrer jeweiligen Stoßstelle zugeordnet werden. Dazu werden *Junction Boxen* eingeführt. Die *Junction Box* ist ein dreidimensionaler Bereich

an den Enden und mittig eines Trennelements, wie sie in Abbildung 5.33 und 5.34 für Wände und Decken gezeigt wird.

Die Boxen werden wie die Bauteile durch ihr Minimum und Maximum charakterisiert. Die Position der jeweiligen *Junction Box* ist durch die Richtung \vec{n} und die Abmessungen des Trennelements vorgegeben. Wände haben die Richtung $\vec{n} = (1/0/0)$ oder $\vec{n} = (0/1/0)$, während Decken die Richtung $\vec{n} = (0/0/1)$ haben. Die Definition aller *Junction Boxen* ist in Anhang C aufgeführt. Beispielfhaft ist hier die Definition für *Junction Box* 1 je nach Bauteilrichtung \vec{n} aufgeführt:

Element mit $\vec{n} = (1/0/0)$

JB-Min: $X_{\text{Min}} - 0,3 / Y_{\text{Min}} - 0,5 / Z_{\text{Min}}$

JB-Max: $X_{\text{Max}} + 0,3 / Y_{\text{Min}} + 0,5 / Z_{\text{Max}}$

Element mit $\vec{n} = (0/1/0)$

JB-Min: $X_{\text{Min}} - 0,5 / Y_{\text{Min}} - 0,3 / Z_{\text{Min}}$

JB-Max: $X_{\text{Min}} + 0,5 / Y_{\text{Max}} + 0,3 / Z_{\text{Max}}$

Element mit $\vec{n} = (0/0/1)$

JB-Min: $X_{\text{Min}} / Y_{\text{Min}} - 0,5 / Z_{\text{Min}} - 0,3$

JB-Max: $X_{\text{Max}} / Y_{\text{Min}} + 0,5 / Z_{\text{Max}} + 0,3$

Flankierende Elemente werden in Abhängigkeit ihrer Position in die entsprechende *Junction Box* verteilt. So kann man jede Box einzeln betrachten und daraus eine Stoßstelle zusammensetzen. In jeder *Junction Box* stehen vier freie Slots zur Verfügung. Sie heißen SE, FE1, FE2, FE3. Dabei steht SE für das Trennelement ($SE = \text{separating element}$) und FE1, FE2, FE3 für die flankierenden Elemente ($FE = \text{flanking element}$). Die Slots SE und FE2 liegen sich immer gegenüber, ebenso die Slots FE1 und FE3. In Slot SE ist immer das Trennelement enthalten, in den anderen Slots immer die flankierenden Elemente. Hier spielt der Abstand und vor allem die Richtung des gemessenen Abstands DD die entscheidende Rolle bei der Zuordnung (siehe Algorithmus 1, 2 und 3).

Durch diese Zuweisung sind bereits die Stoßstellen am Trennelement identifiziert. Der nächste Schritt besteht darin, den genauen Stoßstellentyp zu ermitteln.

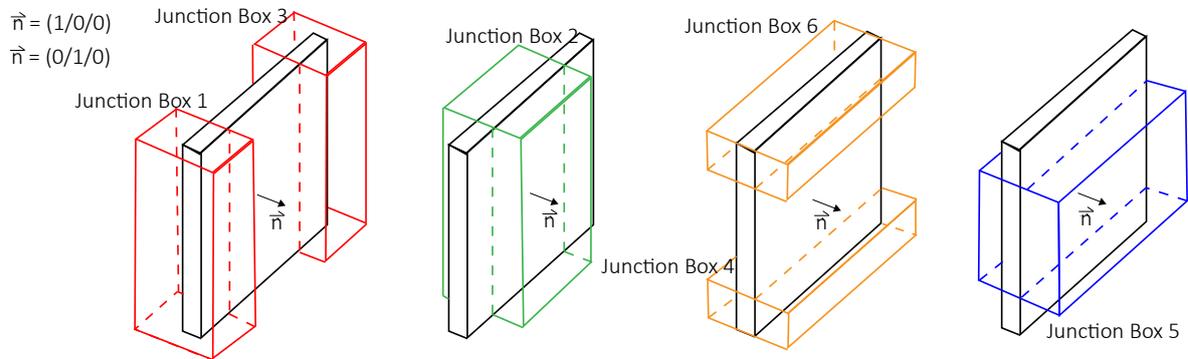


Abbildung 5.33: *Junction Box* für Wände oder andere vertikal stehende Bauteile in Abhängigkeit des globalen Koordinatensystems wie sie in Anhang C definiert werden, oben für Wände mit Richtung $\vec{n} = (1/0/0)$ nach Gleichung C.1, unten für Wände mit Richtung $\vec{n} = (0/1/0)$ nach Gleichung C.2

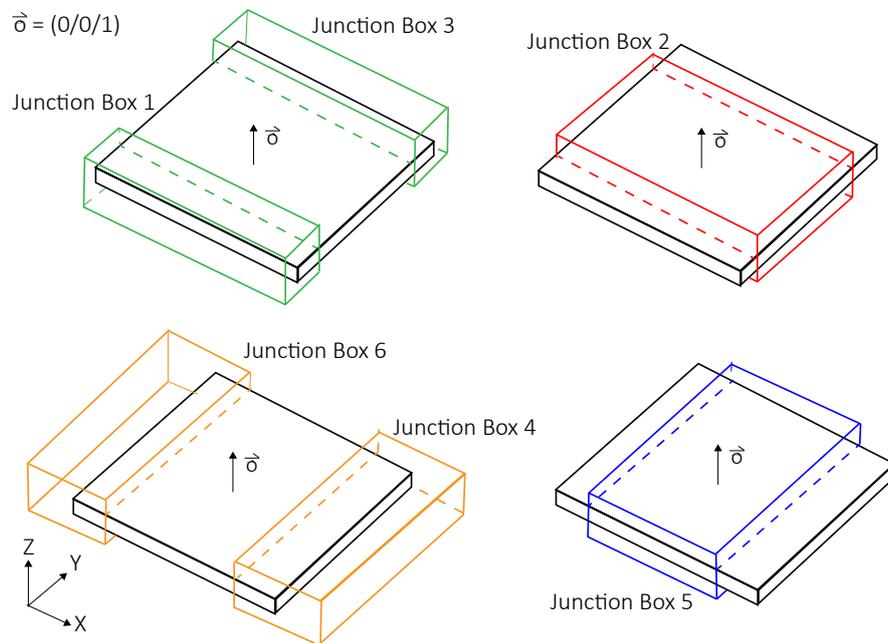


Abbildung 5.34: *Junction Box* für Decken oder andere horizontal liegende Bauteile in Abhängigkeit des globalen Koordinatensystems wie sie in Anhang C definiert werden, für Decken mit Richtung $\vec{o} = (0/0/1)$ nach Gleichung C.3

Algorithm 1: Richtige Junction Box für ein flankierendes Element FE mit einem Trennelement SE in Richtung $SE.\vec{n} = (1/0/0)$

a)

if $FE.\vec{n} = (1/0/0)$ **then**

if $FE.DD = Yplus$ **then** FE in JB3

if $FE.DD = Yminus$ **then** FE in JB1

if $FE.DD = Zplus$ **then** FE in JB6

if $FE.DD = Zminus$ **then** FE in JB4

if $FE.DD = Xplus$ OR $FE.DD = Xminus$ **then** ERROR

b)

else if $FE.\vec{n} = (0/1/0)$ **then**

if $FE.DD = Xplus$ OR $FE.DD = Xminus$ **then**

if $FE.Min.Y \geq JB3.Min.Y$ **then** FE in JB3

else if $FE.Max.Y \leq JB1.Max.Y$ **then** FE in JB1

else FE in JB2

end

if $FE.DD = Yplus$ **then** FE in JB3

if $FE.DD = Yminus$ **then** FE in JB1

if $FE.DD = Zplus$ OR $FE.DD = Zminus$ **then** ERROR

c)

else if $FE.\vec{n} = (0/0/1)$ **then**

if $FE.DD = Xplus$ OR $FE.DD = Xminus$ **then**

if $FE.Min.Z \geq JB6.Min.Z$ **then** FE in JB6

else if $FE.Max.Z \leq JB4.Max.Z$ **then** FE in JB4

else FE in JB5

end

if $FE.DD = Zplus$ **then** FE in JB6

if $FE.DD = Zminus$ **then** FE in JB4

if $FE.DD = Yplus$ OR $FE.DD = Yminus$ **then** ERROR

end

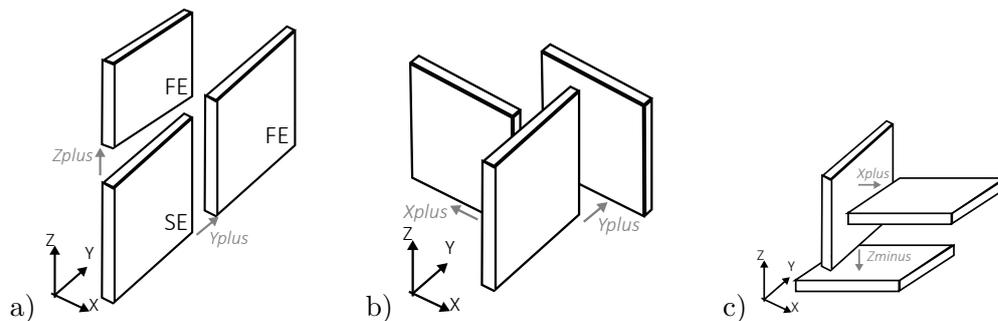


Abbildung 5.35: Skizzen zu Algorithmus 1

Algorithm 2: Richtige Junction Box für ein flankierendes Element FE mit einem Trennelement SE in Richtung $SE.\vec{n} = (0/1/0)$

a)

```

if  $FE.\vec{n} = (1/0/0)$  then
  if  $FE.DD = Yplus$  OR  $FE.DD = Yminus$  then
    if  $FE.Min.X \geq JB3.Min.X$  then FE in JB3
    else if  $FE.Max.X \leq JB1.Max.X$  then FE in JB1
    else FE in JB2
  end
  if  $FE.DD = Xplus$  then FE in JB3
  if  $FE.DD = Xminus$  then FE in JB1
  if  $FE.DD = Zplus$  OR  $FE.DD = Zminus$  then ERROR

```

b)

```

else if  $FE.\vec{n} = (0/1/0)$  then
  if  $FE.DD = Xplus$  then FE in JB3
  if  $FE.DD = Xminus$  then FE in JB1
  if  $FE.DD = Zplus$  then FE in JB6
  if  $FE.DD = Zminus$  then FE in JB4
  if  $FE.DD = Yplus$  OR  $FE.DD = Yminus$  then ERROR

```

c)

```

else if  $FE.\vec{n} = (0/0/1)$  then
  if  $FE.DD = Yplus$  OR  $FE.DD = Yminus$  then
    if  $FE.Min.Z \geq JB6.Min.Z$  then FE in JB6
    else if  $FE.Max.Z \leq JB4.Max.Z$  then FE in JB4
    else FE in JB5
  end
  if  $FE.DD = Zplus$  then FE in JB6
  if  $FE.DD = Zminus$  then FE in JB4
  if  $FE.DD = Xplus$  OR  $FE.DD = Xminus$  then ERROR
end

```

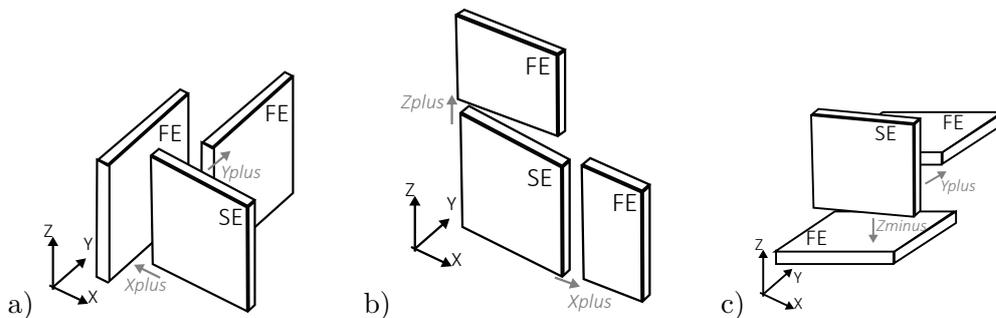


Abbildung 5.36: Skizzen zu Algorithmus 2

Algorithm 3: Richtige Junction Box für ein flankierendes Element FE mit einem Trennelement SE in Richtung $SE.\vec{n} = (0/0/1)$

a)

if $FE.\vec{n} = (1/0/0)$ **then**

if $FE.DD = Xplus$ **then** FE in JB6

if $FE.DD = Xminus$ **then** FE in JB4

if $FE.DD = Zplus$ **OR** $FE.DD = Zminus$ **then**

if $FE.Min.X \geq JB6.Min.X$ **then** FE in JB6

else if $FE.Max.X \leq JB4.Max.X$ **then** FE in JB4

else FE in JB5

end

if $FE.DD = Yplus$ **OR** $FE.DD = Yminus$ **then** ERROR

b)

else if $FE.\vec{n} = (0/1/0)$ **then**

if $FE.DD = Yplus$ **then** FE in JB3

if $FE.DD = Yminus$ **then** FE in JB1

if $FE.DD = Zplus$ **OR** $FE.DD = Zminus$ **then**

if $FE.Min.Y \geq JB3.Min.Y$ **then** FE in JB3

else if $FE.Max.Y \leq JB1.Max.Y$ **then** FE in JB1

else FE in JB2

end

if $FE.DD = Xplus$ **OR** $FE.DD = Xminus$ **then** ERROR

c)

else if $FE.\vec{n} = (0/0/1)$ **then**

if $FE.DD = Xplus$ **then** FE in JB6

if $FE.DD = Xminus$ **then** FE in JB4

if $FE.DD = Yplus$ **then** FE in JB3

if $FE.DD = Yminus$ **then** FE in JB1

if $FE.DD = Zplus$ **OR** $FE.DD = Zminus$ **then** ERROR

end

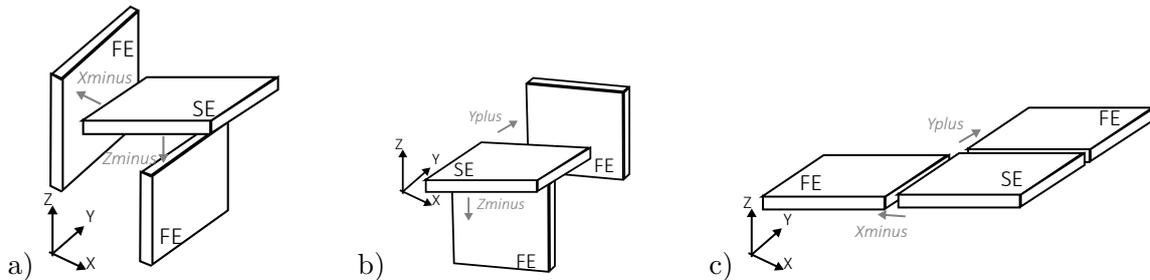


Abbildung 5.37: Skizzen zu Algorithmus 3

5.4.4 Stoßstellentyp

Der Stoßstellentyp, wie in Kapitel 3.4.1, Abbildung 3.5, gezeigt, ergibt sich aus dem geometrischen Zusammentreffen der Bauteile an einer Stoßstelle in Kombination mit der Richtung der Bauteile zueinander (*element direction*). Bauteile werden in drei Bereiche, sogenannte *connection zone*, eingeteilt: *short*, *border*, *middle*. Der Bereich *short* ist umlaufend am Bauteil und deckt die vier kleinsten Bauteilflächen ab. Die Bereiche *border* und *middle* liegen beide auf der richtungsbestimmenden, größten Fläche des Bauteils.

Die Richtung der Bauteile zueinander spielt eine wichtige Rolle bei der Festlegung des Stoßstellentyps. Abbildung 5.38 demonstriert dies an einem Beispiel, in dem sich zwei Bauteile in einer Stoßstelle treffen. Bauteil 1 trifft auf Bauteil 2 in *short*. Bauteil 2 wiederum trifft auf Bauteil 1 in *middle*. Daraus resultieren drei mögliche Stoßstellentypen: Th1-24, Tv1-24 und Tv2-13. Erst durch die Information der Bauteilrichtungen wird der korrekte Stoßstellentyp erkannt.

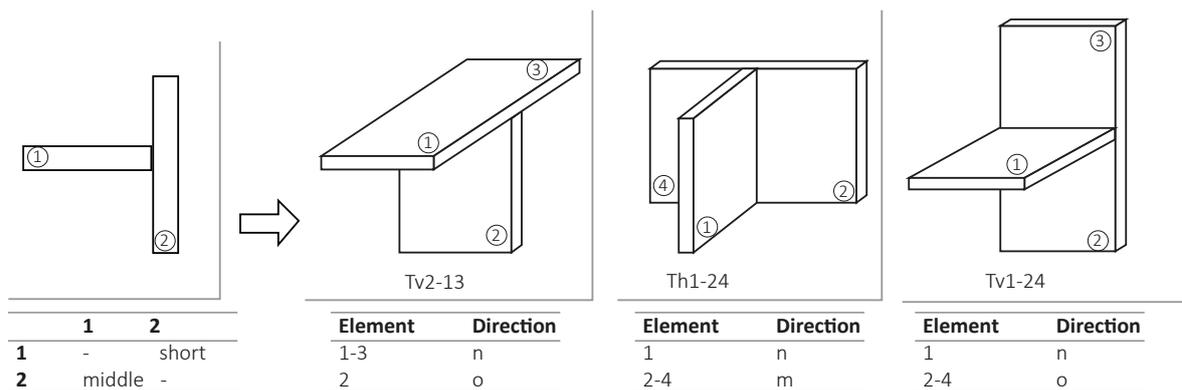


Abbildung 5.38: Unterschiedliche Stoßstellentypen für dieselben *connection zones* am Beispiel eines T-Stoßes

Die Abbildungen 5.39, 5.40 und 5.41 zeigen wo die *connection zone* der Bauteile bei unterschiedlichen Bauteilen liegen. Die Gleichungen in den Abbildungen beschreiben, wie die Zone *border* für unterschiedliche flankierende Elemente gebildet wird. Dabei ist der Punkt *P* ein beliebiger Punkt des flankierenden Bauteils, welches das Prädikat *close to* erfüllt. Um zu bestimmen, wo das flankierende Element auf das Trennelement trifft, kann auch die Information über die *Junction Box* der flankierenden Bauteile verwendet werden.

Die Richtung der Bauteile (*element direction*) wird wie folgt definiert: n bezeichnet die erste Wand. Eine im 90° -Winkel dazu stehende zweite Wand bekommt die Richtung m . Decken stehen zu allen Wänden im 90° -Winkel und erhalten die Richtung o (siehe Abbildung 5.42). Es wird angenommen, dass die Vereinfachung der 90° -Winkel an der Stoßstelle eine ausreichende Genauigkeit bietet.

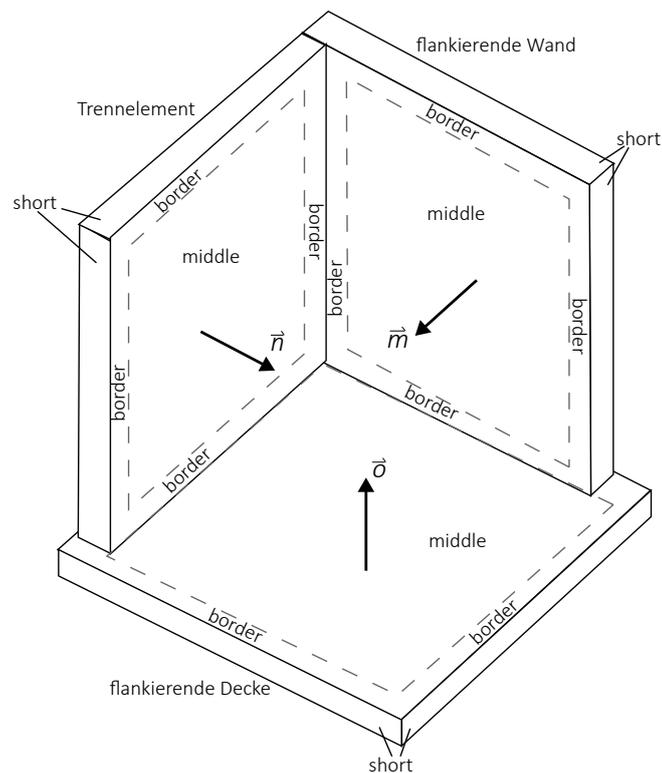


Abbildung 5.42: Definition der *connection zones* *short*, *border* und *middle* für eine Wand als Trennelement mit der *element direction* \vec{n} und flankierenden Bauteilen mit *element direction* \vec{m} und \vec{o}

Erst wenn die Art der Bauteile oder die Winkel zueinander mit angegeben werden, wird deutlich, um welchen Stoßstellentyp es sich genau handelt. Mit Hilfe dieser Informationen können nun alle Stoßstellentypen eindeutig identifiziert werden. Stoßstellen in denen zwei Elemente durch ein drittes Element getrennt werden, erhalten eine neutrale Angabe zur *connection zone* mit 0. Dieser Fall tritt auf bei T-Stößen aus drei Elementen, in denen das Trennelement die flankierenden Elemente voneinander trennt (Tv2-1-4, Th2-1-4) und bei X-Stößen mit drei (Xh1-24-3, Xv2-13-4, Xv1-24-3) oder vier (Xv2-1:3-4, Xh2-1:3-4) Elementen. Abbildung 5.43 zeigt alle Stoßstellentypen mit den notwendigen Definitionen der *element direction* und der *connection zone*.

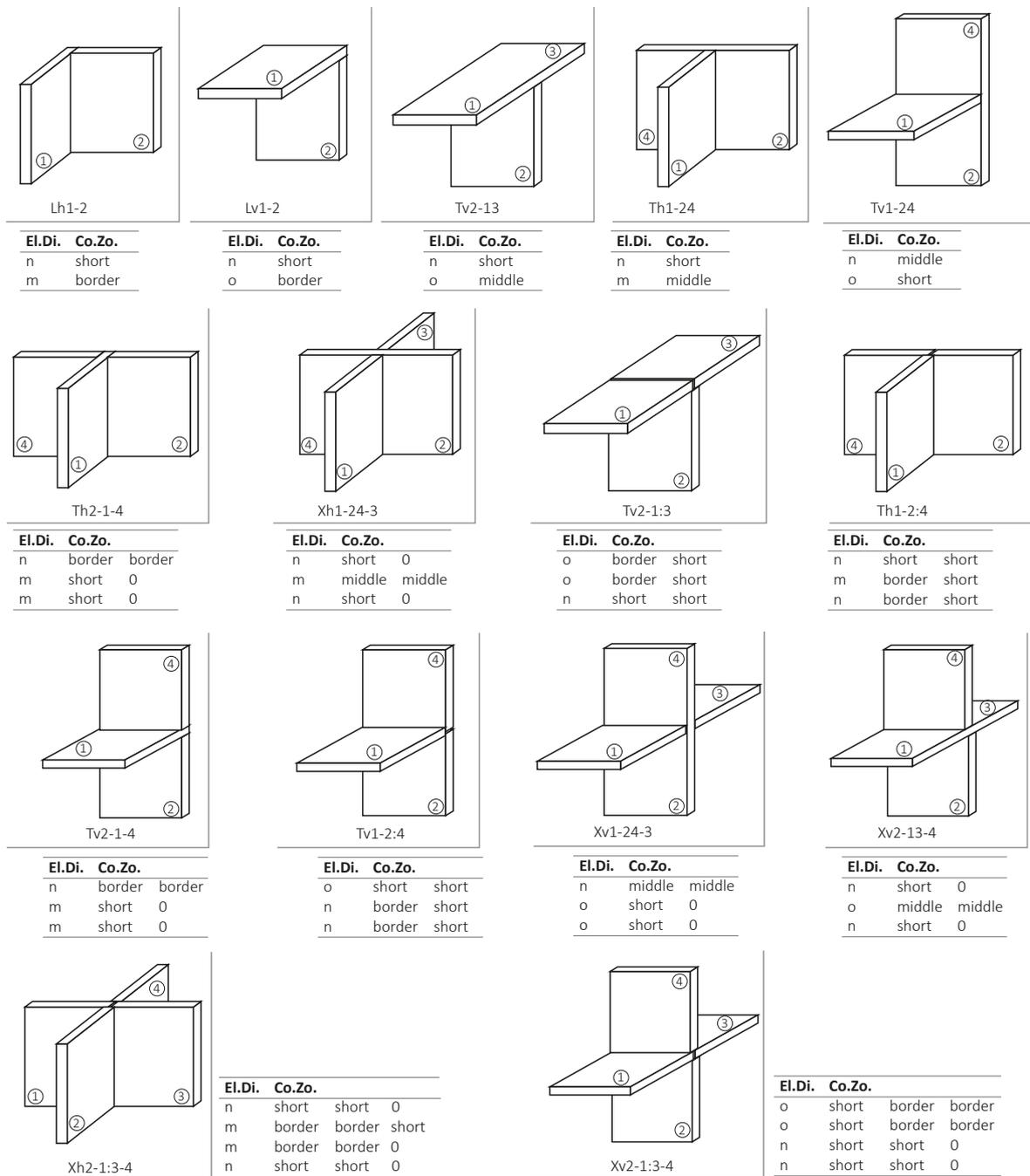


Abbildung 5.43: Definition aller Stoßstellentypen mit *connection zone* (Co.Zo.) und *element direction* (El.Di.)

5.5 Fachmodell Akustik

Das Fachmodell Akustik wird nach der Stoßstellenanalyse aus dem Architektur- oder Koordinationsmodell erstellt (siehe Abbildung 5.44). Es beinhaltet Informationen zu den Stoßstellen, den Übertragungswegen und alle akustisch relevanten (frequenzabhängigen) Werte. Es speichert nicht nur Ergebnisse der Stoßstellenanalyse, sondern auch die der Prognoseberechnung modellbasiert ab. Außerdem können die Stoßstellen und ihre entsprechenden Stoßstellentypen semantisch hinterlegt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit haben sich drei Varianten zur Erstellung des Fachmodells Akustik ergeben. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen. Das bisherige IFC-Schema bietet keine ausreichenden Möglichkeiten, Stoßstellen samt der Übertragungswege semantisch abzubilden. Wie in Kapitel 5.2.2 gezeigt, können einige Klassen zweckentfremdet genutzt werden (Tabelle 5.2, Variante 1). Allerdings führt ein solches Vorgehen nicht zu einer klaren semantischen Struktur und Fehlinterpretationen sind sehr wahrscheinlich. Daher werden für die zweite Variante in Kapitel 5.5.1 neue Klassen vorgeschlagen, die das IFC-Schema sinnvoll erweitern. Da Schemaerweiterungen jedoch sehr aufwendig sind, zeigt eine dritte Variante aus Kapitel 5.5.2, wie anhand des bisherigen Schemas die Informationen zu den Stoßstellen trotzdem integriert werden können.

Tabelle 5.2: Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten des Fachmodells Akustik

Variante 1: Klassen zweckentfremden (Kapitel 5.2.2)	
+ semantische Stoßstellen	- stark verschachtelte Struktur
+ lesbare IFC	- Fehlinterpretation wahrscheinlich
+ frequenzabhängige Werte	
Variante 2: Schema erweitern (Kapitel 5.5.1)	
+ semantische Stoßstellen	- nur lesbar, wenn Schemaerweiterung offiziell
+ frequenzabhängige Werte	- Schemaerweiterung notwendig
+ gute Struktur	
Variante 3: Externe Dateien nutzen (Kapitel 5.5.2)	
+ lesbare IFC	- keine semantischen Stoßstellen
+ frequenzabhängige Werte	- Verwaltung externer Dateien
+ gute Struktur	
+ einfache Umsetzung	

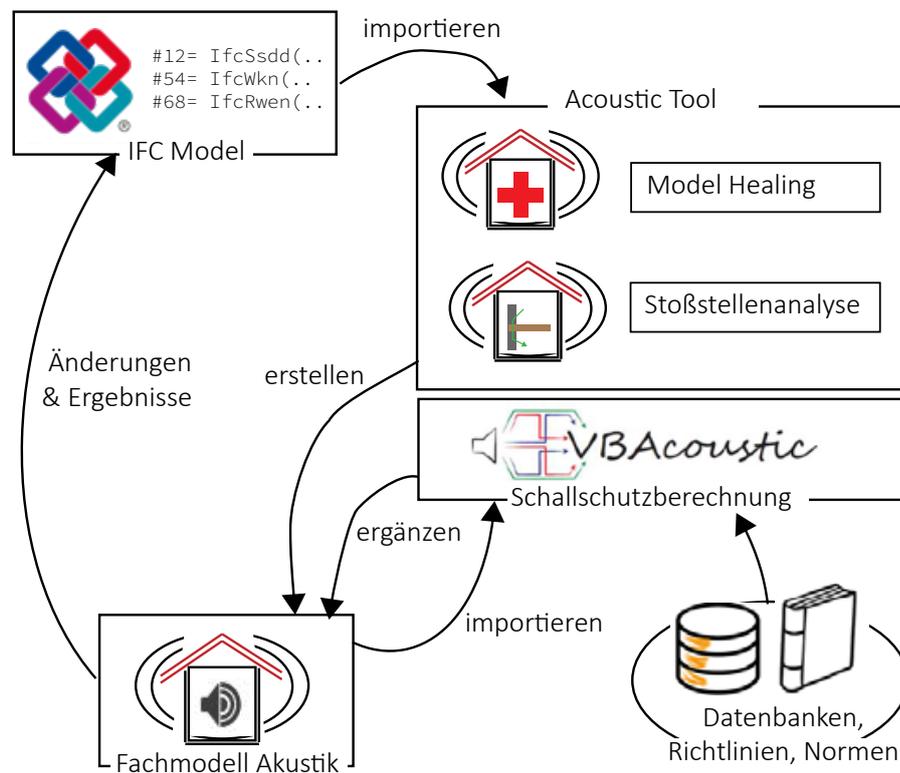


Abbildung 5.44: Planungsprozess zur Berechnung des Schallschutzes mit einem Fachmodell Akustik: vom Import des IFC-Modells in das „Acoustic Tool“ zur Schallschutzberechnung bis zur Erstellung des Fachmodells und Rückmeldung über Berechnungsergebnisse und Planungsempfehlungen

5.5.1 Erweiterung des IFC-Schemas

Die Erweiterung des IFC-Schemas basiert auf dem aktuellen Schema IFC4x3. Es werden insgesamt drei neue Klassen vorgeschlagen, mit denen ein Fachmodell Akustik erstellt werden kann.

Es handelt sich um die Klasse *IfcJunction* zur Beschreibung der Stoßstelle, die Klasse *IfcTransmissionPath* zur Beschreibung der Übertragungswege, sowie die Klasse *IfcRelAssociatesPaths* als Beziehung zwischen den Klassen *IfcJunction* und *IfcTransmissionPath*.

Die Klassen *IfcJunction* und *IfcTransmissionPath* werden als vererbte Klassen *IfcAcousticElement* erstellt, welches wiederum von der Klasse *IfcProduct* erbt. An dieser Stelle befinden sich in der Struktur bereits andere domänenspezifische Klassen wie *IfcStructuralItem*. Die Klasse *IfcAcousticElement* ist dabei nicht zwangsweise nötig und orientiert sich an der Struktur, die für die Tragwerksplanung bereits existiert.

