

Technische Universität Berlin  
Fakultät VI Planen Bauen Umwelt  
Institute für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauinformatik  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt



# UNTERSUCHUNG TOPOLOGISCHER DATENMODELLE UND DEREN ANWENDUNG IN DER BIM-METHODIK

Bachelor Thesis

Anastasia Nekrasova  
374397  
[anastasia.nekrasova@outlook.com](mailto:anastasia.nekrasova@outlook.com)

## Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt  
Prof. Dr. Timo Hartmann

14. November 2021

Berlin

# **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 14. November 2021

Anastasia Nekrasova

# Abstract

---

Since the development of the Sketchpad in the early 1970s by Ivan Sutherland, which was the first prototype from today's modelling software, many strong changes have happened in approaches of drafting and design. Nowadays it is almost impossible to imagine a major project in the construction industry without applying methods of Building Information Modelling (BIM). Extensive software solutions and Industry Foundation Classes (IFC) - in practice as a standard recognized data model can be used to describe almost any geometrical form, thus supporting enormous the design process. There are various ways to model a geometric object, for example: Boundary Representation (BRep), Constructive solid geometry (CSG), triangle meshes and others. Beyond that, there is a question of Modeling relationships between objects. Another sort of models, which currently are not commonly used in the practice but being actively studied and examined, are the models with explicit saved relationships between objects. In science this problem belongs to topology, which represents a sub-area of geometry. In the standard software tools topology is saved for elements within a single object but not for the entire cell complex. The first part of this work is dedicated to theoretical concepts related to the field of topology, there will be defined such terms as homeomorphism in the mathematics, space partitioning and others. Afterwards some questions regarding components and application areas of topological models will be discussed. The main focus of this bachelor thesis is investigation of topological Models in the AEC industry. The data storage structures, which are suitable for topological models, the process of creating a model and possible issues will be depicted. The practical part of this thesis will be completed using the open-source software library Topologic. Whereas an overview of possible use cases of geometrical models, which are enriched with topological information, in construction concludes the thesis.

# Zusammenfassung

---

Seitdem Ivan Sutherland Anfang der 70er Jahre Sketchpad, den ersten Prototypen heutiger Modellierungssoftware, entwickelt hat, haben sich typische Vorgehensweisen beim Entwerfen und Design in allen Branchen enorm geändert. So kann man sich in der Baubranche ein Großprojekt ohne Anwendung von Methoden des Building Information Modelling (BIM) fast nicht mehr vorstellen.

Es existiert sowohl eine Menge von Anwendungsfällen, die ein 3D—Modell vom Bauwerk voraussetzen, als auch umfangreiche Softwarelösungen, die es ermöglichen, solche Modelle zu erstellen. Es gibt auch eine in der Praxis als Standard anerkannte Datenspeicherstruktur - Industry Foundation Classes (IFC), womit verschiedenste Objekt-Geometrien beschrieben und gespeichert werden können. Zu den diversen Wege, ein geometrisches Objekt zu modellieren, zählen dabei beispielsweise: Boundary Representation (BRep), Constructive Solid Geometry (GSG), Dreiecknetze und einige weitere. Neben der Form besteht die Frage der Modellierung von Beziehungen zwischen Objekten, welche aktuell in unterschiedlichen Forschungsprojekten untersucht wird. Da die Information, wie sich Objekte zueinander beziehen, momentan in Modellen selten explizit vorhanden ist, wird das in der Praxis kaum genutzt oder gegebenenfalls geometrisch errechnet. In der Wissenschaft gehört diese Problematik zur Topologie, die ein Teilgebiet der Geometrie darstellt. In Standardwerkzeugen wird Topologie meist nur innerhalb von einzelnen Objekten gespeichert aber nicht für Zell-Komplexe oder den gesamten Raum.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden zur Topologie gehörende Begriffe, wie beispielsweise *Homöomorphismus* in der Mathematik, definiert. Danach wird den Fragen nachgegangen: was sind die Bestandteile eines topologischen Modells und wie sehen die Anwendungsbereiche aus. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt auf Untersuchung von topologischen Modellen in der AEC-Branche. Es wird versucht Antworten auf folgende Fragen zu finden: wie erstellt man ein topologisches Modell, welche Probleme können dabei auftreten. Des weiteren werden verschiedene, für topologische Modelle geeignete Datenspeicherstrukturen, welche auf dem Markt vorhanden sind, näher betrachtet.