Im Folgenden werden die neuen Klassen, wie sie in EXPRESS hinterlegt werden müssen, gelistet. Die Klasse *IfcAcousticElement* als vererbte Klasse von *IfcProduct* untergliedert sich in *IfcJunction* und *IfcTransmissionPath*. Letztere benötigen ein inverses Attribut, um die Beziehung zueinander mit *IfcRelAssociatesPaths* zu ermöglichen. Weitere Attribute in der Klasse *IfcJunction* sind die gemeinsame Länge (*CommonLength*), die Verbindungsmittel (*Fastener*) und der Stoßstellentyp (*JunctionType*). In der Klasse *IfcTransmissionPath* wird mit den Attributen *Is_i* und *Is_j* auf die zwei Bauteile verwiesen, die einen Übertragungsweg vom Senderraum in den Empfangsraum bilden, sodass die Beschriftung der Logik der DIN EN ISO 12354 und der Bauteildatenbank *VaBDat* folgt.

```
ENTITY IfcAcousticElement
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF
( IfcJunction
, IfcTransmissionPath ))
SUBTYPE OF ( IfcProduct );
Tag : OPTIONAL IfcIdentifier ;
END_ENTITY;
```

```

ENTITY IfcJunction
SUBTYPE OF (IfcAcousticElement);
CommonLength : OPTIONAL IfcPositiveLengthMeasure;
Fastener : OPTIONAL IfcMechanicalFastener;
JunctionType : OPTIONAL IfcJunctionTypeEnum;
INVERSE
Transmits : SET [0:?] OF IfcRelAssociatesPaths FOR
    RelatingJunction;
END_ENTITY;

```

```

ENTITY IfcTransmissionPath
SUBTYPE OF (IfcAcousticElement);
Is_i : IfcBuildingElement;
Is_j : IfcBuildingElement;
INVERSE
Decomposes : SET [0:1] OF IfcRelAssociatesPaths FOR
    RelatedPath;
END_ENTITY;

```

Die Klasse *IfcRelAssociatesPaths* bildet die Verbindung zwischen der Stoßstelle *IfcJunction* und ihren Übertragungswegen *IfcTransmissionPath*. Über *RelatingJunction* wird auf die Stoßstelle verwiesen, während *RelatedPath* mindestens einen Übertragungsweg verbindet.

```

ENTITY IfcRelAssociatesPaths
SUBTYPE OF (IfcRelAssociates);
RelatingJunction : IfcJunction;
RelatedPath : SET [1:?] OF IfcTransmissionPath;
END_ENTITY;

```

In den Klassen *IfcProduct* und *IfcRelAssociates* müssen die neuen Unterklassen eingetragen werden (siehe Anhang E). Die Stoßstelle *IfcJunction* wird aus einzelnen Bauteilen zusammengesetzt, die über das Attribut *IsDecomposedBy* anhand einer Aggregation mit der Klasse *IfcRelAggregates* zugeordnet werden. Die Stoßstellentypen in der Klasse *IfcJunction* werden als Enumeration vorgegeben (siehe Anhang E).

Die Abbildung 5.45 verdeutlicht das Konzept der Stoßstellen und Übertragungswege. Abbildung 5.46 zeigt am Beispiel eines T-Stoßes, wie sich eine Stoßstelle aus drei Wänden und drei Übertragungswegen zusammensetzt.

Da nun Stoßstellen und Übertragungswege im Modell integriert sind, können auch die bauakustischen Werte mit *PropertySets* zugeordnet werden. Die frequenzabhängigen Werte können anhand von Tabellen genauso berücksichtigt werden wie Einzahlwerte. Es wird zwischen den Eigenschaften für Bauteile (siehe Tabelle 5.3) und für Übertragungswege (siehe Tabelle 5.4)

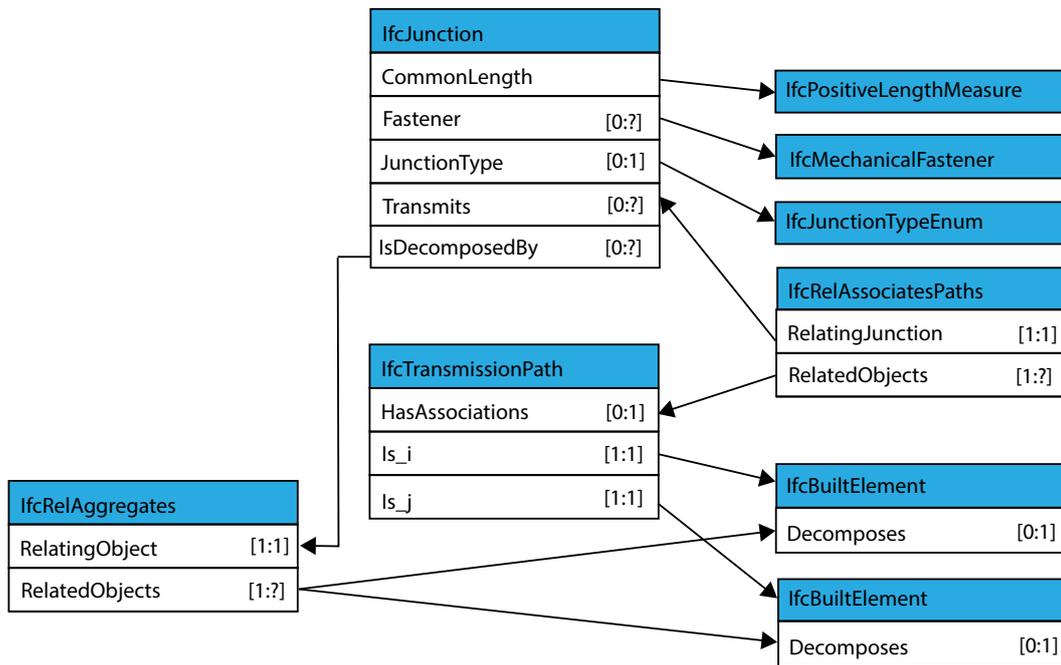


Abbildung 5.45: Konzept für die Stoßstellen (*IfcJunction*) und Übertragungswege (*IfcTransmissionPath*)

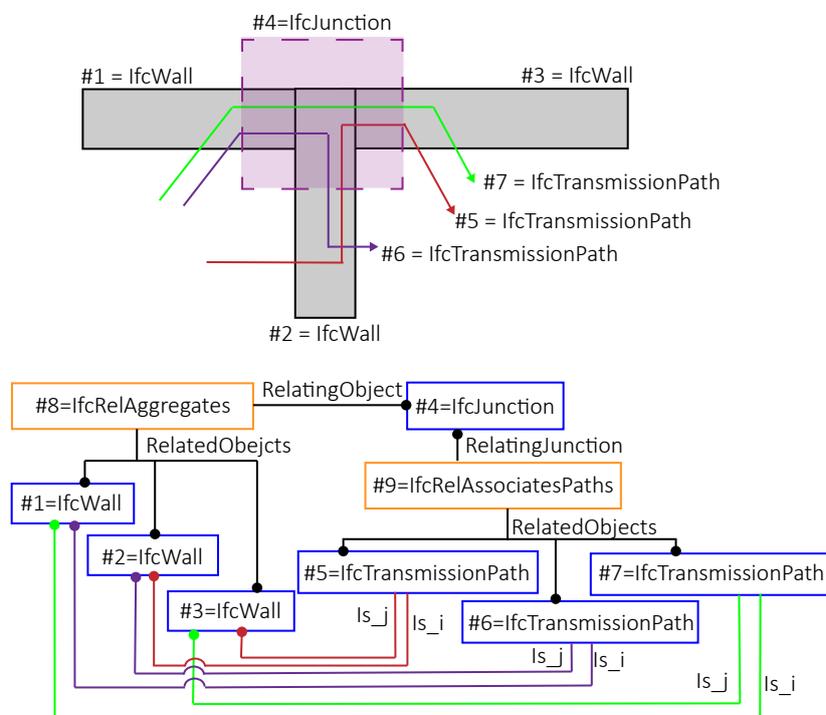


Abbildung 5.46: Stoßstelle im Fachmodell Akustik mit neuen Klassen *IfcJunction* und *IfcTransmissionPath*

unterschieden. Bauteile erhalten Kennwerte für die Luftschallübertragung mit dem *PropertySet* *Pset_Acoustic-Element* und wenn es sich um Decken handelt auch für die Trittschallübertragung *Pset_AcousticImpact*. Schalldämm-Maße für die Verbesserung durch Vorsatzschalen sind für *IfcCovering* möglich.

Tabelle 5.3: Property Sets für die bauteilbezogenen Eingangsdaten zur Schallschutzberechnung

Pset für IFC entity	Symbol	Properties	Propertytype
Pset_AcousticElement für IfcWall, IfcSlab, IfcDoor, IfcWindow, IfcCovering, IfcRoof IfcCurtainWall	R_w	SoundReductionSingle	single value
	R_d	SoundReduction	table value
	m'	AreaRelatedMass	single value
	f_c	Eigenfrequency	single value
		Origin	label
Pset_AcousticImpact für IfcSlab, IfcFloor, IfcCovering, IfcRoof	$L_{n,w}$	ImpactSoundSingle	single value
	$L_{n,d}$	ImpactSound	table value
		Origin	label
Pset_AcousticImprovement für IfcCovering	ΔR_w	SoundReduction- ImprovementSingle	single value
	ΔR	SoundReductionImprovement	table value
	$\Delta L_{n,w}$	ImpactSound- ImprovementSingle	single value
	ΔL_n	ImpactSoundImprovement Origin	table value label

Tabelle 5.4: Property Sets für die Übertragungswege zur Schallschutzberechnung

Pset für IFC entity	Symbol	Properties	Propertytype
Pset_AcousticPath für IfcTransmissionPath	K_{ij}	VibrationReductionIndex	table value
	$D_{v,ij}$	DirectionAvrVelocityLevel	table value
	R_{ij}	FlankingSoundReduction	table value
	$L_{n,ij}$	FlankingImpactSound Origin	table value label

In den *PropertySets* *Pset_AcousticElementInSitu* und *Pset_AcousticImpactInSitu* werden die Ergebnisse der Prognose und der Messung gespeichert (siehe Tabelle 5.5). Diese Werte beziehen sich auf die Bauteile in der Bausituation. Im Attribut *Origin* kann jeweils angegeben werden, woher die Werte stammen (Datenbank, Messung oder Berechnung).

Die offizielle Änderung bzw. Erweiterung des IFC-Schemas erfolgt über *buildingSMART*, was einen langwierigen Prozess ähnlich wie in Normungsgremien mit sich bringt. Da dies nicht innerhalb dieser Arbeit durchführbar ist, sollten ursprünglich die neuen Klassen in dem Prototyp umgesetzt werden. Allerdings zeigte sich hierbei, dass *xBim* keine Schemaerweiterung

Tabelle 5.5: Property Sets für die Ergebnisse der Schallschutzberechnung für Bauteile in Baustellensituation (in situ)

Pset für IFC entity	Symbol	Properties	Propertytype
Pset_AcousticElementInSitu für IfcWall, IfcSlab, IfcDoor, IfcWindow, IfcCovering, IfcRoof Ifc- CurtainWall	R'_w	SoundReductionSingle	single value
	R'	SoundReduction	table value
	T_s	StructuralReverberationTime Origin	table value label
Pset_AcousticImpactInSitu für IfcSlab, IfcFloor, IfcCovering, IfcRoof	$L'_{n,w}$	ImpactSoundSingle	single value
	L'_n	ImpactSound Origin	table value label

ermöglicht. Es ist zwar möglich, die Klassen außerhalb des Schemas zu erstellen und zur Laufzeit zu nutzen, allerdings können sie dann nicht in eine IFC-Datei gespeichert werden.

Eine alternative Umsetzung mit *IfcOpenShell* erforderte tiefe Kenntnisse von *IfcOpenShell* sowie den damit verbundenen höherwertigen Tools und Programmiersprachen *C++*, *Qt*, *Boost* und eine Vielzahl integrierter Open-Source Tools. Daher wurde die Implementierung zum Teil mit Unterstützung eines Kollegen erstellt. Die Implementierung des vorgegebenen Schemas, wie in Kapitel 5.5.1 gezeigt, war zwar möglich, allerdings war hierfür ein größerer Aufwand notwendig, sodass sie nicht vollständig abgeschlossen wurde. Dies liegt nicht zuletzt am Implementierungskonzept von *IfcOpenShell*, welches von Haus aus den Fokus nicht auf eine Erweiterung des IFC-Schemas legt, und im Zusammenhang mit der Programmiersprache *C++* einige grundsätzliche Modifikationen der Daten-Import/Export-Logik erfordert. Die damit verbundenen softwareseitigen Implementierungen haben sich insbesondere dann als sehr aufwendig herausgestellt, wenn sie in eine dauerhaft wartbare und anwendbare Form gebracht werden sollen. Der wissenschaftliche Mehrwert der Softwareimplementierung hingegen ist eher gering. Die professionelle und/oder kommerzielle Nutzung von *IfcOpenShell* für diese Aufgabe konnte für die prototypische Umsetzung der Schemaerweiterung nachgewiesen werden. Eine praxistaugliche Nutzung von *IfcOpenShell* inklusive der Schemaerweiterung für den Ingenieur als Endanwender beschränkt sich damit allerdings auf den Fall, dass dies professionell durch spezialisierte IT-Experten, zum Beispiel in Form eines professionellen Softwareprodukts, begleitet wird.

5.5.2 Fachmodell mit externen Daten

Das Fachmodell Akustik lässt sich, wie im vorherigen Kapitel gezeigt, durch die Erweiterung des IFC-Schemas erreichen. Dies ist jedoch mit einer Vielzahl von Hindernissen verbunden. Auch die Modellqualität sollte dazu ausreichend sein und nach Bedarf bereits ein *model healing* durchgeführt worden sein. Um eine praxistaugliche Lösung für das Fachmodell zu finden, wurden die Stoßstellen und Übertragungswege nicht im IFC-Modell gespeichert, sondern alle akustischen Kennwerte als externe Dateien dem IFC-Modell hinzugefügt. Dies folgt dem Ansatz von *Linked Data*, bei dem nicht mit großen monolithischen Datenmodellen gearbeitet wird, sondern Datenstrukturen flexibel gekoppelt werden. Dieser Ansatz kann für eine verbesserte Interoperabilität der Gebäudemodelle sorgen und den Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Gewerken und Planungsdisziplinen erleichtern (PAUWELS & MCGLENN, 2022; PAUWELS et al., 2017). Aus praktischen Gründen wurde auf eine OWL/RDF-basierte Modellierung verzichtet und stattdessen mit JSON-Dateien gearbeitet.

Das Format *JavaScript Object Notation* (JSON) wurde Anfang der 2000er Jahre veröffentlicht und standardisiert. Während JavaScript eine objektorientierte Sprache ist, also ein Programmierparadigma, ist JSON ein hoch interoperables Datenaustauschformat. Dies wird durch die Standardisierung einer einfachen Grammatik erreicht, die in jede Sprache übersetzt werden kann. JSON kann auch mit einem einfachen Texteditor geschrieben und als JSON-Dokument mit der Dateiendung `.json` gespeichert werden. Für Validierungszwecke ist es hilfreich, mit einem Editor zu arbeiten, der die JSON-Grammatik versteht. Darüber hinaus kann JSON als Untermenge von JavaScript auch direkt in einer JavaScript-Datei fest codiert werden. Beide Methoden sind ideal, um Konfigurationsdateien für eine Anwendung zu erstellen. (B. SMITH, 2015)

Die JSON-Dateien bilden nicht nur das Fachmodell Akustik, sondern dienen auch zum Datenaustausch zwischen den IFC-Modellen und dem Berechnungstool, in dieser Arbeit exemplarisch *VBAcoustic*: aus dem IFC-Modell werden Daten für die akustische Berechnung als JSON-Datei exportiert. Nach der Berechnung können die Ergebnisse in das Fachmodell Akustik integriert werden. Es wird eine neue JSON-Datei erstellt, die für das Fachmodell zu einem *PropertySet* aufbereitet oder dem Modell hinzugefügt werden kann. Dieser Prozess ist in Abbildung 5.47 dargestellt.

Diese Dateien speichern neben den Eingangsdaten und Ergebnissen auch immer die GUID der Bauteile, Stoßstellen und Übertragungswege. Abbildung 5.48 zeigt, wie dieses Konzept anhand der Klassen *IfcRelAssociatesDocument* und *IfcDocumentReference* zustande kommt. Die JSON-Dateien werden immer mit der Klasse *IfcRelAssociatesDocument* an das Trennbauteil angehängt.

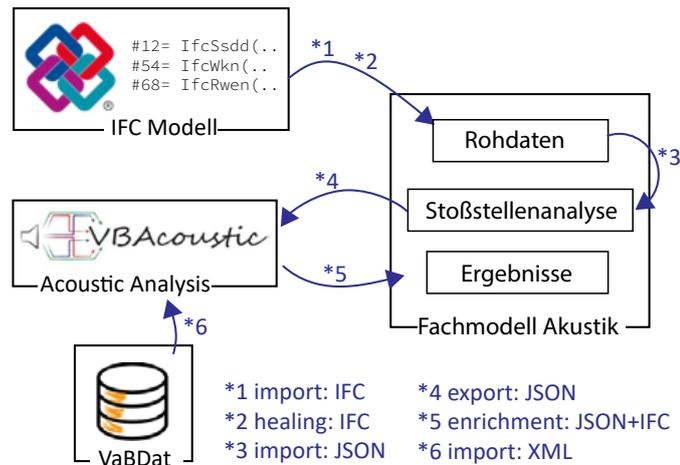


Abbildung 5.47: Datenübergabe im Planungsprozess zwischen dem ursprünglichen IFC-Modell, dem Fachmodell Akustik und dem Berechnungstool *VBAcoustic* für die Schallschutzplanung

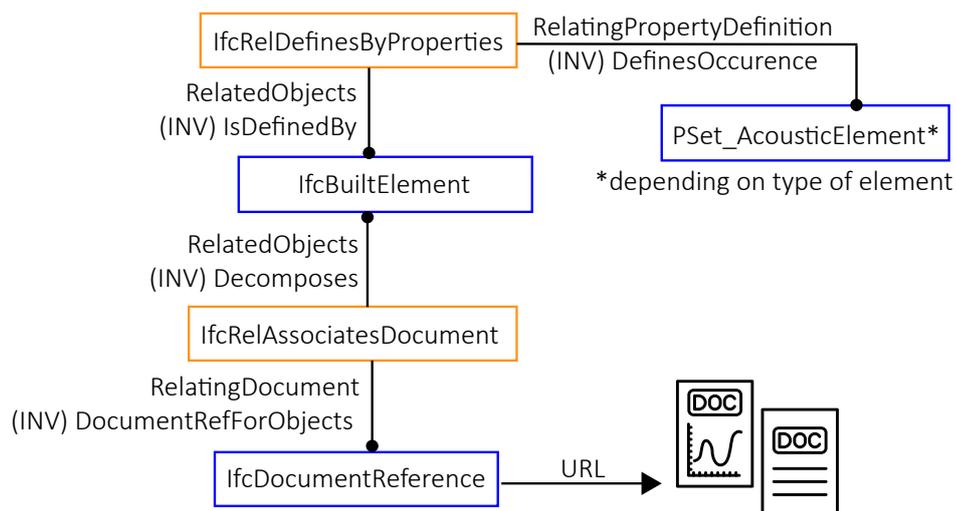


Abbildung 5.48: Alternative Fachmodell Akustik mit angehängten JSON-Dateien zur Beschreibung der Stoßstellen und bauphysikalischer Kennwerte der Übertragungswege

Alternativ zu JSON würde sich auch das Datenformat XML anbieten. XML hat den Vorteil eine bereits etablierte und weit verbreitete Definition des XML-Schemas, abgekürzt XSD, zu haben. JSON gilt als übersichtlicher und hat beim Austausch derselben Daten geringere Dateigrößen, wohingegen XML bei größeren Datenmengen vorteilhafter ist. XML ist insgesamt langsamer beim Auslesen, wobei es von vielen Applikationen unterstützt wird. (GOYAL et al., 2017; HAQ et al., 2015)

Da die Berechnungssoftware *VBAcoustic* Excel-basiert ist, sind beide Datenformate mit denselben Hindernissen verbunden. Tiefer gehende Datenstrukturen kann Excel nicht auslesen, weshalb externe Parser genutzt werden. Diese Schwierigkeiten waren schon von anderen Arbei-

ten bekannt, als Bauteildaten für die Berechnung im XML-Format aus der Bauteildatenbank *VaBdat* importiert wurden (BRUMMER, 2015; ZEHETMAYR, 2021).

Um die Daten nach der Stoßstellenanalyse in das Berechnungstool zu importieren, wurde eine Vorlage für die Strukturierung der JSON-Datei erarbeitet. Das Ergebnis ist in der Abbildung 5.49 zu sehen. Die Abbildung 5.50 zeigt die erweiterte Struktur, nachdem die Schallschutzprognose durchgeführt wurde. Diese Datei wird in das Fachmodell Akustik übertragen. In ihr sind alle relevanten Informationen zu Zwischen- und Berechnungsergebnissen frequenzabhängig enthalten.

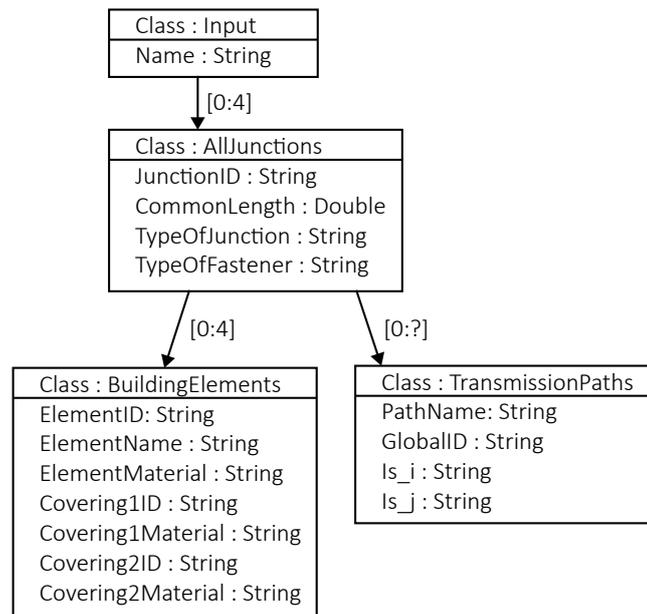


Abbildung 5.49: Aufbau der Datenübergabe nach der Stoßstellenanalyse nach *VBAcoustic*: Struktur der JSON-Datei (links) und eine gekürzte Musterdatei (rechts)

Die Kombination aus IFC-Datei, JSON-Datei mit den Eingangsdaten und JSON-Datei mit den Berechnungsergebnissen ergibt das Fachmodell Akustik. Diese Lösung bietet den großen Vorteil keine Schemaerweiterung zu benötigen. Zudem bleibt die Struktur des IFC-Modells erhalten und das Modell kann in allen gängigen Viewern dargestellt werden. Mit einer Erweiterung kann auch der Inhalt der Dateien ausgelesen werden. Die Kehrseite ist, dass das JSON-Datenformat ebenfalls standardisiert werden müsste. Bis dahin steht jedoch eine funktionale Lösung, die sich als „*Implementor Agreements*“ etablieren kann.

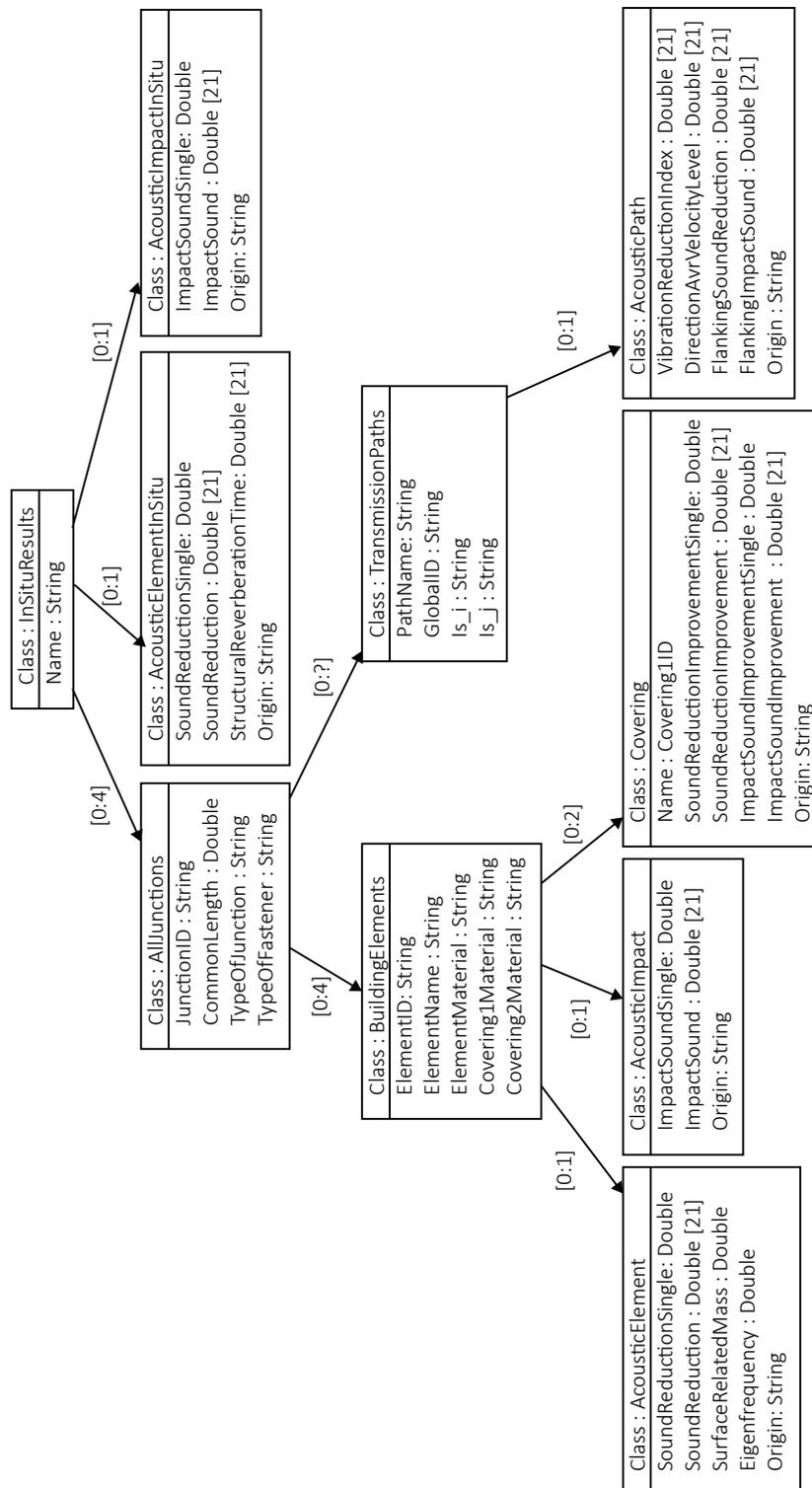


Abbildung 5.50: Datenübergabe der Berechnungsergebnisse aus *VBAcoustic* in das Fachmodell Akustik

5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an ein Gebäudemodell im Format IFC für den Holzbau und die Schallschutzplanung dargestellt, da der übliche Planungsprozess ohne Zugriff auf das Modell der Autorensoftware statt findet. Als Modellierungshilfe wird für unterschiedliche Detaillierungsgrade holzbautypischer Bauteile eine korrekte Semantik in IFC beschrieben. Es zeigt sich, dass aus Autorensoftware erstellte IFC-Modelle ggf. nachbearbeitet werden müssen, um die gewünschte Qualität zu erlangen.

Nach dem Export häufig auftretende Fehler im IFC-Modell können durch *model healing* korrigiert werden: das sind Fehler in der räumlichen Struktur, fehlende Bauteiltypen und fehlerhaft zugeordnete Materialangaben, sowie lose Vorsatzschalen. Einige Prozess des *model healing* sind manuell durchzuführen, da bereits Forschungen in diesem Bereich existieren und diese Methoden nicht implementiert wurden, wie bei der Erstellung der Raumbegrenzungen oder dem Zusammenführen kleinteiliger Bauteile. Wichtig ist vor allem, dass Bauteile korrekt als 3-Schicht-Modell abgebildet werden. Dies ist nicht nur für den Vorfertigungsprozess im Holzbau, sondern auch für die Schallschutzplanung von großer Bedeutung.

Das aufgebesserte IFC-Modell wird anschließend in der Stoßstellenanalyse ausgewertet. Um die flankierenden Bauteile zu einem trennenden Bauteil zu ermitteln, werden semantische und geometrische Informationen genutzt. Geometrische Abfragen ermöglichen durch *junction boxes*, *connection zones* (*short*, *middle*, *border*), Bauteilrichtung (*n*, *m*, *o*), sowie Richtung und den Abstand der Bauteile zueinander (*DD*) die Typisierung der Stoßstellen. Die möglichen Stoßstellentypen wurden bereits in vorangegangenen Arbeiten festgelegt.

Um die für den Schallschutz wichtigen Elemente der Stoßstellen und Übertragungswege zu speichern, wird eine Schemaerweiterung vorgeschlagen. Diese Erweiterung besteht aus der Klasse *IfcAcousticElement* mit den vererbten Klassen *IfcJunction* für die Stoßstelle und *IfcTransmissionPath* für die Übertragungswege, die durch *IfcRelAssociatesPaths* miteinander in Verbindung stehen. Auf diese Weise sind die Übertragungswege klar mit den Stoßstellen und den entsprechenden Bauteilen verbunden. Eine Reihe von *PropertySets* ermöglicht, zusätzlich auch frequenzabhängige Kennwerte zu speichern.

Als alternative Variante werden die akustischen Kennwerte als externe JSON-Datei gespeichert und mit *IfcRelAssociatesDocument* in das IFC-Modell eingebunden. Diese Art der Implementierung ist mit deutlich weniger Aufwand verbunden als eine Erweiterung des IFC-Schemas. Der Nachteil dieser Variante ist jedoch, dass die Stoßstellen und Übertragungswege nicht semantisch vorhanden sind. Dadurch können nur die Eigenschaftensätze *Pset_AcousticElement* und *Pset_AcousticImpact* an Bauteilen sowie *Pset_AcousticElementInSitu* und *Pset_AcousticImpactInSitu* an das trennende Bauteil hinterlegt werden, aber keine *PropertySets* zu den Stoßstellen oder Übertragungswegen selbst.

Kapitel 6

Prototypische Umsetzung

Um die gezeigten Methoden aus Kapitel 5 zu demonstrieren, wurden drei prototypische Anwendungen erstellt. Die Anwendungen und die Beispiele sind in einem Github Repository hinterlegt¹ und öffentlich zugänglich. Die Implementierung erfolgte in einer .Net Umgebung in C# mit Hilfe der Open-Source Library *xBim*². Die Entscheidung für diese Library und Programmiersprache wurde aufgrund ihrer Handlichkeit getroffen, da *xBim* verschiedene Versionen von IFC unterstützt und anhand von *Nuget Packages* leicht in einer Visual Studio Umgebung zu nutzen ist. Zudem zeigte sich eine hohe Aktivität in dem entsprechenden Github Repository und ein aktives Forum bei Fragen und Problemen. Diese Vorteile trafen auf die Alternative *IfcOpenShell* nicht zu. Die Methodik ließe sich jedoch ebenso mit diesem Tool umsetzen.