Anschließend wird die Implementierung von einigen grundlegenden Anwendungsszenarien für topologische Modelle in einer visuellen Programmierumgebung mit der Open-Source Bibliothek *Topologic* gezeigt. Abgeschlossen wird diese Bachelorarbeit mit einer Übersicht von weiteren Einsatzmöglichkeiten der Nutzung von topologischen Informationen innerhalb geometrischer Datenmodelle im Bauwesen.

# Введение

---

С тех пор как Айвен Сазерленд изобрел первый прототип современного программного обеспечения для моделирования - программу Sketchpad, подходы к дизайну и проектированию во всех отраслях изменились сильнейшим образом. Сейчас уже сложно представить крупный девелоперский проект без применения методологии Building Information Modelling (BIM).

Существует как большое количество задач, которые предполагают наличие 3D модели, так и разнообразнейшее программное обеспечение, которое позволяет создавать такие модели. Также уже давно существует международный стандарт хранения данных – Industry Foundation Classes (IFC), с помощью которого можно описать геометрию объекта любой сложности. Геометрическое тело может быть описано различными способами, к наиболее популярным относятся : Boundary Representation (BRep), Constructive Solid Geometry (CSG) и триангуляция. Помимо моделирования геометрической формы объектов в настоящие времена в исследовательских проектах все чаще встает вопрос о необходимости моделирования взаимосвязей между отдельными объектами. Из-за того, что информация о расположение объектов относительно друг друга в большинстве моделей отсутствует, применение этих данных на реальных проектах является на сегодняшний день большой редкостью.

В науке эта проблематика относится к подразделу геометрии, который носит название топология. Как правило в стандартном программном обеспечении топология сохраняется только для элементов внутри отдельного объекта, а не для модели целиком. В первой части этой работы будут даны определения наиболее часто встречающихся в топологии терминов. После этого будет затронут вопрос из чего состоят топологические модели и в каких областях они применяются. Основной целью этой работы является изучение топологических моделей в АЕС секторе. Мы постараемся дать ответ на вопросы: как может выглядеть процесс создания топологической модели и какие сложности могут при этом возникнуть. Затем мы рассмотрим имеющиеся на рынке и подходящие для топологических моделей структуры данных. В заключительной части будут разобраны некоторые стандартные сценарии применения топологических моделей. Для этого в среде визуального программирования и с помощью open source библиотеки Topologic будут созданы и проанализированы несколько примеров. В заключении этой работы будет дан обзор возможностей использования топологической информации в строительстве, при ее наличии в стандартной геометрической модели.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	ii
<b>Abstract</b>	iii
<b>Zusammenfassung</b>	iv
<b>Введение</b>	v
<b>Tabellenverzeichnis</b>	viii
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	ix
<b>1. Einführung</b>	1
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.3. Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2. Topologie</b>	3
2.1. Definitionen . . . . .	3
2.2. Beschreibung der Raumstruktur . . . . .	4
2.3. Topologische Beziehungen zwischen den Elementen . . . . .	5
2.4. Topologie in unterschiedlichen Fachgebieten . . . . .	8
<b>3. Topologische Daten in BIM</b>	9
3.1. Anforderungen an Detaillierungsgrad . . . . .	9
3.2. Gewährleistung der Korrektheit von topologischen Modellen . . . . .	10
3.3. Datenstrukturen für das Speichern von topologischen Daten . . . . .	12
3.3.1. IFC - Industry Foundation Classes . . . . .	12
3.3.2. BOT - Building Topology Ontology . . . . .	13
3.3.3. IndoorGML . . . . .	13
3.3.4. Weitere Formate . . . . .	14
3.4. Werkzeuge für das Erstellen von topologischen Modellen . . . . .	16
3.4.1. Autodesk Revit und Dynamo . . . . .	17
3.4.2. Topologic . . . . .	17

3.4.3. Forschungsprojekte . . . . .	17
<b>4. Anwendungsfälle</b>	<b>19</b>
4.1. Blender + Sverchok und Topologic als Beispiel für Softwarelösung . . . . .	19
4.2. Untersuchte Szenarien . . . . .	20
4.2.1. Import und Transformation . . . . .	20
4.2.2. Analyse . . . . .	21
4.2.3. Modellierung mit topologischen Datenstrukturen . . . . .	30
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>31</b>
<b>A. Blender Code</b>	<b>33</b>
<b>Literatur</b>	<b>41</b>

# Tabellenverzeichnis

2.1. Simplex vier Dimensionen . . . . .	5
3.1. Level of Details (Geometrie) . . . . .	10
4.1. Vergleich der Anzahl von Elementen in IFC Datei . . . . .	24
4.2. Methoden für die Darstellung von den Nachbarschaftsbeziehungen in der Bibliothek Topologic . . . . .	26
4.3. Boolesche Operatoren in Topologic . . . . .	28

# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Topologie als Teilgebiet der Mathematik . . . . .	3
2.2.	Dimensionally Extended 9-Intersection Model . . . . .	6
2.3.	Adjazenzmatrix für Knoten, Kante und Fläche . . . . .	7
2.4.	Beispiel für die Nachbarschaftsbeziehungen in CityGML . . . . .	8
3.1.	Topologisches Modell für Traversierung von Räumen. . . . .	11
3.2.	Topologische Beziehungen in BOT . . . . .	13
3.3.	Geometrie in IndoorGML . . . . .	14
3.4.	Simplified Spatial Model . . . . .	15
3.5.	CACC Zyklus aus 2D Elementen . . . . .	16
3.6.	Topologic Klassenhierarchie . . . . .	16
4.1.	Modellieren mit topologischen Datenstrukturen von Vertices bis zum Cell . . . . .	30
A.1.	Transformation eines existierenden geometrischen Modells in ein topologisches . . . . .	33
A.2.	Importieren von BREP Datei . . . . .	33
A.3.	Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Volumenelementen . . . . .	34
A.4.	Nachbarschaftsbeziehungen zwischen einer Fläche und Volumenelementen . . . . .	34
A.5.	Boolescher Operator Schnittmenge . . . . .	35
A.6.	Ungenauigkeiten beim Importieren einer IFC Datei mit Topologic. . . . .	35
A.7.	Importieren einer IFC Datei in Blender ohne Topologic. . . . .	36
A.8.	Import von IFC Datei. Darstellung einer runden Wand. . . . .	36
A.9.	Import von IFC Datei: ein topologischer Leerraum zwischen zwei gekrümmten Elementen. . . . .	37
A.10.	Import von IFC Datei: unterschiedliche Approximation von gekrümmten Elementen. . . . .	38
A.11.	Import von IFC Datei: Schnittfläche von gekrümmten Elementen. Draufsicht. . . . .	38
A.12.	Innen- und Außengrenzen eines Volumenelementes. . . . .	39
A.13.	Innen- und Außengrenzen eines 2D Elementes. . . . .	39
A.14.	Bestimmung von Wandflächen eines Raums mit Hilfe des booleschen Operators. . . . .	40
A.15.	Das aus topologischen Instanzen aufgebaute Modell vom Prisma . . . . .	40

# Einführung

---

## 1.1. Motivation

Wie auch viele anderen Facetten des Lebens beeinflusst die schnelle Entwicklung im Bereich der Informatik und datenbasierter Prozesse auch die Baubranche. Bauingenieure, Architekten, Geologen und andere Fachleute werden bei ihren alltäglichen Aufgaben durch computerbasierte Modellierung und Auswertung von Datenmodellen enorm unterstützt. Dabei geht es nicht nur um die Arbeitserleichterung, sondern auch um Entstehen von ganz neuen Aufgaben, die häufig mit der Verarbeitung von großen Datenmengen verbundenen sind und per Hand nicht lösbar wären.

Parametrisches Design, Simulationen von unterschiedlichen Prozessen, *Big Data* sind nur einige Schlagwörter, mit denen sich immer mehr Experten beschäftigen, um für verschiedenste Probleme optimierte Lösung finden zu können. Dabei stellen fast immer geometrische 2D oder 3D Modelle die Basis dar.

Herbert Stachowiak hat in seiner Arbeit geschrieben: "Modelle sind nicht nur Modelle von etwas. Sie sind Modelle für jemanden" (*Stachowiak ( 1973) 1973*). Ein Modell muss dementsprechend immer einen Zweck haben, erst wenn man das Ziel der Modellerstellung definiert hat, kann man die Frage beantworten, welche Daten in das Modell enthalten sein müssen. Es kommt auch vor, dass ein bestimmtes Modell, das vorher die Bedürfnisse befriedigen konnte, die neuen Anforderung nicht mehr erfüllt und infolgedessen muss man nach den neuen Lösungen suchen. In BIM konnten die geometrischen Modelle nicht alle erforderlichen Informationen abbilden und als Ergebnis der Suche nach den besseren Alternativen, kann man die topologische Modellierung betrachten.