Die erste Anwendung³ bereitet im Rahmen des *model healing* die IFC-Dateien auf die Stoßstellenanalyse vor. Die zweite Anwendung⁴ beinhaltet die Stoßstellenanalyse selbst, sowie den Export der Informationen für die Stoßstellenberechnung in *VBAcoustic*. Das Tool *VBAcoustic* wurde aus vorherigen Projekten als Version mit frequenzabhängiger Berechnung übernommen. Dieses Tool ist über die TH Rosenheim erhältlich und nicht Teil dieser Arbeit. Die dritte Anwendung⁵ ist ein Viewer für die Erstellung und Darstellung des Fachmodells Akustik. Alle Anwendungen stehen als *Visual Studio* (.sln) zur Verfügung.

Für die Umsetzung wurden unterschiedliche IFC-Modelle verwendet (siehe Tabelle 6.1). Alle Modelle, außer Modell 04, wurden mit *Autodesk Revit* erzeugt und anschließend in IFC exportiert. Das Modell 01 besteht aus losgelösten Stoßstellen und stellt alle Varianten der Stoßstellentypen dar. Modell 02 dient als Fallbeispiel für *model healing*. Modell 03 ist ein fiktives Gebäude und wurde erstellt, um das Verhalten von *Autodesk Revit* beim IFC-Export besser zu verstehen. Aus diesen Erkenntnissen wurde ein Teil des *model healings* erstellt. Modell 04 ist ein Gebäudemodell eines Bürogebäudes, das vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in *Graphisoft ArchiCAD 20* erstellt wurde und öffentlich zugänglich ist⁶. Modell 05 ist das Gebäudemodell des Gebäudes in Holzbauweise *H4* aus Bad Aibling.

¹https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC

²<https://github.com/xBimTeam>

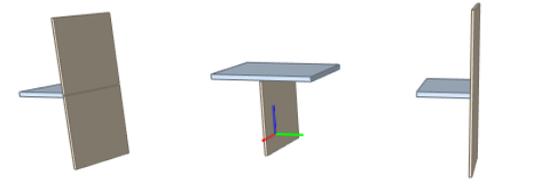
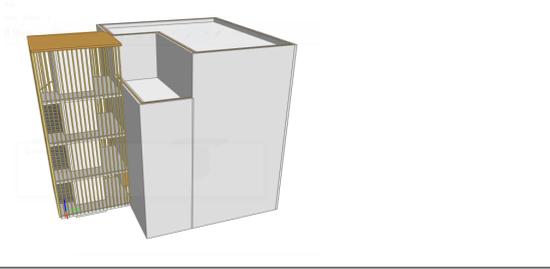
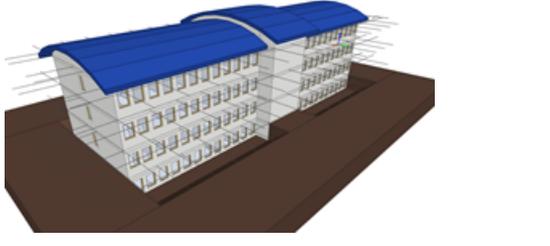
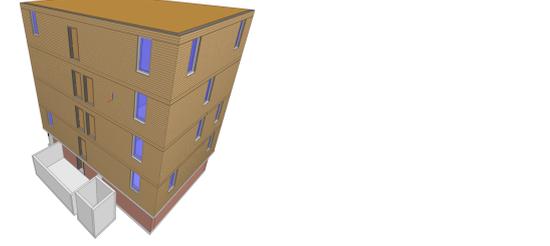
³https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC/tree/main/Prototypes/ModelHealing

⁴https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC/tree/main/Prototypes/JunctionAnalysis/Prototype01

⁵https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC/tree/main/Prototypes/AcousticModel

⁶https://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT_IFC_Examples

Tabelle 6.1: Übersicht der verwendeten Modelle und Fallbeispiele

Modell Beschreibung	Abbildung
01 Übersicht aller Stoßstellentypen	
02 Beispiel für <i>model healing</i> einer Unterdecke	
03 Referenzgebäude für <i>model healing</i>	
04 Fallbeispiel <i>KIT Office Building</i>	
05 Fallbeispiel <i>H4</i> aus Bad Aibling	

6.1 Model healing

Ziel der ersten prototypischen Anwendung ist das *model healing*, das die Grundqualität des IFC-Modells vor der Stoßstellenanalyse sicherstellt. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, ein perfektes IFC-Modell ohne Kollisionen zu erstellen. Das *model healing* wird anhand kurzer Ausschnitte aus IFC-Dateien beispielhaft gezeigt, da nicht alle Fehler in allen Dateien auftraten. Fallbeispiele sind im Github Repository⁷ hinterlegt.

Das erste Beispiel betrifft die Referenzierung von Bauteilen in Geschossen und wurde an Modell 03 (siehe Tabelle 6.1) geprüft. In diesem Modell enthielten die Fassadenbauteile keine Referenzen auf die Geschosse, wie es in Kapitel 5.3.1 verlangt wird. Abbildung 6.1 zeigt wie die IFC-Datei erfolgreich erweitert wurde. Anschließend wurden die Referenzierungen, die pro Geschoss mehrfach vorhanden waren, über die Klasse *IfcRelReferencedInSpatialStructure* zu einer je Geschoss vereint (Abbildung 6.2).

Teil des *model healing* ist auch die Überprüfung der Elementtypen (*IfcElementType*) und des zugeordneten Materialaufbaus (siehe Kapitel 5.3.2). Abbildung 6.3 zeigt schematisch einen Ausschnitt aus dem IFC-Modell vor und nach dem *model healing* für eine Wand im Modell 04.

Die letzte Abfrage beim *model healing* betrifft das Zusammenfügen kleinteiliger Bauteile. Da, wie in Kapitel 5.3.4 bereits erläutert, eine automatisierte Methode dazu bereits existiert (BELSKY et al., 2015), wird nur eine semi-automatische Lösung verwendet. Sind die Bauteile bekannt, die zusammengefügt werden sollen, können die GUIDs angegeben werden und es entsteht eine Aggregation. Mit Modell 02 wird die Aggregation einer Vorsatzschale an einem Bauteil demonstriert (siehe Kapitel 5.3.3). Die Abbildung 6.4 zeigt schematisch einen Ausschnitt aus dem IFC-Modell vor und nach dem *model healing*: Hier wird die Unterdecke als *IfcCovering* der Decke *IfcSlab* zugeordnet. Die Abbildung 6.5 zeigt einen Fall aus Modell 01, bei dem zwei parallele Wände zu einer Wand vereinigt werden. In beiden Fällen werden jeweils die Verweise auf Geschosse auf das neue übergeordnete Bauteil übertragen.

⁷https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC/tree/main/UseCases%20Examples/ModelHealing

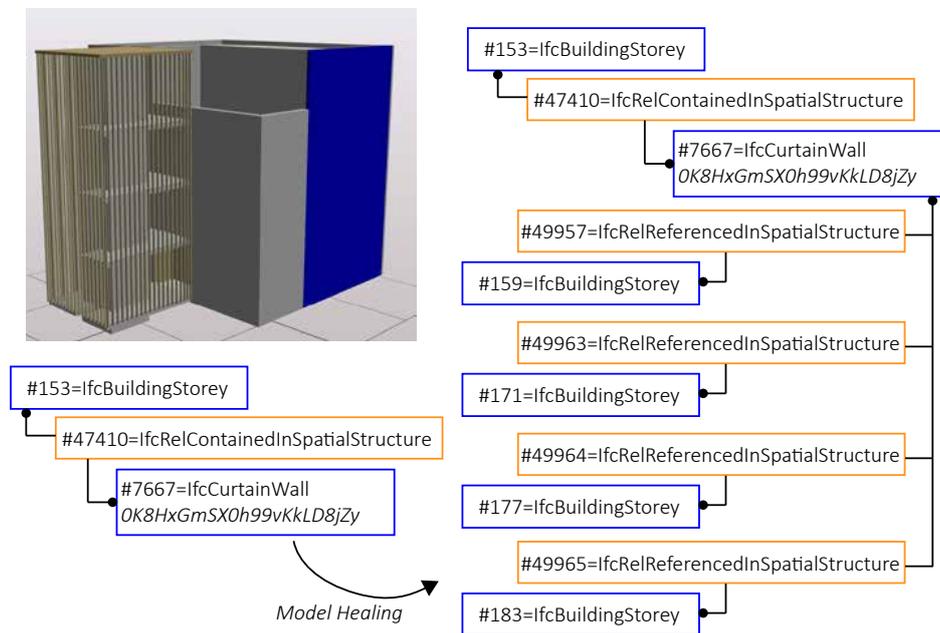


Abbildung 6.1: Beispiel von *model healing* im Modell 03: Ergänzung von Referenzen zu Geschossen für Bauteile, die über mehrere Stockwerke gehen am Beispiel eines Fassadenbauteils *IfcCurtainWall*

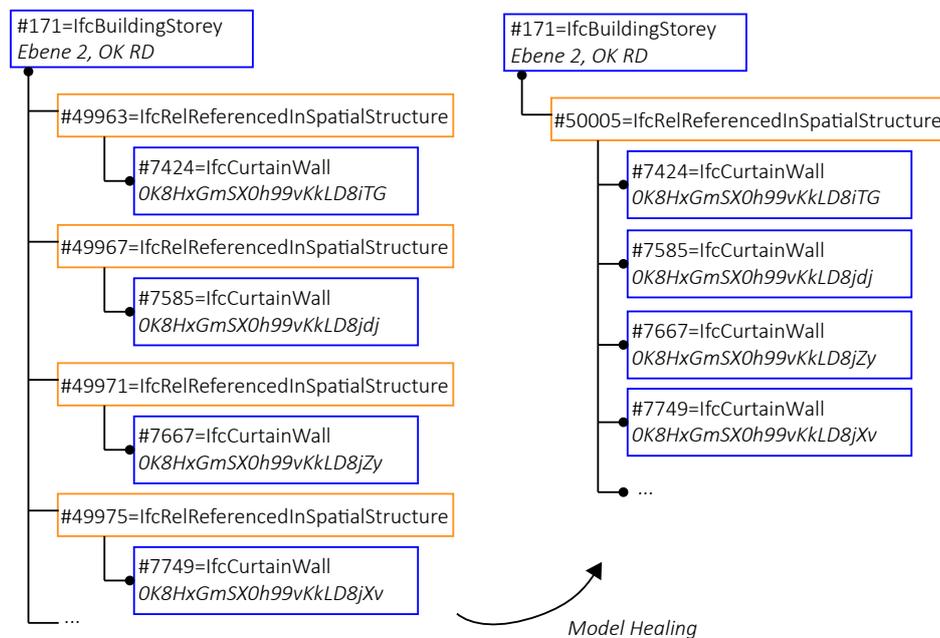


Abbildung 6.2: Beispiel von *model healing* im Modell 03: Reduzierung der IFC-Datei durch Zuweisung von nur einer *IfcRelReferencedInSpatialStructure* pro Geschoss *IfcBuildingStorey*

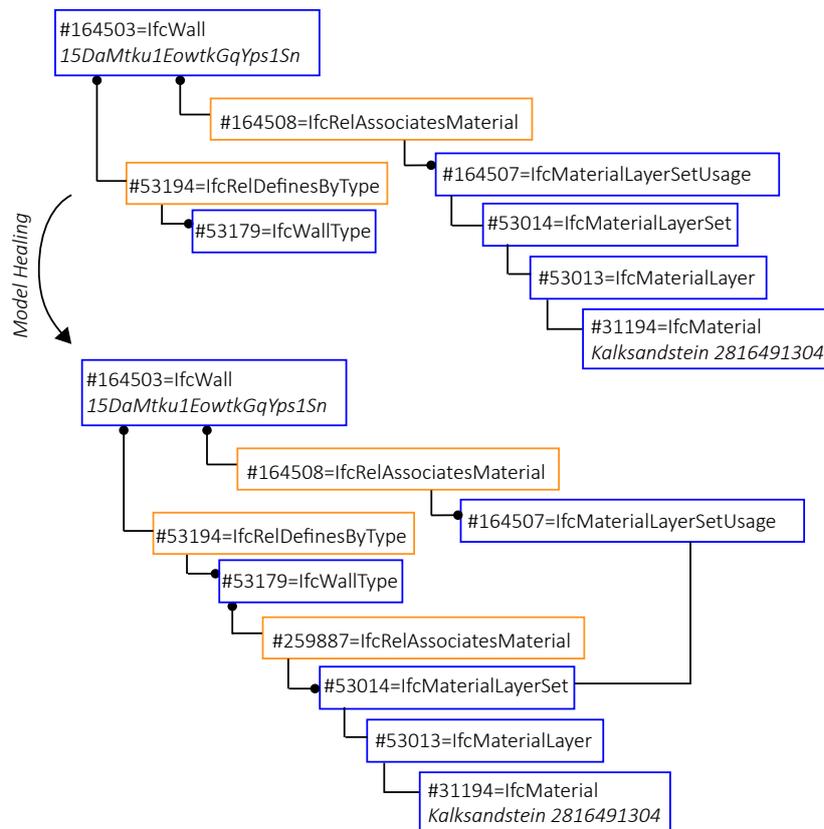


Abbildung 6.3: Beispiel von *model healing* im Modell 04: Ergänzung von Bauteiltypen für eine Wand *IfcWall*

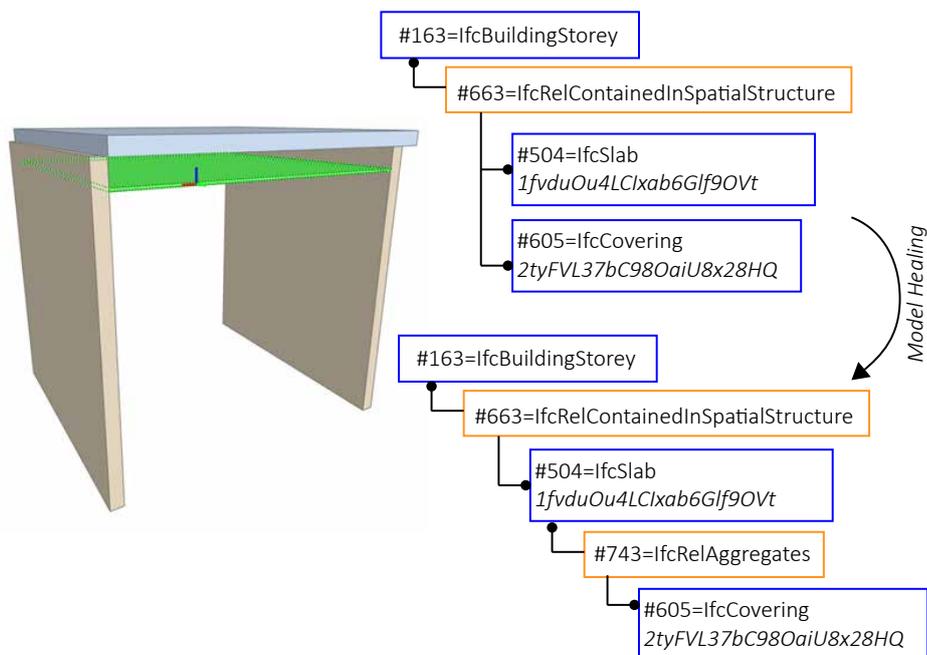


Abbildung 6.4: Beispiel von *model healing* im Modell 02: Zuordnung einer Unterdecke *IfcCovering* zu einem Bauteil *IfcSlab*

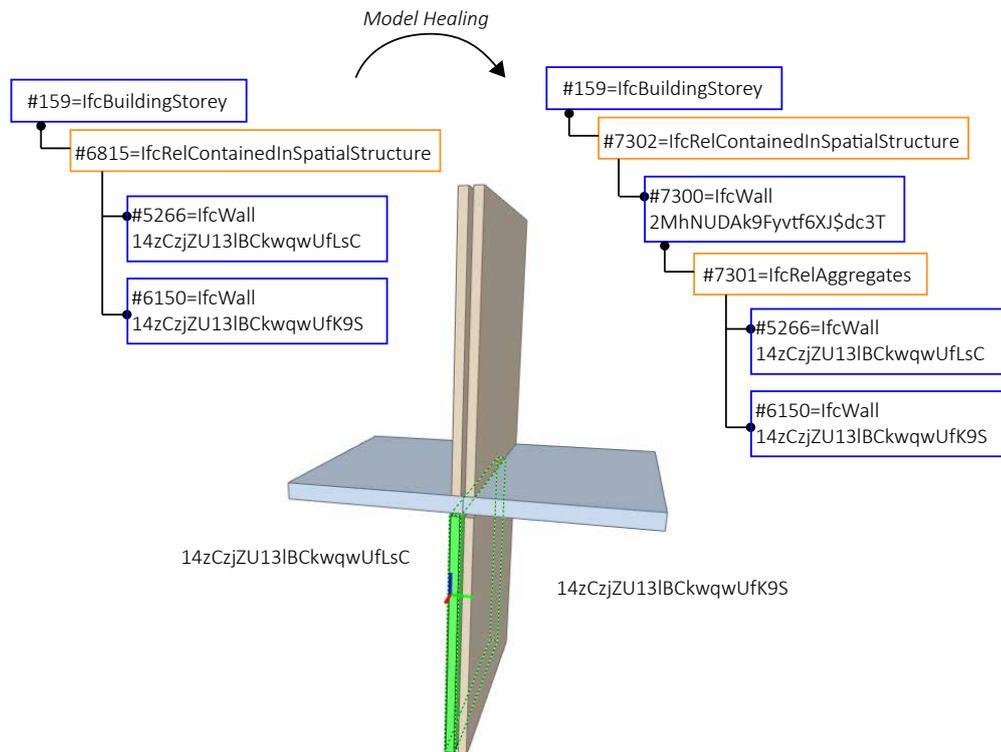


Abbildung 6.5: Beispiel von *Model healing* im Modell 01: Zusammensetzen einer Wohnungstrennwand aus zwei Einzelteilen mit der Klasse *IfcRelAggregates*

6.2 Stoßstellenanalyse

Die zweite prototypische Anwendung beinhaltet die Stoßstellenanalyse selbst. Sie wird ebenfalls an den verschiedenen Modellen aus Tabelle 6.1 durchgeführt, die im Github Repository⁸ zur Verfügung stehen. Die Verifizierung erfolgt anhand des Modells 01, in dem einzelne Stoßstellenvarianten modelliert sind. Als nächstes erfolgt die Validierung anhand von Gebäudemodellen: dem Modell des KIT (Modell 04) und dem Modell des *H4* aus Bad Aibling (Modell 05).

6.2.1 Verifizierung der Stoßstellen

Um die Funktionsweise der Stoßstellenanalyse zu verifizieren, wurde Modell 01 aus Tabelle 6.1 verwendet. In dieser Datei wurde für jede Stoßstelle ein Element als trennendes Element gewählt, um den Stoßstellentyp wie in Abbildung 3.5 aus Kapitel 3.4.1 zu bestimmen. Das Ergebnis für die Trennwand (GUID: 1eyMdikyX8kw63rychh_Ii) mit der Stoßstelle *Th1-24* ist nachfolgend dargestellt. Die Ausgabe des Stoßstellentyps erfolgt über die Konsolenausgabe im Prototypen, wie in Abbildung 6.6 gezeigt. Alle weiteren Ergebnisse sind in Anhang F

⁸https://github.com/CamChatHel/Acoustic_IFC/tree/main/UseCases%20Examples

dargestellt und die Testdatei ist auf dem Github Repository gespeichert. Es wurden auch Stoßstellen mit Wohnungstrennwänden geprüft, wie sie in Abbildung 6.5 dargestellt sind. Die Verifizierung aller vorgegebenen Stoßstellentypen war erfolgreich.

Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_Ii

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

Middle,None,None,None

DirectionElements:

n,m,None,None

Junction Type:

Th1d24

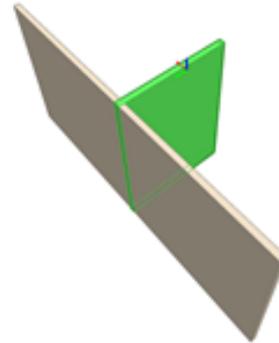


Abbildung 6.6: Ergebnis der Stoßstellenverifizierung (links) für die Wand mit GUID 1eyMdikyX8kw63rychh_Ii und Darstellung der entsprechenden Stoßstelle aus der IFC-Datei (rechts)

6.2.2 KIT Office Building

Die erste Validierung der Stoßstellenanalyse wurde anhand von Modell 04, dem Gebäudemodell des KIT, durchgeführt. Abbildung 6.7 zeigt die untersuchte Situation im Gebäudemodell inkl. der Ergebnisse aus der Stoßstellenanalyse. Als trennendes Bauteil wurde eine Bürowand verwendet (GUID: 15DaMtku1EowtkGqYps1Sn). Tabelle 6.2 listet die Ergebnisse in Form von flankierenden Bauteilen mit den entsprechenden Stoßstellentypen auf. Der erstellte Prototyp ermittelte korrekterweise die flankierenden Bauteile und die Stoßstellen in den *Junction Boxen* 1, 3, 4 und 6. In diesem Modell wurden alle Bauteile als einschalige Bauteile modelliert, was die Stoßstellenanalyse vereinfacht. Der Materialaufbau und die Unterteilung in unterschiedliche Schichten musste nicht berücksichtigt werden. Hier war die Stoßstellenanalyse erfolgreich, solange die Geometrie der Bauteile korrekt ausgebildet war.

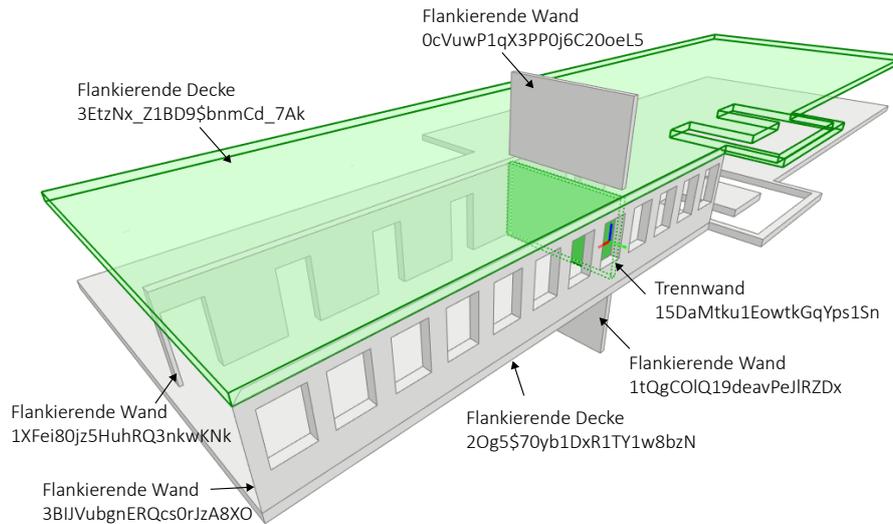


Abbildung 6.7: Fallbeispiel Modell 04 (*KIT Office Building*): Trennwand mit flankierenden Elementen, weitere Ergebnisse in Tabelle 6.2

Tabelle 6.2: Fallbeispiel Modell 04 (*KIT Office Building*): Ergebnisse der Stoßstellenanalyse für die Situation aus Abbildung 6.7

Trennelement: Wand 15DaMtku1EowtkGqYps1Sn			
Stoßstelle	flankierende Bauteile		Stoßstellentyp
1	Wand:	1XFei80jz5HuhRQ3nkwKNk	Th1-24
2	Wand:	3BIJVubgnERQcs0rJzA8XO	Th1-24
3	Decke:	2Og5\$70yb1DxR1TY1w8bzN	Xv2-13-4
	Wand:	1tQgCOIQ19deavPeJIRZDx	
4	Decke:	3EtzNx_Z1BD9\$bnmCd_7Ak	Xv2-13-4
	Wand:	0cVuWP1qX3PP0j6C20oeL5	

6.2.3 Wohngebäude H4

Für die zweite Validierung wird das Modell 05 aus Tabelle 6.1 verwendet. Dieses Gebäude wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten der TH Rosenheim als Musterbeispiel verwendet und ist daher auch in dieser Arbeit vertreten. Zu diesem Gebäude gibt es vom *ift Rosenheim* sowohl eine schalltechnische Stellungnahme, als auch Messungen am Bau zum Schallschutz der Trenndecke und der Wohnungstrennwand (HESSINGER & BACHER, 2010; HESSINGER & RABOLD, 2010). Diese Ergebnisse, sowie die genauen Bauteilaufbauten und Grundrisse, sind im Anhang B dokumentiert.

In diesem Modell wurde die Bauteilsituation einer Trenndecke zwischen den Wohneinheiten im 1. und 2. OG, sowie eine Wohnungstrennwand zwischen zwei Wohneinheiten untersucht (siehe Abbildung 6.8). Die Ergebnisse der Stoßstellenanalyse für die Trenndecke sind in Abbildung 6.9 und Tabelle 6.3 dokumentiert. Für die Stoßstellenanalyse der Wohnungstrennwand sind die Ergebnisse in Abbildung 6.10 und Tabelle 6.4 hinterlegt.

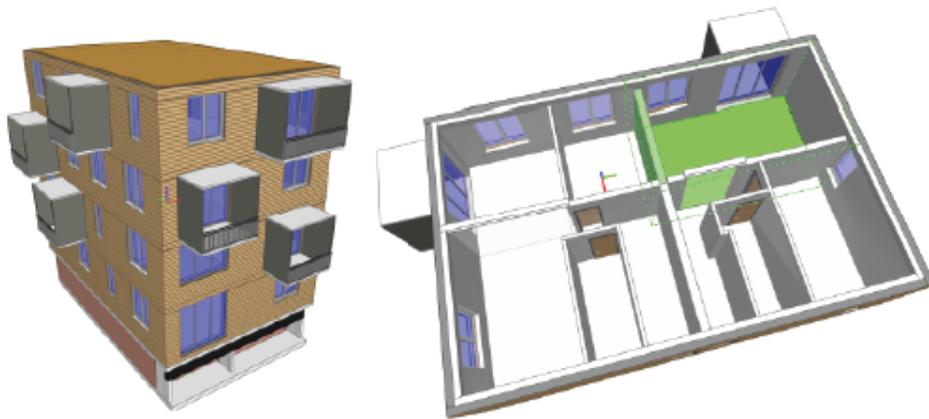


Abbildung 6.8: Modell 05: H_4 mit den gewählten trennenden Elementen

Dieses Modell machte die Schwierigkeiten der Stoßstellenanalyse deutlich. Hier wurden viele Details modelliert, wie z. B. Randstreifen der Wände oder Unterzüge. Genau diese Elemente werden im IFC-Modell jedoch als eigenständige *IfcWall* instanziiert, statt eine Aggregation mit einem übergeordneten Bauteil zu bilden. Genauso die Fassadenverkleidung, die aus vielen Einzelteilen besteht. Der Fußbodenaufbau wurde ebenfalls nicht korrekt als *IfcCovering* erstellt und musste manuell im Modell korrigiert werden.

Eine Herausforderung stellten zum Teil auch die Balkone dar, da sie im IFC-Modell genauso als *IfcSlab* abgebildet sind, wie andere Decken innerhalb des Gebäudes auch. Die Zuweisung der Information *IsExternal* war im Export aus *Revit* für alle Bauteile fehlerhaft, sodass auch das nachträglich manuell ausgebessert werden musste.

Eine korrekte Stoßstellenanalyse war auch mit diesem IFC-Modell möglich, nachdem ein ausführliches *model healing* statt gefunden hatte. Hier wurde der Einfluss der Exportmöglichkeiten aus der Autorensoftware auf die Modellqualität und somit die Möglichkeiten der Analyse deutlich.