## 1.2. Ziel der Arbeit

Das Potenzial von topologischen Modellen ist bereits seit längerem bekannt, aber in aktuellen standardisierten Formaten zur Speicherung und Weitergabe von Bauwerksdatenmodellen wird die Methodik beim Export der größten Softwareanbietern standardmäßig nicht genutzt. An-

wendungsbeispiele von topologischen Modellen in BIM existieren bereits, auch wenn es aktuell noch wenige gibt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Begriffe *Topologie*, *topologische Räume*, *topologische Beziehungen* definiert. Als Schwerpunkt der Arbeit wird dabei die Problematik der Beschreibung und Anwendung von topologischen Modellen im aktuellen wissenschaftlichen Raum untersucht. Darüber hinaus liegt das Ziel des praxisorientierten Teils in der Untersuchung von Open-Source Software Bibliotheken, die es ermöglichen mit topologischen Daten in unterschiedlichen Programmumgebungen zu arbeiten. Anhand reduzierter Beispielmodelle werden unterschiedliche Anwendungsszenarien implementiert. Hierbei wird einerseits der Funktionsumfang und andererseits die Verständlichkeit des Modells sowie der Funktionen und Anwendungen untersucht.

### 1.3. Gliederung der Arbeit

Bevor anwendungsspezifische Details von topologischen Modellen beschrieben werden, behandelt diese Arbeit zunächst das Thema Topologie im Allgemeinen. Im Kapitel 2 wird als erstes die Stellung von Topologie in der Wissenschaft definiert und auf die wichtige Grundlagen und Definitionen aus unterschiedlichen Teilgebieten eingegangen. Im nächsten Kapitel werden topologische Modellierung-Möglichkeiten im Bereich BIM behandelt. Unter anderem wird untersucht, wie man topologische Daten speichern kann und welche Möglichkeiten für das Erstellen von topologischen Modellen vorhanden sind. Der Fokus in diesem Abschnitt liegt auf dem Detaillierungsgrad von topologischen Modellen. Nachfolgend wird die Open-Source-Software-Bibliothek Topologic (Jabi 2021) untersucht. Es wird dargestellt, wie man mit dieser in den Modellierungsumgebungen wie Blender (Foundation 2021) oder Dynamo (*Was ist visuelle Programmierung? / Dynamo Primer* 2021) arbeiten kann, wie der Funktionsumfang ist, und welche Schwierigkeiten dabei entstehen können. Zuletzt wird auf die Entwicklungsperspektive von topologischen Modellen in der Bau-branche eingegangen.

# Topologie

---

Um das Thema Topologie einem wissenschaftlichen Bereich zuzuordnen schauen wir uns wie sich das Gebiet entwickelt hat und wer am meisten dazu beigetragen hat. Einer der ersten, wer sich mit dem Problem, das wir jetzt als topologisches bezeichnen würden, beschäftigt hat, war Leonard Euler als er nach einer Lösung für das Königsberger Brückenproblem gesucht hat. Allerdings die ersten schriftlichen Erwähnungen des Begriffs Topologie kamen im Jahr 1847 vom Johann Listing in seiner Arbeit "Vorstudien zur Topologie". Ungefähr zur gleichen Zeit haben sich mit dieser Thematik auch solche bekannten Mathematiker befasst wie Henri Poincaré mit seiner Arbeit "Analysis Situs", Bernhard Riemann, Felix Hausdorff, August Möbius und andere. Letztendlich hat sich Topologie Ende 19.Jahrhundert als ein separates und essenzielles Gebiet der Mathematik etabliert und wurde bis Mitte 20.Jahrhundert ziemlich intensiv entwickelt.

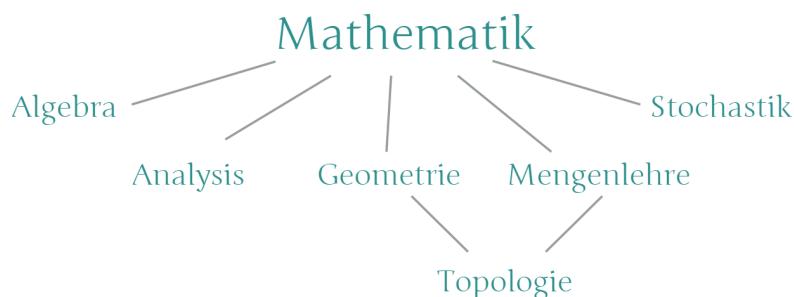


Abbildung 2.1.: Topologie als Teilgebiet der Mathematik

Und für besseres Verständnis von Konzepten der Topologie befassen wir uns als nächstes mit einigen bedeutsamen Begriffen, die zu dem Thema gehören.

## 2.1. Definitionen

In diesem Kapitel werden zuerst einige essenzielle Begriffe definiert, die unter anderem für das Nachvollziehen von Vorteilen von topologischen Modellen hilfreich sein werden.

Der Begriff *Topologie* bzw. *topologischer Raum* wird in der Mathematik als Menge von Teilmengen einer ursprünglichen Menge definiert. Außerdem müssen auch alle Schnitt-, Vereinigungsmengen dieser Teilmengen, leere Menge und die ursprüngliche Menge selbst dem topologischen Raum ge-

hören. Aber im Rahmen dieser Arbeit wird der mathematische Blickwinkel nicht weiter vertieft. Die hier relevante Sichtweise ist in der Arbeit vom Herrn Boguslawski erläutert, er schreibt: in Topologie geht es um die räumlichen Beziehungen zwischen Objekten ohne ihre geometrischen Koordinaten zu berücksichtigen (Pawel Boguslawski 2011).

Wenn man über die Topologie spricht, darf man über den Begriff *Homöomorphismus* nicht vergessen. Ein *Homöomorphismus* oder auch ein *topologischer Isomorphismus* genannt, benutzt man als Bezeichnung für eine invertierbare affine Transformation zwischen zwei topologischen Räumen. Als Beispiel solcher Transformationen kann man Translation, Skalierung, Rotation und Scherung nennen. Der ursprüngliche Raum und der Raum, der als Ergebnis derartigen Transformationen entsteht sind topologisch gleich, da einzelne Elemente ihre Beziehungen zueinander beibehalten. Der Begriff ist von der großen Bedeutung, da homöomorphe Räume gleiche topologische Merkmale besitzen.

Das nächste Konzept, das bei den topologischen Modellen eine wichtige Rolle spielt, ist *die vollständige Raumpartitionierung*. Der Begriff beschreibt ein Prozess der Aufteilung eines Raums in eine endliche Anzahl von disjunkten Teilräumen. Dabei muss jeder Punkt des ursprünglichen Raums genau einem Teilraum gehören.

## 2.2. Beschreibung der Raumstruktur

Wenn man das Thema topologische Räume behandelt ist es immer wichtig sich Gedanken über das Innen und Außen jedes Teilraums zu machen, da es gar nicht eindeutig sein kann was genau innen und was außen eines Raums liegt. Nach der Definition stellt ein topologischer Raum eine Menge von Teilräumen dar und die Frage welche Räume die Eigenschaften des Außenraums haben ist offen. Für alle topologische Räume gilt allerdings, dass man ein topologischer Raum vollständig auf das Innere, den Außen und den Rand aufteilen kann. Das Innere und der Außen stellen immer einen offenen Teilraum dar, während der Rand immer ein geschlossener Teilraum ist.

Die grundlegenden topologischen Elemente sind ein Knoten, eine Kante und eine Fläche. Üblicherweise bezeichnet man die Elemente mit den drei Großbuchstaben:

- V Knoten (vertex)
- E Kante (edge)
- F Fläche (face)

Die Raumaufteilung besteht dann aus den Mengen von zusammenhängenden Elementen dieser Typen. Knoten gelten als Randelemente für Kanten, während Kanten spielen die gleiche Rolle

für Flächen. An der Stelle ist es wichtig noch ein weiteres Konzept zu erläutern, nämlich *The Euler-Poincaré Formula*, die Formel ist in (2.1) dargestellt.

Mit Hilfe dieser Formel wird die Anzahl von den primitiven topologischen Elementen in Relation zueinander gesetzt (Weiler 1986). Das Ergebnis beträgt für jeden konvexen dreidimensionalen Polyeder genau zwei, allerdings darf man nicht den Rückschluss ziehen, dass alle Polyeder, für die die Zahl gleich zwei ist, konvex sind.

$$V + F - E = 2 \quad (2.1)$$

Weiterhin können Objekte eines Raums beispielsweise anhand der Dimension eines Raums klassifiziert werden. Dabei versteht man unter dem Begriff n-Simplex das einfachste geometrische Objekt in dem n-dimensionalen Raum (Paul und Borrmann o. D.).

In der 2.1 werden beispielhaft einige n-Simplex aufgelistet, die ziemlich einfach visuell vorstellbar sind.

Dimension	Simplex
0	Punkt
1	Strecke
2	Dreieck
3	Tetraeder

Tabelle 2.1.: Simplex vier Dimensionen

### 2.3. Topologische Beziehungen zwischen den Elementen

Die topologischen Beziehungen stellen eine Teilmenge aller möglichen Beziehungen zwischen den Objekten im Raum dar und unterscheiden sich von den anderen dadurch, dass sie bei den linearen Transformationen unverändert bleiben (Paul und Borrmann o. D.).