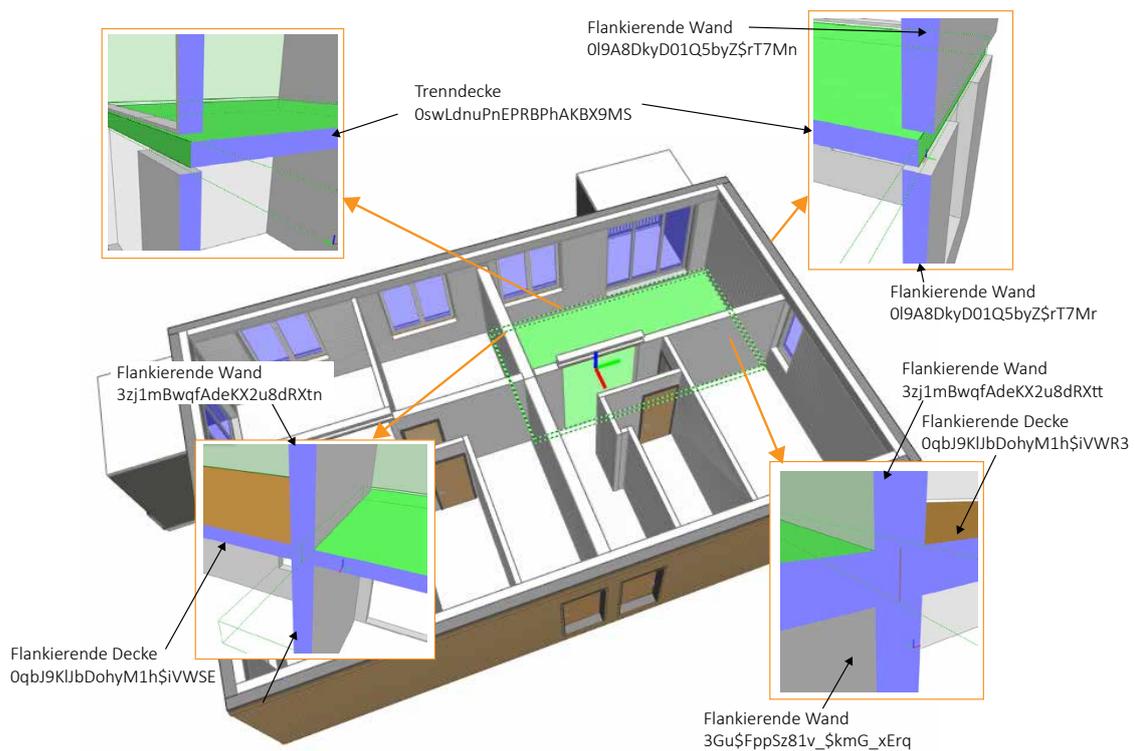


Abbildung 6.9: Fallbeispiel Modell 05 (H_4 , Bad Aibling): Trenndecke mit flankierenden Elementen, weitere Ergebnisse in Tabelle 6.3

Tabelle 6.3: Fallbeispiel Modell 05 : Ergebnisse der Stoßstellenanalyse für die Trenndecke zwischen zwei Wohneinheiten aus Abbildung6.9

Trennelement: Decke 0swLdnuPnEPRBPhAKBX9MS

Stoßstelle	flankierende Bauteile	Stoßstellentyp
1	Wände: 3Gu\$FppSz81v_ \$kmG_xEpz 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXtn Decken: 0qbJ9KlJbDohyM1h\$iVWSE	Xv2-1:3-4
2	Wände: 019A8DkyD01Q5byZ\$rT7Mx 019A8DkyD01Q5byZ\$rT7Mn	Tv2-1-4
3	Wände: 019A8DkyD01Q5byZ\$rT7Mr 019A8DkyD01Q5byZ\$rT7Mh	Tv2-1-4
4	Wände: 3Gu\$FppSz81v_ \$kmG_xErq 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXtt Decken: 0qbJ9KlJbDohyM1h\$iVWR3	Xv2-1:3-4

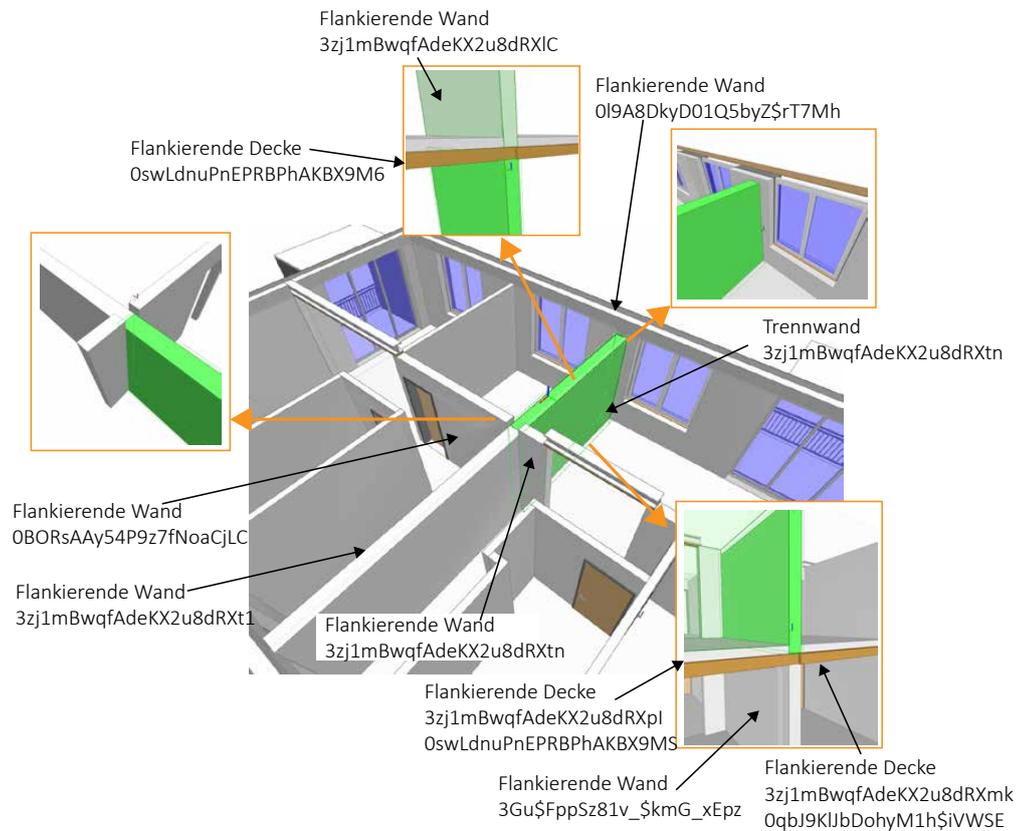


Abbildung 6.10: Fallbeispiel Modell 05 (H_4 , Bad Aibling): Wohnungstrennwand mit flankierenden Elementen, weitere Ergebnisse in Tabelle 6.4

Tabelle 6.4: Fallbeispiel Modell 05 (H_4 , Bad Aibling): Ergebnisse der Stoßstellenanalyse für die Situation aus Abbildung 6.10

Trennelement: Wohnungstrennwand 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXtn

Stoßstelle	flankierende Bauteile	Stoßstellentyp
1	Wände: 0l9A8DkyD01Q5byZ\$rT7Mh	Th1-24
2	Wände: 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXtr 0BORsAAy54P9z7fNoaCjLC 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXt1	
3	Wand: 3Gu\$FppSz81v_\$kmG_xEpz Decken: 0qbJ9KlJbDohyM1h\$iVWSE 0swLdnuPnEPRBPhAKBX9MS	Xv2-1:3-4
4	Wand: 3zj1mBwqfAdeKX2u8dRXIC Decken: 0swLdnuPnEPRBPhAKBX9M6	Xv2-13-4

6.3 Erstellung des Fachmodells

Die dritte Anwendung zeigt über ein Userinterface, das auf Basis des *xBim Viewers* aufgebaut ist (*XbimWindowsUI*), die Erstellung und Darstellung des Fachmodell Akustik durch die Anreicherung des IFC-Modells mit externen JSON-Dateien. An den Funktionen des Viewers selbst wurden keine Änderungen vorgenommen. Es wurden jedoch einige fachspezifische Funktionen ergänzt. Über die GUID oder die Auswahl eines Bauteils kann abgerufen werden, ob das Bauteil über eine JSON-Datei verfügt und zusätzlich kann dem Bauteil eine JSON-Datei hinzugefügt werden.

Die Abbildung 6.11 zeigt schematisch einen Ausschnitt aus dem IFC-Modell für die Trenndecke im Gebäudemodell des *H4* aus Bad Aibling (Modell 05, siehe Tabelle 6.1). Dabei wird der Trenndecke *IfcSlab* über die Klasse *IfcRelAssociatesDocument* eine externe JSON-Datei eingebunden. In diesem Beispiel wurde eine Datei mit den Eingangswerten vor der Berechnung in *VBAcoustic* (*#98072=IfcDocumentReference, Name = JunctionInputData*) und eine Datei mit den Berechnungsergebnissen (*#98079=IfcDocumentReference, Name = JunctionResults*) hinterlegt.

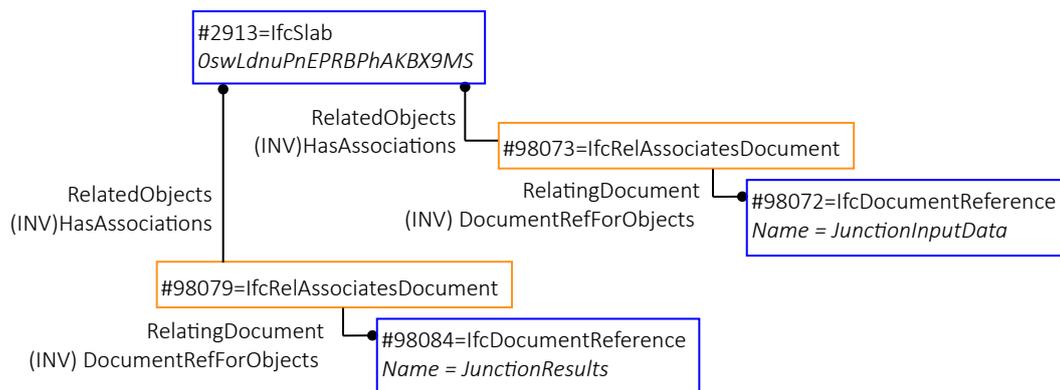


Abbildung 6.11: Ausschnitt aus dem Fachmodell Akustik für das Modell 05: Referenzierung der JSON-Dateien für das Trennelement Decke für die Eingangswerte vor der Berechnung in *VBAcoustic* (*JunctionInputData*) und für die Berechnungsergebnisse (*JunctionResults*)

Abbildung 6.12 zeigt wie die Daten aus einem Fachmodell analysiert werden können. Durch die Auswahl des Bauteils werden die referenzierten Dokumente abgerufen. Da die Struktur der Dokumente bekannt ist, können die Stoßstelleninformationen ausgelesen und auch Berechnungsergebnisse für das jeweiligen Bauteil tabellarisch dargestellt werden. Dieser Prototyp stellt nur einen ersten Vorschlag dar und soll aufzeigen, dass die Daten verfügbar sind.

The screenshot displays a software interface for acoustic analysis. On the left, there is a toolbar with icons for file operations and a 3D view of a building facade. The main area shows a 3D model of a building facade with a grid overlay. Below the model, there is a text area containing JSON data and a table of results.

JSON Data:

```

    In [FC C:\Users\chica426\Documents\GitHub\
    Users\chica426\Documents\GitHub\
    YHRo_H4\2022\2H16305\gebruesse.json
    YHRo_H4\2021_0830_0hRo_H4_JournalPaper02.0
    ZohneBalkon_JunctionInputData_GewLdnuPhEPRPhAKBXSMS
    LdnuPhEPRPhAKBXSMS_Pathname
    Add json file to element json file added to element GUID: 0ewLdnuPhEPRPhAKBXSMS
    Load VBAcoustic Results from extern
    Open Input Data from internal JSON file
    C:\Users\chica426\Documents\GitHub\ Dissertation Modelle\UseCases
    \YHRo_H4\2022\2H16305\gebruesse.json
    C:\Users\chica426\Documents\GitHub\ Dissertation Modelle\UseCases
    \YHRo_H4\2021_0830_0hRo_H4_JournalPaper02.0
    ZohneBalkon_JunctionInputData_GewLdnuPhEPRPhAKBXSMS.json
    Calculation results from VBAcoustic Trennelement:
    GewLdnuPhEPRPhAKBXSMS
    junctiontype: Xv2d1c344
    path name: DfElement: 1: 0ewLdnuPhEPRPhAKBXSMS_element: 30u
    $Fpp5s81v_$kmG_xFbz
    path name: FdElement: 1: 30u$Fpp5s81v_$kmG_xFbz_element: j:
    0ewLdnuPhEPRPhAKBXSMS
    path name: FdElement: 1: 30u$Fpp5s81v_$kmG_xFbz_element: j:
    30u$Fpp5s81v_$kmG_xFbz_element: j:
    junctiontype: TV2d1844
    path name: DfElement: 1: 0ewLdnuPhEPRPhAKBXSMS_element: j:
    0ewLdnuPhEPRPhAKBXSMS
  
```

Table of Results:

	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz					
Wert																						
Calcul...																						
Rnw	0	23	31.5	41.2	45.4	48	49	49.8	51.1	51.7	51.8	51.8	51.3	52.8	57.6	61.7	64.3	66.4	69.6	71	72.4	
Lnw	43.9	55.8	52.1	49.9	46.9	47.2	45.6	45.3	47.3	45.6	43.4	41.6	39.6	35	31.6	32.4	32.3	31.6	31.6	14.7	15	15.3
Kfj	Xv2d1c344_path...	9.4	10.1	10.1	10.4	10.7	11.1	11.4	11.7	12	12.4	12.7	13	13.4	13.4	14	14.4	14.7	14.7	14.7	15	15.3
Kk	Xv2d1c344_path...	8.4	10.1	10.4	10.7	11.1	11.4	11.7	12	12.4	12.4	12.7	13	13.4	13.4	14	14.4	14.7	14.7	14.7	15	15.3
Kk	Xv2d1c344_nath...	18.7	19.4	19.7	20.1	20.4	20.7	21	21.4	21.7	22	22.4	23	23.4	23.7	24	24.3	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7

Abbildung 6.12: Ausschnitt aus Viewer zur Darstellung des Fachmodells mit der Auswahl des Bauteils über GUID und den ausgelesenen Informationen aus angehängten JSON-Dateien

6.4 Zusammenfassung prototypische Umsetzung

Die prototypische Umsetzung erfolgt in *C#* einer *.Net* Umgebung mit Hilfe der Open-Source Library *xBim*. Insgesamt wurden drei separate Anwendungen erstellt, um das *model healing* klar von der Stoßstellenanalyse und der Erweiterung des IFC-Modells zum Fachmodell abzugrenzen. All diese Anwendungen zeigen, dass bei ausreichender Modellqualität die gezeigten Methoden eine Analyse der Stoßstellentypen ermöglichen.

Die gewünschte Modellqualität kann in vielen Fällen durch eine Kombination aus guter Modellierung in der Autorensoftware, sinnvollen Exporteinstellungen und den gezeigten Methoden des *model healings* erreicht werden. Allerdings werden sich bei komplexen Gebäuden immer wieder neue Herausforderungen ergeben, die im der IFC-Datei behoben werden müssen. Hier ist es von Vorteil mit Tools wie dem *xBim Toolkit* die IFC-Modelle direkt verändern zu können.

Es ist zu betonen, dass keine besonderen Maßnahmen zur Beschleunigung der Methodik untersucht wurden. Wie sich das bei größeren, detailreichen Modellen auswirkt, wurde nicht untersucht. Zudem funktioniert die vorgestellte Lösung der Stoßstellenanalyse bisher nur über Eingaben in der Konsole und sollte für die Praxisanwendung noch nutzerfreundlich aufbereitet werden.

Kapitel 7

Auswertung und Diskussion

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit war, dass das Auslesen und Abstrahieren der Eingangsdaten für die Schallschutzplanung im Holzbau aus einem digitalen Gebäudemodell im offenen Datenstandard realisierbar ist. Dazu wurde eine Methode vorgestellt, wie aus einem BIM-Modell im IFC-Format ausreichend Informationen für die Schallschutzplanung extrahiert werden können, wobei der Schwerpunkt auf der Identifizierung und Interpretation der Stoßstellen lag.

Zusätzlich wurde diese Methode in einen open BIM Planungsprozess integriert, um Daten nicht nur für die Schallschutzplanung auszulesen, sondern auch berechnete Daten zu dokumentieren. Daraus entstand das Fachmodell Akustik, das aus einer IFC-Datei zur Beschreibung des Gebäudes sowie JSON-Dateien zur Dokumentation der schalltechnischen Daten besteht.

Die Literaturrecherche zeigte, dass es für den Holzbau von Vorteil ist, in der frühen Planungsphase bereits konstruktive Details zu lösen. Auch die Schallschutzplanung für den Holzbau eignet sich für eine Verlagerung in frühe Planungsphasen und lässt sich dadurch in einen open BIM-Prozess integrieren. Allerdings zeigte sich, dass weder für den Holzbau noch für die Schallschutzplanung die Integration in den open BIM-Prozess bisher in der Praxis realisiert wurde. Die Holzbaubranche nutzt zwar bereits seit vielen Jahren erfolgreich dreidimensionale CAD/CAM-Modelle in hohen Detaillierungsgraden, ohne jedoch mit BIM-Methoden zu arbeiten. Auch für die Schallschutzplanung ist die Anwendung von BIM noch nicht geläufig.

Für die Schallschutzplanung könnten aktuell bereits einige Eingangsdaten aus dem Architekturmodell ausgelesen werden, allerdings bisher keine Stoßstellentypen. Die erarbeitete Methode zeigt, dass bei qualitativ hochwertigen IFC-Modellen alle Voraussetzungen erfüllt sind, um mit semantischen und geometrischen Analysen die flankierenden Bauteile des Trennelements sowie die zugehörigen Stoßstellentypen zu ermitteln.

Die vorgestellte Methode zur Ermittlung der Stoßstellentypen über die Geometrie und Position der Bauteile ist unabhängig von IFC nutzbar. Die semantische Vorfilterung jedoch beruht auf dem IFC-Schema und kann somit nur bedingt für andere Datenformate übernommen werden. Allerdings können die einzelnen Schritte abstrahiert und auf die Datenstruktur anderer Formate angewendet werden, wenn diese mit ähnlichen Informationen versehen sind. Die Vorfilterung unterliegt am stärksten den Einschränkungen der Modellqualität.

Die semantische Darstellung einer Stoßstelle im Modell bietet einen erheblichen Mehrwert. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Möglichkeiten erarbeitet, die Stoßstellen

und Übertragungswege in IFC darzustellen. Im Vergleich von Aufwand und Nutzen wurde eine Umsetzung gewählt, bei der das Fachmodell Akustik aus einem für die Stoßstellenanalyse aufbereiteten IFC-Modell und separaten JSON-Dateien besteht. Hier ist in Zukunft eine Verknüpfung zwischen Bauteildatenbanken, akustischen Datenbanken und den Berechnungs- oder Messergebnissen eines Projektes denkbar, wie sie in *Linked Data*-Ansätzen verwendet wird. Die in dieser Arbeit erarbeitete Datenstruktur kann als Grundlage für eine solche Entwicklung dienen.

Bisher ist es nicht notwendig, alle Informationen des Fachmodells Akustik in das zentrale Architektur- oder Koordinationsmodell zurückzuführen. Empfohlen wird, für andere Planer relevante Information, wie etwa die bauakustischen Anforderungen der Bauteile, abzulegen. Alle weiteren Informationen und Berechnungsergebnissen sollten ebenfalls nachvollziehbar gespeichert werden. Dazu ist das modellbasierte Speichern von Daten geeignet. So werden alle Informationen für den nachfolgenden Bearbeiter nachvollziehbar dokumentiert und die Ergebnisse aus Berechnungen können mit Anforderungen abgeglichen werden. Zusätzlich können später am Bau durchgeführte Messungen ebenfalls auf diese Art hinterlegt werden. So entsteht ein Modell, das den IST-Zustand sinnvoll dokumentiert und auch nach Jahren noch Planungsentscheidungen nachvollziehbar dokumentiert.

Für die Arbeit mit den IFC-Modellen wurde die Open-Source Bibliothek *xBim* verwendet, da nicht nur die Nutzung leichter, sondern die Dokumentation deutlich größer war als bei ähnlichen Tools. Im Nachhinein stellte sich heraus, dass die Open-Source Bibliothek *IfcOpenShell* mit *C++*-Kern besser für die Erzeugung eines neuen IFC-Schemas geeignet gewesen wäre. Ein weiterer Vorteil von *IfcOpenShell* ist, dass es in vielen Tools auf Python Basis integriert werden kann. Es könnte für die Weiterentwicklung des Prototypen eine Alternative sein. Die Anwendung der Bibliothek auf Python-Basis ermöglicht allerdings keine Änderung im Schema. Dazu muss *IfcOpenShell* mit *C++* verwendet werden.

Die Modellqualität und der Detaillierungsgrad spielen eine große Rolle im open BIM-Planungsprozess. Der Detaillierungsgrad wird von verschiedenen Institutionen unterschiedlich definiert und ist vor allem über Tabellen und Abbildungen festgelegt. Er muss für das jeweilige Datenformat interpretiert werden. Für IFC-Modelle bedeutet das, dass neben einer tiefen Kenntnis des IFC-Schemas auch die Möglichkeit bestehen muss, IFC-Modelle unabhängig von der Autorensoftware zu bearbeiten. In der Autorensoftware fehlt bisher die Möglichkeit, den Detaillierungsgrad für den Export in das IFC-Modell anzugeben. Auch die Exporteinstellungen über MVD kommen an ihre Grenzen, wenn für spezifische Anwendungen eigentlich eine Kombination aus verschiedenen Exporteinstellungen notwendig wäre. So bleibt nur der Weg, die Modelle über *model healing* aufzubessern und mit *semantic enrichment* um Informationen zu erweitern.

Zusätzlich werden Angaben zum Material im Gebäudemodell nur über Text angegeben. Auch in der Autorensoftware werden herstellereigene oder eigene Bezeichnungen verwendet. In

diesem Bereich sollten sich die Verbände der Holzbauunternehmen aktiv in Standardisierungsvorgängen wie *UniClass*, *Omniclass* oder dem *buildingSMART data dictionary* beteiligen. Durch diese Standardisierung könnte der Zugriff auf Datenbanken leichter automatisiert werden.

Die gezeigten Ergebnisse sind sehr spezifisch auf den Schallschutz im Holzbau ausgerichtet. Da sich die Stoßstellensituation für den Massivbau nicht als derart komplex darstellt, können die Ergebnisse jedoch auch hierfür genutzt werden. Auch im Massivbau ist für die Schallschutzplanung der semantische Aufbau der Bauteile in drei Schichten am wichtigsten. Auf dieser Grundlage lässt sich die Analyse gut verallgemeinern.

Da bisher keine Stoßstellen in IFC-Modellen semantisch angegeben sind, liegt der Mehrwert dieser Arbeit nicht nur bei der Methodik zur Erkennung von Stoßstellen, sondern auch in der Definition einer Schemaerweiterung um die Stoßstellen in nachfolgenden IFC-Versionen zu implementieren. Die Angabe von Stoßstellen im IFC-Modell könnte nicht nur für die Schallschutzplanung, sondern auch für andere Bereiche der Bauphysik wie z. B. dem Wärmeschutz bei Wärmebrücken an Kanten und Stößen wichtig sein. Auch die Tragwerksplanung könnte durch diese Informationen profitieren. Als Verallgemeinerung des Fachmodell Akustik ist ein übergreifendes Fachmodell für die Bauphysik denkbar. Dies würde die integrale Planung und den Austausch zwischen den Planern erleichtert.

Kapitel 8

Fazit

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die modellbasierte Stoßstellenanalyse einen großen Mehrwert bei der Schallschutzplanung bringt. Die Optimierung der Datenübergabe ohne Informationsverluste ist in der Bauplanung eine der größten Herausforderungen. Die Bauphysik und insbesondere der Schallschutz müssen sich auch in Zukunft an die neuen Methoden anpassen. Hier ist es wichtig, bereits jetzt die Ingenieure der Zukunft an das Thema (open) BIM heranzuführen. Lösungsvorschläge, aber vor allem nützliche Tools, die im Alltag die Vorteile der BIM-Methodik zeigen, können einen Weg darstellen, die Hemmschwelle zur Anwendung von BIM zu senken.

Speziell im Holzbau bieten BIM-Modelle als Grundlage für die CAD/CAM-Fertigung ein großes, bisher ungenutztes Potenzial. Die Einbindung der BIM-Modelle für die Konstruktionsplanung in Kombination mit bauphysikalischer Planung würde dem Holzbau erhebliche Vorteile bringen.

„Die Zukunftsvision der Bauphysik beinhaltet [...] die Vernetzung der gemeinsamen Planungsschritte einzelner Leistungsfelder und die Schaffung einer intelligenten Kommunikationsebene, die auf der einen Seite einen Informationsfluss sicherstellt, aber auf der anderen Seite auch diese für weitere Planungsschritte recycelt“ (DA SILVA & BEWERSDORFF, 2022). Auch der VDI möchte im neuen Projekt VDI/bS 2552 Blatt 11.9 die Informationsaustauschanforderungen für die Bauphysik als BIM-Anwendungsfall beschreiben (VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V., 2023).

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik und Vorschläge zur Schemaerweiterung stellen einen kleinen Beitrag dar, um das Ziel, die Bauphysik als integrale Planung zu erfassen, zu erreichen.

Anhang A

Anhang: Stoßstellendämm-Maße

In diesem Anhang werden die Ergebnisse der Berechnung der Schalldämm-Maße und Trittschallpegel aus Kapitel 3.4.2 erläutert.

Tabelle A.1: Eingangsdaten für die Berechnung aus Kapitel 3.4.2

	R_w	$L_{n,w}$	$l \cdot b$
Trenndecke	70 dB	38 dB	7,5 m x 3,76 m
Flanken	$R_{w,SR}$ in dB	$R_{w,ER}$ in dB	l_{ij} in m
Flanke 1	53	53	7,5
Flanke 2	53	53	3,76
Flanke 3	66	54	3,76
Flanke 4	43	31	3,76

Tabelle A.2: Eingangsdaten für Situation 1: Stoßstellendämm-Maße und Flankendämm-Maße

Stoßstellendämm-Maße			
Flanken	K_{Ff} in dB	K_{Fd} in dB	K_{Df} in dB
Flanke 1	3	10,1	10,1
Flanke 2	3	10,1	10,1
Flanke 3	3	10,1	10,1
Flanke 4	3	10,1	10,1
Flankendämm-Maße			
	R_{Ff} in dB	R_{Fd} in dB	R_{Df} in dB
Flanke 1	61,8	85,4	69,4
Flanke 2	64,8	88,4	72,4
Flanke 3	41,8	88,9	48,9
Flanke 4	48,8	77,4	67,4
Gesamt			
$R'_w =$	40,2 dB	$L'_{n,w} =$	53,6 dB

Tabelle A.3: Eingangsdaten für Situation 2: Stoßstellendämm-Maße und Flankendämm-Maße

Stoßstellendämm-Maße			
Flanken	K_{Ff} in dB	K_{Fd} in dB	K_{Df} in dB
Flanke 1	10,5	13,6	13,6
Flanke 2	10,5	13,6	13,6
Flanke 3	10,5	13,6	13,6
Flanke 4	12,5	18,6	18,6
Flankendämm-Maße			
	R_{Ff} in dB	R_{Fd} in dB	R_{Df} in dB
Flanke 1	69,3	88,9	72,9
Flanke 2	72,3	91,9	75,9
Flanke 3	79,3	92,4	82,4
Flanke 4	58,3	85,9	75,9
Gesamt			
$R'_w =$	57,2 dB	$L'_{n,w} =$	44,7 dB

Tabelle A.4: Eingangsdaten für Situation 3: Stoßstellendämm-Maße und Flankendämm-Maße

Stoßstellendämm-Maße			
Flanken	K_{Ff} in dB	K_{Fd} in dB	K_{Df} in dB
Flanke 1	18	17	17
Flanke 2	18	17	17
Flanke 3	22	22,4	22,4
Flanke 4	22	23,5	23,5
Flankendämm-Maße			
	R_{Ff} in dB	R_{Fd} in dB	R_{Df} in dB
Flanke 1	76,8	92,3	76,3
Flanke 2	79,8	95,3	79,3
Flanke 3	90,8	101,2	91,2
Flanke 4	67,8	90,8	80,8
Gesamt			
$R'_w =$	64,6 dB	$L'_{n,w} =$	39,8 dB

Tabelle A.5: Eingangsdaten für Situation 4: Stoßstellendämm-Maße und Flankendämm-Maße

Stoßstellendämm-Maße			
Flanken	K_{Ff} in dB	K_{Fd} in dB	K_{Df} in dB
Flanke 1	25,5	20,5	20,5
Flanke 2	25,5	20,5	20,5
Flanke 3	31,5	28,5	28,5
Flanke 4	31,5	28,5	28,5
Flankendämm-Maße			
	R_{Ff} in dB	R_{Fd} in dB	R_{Df} in dB
Flanke 1	84,3	95,8	98,8
Flanke 2	87,3	98,8	82,8
Flanke 3	100,3	107,3	97,3
Flanke 4	77,3	95,8	85,8
Gesamt			
$R'_w =$	68,4 dB	$L'_{n,w} =$	38,4 dB

Anhang B

Berechnungsbeispiel H4

Standort: Bad Aibling
 Baujahr: 2010
 Bauweise: Holzmassivbau
 Baubetrieb: Huber & Sohn GmbH & Co.
 KG, Bachmehring
 Architekten: SCHANKULA Architekten
 Bauherren: B & O Gruppe; Bad Aibling



Abbildung B.1: Wohnhaus H4 in Bad Aibling (BAUART-INGENIEURE, n. d.)

Es sollen drei verschiedene Übertragungssituationen betrachtet werden:

- Luftschall vertikal (2.OG Wohnen – 1.OG Wohnen) der Wohnungstrenndecke
- Trittschall vertikal (2.OG Wohnen – 1.OG Wohnen) der Wohnungstrenndecke
- Luftschall horizontal (1.OG Schlafen – 1.OG Wohnen) der Wohnungstrennwand

Vom *ift Rosenheim* wurden im gebauten Gebäude Messungen durchgeführt. Die Abbildungen B.2 und B.3 zeigen die Grundrisse der betroffenen Geschosse. Der rot markierte Raum wurde jeweils als Senderraum benutzt. Tabelle B.1 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle B.1: Ergebnisse der Bau-Messungen (HESSINGER & BACHER, 2010)

Senderraum	Empfangsraum	Bauteil	R'_{w}	$L'_{n,w}$
2. OG Wohnen	1.OG Wohnen	Decke	59 dB	43 dB
1. OG Schlafen	1. OG Wohnen	Wohnungstrennwand	66 dB	-
1. OG Wohnen	EG Wohnen	Decke	56 dB	45 dB

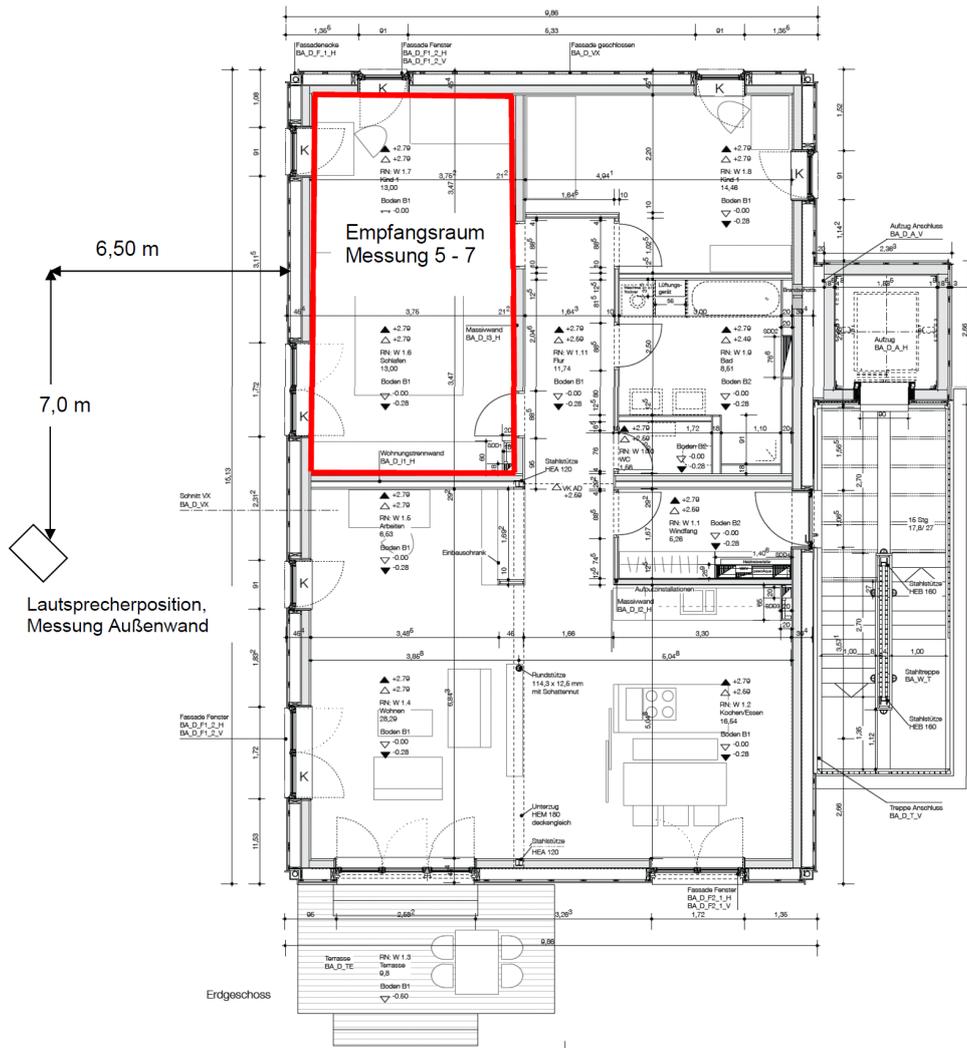


Abbildung B.2: Grundriss H4 im Erdgeschoss, mit markiertem Empfangsraum (HESSINGER & BACHER, 2010)

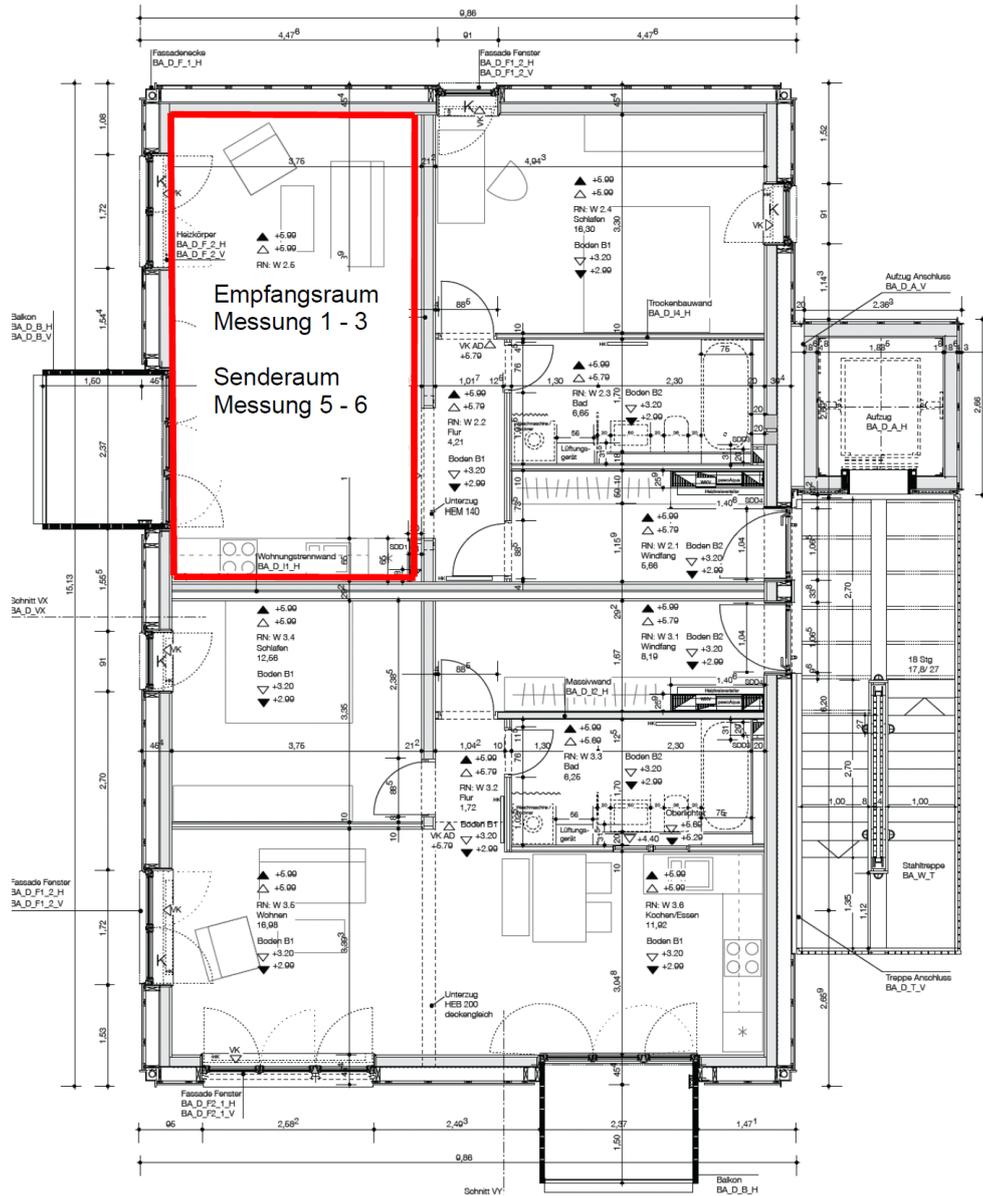


Abbildung B.3: Grundriss H4 im Obergeschoss, mit markiertem Sende-/Empfangsraum (HESSINGER & BACHER, 2010)

B.1 Bauteilaufbauten

Die relevanten Bauteile sind neben der Wohnungstrenndecke die Außenwand, die Innenwände und die Wohnungstrennwand. Abbildungen B.8 und B.9 zeigen die Bauteilaufbauten in den Schnitten. Die Bauteilaufbauten sind entnommen aus der schalltechnischen Stellungnahme (HESSINGER & RABOLD, 2010).