In den topologischen Räumen werden die Abstände zwischen den einzelnen Elementen vernachlässigt, somit sind die topologischen Beziehungen nicht quantifizierbar, und daher sind sie ungeeignet für die Untersuchung von den metrischen Merkmalen. Dafür kann man einen anderen Beziehungstyp beispielsweise die Distanzbeziehungen in Betracht nehmen.

Wie es schon oben erwähnt wurde, kann man einen topologischen Raum auf das Innen, den Außen und den Rand unterteilen. Um die räumlichen Beziehungen zu betrachten, braucht man mindestens zwei Elemente, die sowohl gleicher als auch unterschiedlicher Dimension sein können. Es ist jedoch wichtig ob diese Elemente miteinander verbunden sind und wenn ja, wie sieht die Verbindung aus. Als ein der Standards für die Klassifizierung von räumlichen Beziehungen zwischen den Elementen einer bestimmten Dimension (2D oder 3D) hat sich das DE-9IM ( Di-

dimensionally Extended 9-Intersection Model) oder Clementini-Matrix etabliert. Das Modell ist von OGC (Open Geospatial Consortium) *The Home of Location Technology Innovation and Collaboration / OGC* 2021 akzeptiert und wird für die Beschreibung von Beziehungen zwischen den Objekten in der Geowissenschaft benutzt. Auf dem Bild 2.4 ist das Modell dargestellt, es basiert auf dem Konzept der vollständigen Raumaufteilung, das in einem vorherigen Kapitel erwähnt wurde. Man betrachtet zwei Elementen und dementsprechend insgesamt sechs Teilräume (Innen, Rand und Außen für jedes Element), danach bildet man die Schnittmengen für jeden Teilraum eines Elements mit jedem Teilraum des anderen Elements und trägt das Ergebnis in eine Matrix ein. Diese Matrix hat entweder einen booleschen Wertebereich oder einen Wertebereich, der aus { 0,1,2,F } besteht. Mit Matrix erster Form beantwortet man die Frage, ob eine Schnittmenge überhaupt Elemente enthält. Während in der Matrix der zweiten Form findet man die Antwort auf die Frage welche Dimension die Schnittmenge besitzt. Auf diese Weise kann man die invarianten binären Beziehungen untersuchen und diese formal beschreiben, da es jedem der topologischen Prädikaten: disjunkt, berührt, überlappt, liegt innerhalb, enthält, deckt, gleich (engl. disjoint, meet, overlap, inside, contains, covers, equal) eine bestimmte Matrix entspricht (Egenhofer 1989).

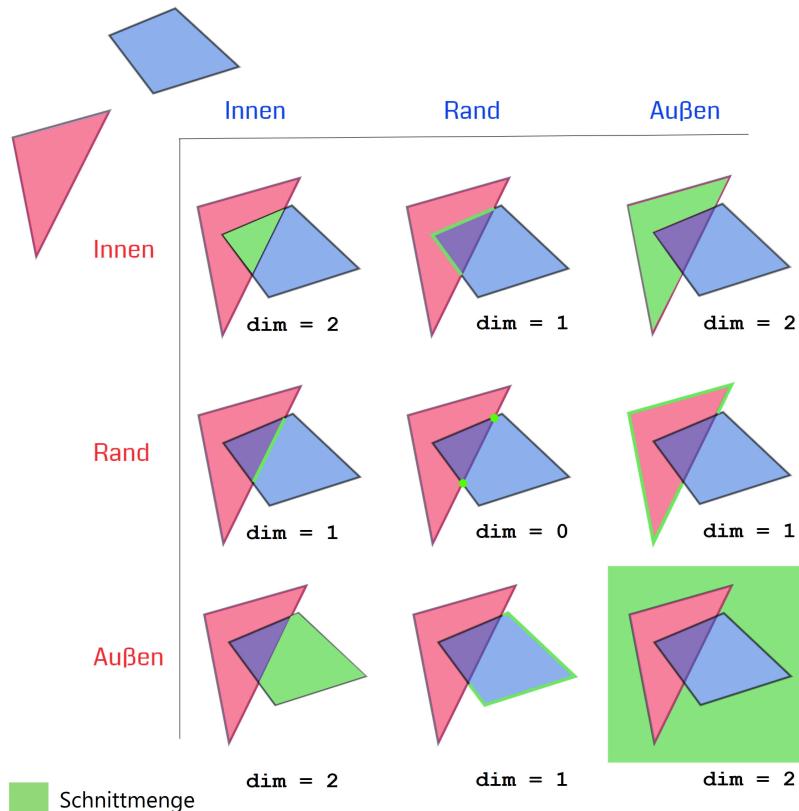


Abbildung 2.2.: Dimensionally Extended 9-Intersection Model

Die Angaben über den angrenzenden Elementen bzw. Nachbarschaftsbeziehungen sind die grundlegenden Daten, die beim Modellieren von Topologie gepflegt werden. Eine übliche Art für

die Beschreibung von den Nachbarschaftsbeziehungen ist die *Adjazenzmatrix*. Die Anzahl von den Nachbarschaftsbeziehungen in einer Topologie entspricht der Anzahl von den geordneten Paaren aus den Elementen und ist gleich  $n^2$ , wenn n die Anzahl von Elementen dieser Topologie ist (Weiler 1986). Auf der Abbildung 2.3 ist die Matrix für die Topologie mit drei Elementen: Knoten (V), Kante (E) und Fläche (F) dargestellt.

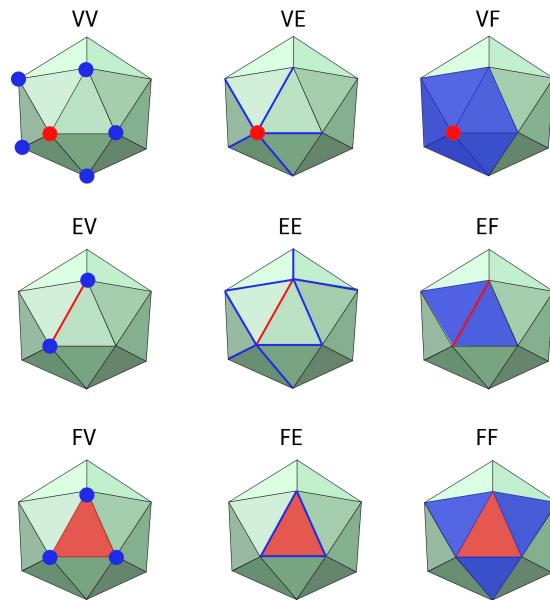


Abbildung 2.3.: Adjazenzmatrix für Knoten, Kante und Fläche

Die Nachbarschaftsbeziehungen können Graphen, in einer Extensible Markup Language (XML) Datei oder mit Hilfe einer anderen Datenstruktur wie zum Beispiel Compact Abstract Cell Complexes (CACC) gespeichert werden. Wohingegen es ist stark von der Wahl der Datenspeicherstruktur abhängig, wie man später topologische Daten verarbeiten und analysieren kann. Zum Beispiel sind in The City Geography Markup Language (CityGML) die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Elementen verschiedener Dimensionen nicht beschrieben. Es besteht die Möglichkeit über die gespeicherten Referenzen zu erfahren welche Flächen gehören zu einem Volumen, aber beispielsweise nicht welche Flächen sind die Nachbarn einer Kante (Salleh u. a. 2019).

Während das Vorhandensein der Information über die Verbindungen zwischen den Elementen, und vor allem auch zwischen den Elementen verschiedener Dimension, kann sehr hilfreich für solche Gebiete wie 3D Navigation, Design Optimierung und Energiesimulation sein.

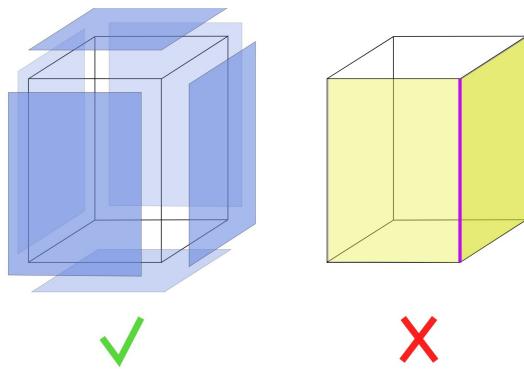


Abbildung 2.4.: Beispiel für die Nachbarschaftsbeziehungen in CityGML

## 2.4. Topologie in unterschiedlichen Fachgebieten

Das Vorhandensein von den explizit gespeicherten topologischen Beziehungen unterstützt die Anwender aus vielen unterschiedlichen Fachgebieten. Als die Systeme, die das Speichern, das Abfragen und die Darstellung von den Beziehungen zwischen den Objekten entwickelt wurden, beobachtet man eine ständige Vermehrung von den Anwendungsfällen, die daraus Mehrwert ziehen. In diesem Abschnitt werden einige Branchen dargestellt, wo die topologischen Modelle eine wichtige Rolle spielen.