Element 1: Wohnungstrenndecke

- 200 mm Massivholz (CLT)
- 90 mm Kalksplitt
- 40 mm MW Trittschalldämmung
- 60 mm Zementestrich

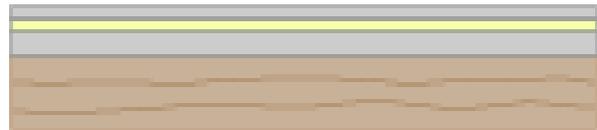


Abbildung B.4: Bauteilaufbau der Wohnungstrenndecke nach (HESSINGER & RABOLD, 2010)

Element 2: Wohnungstrennwand

- 2x18 mm Gipsfaserplatten
- 100 mm Massivholz (CLT)
- 20 mm Luftschicht
- 100 mm Holzständer + Mineralwolle
- 2x18 mm Gipsfaserplatten

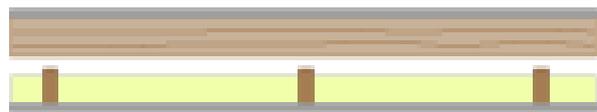


Abbildung B.5: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand nach (HESSINGER & RABOLD, 2010)

Element 3: Innenwand

- 2 x 18 mm Gipsfaserplatte
- 80 mm Massivholz (CLT)
- 2 x 18 mm Gipsfaserplatte



Abbildung B.6: Bauteilaufbau der Innenwand nach (HESSINGER & RABOLD, 2010)

Element 4: Außenwand

- 25 mm Schalung
- 40 mm Konterlattung
- 200 mm Wärmedämmung MW
- 18 mm Gipsfaserplatten
- 140 mm Massivholz (CLT)
- 2 x 18 mm Gipsfaserplatten

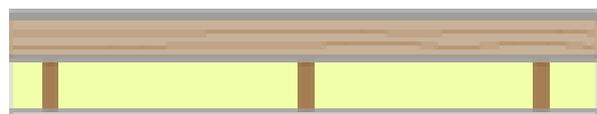


Abbildung B.7: Bauteilaufbau der Außenwand nach (HESSINGER & RABOLD, 2010)

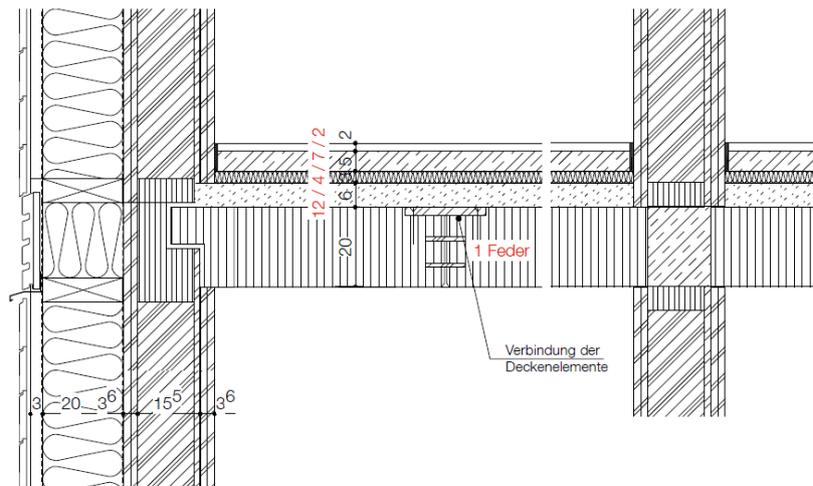


Abbildung B.8: Vertikalschnitt durch den Anschluss der Wohnungstrenndecke, Außenwand und Innenwand (HESSINGER & RABOLD, 2010)

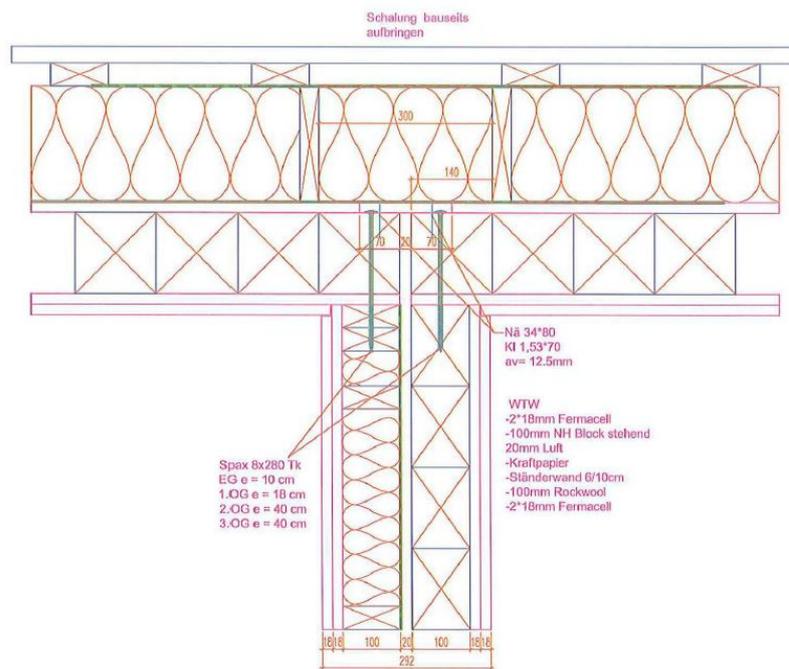


Abbildung B.9: Horizontalschnitt durch den Anschluss der Wohnungstrennwand an die Außenwand (HESSINGER & RABOLD, 2010)

B.2 Eingangsdaten

Diese Berechnung erfolgt mit Eingangsdaten von Prüfberichten aus dem *ift Rosenheim* und dem Berechnungstool *VBAcoustic* in der Version 1.4. Die Stoßstellen wurden händisch angegeben. Die Stoßstellendämm-Maße wurden nach DIN EN ISO 12354-1:2017-11, 2017 ermittelt. Alle Stoßstellen wurden als T-Stöße ohne Elastomerlager angegeben, außer die Stoßstelle zur Innenwand, die als Kreuzstoß angegeben wurde.

Tabelle B.2: Eingangsdaten zur Berechnung des Schalldämm-Maßes

f in Hz	R in dB					
	Innen- wand	Außen- wand	WTW (Massivholz- seite)	WTW (gesamt)	Decke (gesamt)	Decke (ohne Estrich)
50	33,0	31,9	30,6	37,0	24,5	21,8
63	36,2	31,7	29,0	43,0	33,4	31,3
80	33,5	30,0	28,8	42,4	45,9	37,5
100	35,7	31,7	30,8	48,7	53,1	40,5
125	31,0	36,5	29,3	53,3	61,5	44,9
160	32,6	38,0	29,0	55,3	64,2	46,3
200	34,2	40,6	29,4	57,9	66,9	45,9
250	34,5	40,3	30,0	59,4	70,1	48,2
315	36,2	44,9	30,5	61,0	71,2	46,2
400	37,7	47,2	30,5	63,5	70,7	44,0
500	40,6	50,1	30,9	67,4	69,0	39,5
630	43,4	53,1	32,3	69,6	71,5	39,5
800	44,9	55,4	34,7	73,3	77,6	46,8
1000	45,4	57,1	37,1	77,1	82,7	53,3
1250	44,4	59,3	39,2	81,6	86,9	57,2
1600	43,4	59,7	41,2	79,8	89,3	61,1
2000	46,1	61,6	42,9	78,4	88,4	65,5
2500	51,2	65,7	42,6	82,1	85,6	65,0
3150	55,1	67,4	43,3	84,0	85,1	64,8
4000	58,6	68,3	49,1	84,1	87,3	66,6
5000	61,1	69,5	53,9	77,3	85,6	62,4
R_w in dB	44	53	37	70	77	-
m' in kg/m ²	119	118	58	131	342	219

Tabelle B.3: Eingangsdaten zur Berechnung des Trittschallpegels

f in Hz	L_n		ΔL_n
	Decke (gesamt)	Decke (ohne Estrich)	Trittschallminderung auf CLT
50	54,1	56,8	2,7
63	49,7	51,8	2,1
80	45,9	54,3	8,4
100	43,3	55,9	12,6
125	42,6	59,2	16,6
160	39,5	57,4	17,9
200	40,4	61,4	21,0
250	43,0	64,9	21,9
315	40,8	65,8	25,0
400	42,0	68,7	26,7
500	42,4	71,9	29,5
630	41,2	73,2	32,0
800	38,5	69,3	30,8
1000	35,2	64,6	29,4
1250	31,6	61,3	29,7
1600	26,2	54,4	28,2
2000	22,6	45,5	22,9
2500	16,8	37,4	20,6
3150	10,8	31,1	20,3
4000	9,0	29,7	20,7
5000	8,6	31,8	23,2
$L_{n,w}$ in dB	38	-	-

B.3 Berechnungsergebnisse

Die nachfolgenden Berechnungsergebnisse stammen aus dem Excel-Tool *VBAcoustic* Version 1.4. Als Eingangsdaten dienten die Werte aus Abschnitt B.2.



Luft- und Trittschallprognose von Holzdecken

Trenndecke:

Skizze	Konstruktionsdetails	L _{n,w} (C _{1,50-2500})	R _w
		37 dB (-)	77 dB

Zusätzliche Angaben zur Trenndecke für das Prognosemodell

Trennfläche der Decke S₃ = 28,20 m²
 Ausgewählter Deckentyp: Massivholzdecke ohne Unterdecke
 Art des Estrichaufbaus: Zementestrich auf Mineralfaser
 Rohdecke+Beschwerung: m' = 219,0 kg/m²

Flankierende Wände:

Wand 1

Gemeinsame Kantenlänge l _f = 7,50 m		Trittschallpegel Flanke:	Flankendämm-Maße:
Wandtyp: Massivholzwand	K _{ef} = 22,0 dB	L _{DF,w} = 36,6 dB	R _{ef,w} = 79,9 dB
Stoßstelle Decke/Wand: T-Stoß, Decke durchlaufend	K _{ef} = 15,0 dB	L _{DF,w} = 20,5 dB	R _{ef,w} = 95,9 dB
Wand+Beplankung: m' = 118,0 kg/m ²	K _{ef} = 15,0 dB		R _{ef,w} = 71,9 dB

Wand 2

Gemeinsame Kantenlänge l _f = 3,76 m		Trittschallpegel Flanke:	Flankendämm-Maße:
Wandtyp: Massivholzwand	K _{ef} = 22,0 dB	L _{DF,w} = 36,7 dB	R _{ef,w} = 82,5 dB
Stoßstelle Decke/Wand: T-Stoß, Decke durchlaufend	K _{ef} = 15,0 dB	L _{DF,w} = 18,0 dB	R _{ef,w} = 98,5 dB
Wand+Beplankung: m' = 118,0 kg/m ²	K _{ef} = 15,0 dB		R _{ef,w} = 74,9 dB

Wand 3

Gemeinsame Kantenlänge l _f = 7,50 m		Trittschallpegel Flanke:	Flankendämm-Maße:
Wandtyp: Massivholzwand	K _{ef} = 23,0 dB	L _{DF,w} = 35,5 dB	R _{ef,w} = 72,4 dB
Stoßstelle Decke/Wand: Kreuz-Stoß, Decke durchlaufend	K _{ef} = 18,0 dB	L _{DF,w} = 20,3 dB	R _{ef,w} = 95,9 dB
Wand+Beplankung: m' = 119,0 kg/m ²	K _{ef} = 18,0 dB		R _{ef,w} = 70,6 dB

Wand 4

Gemeinsame Kantenlänge l _f = 3,76 m		Trittschallpegel Flanke:	Flankendämm-Maße:
Wandtyp: Massivholzwand	K _{ef} = 22,0 dB	L _{DF,w} = 34,9 dB	R _{ef,w} = 68,1 dB
Stoßstelle Decke/Wand: T-Stoß, Decke durchlaufend	K _{ef} = 15,0 dB	L _{DF,w} = 21,4 dB	R _{ef,w} = 94,7 dB
Wand+Beplankung: m' = 131,0 kg/m ²	K _{ef} = 15,0 dB		R _{ef,w} = 66,0 dB

Prognoseergebnis:

Bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	R' _w =	61,7 +/- u _{prog}
Bewerteter Norm-Trittschallpegel inkl. Nebenwege	L' _{n,w} =	43,7 +/- u _{prog}

Erstellt am: 09.01.2023 Seite 1 von 3

Luft- und Trittschallprognose von Holzdecken



Zusätzliche Information über die Berechnung

Abstrahlverluste	Berücksichtigt
In-Situ Korrektur	Vereinfacht nach DIN EN ISO 12354-1:2017

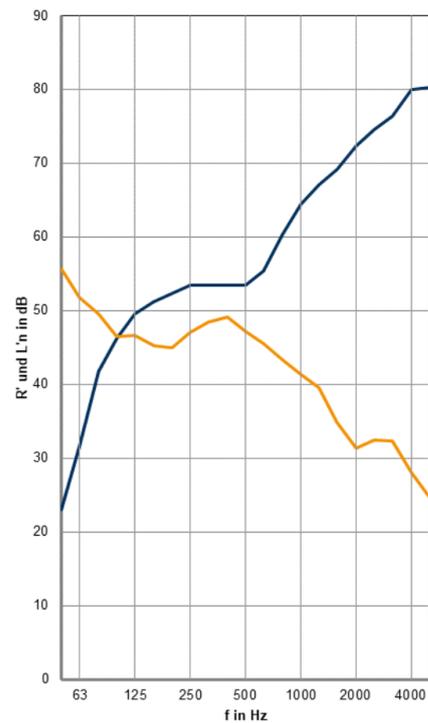
Zwischenergebnisse Luftschall

Frequenz in Hz	R_{Dd} in dB	$R_{Ff,1}$ in dB	$R_{Fd,1}$ in dB	$R_{Df,1}$ in dB	$R_{Ff,2}$ in dB	$R_{Fd,2}$ in dB	$R_{Df,2}$ in dB	$R_{Ff,3}$ in dB	$R_{Fd,3}$ in dB	$R_{Df,3}$ in dB	$R_{Ff,4}$ in dB	$R_{Fd,4}$ in dB	$R_{Df,4}$ in dB
50	23,2	57,4	43,3	47,8	59,3	46,3	49,7	59,5	46,9	51,4	57,2	45,0	49,0
63	32,1	57,6	48,1	52,3	59,5	51,1	54,2	63,1	53,4	57,5	57,7	49,1	54,4
80	44,6	56,2	50,4	61,2	58,2	53,4	63,2	60,7	55,2	66,0	58,8	52,1	65,0
100	51,8	58,1	52,8	68,0	60,2	55,7	70,0	63,1	57,8	73,0	60,8	54,6	71,7
125	60,2	62,9	57,4	76,5	65,1	60,4	78,7	58,4	57,7	76,9	60,9	56,2	78,7
160	63,0	64,4	59,4	79,3	66,8	62,4	81,7	60,0	59,7	79,6	61,5	57,2	81,3
200	65,7	66,8	60,8	83,3	69,2	63,8	85,8	61,5	60,6	83,1	61,9	57,6	84,4
250	68,9	66,2	62,2	84,9	68,9	65,2	87,6	61,4	62,3	85,0	61,5	59,6	85,9
315	70,1	70,5	63,9	89,0	73,4	66,9	91,9	62,8	62,5	87,6	58,9	59,2	85,1
400	69,6	73,3	64,5	91,2	76,3	67,5	94,2	64,8	62,8	89,5	58,0	58,7	84,9
500	67,9	76,5	64,1	93,6	79,6	67,1	96,6	68,1	62,4	91,9	59,9	57,1	87,1
630	70,5	79,9	66,0	98,0	82,9	69,0	101,0	71,3	64,2	96,2	63,5	58,3	92,5
800	76,6	82,9	71,4	102,2	85,9	74,4	105,2	73,4	69,2	100,0	67,3	63,7	97,5
1000	81,7	85,0	76,0	105,4	88,0	79,0	108,4	74,3	73,1	102,5	70,6	68,6	101,4
1250	86,0	87,7	79,5	109,2	90,7	82,5	112,2	73,8	75,1	104,8	73,8	72,1	105,8
1600	88,4	88,6	82,3	110,5	91,7	85,3	113,5	73,4	77,1	105,3	77,1	75,7	108,5
2000	87,5	91,1	85,9	108,8	94,1	88,9	111,8	76,6	81,2	104,1	79,9	79,2	107,4
2500	84,8	95,7	88,3	108,9	98,6	91,2	111,8	82,2	84,0	104,6	81,7	79,3	106,8
3150	84,3	97,9	89,5	109,8	100,8	92,5	112,8	86,6	86,3	106,6	84,1	80,2	108,4
4000	86,6	99,4	91,5	112,2	102,5	94,5	115,2	90,8	89,7	110,4	89,2	84,7	111,9
5000	84,9	101,2	90,6	113,8	104,2	93,6	116,8	93,8	89,4	112,6	93,6	85,6	114,3
R_w	76,3	79,9	71,9	95,9	82,5	74,9	98,5	72,4	70,6	95,9	68,1	66,0	94,7

Endergebnis

Frequenz [Hz]	R' [dB]	$L'_{n'}$ [dB]
50	23,0	55,7
63	31,7	51,8
80	41,8	49,5
100	46,2	46,5
125	49,6	46,7
160	51,2	45,3
200	52,3	44,9
250	53,4	47,1
315	53,5	48,5
400	53,5	49,1
500	53,5	47,2
630	55,4	45,5
800	60,4	43,3
1000	64,4	41,4
1250	67,0	39,5
1600	69,1	34,8
2000	72,3	31,4
2500	74,6	32,4
3150	76,3	32,3
4000	80,0	28,0
5000	80,3	24,7
R'_w	61,7	$L'_{n,w}$ 43,7

Bau-Schalldämm-Maß und Norm-Trittschallpegel



Luft- und Trittschallprognose von Holzdecken



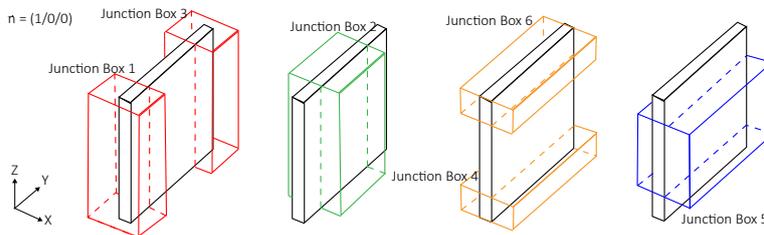
Zwischenergebnisse Trittschall									
Frequenz in Hz	$L_{n,Dd}$ in dB	$L_{n,DF,1}$ in dB	$L_{n,DF,1}$ in dB	$L_{n,DF,2}$ in dB	$L_{n,DF,2}$ in dB	$L_{n,DF,3}$ in dB	$L_{n,DF,3}$ in dB	$L_{n,DF,4}$ in dB	$L_{n,DF,4}$ in dB
50	55,4	33,8	35,9	31,9	37,4	30,2	34,8	32,6	35,2
63	51,0	33,6	36,9	31,6	38,2	28,3	35,7	31,5	36,1
80	47,2	32,9	39,0	30,9	40,3	28,2	37,9	29,2	38,2
100	44,6	30,4	35,4	28,4	36,5	25,4	34,2	26,7	34,5
125	43,9	29,3	37,1	27,1	38,3	28,9	36,0	27,1	36,2
160	40,7	25,9	37,3	23,5	38,4	25,6	36,2	23,9	36,2
200	41,6	25,5	36,1	23,0	37,1	25,7	34,9	24,4	35,0
250	44,2	29,7	37,7	27,0	38,7	29,6	36,5	28,7	36,7
315	41,9	24,4	41,5	21,5	42,5	25,8	40,4	28,3	40,4
400	43,1	22,9	42,4	19,9	42,4	24,6	41,2	29,2	40,4
500	43,5	19,2	39,4	16,2	39,3	20,9	38,1	25,7	37,4
630	42,2	16,0	37,4	13,0	37,4	17,8	36,3	21,5	35,5
800	39,5	15,2	35,5	12,2	35,5	17,4	34,3	19,9	33,6
1000	36,2	13,8	34,5	10,8	34,5	16,7	33,3	17,8	32,7
1250	32,5	10,5	33,1	7,5	33,1	14,9	32,0	13,9	31,3
1600	27,1	6,1	28,7	3,1	28,6	11,3	27,4	8,1	26,8
2000	23,5	3,3	25,3	0,3	25,3	8,0	24,1	4,7	23,5
2500	17,6	-5,5	26,8	-8,4	26,9	-1,2	25,7	-3,4	25,1
3150	11,6	-12,9	26,8	-15,9	26,9	-9,7	25,7	-11,5	25,2
4000	9,7	-15,0	22,6	-18,0	22,5	-13,2	21,4	-14,7	20,8
5000	9,3	-18,7	19,2	-21,7	19,2	-17,5	18,1	-19,2	17,6
$L_{n,w}$	37,3	20,5	36,6	18,0	36,7	20,3	35,5	21,4	34,9

Weitere Informationen zu den Stoßstellen												
Frequenz in Hz	$K_{FF,1}$ in dB	$K_{Fd,1}$ in dB	$K_{DF,1}$ in dB	$K_{FF,2}$ in dB	$K_{Fd,2}$ in dB	$K_{DF,2}$ in dB	$K_{FF,3}$ in dB	$K_{Fd,3}$ in dB	$K_{DF,3}$ in dB	$K_{FF,4}$ in dB	$K_{Fd,4}$ in dB	$K_{DF,4}$ in dB
50	18,7	11,7	11,7	18,7	11,7	11,7	19,7	14,7	14,7	18,7	11,7	11,7
63	19,0	12,0	12,0	19,0	12,0	12,0	20,0	15,0	15,0	19,0	12,0	12,0
80	19,4	12,4	12,4	19,4	12,4	12,4	20,4	15,4	15,4	19,4	12,4	12,4
100	19,7	12,7	12,7	19,7	12,7	12,7	20,7	15,7	15,7	19,7	12,7	12,7
125	20,0	13,0	13,0	20,0	13,0	13,0	21,0	16,0	16,0	20,0	13,0	13,0
160	20,4	13,4	13,4	20,4	13,4	13,4	21,4	16,4	16,4	20,4	13,4	13,4
200	20,7	13,7	13,7	20,7	13,7	13,7	21,7	16,7	16,7	20,7	13,7	13,7
250	21,0	14,0	14,0	21,0	14,0	14,0	22,0	17,0	17,0	21,0	14,0	14,0
315	21,3	14,3	14,3	21,3	14,3	14,3	22,3	17,3	17,3	21,3	14,3	14,3
400	21,7	14,7	14,7	21,7	14,7	14,7	22,7	17,7	17,7	21,7	14,7	14,7
500	22,0	15,0	15,0	22,0	15,0	15,0	23,0	18,0	18,0	22,0	15,0	15,0
630	22,3	15,3	15,3	22,3	15,3	15,3	23,3	18,3	18,3	22,3	15,3	15,3
800	22,7	15,7	15,7	22,7	15,7	15,7	23,7	18,7	18,7	22,7	15,7	15,7
1000	23,0	16,0	16,0	23,0	16,0	16,0	24,0	19,0	19,0	23,0	16,0	16,0
1250	23,3	16,3	16,3	23,3	16,3	16,3	24,3	19,3	19,3	23,3	16,3	16,3
1600	23,7	16,7	16,7	23,7	16,7	16,7	24,7	19,7	19,7	23,7	16,7	16,7
2000	24,0	17,0	17,0	24,0	17,0	17,0	25,0	20,0	20,0	24,0	17,0	17,0
2500	24,3	17,3	17,3	24,3	17,3	17,3	25,3	20,3	20,3	24,3	17,3	17,3
3150	24,6	17,6	17,6	24,6	17,6	17,6	25,6	20,6	20,6	24,6	17,6	17,6
4000	25,0	18,0	18,0	25,0	18,0	18,0	26,0	21,0	21,0	25,0	18,0	18,0
5000	25,3	18,3	18,3	25,3	18,3	18,3	26,3	21,3	21,3	25,3	18,3	18,3
$K_{ij} =$	22,0	15,0	15,0	22,0	15,0	15,0	23,0	18,0	18,0	22,0	15,0	15,0

Anhang C

Definition der junction box

C.1 Junction Box für Wände in Richtung (1/0/0)



Element mit $\vec{n} = (1/0/0)$

Junction box 1

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min - 0,5/Z.Min$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Min + 0,5/Z.Max$

Junction box 2

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min + 0,5/Z.Min$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Max - 0,5/Z.Max$

Junction box 3

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min - 0,5/Z.Min$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Max + 0,5/Z.Max$

Junction box 4

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min/Z.Min - 0,5$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Max/Z.Max + 0,5$

Junction box 5

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min/Z.Min + 0,5$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Max/Z.Max - 0,5$

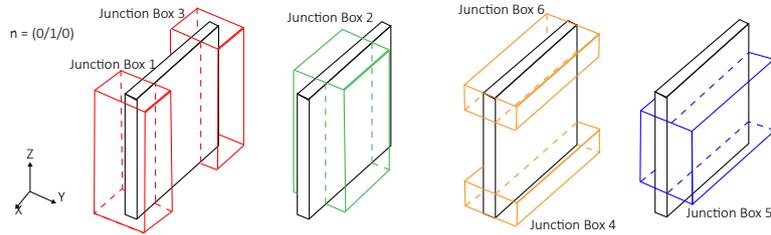
Junction box 6

JB-Min: $X.Min - 0,3/Y.Min/Z.Max - 0,5$

JB-Max: $X.Max + 0,3/Y.Max/Z.Max + 0,5$

(C.1)

C.2 Junction Box für Wände in Richtung (0/1/0)



Element mit $\vec{n} = (0/1/0)$

Junction box 1

JB-Min: $X.Min - 0,5 / Y.Min - 0,3 / Z.Min$

JB-Max: $X.Min + 0,5 / Y.Max + 0,3 / Z.Max$

Junction box 2

JB-Min: $X.Max + 0,5 / Y.Min - 0,3 / Z.Min$

JB-Max: $X.Max - 0,5 / Y.Max + 0,3 / Z.Max$

Junction box 3

JB-Min: $X.Max - 0,5 / Y.Min - 0,3 / Z.Min$

JB-Max: $X.Max + 0,5 / Y.Max + 0,3 / Z.Max$

(C.2)

Junction box 4

JB-Min: $X.Min / Y.Min - 0,3 / Z.Max - 0,5$

JB-Max: $X.Max / Y.Max + 0,3 / Z.Max + 0,5$

Junction box 5

JB-Min: $X.Max / Y.Max + 0,3 / Z.Max + 0,5$

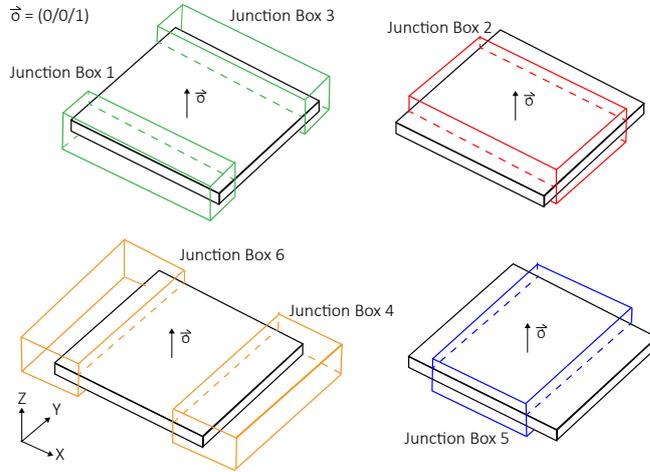
JB-Max: $X.Min / Y.Min - 0,3 / Z.Max - 0,5$

Junction box 6

JB-Min: $X.Min / Y.Min - 0,3 / Z.Max - 0,5$

JB-Max: $X.Max / Y.Max + 0,3 / Z.Max + 0,5$

C.3 Junction Box für Decken in Richtung (0/0/1)



Element mit $\vec{n} = (0/0/1)$

Junction box 1

JB-Min: $X.Min/Y.Min - 0,5/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Max/Y.Min + 0,5/Z.Max + 0,3$

Junction box 2

JB-Min: $X.Min/Y.Min + 0,5/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Max/Y.Max - 0,5/Z.Max + 0,3$

Junction box 3

JB-Min: $X.Min/Y.Max - 0,5/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Max/Y.Min + 0,5/Z.Max + 0,3$

Junction box 4

JB-Min: $X.Min - 0,5/Y.Min/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Min + 0,5/Y.Max/Z.Max + 0,3$

Junction box 5

JB-Min: $X.Min + 0,5/Y.Min/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Max - 0,5/Y.Max/Z.Max + 0,3$

Junction box 6

JB-Min: $X.Max - 0,5/Y.Min/Z.Min - 0,3$

JB-Max: $X.Max + 0,5/Y.Max/Z.Max + 0,3$

(C.3)

Anhang D

Definition der Stoßstellentypen

In diesem Anhang werden die Definitionen der Stoßstellentypen anhand der Matrix für die *connection zone* sowie die Zuordnung der *element direction* aufgelistet. Nur in Kombination ergibt sich eine eindeutige Stoßstelle.

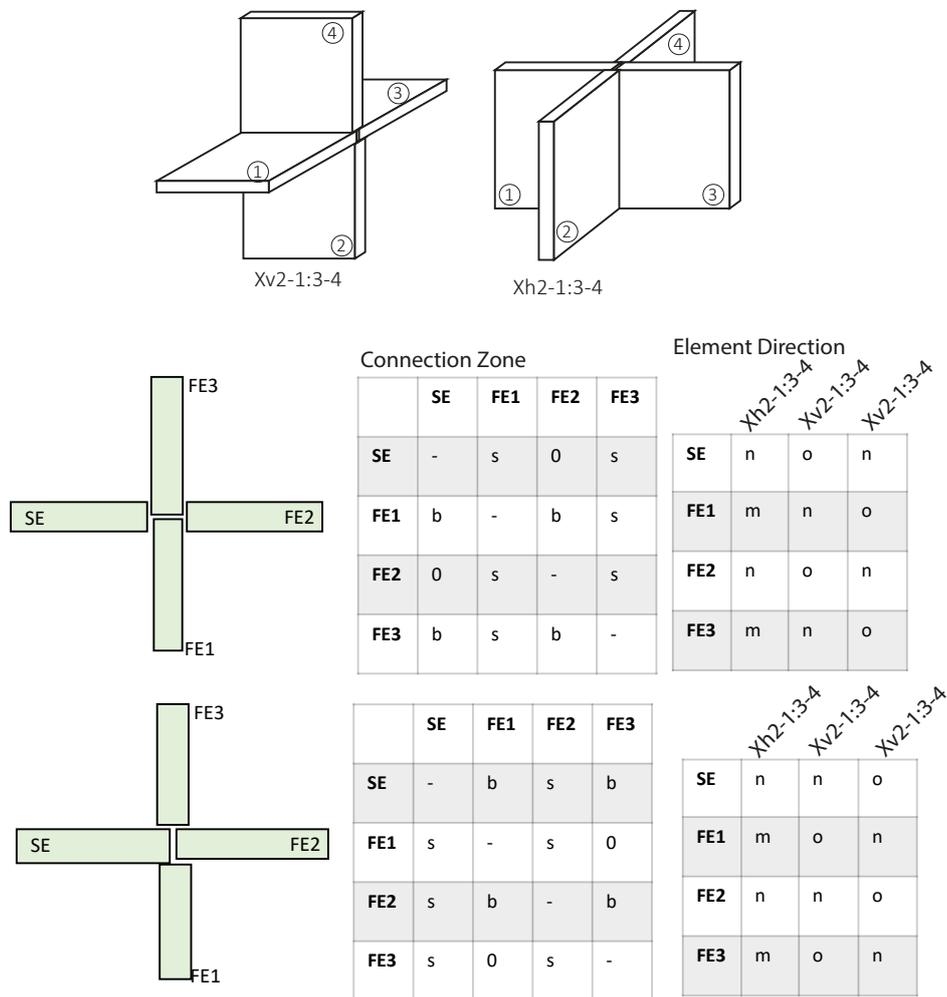


Abbildung D.1: Definition von Stoßstellentypen Teil 1

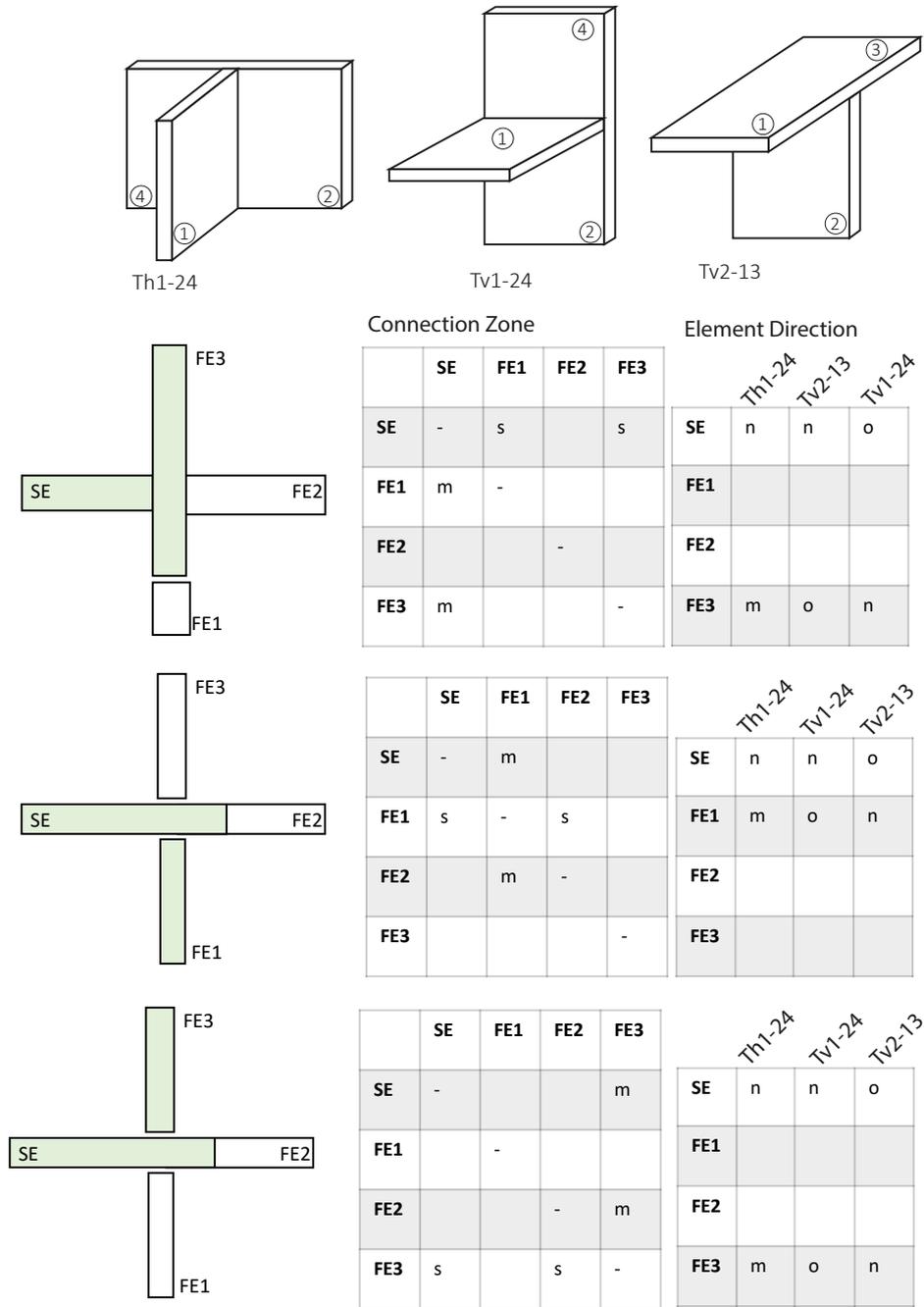


Abbildung D.2: Definition von Stoßstellentypen Teil 2

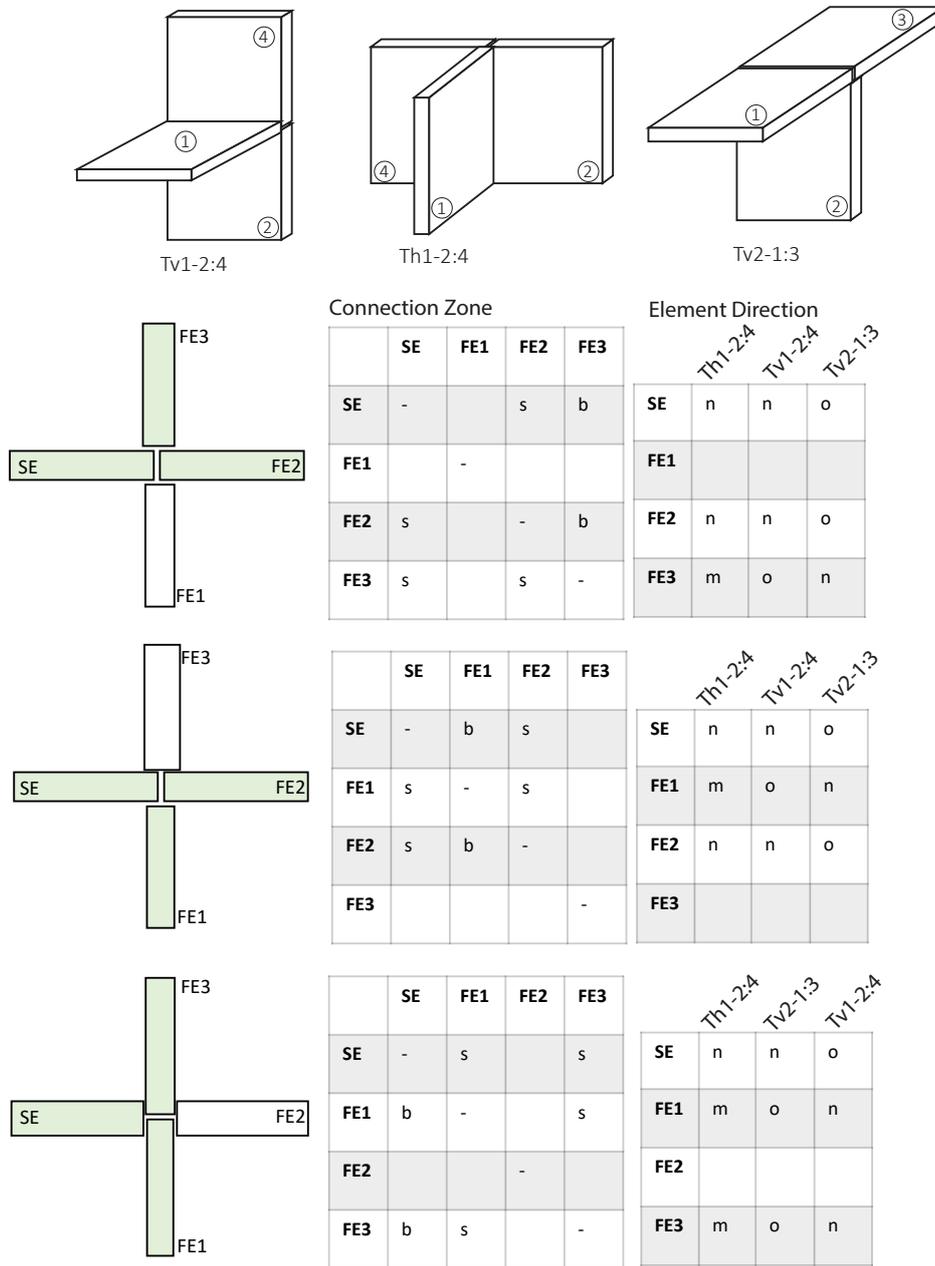


Abbildung D.3: Definition von Stoßstellentypen Teil 3

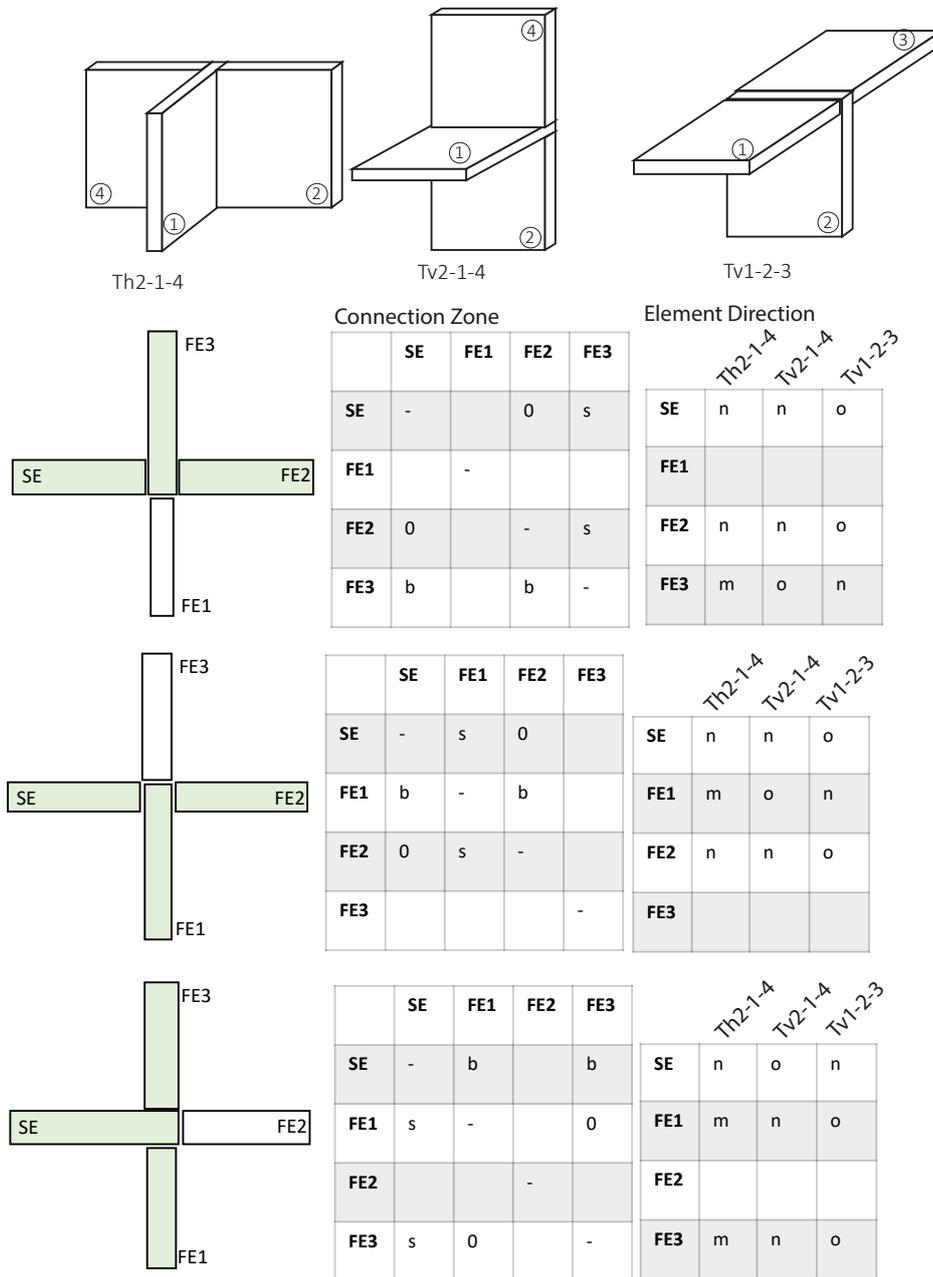


Abbildung D.4: Definition von Stoßstellentypen Teil 4

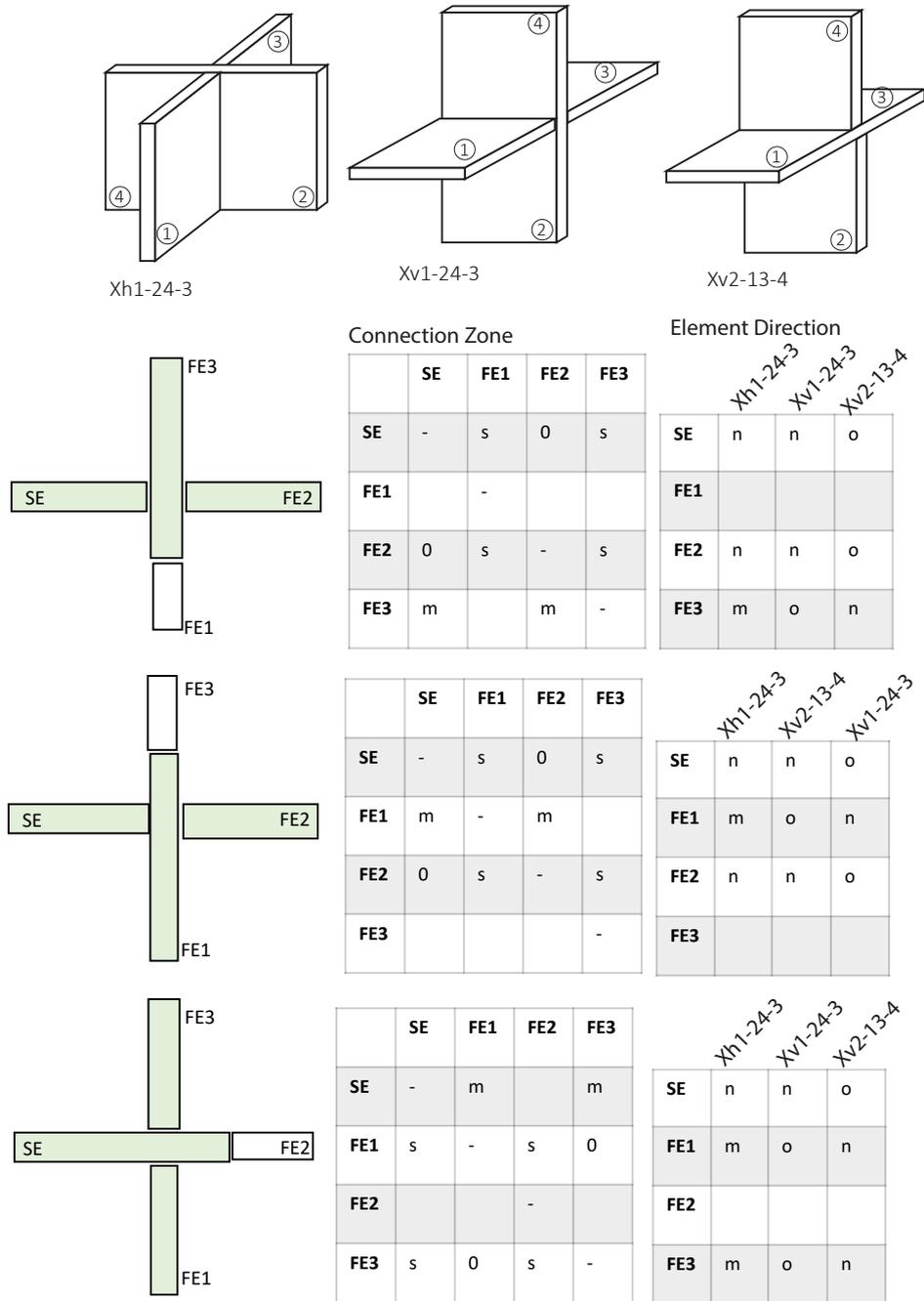


Abbildung D.5: Definition von Stoßstellentypen Teil 5

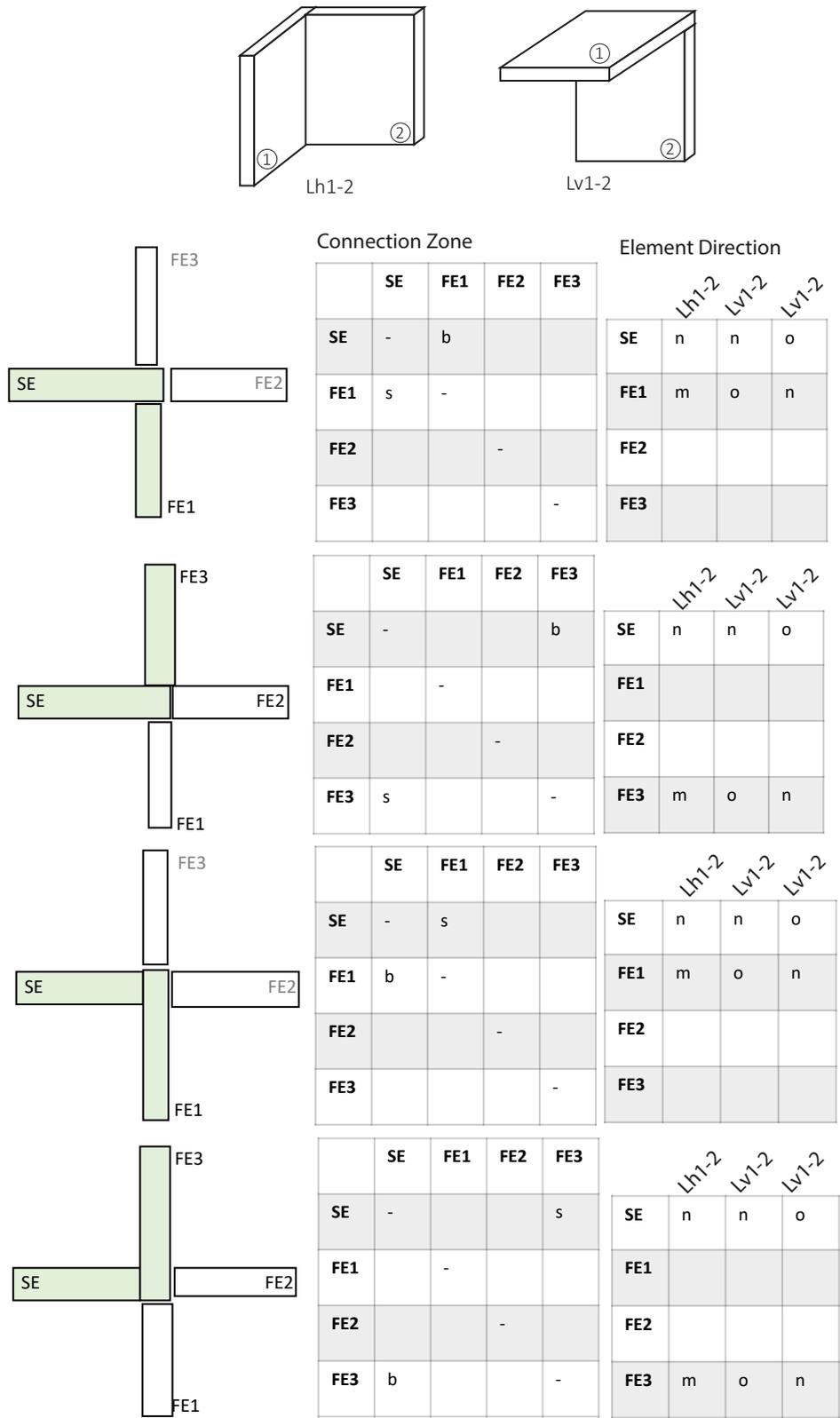


Abbildung D.6: Definition von Stoßstellentypen Teil 6

Anhang E

IFC-Klassen für das Fachmodell Akustik

In Kapitel 5.5.1 wurden Klassen zur Erweiterung des IFC-Schemas für das Akustik Fachmodell vorgeschlagen. Zusätzlich müssen in bereits vorhandenen Klassen Ergänzungen vorgenommen werden. Die Veränderungen in den bereits bestehenden Klassen sind jeweils in blau markiert.

Erweiterung der Klasse *IfcProduct*:

```

ENTITY IfcProduct
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF
( IfcAnnotation
, IfcElement
, IfcGrid
, IfcPort
, IfcProxy
, IfcSpatialElement
, IfcStructuralActivity
, IfcStructuralItem
, IfcAcousticElement ))
SUBTYPE OF ( IfcObject );
ObjectPlacement : OPTIONAL IfcObjectPlacement;
Representation : OPTIONAL IfcProductRepresentation;
INVERSE
ReferencedBy : SET [0:?] OF IfcRelAssignsToProduct FOR
    RelatingProduct;
WHERE
PlacementForShapeRepresentation : ( EXISTS(Representation) AND
    EXISTS(ObjectPlacement) )
OR ( EXISTS(Representation) AND
    ( SIZEOF(QUERY(temp < * Representation.Representations | 'IFC4.
        IFCSHAPEREPRESENTATION' IN TYPEOF(temp))) = 0) )
OR ( NOT(EXISTS(Representation)) );
END_ENTITY;

```

Erweiterung der Klasse *IfcRelAssociates*:

```

ENTITY IfcRelAssociates
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF
( IfcRelAssociatesApproval
, IfcRelAssociatesClassification
, IfcRelAssociatesConstraint
, IfcRelAssociatesDocument
, IfcRelAssociatesLibrary
, IfcRelAssociatesMaterial
, IfcRelAssociatesPaths ))
SUBTYPE OF ( IfcRelationship );
RelatedObjects : SET [1:?] OF IfcDefinitionSelect ;
END_ENTITY;

```

Neue Klasse *IfcJunctionTypeEnum* für die Stoßstellentypen:

```

TYPE IfcJunctionTypeEnum = ENUMERATION OF
( Lh1d2 ,
Lv1d2 ,
Tv1d24 ,
Tv2d13 ,
Th1d24 ,
Th2d13 ,
Th2d1d4 ,
Tv2d1d4 ,
Th1d2c4 ,
Tv1d2c4 ,
Tv2d1c3 ,
Xh1d24d3 ,
Xv2d13d4 ,
Xv1d24d3 ,
Xh2d1c3d4 ,
Xv2d1c3d4 ,
, USERDEFINED
, NOTDEFINED );
END_TYPE;

```

Anhang F

Test der Stoßstellenanalyse

Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_Xh

Connection Zone Matrix:

None,None,None,Border

None,None,None,None

None,None,None,None

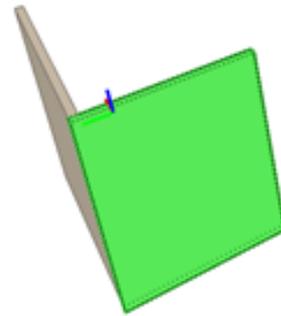
Short,None,None,None

DirectionElements:

n,None,None,m

Junction Type:

Lh1d2



Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_PM

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

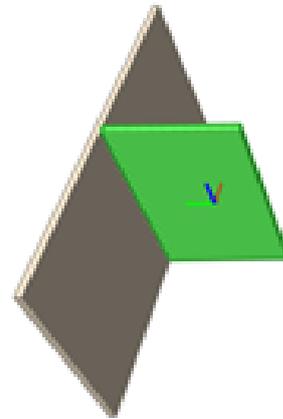
Middle,None,None,None

DirectionElements:

n,m,None,None

Junction Type:

Th1d24



Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_Ii

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

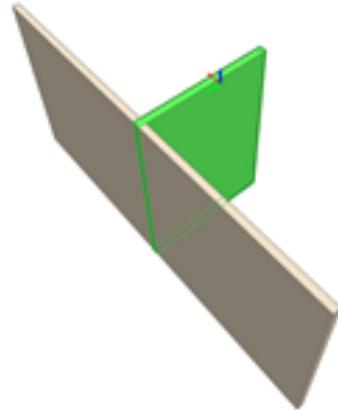
Middle,None,None,None

DirectionElements:

n,m,None,None

Junction Type:

Th1d24



Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_Mg

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Border,None,None,Short

None,None,None,None

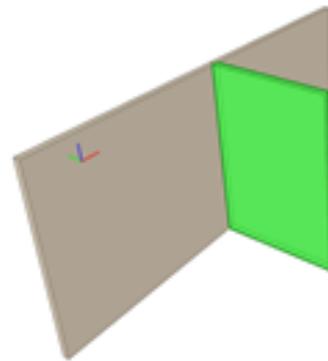
Border,Short,None,None

DirectionElements:

n,m,None,m

Junction Type:

Th1d2c4



Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_89

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Middle,None,Middle,None

Zero,Short,None,Short

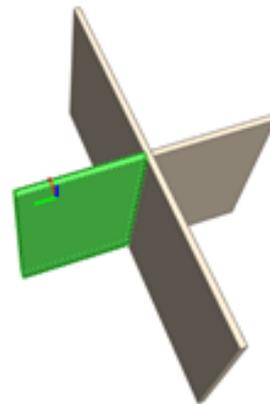
Middle,None,Middle,None

DirectionElements:

n,m,n,None

Junction Type:

Xh1d24d3



Trennelement: 1eyMdikyX8kw63rychh_BR

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,None

Border,None,None,None

None,None,None,None

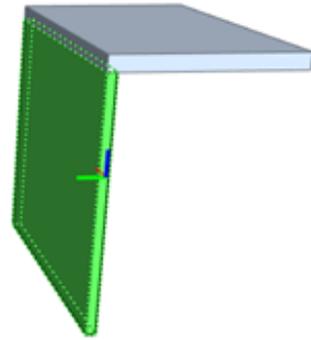
None,None,None,None

DirectionElements:

n,o,None,None

Junction Type:

Lv1d2



Trennelement: 3_LgvMVeX5TwULkQDzAB8N

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

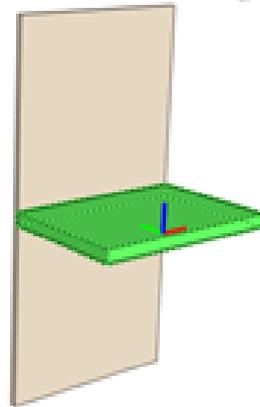
Middle,None,None,None

DirectionElements:

o,n,None,None

Junction Type:

Tv1d24



Trennelement: 1mIwVpoq52YfEsjt7\$Laa0

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

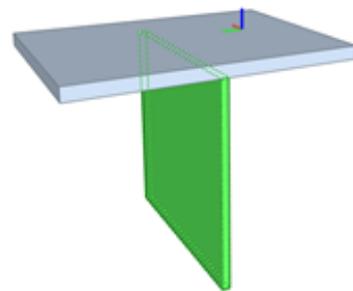
Middle,None,None,None

DirectionElements:

n,o,None,None

Junction Type:

Tv2d13



Trennelement: 1mIwVpoq52YfEsjt7\$Lanm

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Border,None,None,Short

None,None,None,None

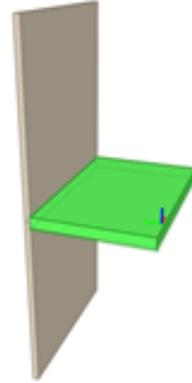
Border,Short,None,None

DirectionElements:

o,n,None,n

Junction Type:

Tv1d2c4



Trennelement: 1KTTbw5vD3XPXkzEPOfeI7

Connection Zone Matrix:

None,Border,None,Border

Short,None,None,Zero

None,None,None,None

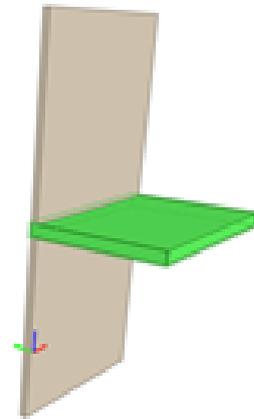
Short,Zero,None,None

DirectionElements:

o,n,None,n

Junction Type:

Tv2d1d4



Trennelement: 0weDM8O_X8xeE7eElXutVG

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Border,None,None,Short

None,None,None,None

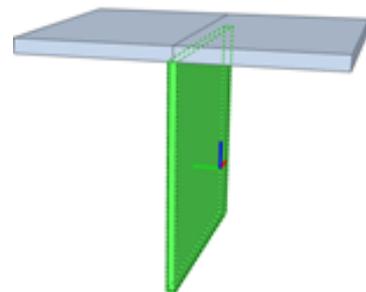
Border,Short,None,None

DirectionElements:

n,o,None,o

Junction Type:

Tv2d1c3



Trennelement: 0weDM8O_X8xeE7eElXutRy

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Middle,None,Middle,None

Zero,Short,None,Short

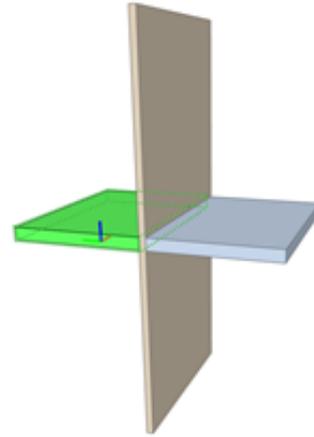
Middle,None,Middle,None

DirectionElements:

o,n,o,None

Junction Type:

Xv1d24d3



Trennelement: 0i8nVeTTf6ox2YVT2SRCLM

Connection Zone Matrix:

None,Border,Short,Border

Short,None,Short,Zero

Short,Border,None,Border

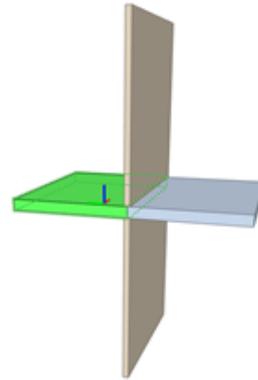
Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

o,n,o,n

Junction Type:

Xv2d1c3d4



Trennelement: 0i8nVeTTf6ox2YVT2SRCea

Connection Zone Matrix:

None,Border,Short,Border

Short,None,Short,Zero

Short,Border,None,Border

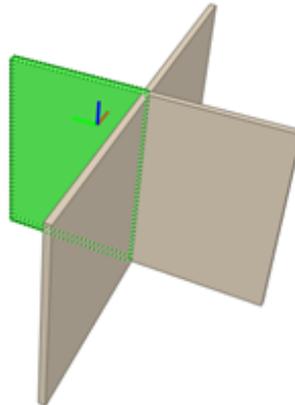
Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

n,m,n,m

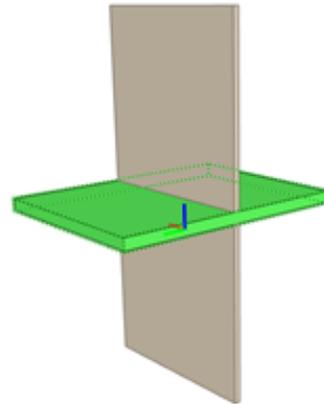
Junction Type:

Xh2d1c3d4



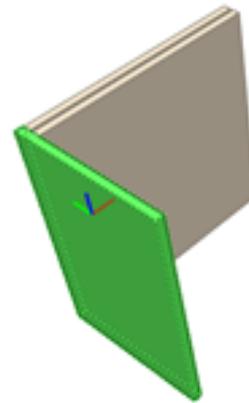
Trennelement: 0i8nVeTTf6ox2YVT2SRCiv

Connection Zone Matrix:
 None,Middle,None,Middle
 Short,None,Short,Zero
 None,Middle,None,Middle
 Short,Zero,Short,None
 DirectionElements:
 o,n,o,n
 Junction Type:
 Xv2d13d4



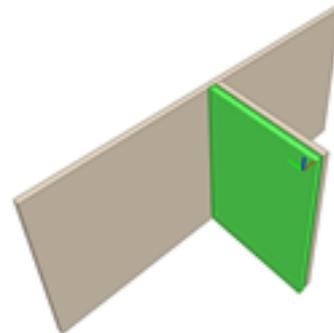
Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLu\$

Connection Zone Matrix:
 None,None,None,Border
 None,None,None,None
 None,None,None,None
 Short,None,None,None
 DirectionElements:
 n,None,None,m
 Junction Type:
 Lh1d2



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLu1

Connection Zone Matrix:
 None,Short,None,Short
 Middle,None,None,None
 None,None,None,None
 Middle,None,None,None
 DirectionElements:
 n,m,None,None
 Junction Type:
 Th1d24



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLu5

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Border,None,None,Short

None,None,None,None

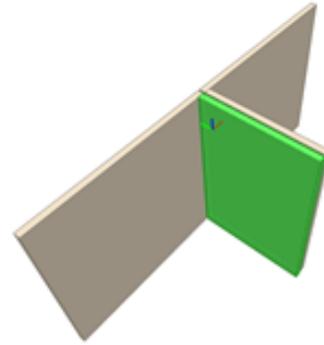
Border,Short,None,None

DirectionElements:

n,m,None,m

Junction Type:

Th1d2c4



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLuB

Connection Zone Matrix:

None,Border,None,Border

Short,None,None,Zero

None,None,None,None

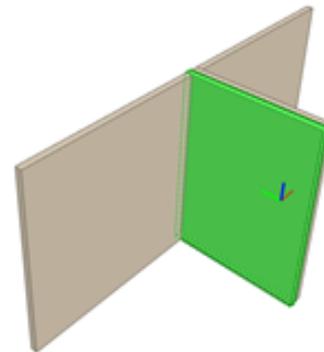
Short,Zero,None,None

DirectionElements:

n,m,None,m

Junction Type:

Th2d1d4



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLuF

Connection Zone Matrix:

None,Middle,None,Middle

Short,None,Short,Zero

None,Middle,None,Middle

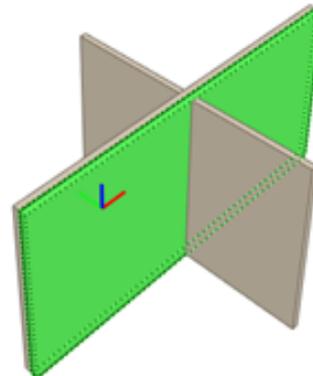
Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

n,m,n,m

Junction Type:

Xh1d24d3



Trennelement: 2KYY2eIEv34xHtB3kRSurR

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,None

Border,None,None,None

None,None,None,None

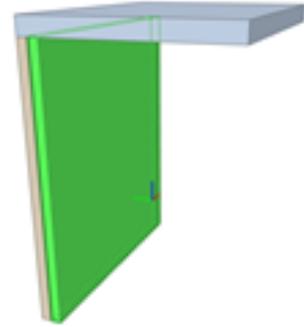
None,None,None,None

DirectionElements:

n,o,None,None

Junction Type:

Lv1d2



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLtf

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Middle,None,None,None

None,None,None,None

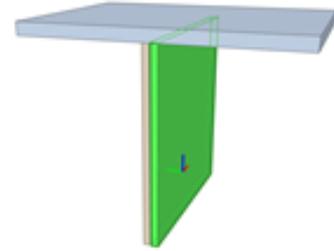
Middle,None,None,None

DirectionElements:

n,o,None,None

Junction Type:

Tv2d13



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLsc

Connection Zone Matrix:

None,Short,None,Short

Border,None,None,Short

None,None,None,None

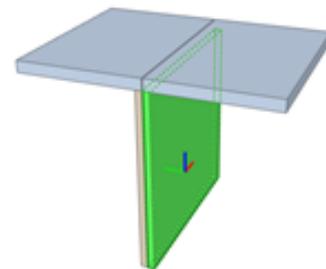
Border,Short,None,None

DirectionElements:

n,o,None,o

Junction Type:

Tv2d1c3



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLsa

Connection Zone Matrix:

None,Middle,None,Middle

Short,None,Short,Zero

None,Middle,None,Middle

Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

n,o,None,o

Junction Type:

Xv1d24d3

Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLss

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Middle,None,Middle,None

Zero,Short,None,Short

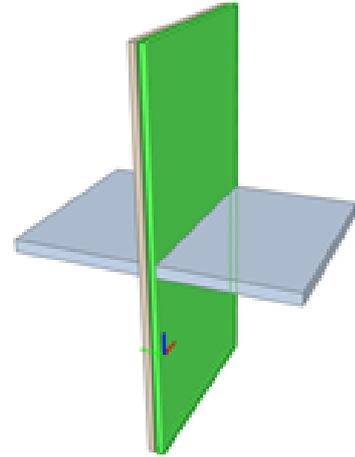
Middle,None,Middle,None

DirectionElements:

o,n,o,None

Junction Type:

Xv1d24d3



Trennelement: 3Yu2dBo\$vBBuoM4SyQP\$9X

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Border,None,Border,Short

Zero,Short,None,Short

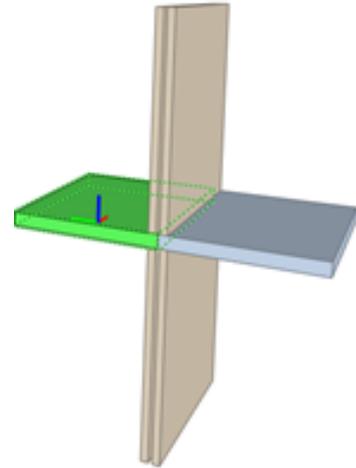
Border,Short,Border,None

DirectionElements:

n,o,n,o

Junction Type:

Xv2d1c3d4



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLs5

Connection Zone Matrix:

None,Border,Short,Border

Short,None,Short,Zero

Short,Border,None,Border

Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

o,n,o,n

Junction Type:

Xv2d1c3d4

Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLsQ

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Border,None,Border,Short

Zero,Short,None,Short

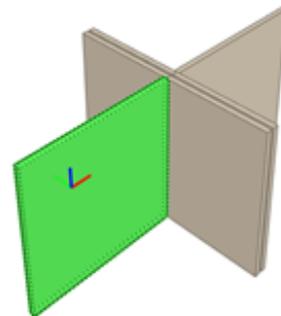
Border,Short,Border,None

DirectionElements:

n,m,n,m

Junction Type:

Xh2d1c3d4



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLrd

Connection Zone Matrix:

None,Short,Zero,Short

Middle,None,Middle,None

Zero,Short,None,Short

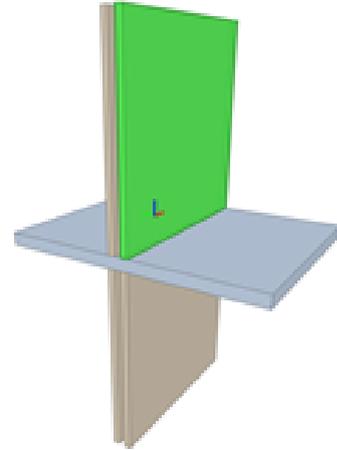
Middle,None,Middle,None

DirectionElements:

n,o,n,o

Junction Type:

Xv2d13d4



Trennelement: 14zCzjZU13lBCkwqwUfLsU

Connection Zone Matrix:

None,Middle,None,Middle

Short,None,Short,Zero

None,Middle,None,Middle

Short,Zero,Short,None

DirectionElements:

o,n,o,n

Junction Type:

Xv2d13d4

Anhang G

Weitere Algorithmen

Algorithmus 4 dient zur Überprüfung des Materials und Bauteiltyps wie in Kapitel 5.3.2 und Abbildung 5.14 beschrieben.

Algorithm 4: Bauteiltyp und Material überprüfen

Input : element as IfcBuiltElement

```

if element.IsTypedBy != null then
  if elementtype.HasAssociations.OfType<IfcRelAssociatesMaterial> != null then
    | OK
  else
    if element.HasAssociations.OfType<IfcRelAssociatesMaterial> != null then
      | Add Material to Type
    else
      | ERROR: element and type without Material
    end
  end
end
else
  if element.HasAssociations.OfType<IfcRelAssociatesMaterial> != null then
    if materialLayerSet.AssociatedTo..RelatedObjects.OfType<IfcElementType> != null
    then
      | Add existing type to element
    else
      | Create new type with materials from element Add new type to element
    end
  else
    | ERROR: element without material or type
  end
end

```

Algorithmus 5 dient zur Bestimmung des Abstands zweier Bauteile zueinander wie in Kapitel 5.4.2 und Abbildung 5.29 beschrieben.

Algorithm 5: Abstand d berechnen zwischen zwei Bauteilen die übereinander liegen

Input: element1 as IfcBuiltElement, element2 as IfcBuiltElement

```

if element1.Type = Wall AND element2.Type = Wall then
  if element1 is not parallel element2 then
    Distance = 0
    DistanceDirection = null
  else
    if element1.Max.X <= element2.Min.X OR element1.Min.X >= element2.Max.X
    AND
    element1.Max.Y <= element2.Min.Y OR element1.Min.Y >= element2.Max.Y then
      Distance = 0
      DistanceDirection = null
    else
      if (element1.Min.Z - element2.Max.Z) < (element2.Min.Z - element1.Max.Z) then
        Distance = element2.Min.Z - element1.Max.Z
        DistanceDirection = Zplus
      else
        Distance = element1.Min.Z - element2.Max.Z
        DistanceDirection = Zminus
      end
    end
  end
end

```

Algorithmus 6 dient zur Bestimmung des Abstands zweier Bauteile zueinander wie in Kapitel 5.4.2 und Abbildung 5.30 beschrieben.

Algorithm 6: Abstand d berechnen zwischen zwei Bauteilen die auf selber Höhe liegen

```

if  $element1.Max.X \leq element2.Min.X$  OR  $element1.Min.X \geq element2.Max.X$  then
  if  $element1.Max.Y \leq element2.Min.Y$  OR  $element1.Min.Y \geq element2.Max.Y$  then
    Distance = 0
    DistanceDirection = null
  else
    if  $element1.Max.X \leq element2.Min.X$  then
      Distance =  $element2.Min.X - element1.Max.X$ 
      DistanceDirection = Xplus
    else
      Distance =  $element1.Min.X - element2.Max.X$ 
      DistanceDirection = Xminus
    end
  end
else if  $element1.Max.Y \leq element2.Min.Y$  OR  $element1.Min.Y \geq element2.Max.Y$  then
  if  $element1.Max.X \leq element2.Min.X$  OR  $element1.Min.X \geq element2.Max.X$  then
    Distance = 0
    DistanceDirection = null
  else
    if  $element1.Max.Y \leq element2.Min.Y$  then
      Distance =  $element2.Min.Y - element1.Max.Y$ 
      DistanceDirection = Yplus
    else
      Distance =  $element1.Min.Y - element2.Max.Y$ 
      DistanceDirection = Yminus
    end
  end
else if Check for Overlap in X OR Y direction then
  use overlap algorithm (7)
else
  Distance = 0
  DistanceDirection = null
end

```

Algorithmus 7 dient zur Bestimmung des Abstands zweier Bauteile zueinander wie in Kapitel 5.4.2 und Abbildung 5.31 beschrieben.

Algorithm 7: Abstand d zwischen zwei Bauteilen berechnen: Überprüfung der Überschneidung (overlap)

Input: element1 as IfcBuiltElement, element2 as IfcBuiltElement

```

if element1.Max.X > element2.Min.X AND element1.Min.X <= element2.Min.X then
  if IS NOT (element1.Max.Y <= element2.Min.Y AND element1.Min.Y >=
    element2.Max.Y) then
    Distance = 0
    DistanceDirection = Xmin
  end
else if element1.Min.X < element2.Max.X AND element1.Max.X >= element2.Max.X then
  if IS NOT (element1.Max.Y <= element2.Min.Y AND element1.Min.Y >=
    element2.Max.Y) then
    Distance = 0
    DistanceDirection = Xplus
  end
else if element1.Min.Y < element2.Max.Y AND element1.Max.Y >= element2.Max.Y then
  if IS NOT (element1.Max.X <= element2.Min.X AND element2.Min.X >=
    element2.Max.X) then
    Distance = 0
    DistanceDirection = Yminus
  end
else if element1.Min.Y < element2.Max.Y AND element1.Max.Y >= element2.Max.Y then
  if IS NOT (element1.Max.X <= element2.Min.X AND element1.Min.X >=
    element2.Max.X) then
    Distance = 0 DistanceDirection = Yplus
  end
end

```

Literaturverzeichnis

- ABUALDENIEN, J. (2023). *Consistent management and evaluation of building models across design phases* [Diss., TU München]. TUM School of Engineering and Design.
- ABUALDENIEN, J., & BORRMANN, A. (2019). A meta-model approach for formal specification and consistent management of multi-LOD building models. *Advanced Engineering Informatics*, 40, S. 135–153.
- ABUALDENIEN, J., & BORRMANN, A. (2022). Levels of detail, development, definition, and information need: a critical literature review. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, S. 363–392.
- ABUALDENIEN, J., PFUHL, S., & BRAUN, A. (2019). Development of an MVD for checking fire-safety and pedestrian simulation requirements. *Proc. of the 31th Forum Bauinformatik*.
- AFSARI, K., EASTMAN, C. M., & CASTRO-LACOUTURE, D. (2017). JavaScript Object Notation (JSON) data serialization for IFC schema in web-based BIM data exchange. *Automation in Construction*, 77, S. 24–51.
- AGUILAR-AGUILERA, A. J., de LA HOZ-TORRES, M. L., MARTÍNEZ-AIRES, M. D., & RUIZ, D. P. (2019). BIM-based framework for indoor acoustic conditioning in early stages of design. *internoise 2019*.
- AJAYI, S. O., OYEDELE, L. O., CERANIC, B., GALLANAGH, M., & KADIRI, K. O. (2015). Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 6(1), S. 14–24.
- ALFIERI, E., SEGHEZZI, E., SAUCHELLI, M., DI GIUDA, G. M., & MASERA, G. (2020). A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. *Architectural Engineering and Design Management*, 16(4), S. 247–269.
- ALJOHANI, A., AHIAGA-DAGBUI, D., & MOORE, D. (2017). Construction Projects Cost Overrun: What Does the Literature Tell Us? *International Journal of Innovation, Management and Technology*, S. 137–143.
- ALWISY, A., BU HAMDAN, S., BARKOKEBAS, B., BOUFERGUENE, A., & AL-HUSSEIN, M. (2019). A BIM-based automation of design and drafting for manufacturing of wood panels for modular residential buildings. *International Journal of Construction Management*, 19(3), S. 187–205.
- ANDERSEN, J. H., RASMUSSEN, N. L., & RYBERG, M. W. (2022). Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. *Energy and Buildings*, 254.

- ARAYICI, Y., KHOSROWSHAHI, F., MARSHAL PONTING, A., & MIHINDU, S. (2009). Towards Implementation of Building Information Modelling in the Construction Industry. *Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V)*.
- ARCHITECTUREAU.COM. (n. d.). *candlebark school library*. Verfügbar 26. Mai 2023 unter <https://architectureau.com/articles/candlebark-library/#img-2>
- ARCHITECTURE-EXCELLENCE.ORG. (2023). *Thunder Bay Regional*. Verfügbar 26. Mai 2023 unter https://architecture-excellence.org/wp-content/uploads/2022/08/2005_NA_COMP_Thunder_Bay_Regional_Health_Sciences_Centre.jpg
- BADINO, E., SHTREPI, L., & ASTOLFI, A. (2020). Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. *Acoustics*, 2(2), S. 246–278.
- BALAJI, B., BHATTACHARYA, A., FIERRO, G., GAO, J., GLUCK, J., HONG, D., JOHANSEN, A., KOH, J., PLOENNIGS, J., AGARWAL, Y., BERGÉS, M., CULLER, D., GUPTA, R. K., KJÆRGAARD, M. B., SRIVASTAVA, M., & WHITEHOUSE, K. (2018). Brick : Metadata schema for portable smart building applications. *Applied Energy*, 226, S. 1273–1292.
- BAUART-INGENIEURE. (n. d.). *Neubau eines 4-geschossigen Wohnhauses, Bad Aibling*. Verfügbar 26. Mai 2023 unter <https://www.bauart-ingenieure.de/projekt/neubau-eines-4-geschossigen-wohnhauses-bad-aibling/?pk=auszeichnungen>
- BAUMGÄRTEL, K., & PIRNBAUM, S. (2016). Automatische Prüfung und Filterung in BIM mit Model View Definitions. *28. Forum Bauinformatik 2016*.
- BAZJANAC, V. (2010). Space Boundary Requirements for Modeling of Building Geometry for Energy and Other Performance Simulation. *Proceedings of the CIB W78 2010*.
- BAZJANAC, V., & CRAWLEY, D. B. (1997). The Implementation of Industry Foundation Classes in Simulation Tools for the Building Industry. *Building Simulation 1997*.
- BEDRICK, J., IKERD, W., & REINHARDT, J. (2021). 2021 level of development (LOD) specification for Building Information Models. In BIMFORUM (Hrsg.).
- BELSKY, M., SACKS, R., & BRILAKIS, I. (2015). A Semantic Enrichment Engine for Building Information Modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(4), S. 261–274.
- BERTIM PROJECT TEAM. (2019). BERTIM – innovative wood prefabrication for energy efficient renovations - Project Results Booklet.
- BIMiD-KONSORTIUM. (2018). BIMiD-Leitfaden: So kann der Einstieg in BIM gelingen. In BIMiD-KONSORTIALFÜHRER (Hrsg.).
- BINDERHOLZ.COM. (2019). *Wenlock Park*. Verfügbar 26. Mai 2023 unter https://www.binderholz.com/fileadmin/_processed_/7/d/csm_Wenlock_ParkView1_gross_1_131b5d504c.jpg
- BLOCH, T. (2022). Connecting research on semantic enrichment of BIM - review of approaches, methods and possible applications. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, S. 416–440.

- BLÖDT, A., RABOLD, A., & HALSTENBERG, M. (2019). Schallschutz im Holzbau – Schallschutz im Holzbau - Grundlagen und Vorbemessung. In INFORMATIONSDIENST HOLZ (Hrsg.).
- BODEMER, E., KLEINHENZ, M., ERHARD, L., & WINTER, S. (2017). Gesundheitliche Interaktion von Holz - Mensch - Raum: Eine Metastudie der TU München in Kooperation mit Proholz Bayern.
- BODENSCHLÄGEL, K. (2021). *BIM gestützte Schallschutz Planung mit BIM.click und VBA-coustic* [Bachelorarbeit]. TH Rosenheim. Studiengang Gebäudephysik.
- BOGDAHN, J., & COORS, V. (2010). TOWARDS AN AUTOMATED HEALING OF 3D URBAN MODELS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, *W15*, 38(4).
- BOROWIETZ, M., BRAUN, M., BROSSMANN, A., DÜSPOHL, R., GROHMANN, M., OLTMANN, H.-G., & PROKOP, I. (2016). BIM-Leitfaden für die Planerpraxis: Empfehlungen für planende und beratende Ingenieure.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C., & BEETZ, J. (Hrsg.). (2015). *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg.
- BORRMANN, A., & RANK, E. (2009a). Specification and implementation of directional operators in a 3D spatial query language for building information models. *Advanced Engineering Informatics*, *23*(1), S. 32–44.
- BORRMANN, A., & RANK, E. (2009b). Topological analysis of 3D building models using a spatial query language. *Advanced Engineering Informatics*, *23*(4), S. 370–385.
- BRAMANN, H., & MAY, I. (2015). Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, Hrsg.).
- BREIT, M., HÄUBI, F., & ARNOLD, N. (2010). Digital simulation in lean project development. *18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction - IGLC 18*.
- BRUMMER, B. (2015). *Rest-Interface für ein Bauteilinformationssystem zur Anbindung an Software zur Gebäudekonstruktion* [Bachelorarbeit]. Hochschule Rosenheim.
- BUHAMDAN, S., DUNCHEVA, T., & ALWISY, A. (2021). Developing a BIM and Simulation-Based Hazard Assessment and Visualization Framework for CLT Construction Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, *147*(3).
- BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY AND BRYDEN WOOD. (2016). BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly): Essential Guide.
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2013). *Coordination View Version 2.0 for IFC 2x3*. Verfügbar 18. Juni 2023 unter https://standards.buildingsmart.org/MVD/RELEASE/IFC2x3/TC1/CV2_0/CoordinationView_V2-0_EXPRESS_IFC2X3_Version-1-3.pdf
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2019). *IFC4 ADD2 TC 1 Reference View 1.2*. Verfügbar 18. Juni 2023 unter https://standards.buildingsmart.org/MVD/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/RV1_2/HTML/

- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2023a). *IFC 4x3 Add 1*. Verfügbar 31. Mai 2023 unter <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2023b). *latest available documentation for IFC 4.3.x specification*. Verfügbar 18. Juni 2023 unter <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2023c). *What is openBIM?* Verfügbar 15. Juni 2023 unter <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/openbim-definition/>
- BUNDESARCHITEKTENKAMMER. (2020). BIM für Architekten: Leistungsbild, Vertrag, Vergütung.
- CADWORK. (2022). *Workshop Videos Anwendertreffen 2022: Arbeiten nach der BIM-Methode, IFC und andere Schnittstellen*. https://en.cadwork.com/cwen/projects/truckee__home__project/indexL1.jsp?did=13233
- CHANG, Y. T., LI, T. Y., & HSIEH, S. H. (2021). Building Information Modeling for Timber Buildings- A Review. *38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021)*.
- CHARPENAY, V., KABISCH, S., ANICIC, D., & KOSCH, H. (2015). An ontology design pattern for IoT device tagging systems. *2015 5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*, S. 138–145.
- CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG, C., SCHANDA, U., GELADZE, E., SCHÖPFER, F., FRISCHMANN, F., RABOLD, A., & MAYR, A. (2021). An open BIM workflow for the prediction of sound insulation in timber constructions. *EuroNoise 2021*.
- CHERET, P., SCHWANER, K., & SEIDEL, A. (2014). *Urbaner Holzbau: Handbuch und Planungshilfe - Chancen und Potenziale für die Stadt*. DOM Publishers.
- CHO, J., LEE, B., & YOON, J. (2016). Development of parametric libraries for BIM of Korean traditional wooden structure. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*.
- CLASEN, D., & LANGER, S. (2007). Finite Element Approach for Flanking Transmission in Building Acoustics. *Building Acoustics*, 14(1), S. 1–14.
- COLLINS, F. C., RINGSQUANDL, M., BRAUN, A., HALL, D. M., & BORRMANN, A. (2022). Shape encoding for semantic healing of design models and knowledge transfer to scan-to-BIM. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 175(4), S. 160–180.
- CRISPIN, C., DE GEETERE, L., & INGELAERE, B. (2014). Extensions of EN 12354 vibration reduction index expressions by means of FEM calculations. *Inter-Noise 2014*.
- DA SILVA, C., & BEWERSDORFF, D. (2022). Vernetzte Multiphysik, Bauphysik von morgen. In C. JACOB & S. KUKOVEC (Hrsg.), *Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und profitablen Wertschöpfung von Gebäuden*. Springer Vieweg.
- DALY, L., & BRUTZMAN, D. (2007). X3D: Extensible 3D Graphics Standard [Standards in a Nutshell]. *IEEE signal processing magazine*, 24(6).

- DANIELE, L. M., den HARTOG, F., & ROES, J. (2015). Study on Semantic Assets for Smart Appliances Interoperability : D-S4: FINAL REPORT (L. EUROPEAN UNION, Hrsg.). (Contract number: 30-CE-0610154/00-11 ; SMART number: 2013/01077).
- DARWISH, M., ALSAKA, F., ASSAF, S., & AL-HUSSEIN, M. (2022). Automated BIM-Based CNC File Generator for Wood Panel Framing Machines in Construction Manufacturing. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit 2022*.
- DAUM, S. (2018). *Konzeption einer raum-zeitlichen Anfragesprache für die Analyse und Prüfung von 4D-Gebäudeinformationssystemmodellen* [Dissertation]. Technische Universität München. Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt.
- DAUM, S., & BORRMANN, A. (2014). Processing of Topological BIM Queries using Boundary Representation Based Methods. *Advanced Engineering Informatics*, 28(4), S. 272–286.
- DAY, G., GASPARRI, E., & AITCHISON, M. (2019). Knowledge-Based Design in Industrialised House Building: A Case-Study for Prefabricated Timber Walls. In F. BIANCONI & M. FILIPPUCCI (Hrsg.), *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design* (S. 989–1016, Bd. 24). Springer International Publishing.
- DEGA EMPFEHLUNG 103. (2018). Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis (D. G. für AKUSTIK E.V., Hrsg.).
- DI BELLA, A. (2021). Application of BIM Model Checking in building acoustic design. *EuroNoise 2021*.
- DIN 4109-1:2018-01. (2018). Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderung.
- DIN 4109-2:2018-01. (2018). Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderung.
- DIN 4109-31:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 31: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Rahmendokument.
- DIN 4109-32:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Massivbau.
- DIN 4109-33:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Holz-, Leicht- und Trockenbau.
- DIN 4109-34:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 34: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen.
- DIN 4109-35:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden.
- DIN 4109-36:2016-07. (2016). Schallschutz im Hochbau - Teil 36: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Gebäudetechnische Anlagen.
- DIN EN 17412-1:2021-06. (2021). DIN EN 17412-1:2021-06, Bauwerksinformationsmodellierung - Informationsbedarfstiefe - Teil 1: Konzepte und Grundsätze.
- DIN EN ISO 10140-1:2021-09. (2021). Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte.

- DIN EN ISO 10140-2:2021-09. (2021). Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung.
- DIN EN ISO 10140-3:2021-09. (2021). Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung.
- DIN EN ISO 12354-1:2017-11. (2017). Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen.
- DIN EN ISO 12354-2:2017-11. (2017). Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen.
- DIN EN ISO 16283-1:2018-04. (2018). Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 1: Luftschalldämmung.
- DIN EN ISO 16283-2:2020-11. (2020). Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung.
- DIN EN ISO 19650-1:2019-08. (2019). DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung__ (BIM)_- Informationsmanagement mit BIM_- Teil_1: Begriffe und Grundsätze (ISO_19650-1:2018).
- DIN EN ISO 29481-1:2018-01. (2018). Bauwerksinformationsmodelle - Handbuch der Informationslieferungen: Teil 1: Methodik und Format.
- DIN EN ISO 717-1:2021-05. (2021). Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung.
- DIN EN ISO 717-2:2021-05. (2021). Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung.
- DINIS, F. M., POÇAS MARTINS, J., GUIMARÃES, A. S., & RANGEL, B. (2022). BIM and Semantic Enrichment Methods and Applications: A Review of Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, S. 879–895.
- DLUBAL, D. (2021). *Untersuchung des Structural Analysis Format (SAF) auf Eignung für eine BIM-gestützte Tragwerksplanung* [Masterarbeit]. TU München. Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation.
- DODOO, A., GUSTAVSSON, L., & SATHRE, R. (2014). Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. *Energy and Buildings*, 82, S. 194–210.
- DONG, B., LAM, K. P., HUANG, Y. C., & DOBBS, G. M. (2007). A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. *Building Simulation* 2007.
- EASTMAN, C. (2009). Automated Assessment of Early Concept Designs. *Architectural Design*, 79(2), S. 52–57.
- EHMANN, S. A., & LIN, M. C. (2001). Accurate and Fast Proximity Queries Between Polyhedra Using Convex Surface Decomposition. *Computer Graphics Forum*, 20(3), S. 500–511.

- FALLAHI, A., POIRIER, E. A., STAUB-FRENCH, S., GLATT, J., & SILLS, N. (2016). Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBC's Tall Wood Building. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*.
- FICHTER, E., RICHTER, V., FRISCH, J., & VAN TREECK, C. (2021). Automatic generation of second level space boundary geometry from IFC models. *Building Simulation 2021*.
- FINCH, G., MARRIAGE, G., GJERDE, M., PELOSI, A., & PATEL, Y. (2020). Understanding the challenges of circular economy construction through full-scale prototyping. *Proceedings of the International Conference of Architectural Science Association 2020*.
- FLODÉN, O., PERSSON, K., & SANDBERG, G. (2016). Numerical methods for predicting vibrations in multi-storey wood buildings. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*.
- FRISCHMANN, F., KOLLMANNNSBERGER, S., & RABOLD, A. (2013). Prä-Prozessor Framework für BIM-gekoppelte vibroakustische Simulationen im Holzbau. In *Forum Bauinformatik 2013*.
- FRISCHMANN, F., KOLLMANNNSBERGER, S., RABOLD, A., & RANK, E. (2014). High order Finite Elements for mid-frequency vibro-acoustics. *9th International Conference on Structural Dynamics EURO-DYN 2014*.
- FÜRHAPPER, C., HABLA, E., STRATEV, D., WEIGL, M., & DOBIANER, K. (2020). Living Conditions in Timber Houses: Emission Trends and Indoor Air Quality. *Frontiers in Built Environment*, 5.
- GALIĆ, M., VENKRBEČ, V., CHMELIK, F., FEINE, I., PUČKO, Z., & KLANŠEK, U. (2017). Survey of Accomplishments in Bim Implementation in Croatia, The Czech Republic, Germany, And Slovenia. *Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek*, 8(15), S. 23–35.
- GARRETT, J. H., BASTEN, J. C., & BRESLIN, J. F. (1989). An Object-Oriented Environment for Representing Building Design and Construction data: Interim Technical Report. *Advanced Construction Technology Center, Newmark Civil Engineering Laboratory, University of Illinois*.
- GAUDRY, L., CHABLOZ, M., GOLCHAN, D., NEMBRINI, J., & SCHMID, M. (2019). Ecological mass timber as an answer to affordable housing in Switzerland? *IABSE Congress, New York, New York 2019: The Evolving Metropolis*, S. 621–629.
- GEORGIADOU, M. C. (2019). An overview of benefits and challenges of building information modelling (BIM) adoption in UK residential projects. *Construction Innovation*, 19(3), S. 298–320.
- GERRETSEN, E. (2015). Extending EN 12354 sound insulation modelling to composed, light weight building systems. *Inter-Noise 2015*.
- GIGLIO, A., PAOLETTI, I., & ZHELIAZKOVA, M. (2020). Performance-Based Design Approach for Tailored Acoustic Surfaces. In B. DANIOTTI, M. GIANINETTO & S. DELLA TORRE (Hrsg.), *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*. Springer International Publishing.

- GINEIGER, B. (2022). BIM und Holzbau – Sicht des Holzbauers: Campus RO, Rosenheim in «OPEN BIM» geplant. In FORUM HOLZBAU (Hrsg.), 26. *Internationales Holzbau-Forum, IHF*.
- GOMES, V., BARROS, N. N., & RUSCHEL, R. C. (2019). Building Information Modelling for Whole-Building LCA: BIM4LCA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1).
- GOYAL, G., SINGH, K., & RAMKUMAR, K. R. (2017). A detailed analysis of data consistency concepts in data exchange formats (JSON & XML). *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2017)*.
- GRUBER, B. (2021). *Studentenquartier will DGNB-Platin Rosenheim setzt auf Holzbau und Ökostrom* (HOLZBAU AUSTRIA, Hrsg.). Verfügbar 26. Juni 2023 unter <https://www.holzbauaustria.at/architektur/2021/08/mehr-wohnraum-fuer-rosenheim.html>
- HAIYAN, D., HONG, Z., & BIN, M. (2021). Manufacture and Assembly Mechanism of Dougong. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 960.
- HAMIDAVI, T., ABRISHAMI, S., & HOSSEINI, M. (2020). Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution. *Journal of Building Engineering*, 32.
- HAQ, Z. U., KHAN, G. F., & HUSSAIN, T. (2015). A Comprehensive analysis of XML and JSON web technologies. *New Developments in Circuits, Systems, Signal Processing, Communications and Computers*.
- HEBEL, J. P. (2021). *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure: Textausgabe mit Einführung und Anmerkungen zu den wichtigsten Neuerungen* (4., vollständig überarbeitete Auflage). Reguvis Fachmedien.
- HEIDELAUF, L. (2022). Projektvorstellung und Leitmodell: Campus RO, Rosenheim in «OPEN BIM» geplant. In FORUM HOLZBAU (Hrsg.), 26. *Internationales Holzbau-Forum, IHF*.
- HEIKKINEN, P., PUTTONEN, JARI, KAIRI, MATTI, KAUFMANN, H., WINTER, S., LARSEN, K. E., & HOLM, K. R. (2010). TES EnergyFaçade - prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope. *gefördert von: ERA-NET "WoodWisdom-Net – Networking and Integration of National Programmes in the Area of Wood Material Science and Engineering"*.
- HELMUS, M., MEINS-BECKER, A., FELLER, D. J., & HORT, G. (2021a). Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells: Anlage 2: Bezeichnungsvorschläge. In BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL & TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT (Hrsg.), *Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells*.
- HELMUS, M., MEINS-BECKER, A., FELLER, D. J., & HORT, G. (2021b). Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells: Anlage 3: Anforderungskatalog Räume und Bauelemente - Architektur. In BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL & TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT (Hrsg.), *Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells*.
- HELMUS, M., MEINS-BECKER, A., FELLER, D. J., & HORT, G. (2021c). Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells: Anlage 4: Anforderungskatalog Technische Gebäude-

- ausrüstung. In BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL & TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT (Hrsg.), *Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells*.
- HELMUS, M., MEINS-BECKER, A., FELLER, D. J., & HORT, G. (2021d). Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells: Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells Anlage 1: Unterlagen zur Projektorganisation. In BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL & TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT (Hrsg.), *Leitfaden für die Erstellung eines Bauwerksdatenmodells*.
- HERTIE SCHOOL OF GOVERNANCE GMBH. (2015). Studie: Großprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität: Fact Sheet 1.
- HESSINGER, J., & BACHER, S. *Prüfbericht Nr. 171 43756: Auftraggeber B&O Wohnungswirtschaft* (IFT ROSENHEIM, Hrsg.). Hrsg. von IFT ROSENHEIM. Rosenheim, 2010.
- HESSINGER, J., & RABOLD, A. *Schalltechnische Stellungnahme Nr. 175 42529 - S60: Schalltechnische Begleitung eines Bauvorhabens. Auftraggeber B&O Wohnungswirtschaft* (IFT ROSENHEIM, Hrsg.). Hrsg. von IFT ROSENHEIM. Rosenheim, 2010.
- HOLTZ, F., RABOLD, A., BUSCHBACHER, H.-P., & HESSINGER, J. (2004). Schalltechnische Optimierung des Holzbaus durch Verbesserung der Wandkonstruktionen: Schlussbericht (LABOR FÜR SCHALL- UND WÄRMESSTECHNIK, Hrsg.).
- HOULIHAN WIBERG, A., GEORGES, L., DOKKA, T. H., HAASE, M., TIME, B., LIEN, A. G., MELLEGÅRD, S., & MALTHA, M. (2014). A net zero emission concept analysis of a single-family house. *Energy and Buildings*, 74, S. 101–110.
- HÜHNE, J. (2022). Zur Verfügung stellen von 3D-Planungsmodellen und Arbeitsablauf bei Meisterstück-HAUS (Hameln): Telefonat am 02.09.2022.
- ISO 10303-11:2014-11. (2004). Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange — Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual.
- ISO 12006-2:2015-05. (2015). Building construction - Organization of information about construction works: Part 2: framework for classification.
- ISO 16739-1:2018-11. (2018). Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries: Part 1: Data schema.
- ISO/IEC 19775-1:2013-11. (2013). Informationstechnik - Computergraphik , Bildverarbeitung und Umweltdatendarstellung - Erweiterbare 3D (X3D) - Teil 1: Architektur und Basiskomponenten.
- ISO/IEC 19776-2:2015-12. (2015). Informationstechnik - Computergrafik und Bildverarbeitung - Erweiterbare 3D (X3D) Codierungen - Teil 2: Klassische VRML Codierung.
- ISO/IEC 19776-3:2015-10. (2015). Informationstechnik - Computergraphik , Bildverarbeitung und Umweltdatendarstellung - Erweiterbare 3D (X3D) - Teil 3: Binärcodierung.
- JUNG, N., HÄKKINEN, T., & REKOLA, M. (2018). Extending Capabilities of BIM to support performance based design. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*.

- KABELITZ-CIRÉ, R. (2021). LAGEBERICHT 2021: Zimmerer / Holzbau (HOLZBAU DEUTSCHLAND – BUND DEUTSCHER ZIMMERMEISTER IM ZENTRALVERBAND DES DEUTSCHEN BAUGEWERBES E.V., Hrsg.).
- KABELITZ-CIRÉ, R. (2022). LAGEBERICHT 2022: Zimmerer / Holzbau (HOLZBAU DEUTSCHLAND – BUND DEUTSCHER ZIMMERMEISTER IM ZENTRALVERBAND DES DEUTSCHEN BAUGEWERBES E.V., Hrsg.).
- KAUFMANN, H., HUSS, W., SCHUSTER, S., & STIEGLMEIER, M. (2017). Optimierte Planungsprozesse für Gebäude in vorgefertigter Holzbauweise: leanWOOD (TU MÜNCHEN, Hrsg.).
- KAWADA, T. (2011). Noise and health–sleep disturbance in adults. *Journal of occupational health*, 53(6), S. 413–416.
- KESSEL, M. H., HOFFMEISTER, H.-W., QUAST, S., & ARMBRECHT, C. (2005). Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse: Teilvorhaben 2: Innovativer Holzsystembau durch optimierte Fertigungs- und integrierte Planungsmethoden (INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSTECHNIK UND INSTITUT FÜR BAUKONSTRUKTION UND HOLZBAU TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, Hrsg.).
- KINCELOVA, K., BOTON, C., BLANCHET, P., & DAGENAIS, C. (2019). BIM-based code compliance checking for fire safety in timber buildings: A comparison of existing tools. *CSCE Annual Conference 2019*.
- KINCELOVA, K., BOTON, C., BLANCHET, P., & DAGENAIS, C. (2020). Fire Safety in Tall Timber Building: A BIM-Based Automated Code-Checking Approach. *Buildings*, 10(7), S. 121.
- KNAUF GIPS KG. (2020). Knauf Metallständerwände, Trockenbausystem W11.de: Detailblatt 04/2020 (KNAUF GIPS KG, Hrsg.).
- KOMZET BAU BÜHL. (2011). Übersicht über CAD-Software für den Holzbau (KOMZET BAU BÜHL KOMPETENZZENTRUM DER BAUWIRTSCHAFT, BERUFSFÖRDERUNGSWERK DER SÜDBADISCHEN BAUWIRTSCHAFT GMBH, Hrsg.).
- KOSTKA, G., & FIEDLER, J. (2016). *Large Infrastructure Projects in Germany*. Springer International Publishing.
- KOUYOUMJI, J.-L., BARD, D., BORELLO, G., & GUIGOU-CARTER, C. (2014). Challenges for acoustic calculation models in Silent Timber Build , Part 2. *InterNoise: Improving the World through Noise Control*.
- KREMER, P. D., & SYMMONS, M. A. (2015). Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: a PESTEL evaluation of the potential. *International Wood Products Journal*, 6(3), S. 138–147.
- KRIJNEN, T., & BEETZ, J. (2020). An efficient binary storage format for IFC building models using HDF5 hierarchical data format. *Automation in Construction*, 113.

- LANGSTON, C., & ZHANG, W. (2021). DfMA: Towards an Integrated Strategy for a More Productive and Sustainable Construction Industry in Australia. *Sustainability*, 13(16).
- LATTKE, F., & HERNANDEZ-MAETSCHL, S. (2016). LeanWOOD - Advancing performance of design teams in timber construction. In W. WINTER, J. EBERHARDSTEINER & F.-H. JOURDA (Hrsg.), *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016: World Conference on Timber Engineering*. Vienna University of Technology Austria.
- LAUSCHKE, M. (2021). *BIM im Holzbau und Schallschutz - Erstellung eines Holzbau-Modells in IFC4 mit dem xBim-Toolkit* [Studienarbeit]. TH Rosenheim.
- LE ROUX, S., BANNIER, F., BOSSANNE, E., & STIEGLMEIER, M. (2016). Investigating the interaction of building information modelling and lean construction in the timber industry. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*.
- LILIS, G. N., GIANNAKIS, G. I., & ROVAS, D. V. (2017). Automatic generation of second-level space boundary topology from IFC geometry inputs. *Automation in Construction*, 76, S. 108–124.
- LIU, H., LU, M., & AL-HUSSEIN, M. (2016). Ontology-based semantic approach for construction-oriented quantity take-off from BIM models in the light-frame building industry. *Advanced Engineering Informatics*, 30(2), S. 190–207.
- LIU, H., ZHANG, Y., LEI, Z., LI, H. X., & HAN, S. (2021). Design for Manufacturing and Assembly: A BIM-Enabled Generative Framework for Building Panelization Design. *Advances in Civil Engineering*, 2021, S. 1–14.
- LIVINGSTONE, A., PATLAKAS, P., MILNE, M., SMITH, S., & HAIRSTANS, R. (2016). Multi-dimensional data fitting for the structural design of a simple timber connection. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*.
- LIVINGSTONE, A., MENENDEZ, J., LEITCH, K., & HAIRSTANS, R. (2015). The Case for Mass Customisation of Structural Timber Design. In N. INGRAFFEA & M. LIBBY (Hrsg.), *Structures Congress 2015* (S. 2804–2814). American Society of Civil Engineers.
- LORENZ, R. (2007). Development of new facades by combined modeling of thermal sound and ventilation aspects at early design phases. *IBPSA 2007*.
- LUTTUN, J., & KRJJNEN, T. (2021). An Approach for Data Extraction, Validation and Correction Using Geometrical Algorithms and Model View Definitions on Building Models (E. TOLEDO SANTOS & S. SCHEER, Hrsg.). *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 98, S. 529–543.
- MÄNTYLÄ, M. (1988). An introduction to solid modeling (COMPUTER SCIENCE PRESS, Hrsg.). *Principles of computer science series*, 13.
- MANZOOR, B., OTHMAN, I., & POMARES, J. C. (2021). Digital Technologies in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry-A Bibliometric-Qualitative Literature Review of Research Activities. *International journal of environmental research and public health*, 18(11).
- MASTINO, C. C., BACCOLI, R., FRATTOLILLO, A., MARINI, M., DI BELLA, A., & DA POS, V. (2017). The building information model and the IFC standard: Analysis of the

- characteristics necessary for the acoustic and energy simulation of buildings. *IBPSA 2017*.
- MASTINO, C. C., BACCOLI, R., FRATTOLILLO, A., MARINI, M., & SALARIS, C. (2019). Acoustic Insulation And Building Information Modeling: A Model Of Calculation For The Code Checking In The Forecast Phase And Of Measurement Of Performance. *IBPSA 2019*.
- MASTINO, C. C., CONCU, G., BACCOLI, R., FRATTOLILLO, A., & DI BELLA, A. (2019). Methods for Acoustic Classification in Buildings: An example of Application of BIM Procedures on Wooden Buildings. *Inter-Noise 2019*.
- MASTINO, C. C., DI BELLA, A., BARBARESI, L., SEMPRINI, G., & FRATTOLILLO, A. (2021). BIM Process for acoustic problems. *Euro-Noise 2021*.
- MEDIAVILLA, A. (2019). RenoBIM: New tools for the competitiveness of timber construction. *9e Forum International Bois Construction 2019*.
- MEDIAVILLA, A., SEBESI, Y., & PHILIPPS, P. (2017). bertim - deliverable 4.6 Integration with external tools (Energy Plus), gefördert von European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.
- MENSCH UND MASCHINE. (2017). BIM-Konstrukteur - Autodesk Revit Structure Trainingshandbuch: Grundlagen.
- MONEDERO, J. (2000). Parametric design: a review and some experiences. *Automation in Construction*, 9(4), S. 369–377.
- MONTEIRO, C., WEITBRECHT, P., & JARDIM, C. (2021). Brazilian BIM Objects Standard - How to Deal with Acoustics? *Euro-Noise 2021*.
- MONTENEGRO, V. D., AGNOLIN, S., & DUCRUET, P. (2021). Development of an architectural acoustic study through a complete Open BIM workflow. *Euro-Noise 2021*.
- MOORER, J. A. (1979). About This Reverberation Business. *Computer Music Journal*, 3(2), S. 13.
- MORANDI, F., de CESARIS, S., GARAI, M., & BARBARESI, L. (2018). Measurement of flanking transmission for the characterisation and classification of cross laminated timber junctions. *Applied Acoustics*, 141, S. 213–222.
- MOUDON, A. V. (2009). Real noise from the urban environment: how ambient community noise affects health and what can be done about it. *American journal of preventive medicine*, 37(2), S. 167–171.
- NAGEL, R. N., BRAITHWAITE, W. W., & KENNICOTT, P. R. (1980). Initial Graphics Exchange Specification IGES Version 1.0: NBSIR 80-1978 (R).
- NAWARI, N. (2012). BIM Standardization and Wood Structures. *International Conference on Computing in Civil Engineering ASCE 2012*, S. 293–300.
- NGUYEN, T.-H., & OLOUFA, A. A. (2002). Spatial Information: Classification and Applications in Building Design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17(4), S. 246–255.

- OLAWALE, Y. A., & SUN, M. (2010). Cost and time control of construction projects: inhibiting factors and mitigating measures in practice. *Construction Management and Economics*, 28(5), S. 509–526.
- OSTROWSKA-WAWRYNIUK, K. (2021). Prefabrication 4.0: BIM-aided design of sustainable DIY-oriented houses. *International Journal of Architectural Computing*, 19(2), S. 142–156.
- PATLAKAS, P., LIVINGSTONE, A., HAIRSTANS, R., & NEIGHBOUR, G. (2018). Automatic code compliance with multi-dimensional data fitting in a BIM context. *Advanced Engineering Informatics*, 38, S. 216–231.
- PAUEN, N., SCHLÜTTER, D., SIWIECKI, J., FRISCH, J., & TREECK, C. (2020). Integrated representation of building service systems: topology extraction and TUBES ontology. *Bauphysik*, 42(6), S. 299–305.
- PAUWELS, P., VAN DEURSEN, D., VERSTRAETEN, R., de ROO, J., de MEYER, R., VAN DE WALLE, R., & VAN CAMPENHOUT, J. (2011). A semantic rule checking environment for building performance checking. *Automation in Construction*, 20(5), S. 506–518.
- PAUWELS, P., & MCGLINN, K. (2022). *Buildings And Semantics: Data models and web technologies for the built* (First published 2023). CRC Press.
- PAUWELS, P., & TERKAJ, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, 63, S. 100–133.
- PAUWELS, P., ZHANG, S., & LEE, Y.-C. (2017). Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview. *Automation in Construction*, 73, S. 145–165.
- PAVIOT, T., PLESCH, A., SATTLER, L., & LAMOURI, S. (2020). STEP and IFC export to X3D. In S. HAN, D. BRUTZMAN, J. LEE, K.-H. YOO, V. MARCHETTI, C. MOUTON, T. KURATA & J. JIA (Hrsg.), *The 25th International Conference on 3D Web Technology*.
- PEREZ, M., & FUENTE, M. (2013). Acoustic design through predictive methods in Cross Laminated Timber (CLT) panel structures for buildings. *Proceedings of Inter-Noise 2013*.
- PETERS, B., NGUYEN, J., & OMAR, R. (2021). Parametric Acoustics: Design techniques that integrate modelling and simulation. *Euro-Noise 2021*.
- PINHEIRO, S., WIMMER, R., O'DONNELL, J., MUHIC, S., BAZJANAC, V., MAILE, T., FRISCH, J., & VAN TREECK, C. (2018). MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. *Automation in Construction*, 90, S. 91–103.
- PLANET ARK. (2015). Wood - Housing, Health, Humanity.
- POBLET-PUIG, J., & GUIGOU-CARTER, C. (2015). Using spectral finite elements for parametric analysis of the vibration reduction index of heavy junctions oriented to flanking transmissions and EN-12354 prediction method. *Applied Acoustics*, 99, S. 8–23.
- POIRIER, E., STAUB-FRENCH, S., PILON, A., FALLAHI, A., TESHNIZI, Z., TANNERT, T., & FROESE, T. (2022). Design process innovation on brock commons tallwood house. *Construction Innovation*, 22(1), S. 23–40.

- POYET, P., ZARLI, A., & BESSE, G. (2002). Vers une Généralisation de l'Usage de la Norme STEP dans le secteur du Bâtiment. *Gefördert von Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, Subvention N°01 DIR 04.*
- PRATT, M. (2001). Introduction to ISO 10303 - The STEP Standard for Product Data Exchange. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1), S. 102–103.
- PREIDEL, C. (2020). *Automatisierte Konformitätsprüfung digitaler Bauwerksmodelle hinsichtlich geltender Normen und Richtlinien mit Hilfe einer visuellen Programmiersprache* [Diss., TU München]. Lehrstuhl für computergestützte Modellierung und Simulation, Ingenieur fakultät für Bau Geo Umwelt.
- PREIDEL, C., BUS, N., BORRMANN, A., & FIES, B. (2018). Pre-Processing IFC Building Models for Code Compliance Checking based on Visual Programming. *Proc. of the Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering.*
- PRITONI, M., PAINE, D., FIERRO, G., MOSIMAN, C., POPLAWSKI, M., SAHA, A., BENDER, J., & GRANDERSON, J. (2021). Metadata Schemas and Ontologies for Building Energy Applications: A Critical Review and Use Case Analysis. *Energies*, 14(7), S. 2024.
- PROFESSNER, H., & RHOMBERG, H. (2016). New opportunities for wood in digitization and in the internet of things. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016.*
- QIAN, C., MÉNARD, S., BARD, D., & NEGREIRA, J. (2019). Development of a Vibroacoustic Stochastic Finite Element Prediction Tool for a CLT Floor. *Applied Sciences*, 9(6), S. 1106.
- QUINN, C., & MCARTHUR, J. J. (2021). A case study comparing the completeness and expressiveness of two industry recognized ontologies. *Advanced Engineering Informatics*, 47.
- RABOLD, A., CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG, C., & MECKING, S. (2017). Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109. In FORUM HOLZBAU (Hrsg.), *10. Europäischer Kongress EBH 2017.*
- RABOLD, A., CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG, C., & MECKING, S. (2018). Nachweis von Holzdecken nach DIN 4109 - Möglichkeiten und Grenzen. In DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR AKUSTIK E.V. (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik - DAGA.*
- RABOLD, A., WOHLMUTH, B., HORGER, T., RANK, E., KOLLMANNBERGER, S., FRISCHMANN, F., PAOLINI, A., SCHANDA, U., MECKING, S., KRUSE, T., CHÂTEAUVIEUX-HELLWIG, C., SCHRAMM, M., MÜLLER, G., BUCHSCHMID, M., & WINTER, C. (2018). Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten: Modellierung, numerische Simulation, Validierung: Dachbericht zum Forschungsvorhaben.
- RAMAJI, I. J., MEMARI, A. M., & SOLNOSKY, RYAN, L. (2014). Integrated BIM Platform for Multi-Story Modular Building Industry. *2nd Residential Building Design & Construction Conference 2014.*

- RANDO, M., OVERTON, K., SÁNCHEZ-SOLÍS, M., GAUTE, M., & IBANEZ CLIMENT, F. (2017). Finansparken Bjergsted, Stavanger: An Innovative Timber-Framed Office Building. *VII conference ACHE 2017*.
- RIBA. (2020). Plan of Work 2020.
- RICHERT, C. (2022). BIM- Modelldetaillierungsgrad (MDG), Auszug AHO-Heft 11 – Arbeitsstand der Überarbeitung, 09.06.2022, E-Mail Austausch zwischen Châteauevieux-Hellwig, Camille und Richert, Christian.
- RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, C., SAN MILLÁN-CASTILLO, R., & LATORRE-IGLESIAS, E. (2021). Challenges in entire building sound insulation calculation. *Euro-Noise 2021*.
- ROSE, C. M., & BAZJANAC, V. (2015). An algorithm to generate space boundaries for building energy simulation. *Engineering with computers*, 31, S. 271–280.
- RUUSKA, A., & HÄKKINEN, T. (2016). Efficiency in the Delivery of Multi-story Timber Buildings. *Energy Procedia*, 96, S. 190–201.
- SACKS, R., LING, M., YOSEF, R., BORRMANN, A., DAUM, S. F., & KATTEL, U. (2017). Semantic Enrichment for Building Information Modeling: procedure for compiling inference rules and operators for complex geometry. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(6).
- SAJJADIAN, S. M., TUPENAITE, L., & BARLOW, C. (2021). Four Angles of Using Timber in Tall Building. In J. LITTLEWOOD, R. J. HOWLETT & L. C. JAIN (Hrsg.), *Sustainability in Energy and Buildings 2020* (1st ed. 2021). Springer Singapore; Imprint Springer.
- SALVADORI, V. (2019). An overview of the tallest timber buildings in the world. *Forum Legno 2019*.
- SCHACHNER, J. (2022). Wie BIM koordinieren: Campus RO, Rosenheim in «OPEN BIM» geplant. In FORUM HOLZBAU (Hrsg.), 26. *Internationales Holzbau-Forum, IHF*.
- SCHLUETER, A., & THESELING, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, 18(2), S. 153–163.
- SCHROEDER, M. R. (1962). Novel Uses of Digital Computers in Room Acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962.
- SEBESI, Y., EMMER, U., PHILIPPS, P., MANDRARA, Z., COPERET, H., & INTXAUSTI, A. M. (2016). bertim - Deverable 4.2 Building Template Modeller, gefördert von European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.
- SHIBANI, A., BHAVSAR, A., HASSAN, D., SAIDANI, M., & AGHA, A. (2021). Investigating the Benefits of BIM for Mid-Rise Timber Buildings in Canada: A Qualitative Study. In *IJRDO - Journal of Mechanical And Civil Engineering* (Bd. 7).
- SHIN, S., & LEE, B., YOON, J. (2016). Seismic design method for HanOk considering joint lateral rigidity using BIM. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*.
- SHRESTHA, P. P., BURNS, L. A., & SHIELDS, D. R. (2013). Magnitude of Construction Cost and Schedule Overruns in Public Work Projects. *Journal of Construction Engineering*, 2013, S. 1–9.

- SIBENIK, G., KOVACIC, I., & PETRINAS, V. (2020). From Physical to Analytical Models: Automated Geometry Interpretations. *EG-ICE 2020*.
- SMITH, A. (2014). 17-21 Wenlock Road – Building a 10 Storey Hybrid Structure in London. In FORUM HOLZBAU (Hrsg.), *20. Internationales Holzbau-Forum, IHF 2014*.
- SMITH, B. (2015). *Beginning JSON*. Apress.
- ŠONKA, Š. (2022). SAF - Structural Analysis Format. *PhD WORKSHOP 2022*.
- SOUST-VERDAGUER, B., LLATAS, C., & MOYA, L. (2020). Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage. *Journal of Cleaner Production*, 277.
- SPÄH, M., & WEBER, L. (2016). Flanking transmission of metal stud walls with different junction details. *Applied Acoustics*, 111, S. 86–95.
- SQUADRONE, G., & BACCHI, E. (2017). Acoustic classification scheme and design procedure for buildings pertinent to industrial premises for engineering optimization purposes. *ICSV 24*.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.). (2021). Bauen und Wohnen: augenzeugnisse von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff Lange Reihen z. T. ab 1980.
- STAUB-FRENCH, S., PILON, A., POIRIER, E., FALLAHI, A., KASBAR, M., CALDERON, F., TESHNIZI, Z., & FROESE, T. (2021). Construction process innovation on Brock Commons Tallwood House. *Construction Innovation*, 22(1).
- STOCKER, T. (2021). *Schallschutzoptimierung im Holzbau: Erstellung von IFC-Datenmodellen und Entwicklung eines Automated Code Compliance Checks* [Diss., TU München].
- SUŠNIK, M., TAGLIABUE, L. C., & CAIROLI, M. (2021). BIM-based energy and acoustic analysis through CVE tools. *Energy Reports*, 7, S. 8228–8237.
- SVATOŠ-RAŽNJEVIĆ, H., OROZCO, L., & MENGES, A. (2022). Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. *Buildings*, 12(4), S. 404.
- TAN, Y., FANG, Y., ZHOU, T., WANG, Q., & CHENG, J. C. (2017). Improving Indoor Acoustics Performance of Concert Halls Using Building Information Modeling. In M.-Y. CHENG, H.-M. CHEN & K. C. CHIU (Hrsg.), *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*.
- THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. (n. d.). *Brock Commons*. Verfügbar 26. Mai 2023 unter vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/
- TIMPTE, A. (2016). *Stoßstellen im Massivholzbau: Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose* [Masterarbeit]. Technische Universität Berlin und Hochschule Rosenheim. Architektur.
- TOLMAN, F. P. (1999). Product modeling standards for the building and construction industry: past, present and future. *Automation in Construction*, 8(3), S. 227–235.

- TUPÉNAITÉ, L., ŽILÉNAITÉ, V., KANAPECKIENĖ, L., SAJJADIAN, S. M., GEČYS, T., SAKALAUSKIENĖ, L., & NAIMAVIČIENĖ, J. (2020). Multiple Criteria Assessment of High-Rise Timber Buildings. *Engineering Structures and Technologies*, 11(3), S. 87–94.
- URBAN, S. D., TJAHHADI, M., & SHAH, J. J. (2000). A case study in mapping conceptual designs to object-relational schemas. *Concurrency: Practice and Experience*, 12(9), S. 863–907.
- VDI 2552 BLATT 1:2020-07. *VDI 2552 Blatt 1:2020-07 - Building Information Modeling: Grundlagen* (VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V., Hrsg.). Hrsg. von VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2020.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2012). VDI 4100:2012-10 - Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz.
- VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2023). *VDI/bS 2552 Blatt 11.9 - Projekt: Building Information Modeling; Informationsaustauschanforderungen; Bauphysik*. Verfügbar 7. Juli 2023 unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdibs-2552-blatt-119-building-information-modeling-informationsaustauschanforderungen-bauphysik>
- WAUGH THISTLETON ARCHITECTS. (2018). 100 projects UK CLT. In SOFTWOOD LUMBER BOARD & FORESTRY INNOVATION INVESTMENT (Hrsg.).
- WU, C., & CLAYTON, M. J. (2013). BIM-Based Acoustic Simulation Framework. *30th International Conference of CIB W78*.
- YANG, Y., FENEMORE, C., KINGAN, M. J., & MACE, B. R. (2021). Analysis of the vibroacoustic characteristics of cross laminated timber panels using a wave and finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 494.
- ZEHEMAYR, R. (2021). *Datenbankgestütztes Berechnungstool zur frequenzabhängigen Schallschutzprognose im Holzbau* [Magisterarb., TH Rosenheim]. Studiengang Gebäudephysik.
- ZOTKIN, S. P., IGNATOVA, E. V., & ZOTKINA, I. A. (2016). The Organization of Autodesk Revit Software Interaction with Applications for Structural Analysis. *Procedia Engineering*, 153, S. 915–919.
- ZWIKAEEL, O. (2009). Critical planning processes in construction projects. *Construction Innovation*, 9(4), S. 372–387.