Wie es so oft in der Forschung ist, waren die topologischen Modelle ziemlich früh zu den militärischen Zwecken eingesetzt, um beispielsweise eine 3D Umgebung für die Flugsimulation zu generieren (Ellul und Haklay 2006). Auch für die Medizin können topologische Modelle Vorteile bringen, wie Herr Gross in seiner Arbeit (Gross 1998) erwähnt hat, können die 3D topologische Modelle für die Simulation von den chirurgischen Eingriffen und den anatomischen Modellen von Menschen gebraucht werden.

Das Gebiet, in dem die 2D und auch die 3D topologischen Modelle immer öfter Anwendung finden, ist Geographic Information System (GIS). Es gibt eine umfangreiche Menge an wissenschaftlichen Projekten, die sich auf das Thema beziehen, aber in Rahmen dieser Arbeit wird das Thema nicht weiter konkretisiert. Allerdings um zu veranschaulichen, wie weit das Themengebiet ist, werden hier exemplarisch einige Anwendungsfälle aus GIS genannt: Simulation von Verkehr und Notfallsituationen in Stadtgebieten, Modellieren und Analysieren von Gelände, Gewässer, unterirdischen Räumen und viel anderes.

Weiterhin sind die topologischen Modelle für BIM wichtig. Sie werden gerade sowohl in der Forschung als auch in der Praxis anhand von Case-Studies viel untersucht. Indoor-Navigation, 3D Visualisierung, Energie- und Beleuchtungssimulation sind nur ein paar Beispiele davon, bei welchen Aufgaben können die explizit gespeicherten topologischen Beziehungen nützlich sein. In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird das Thema Topologie im Bauwesen näher betrachtet.

# Topologische Daten in BIM

---

Zu dem heutigen Zeitpunkt kann man noch nicht sagen, das Anwendung von topologischen Daten oft bei den realen Projekten stattfindet. Gerade tritt diese Thematik in den Forschungsprojekten auf, wobei es auch Pionier Büros gibt, die eigene auf die Nachbarschaftsbeziehungen basierende Tools entwickeln. Beispielsweise hat das Büro Happold ein eigenes Datenmodell entworfen, das The Buildings and Habitats Object Model (BHOM) heißt und als Open-Source Projekt entwickelt wird. Der große Vorteil dieser Applikation besteht darin, dass sie eine Schnittstelle mit vielen Softwareprodukten besitzt, was Transformation von Modellen in BHOM für Spezialisten aus den verschiedenen Fachgebieten ermöglicht. Auch die in Rahmen dieser Bachelorarbeit untersuchte Bibliothek Topologic kann in Verbindung mit BHOM benutzt werden.

Topologische Daten sind für Analyse, Simulation und in dem Zusammenhang für das Treffen von Entscheidungen beim Projektieren eines Bauwerks insbesondere hilfreich. Die Navigation in Innenräumen, die Simulation von Notfallsystemen und die Logistik, aber auch Clash Detection, das Erstellen von Modellen für Finite-Elemente-Methode (FEM) und Energieanalyse sind einige gut bekannte Beispiele dafür, wie man die topologischen Modelle einsetzen kann (A. Jamali, Abdul Rahman und P. Boguslawski 2016).

## 3.1. Anforderungen an Detaillierungsgrad

Um ein verlässliches ziel konformes Modell von einem erforderlichen Detaillierungsgrad zu erstellen, muss man ganz genau verstehen wozu sollte das Modell dienen. "Um Objekte und ihre Zusammenhänge in einem Raum zu analysieren ist es erforderlich zuerst auf eine vereinfachte Abbildung der Realität zu kommen. Sonst kann die Untersuchung wegen zu viele Details in einem Modell zu komplex werden. Andererseits wenn ein Modell nicht detailliert genug ist, kann es ungenaue Ergebnisse liefern, denn die notwendigen Beziehungen fehlen". (Pawel Boguslawski 2011)

Aktuell gibt es keine Norm, die konkret besagt welche Anforderungen müssen für einzelne LODs erfüllt werden, aber es gibt Beispiele, an die man sich orientieren kann, und wie auch immer kann man projektspezifische Details einzeln vereinbaren. Da topologische Modelle aktuell nicht

häufig implementiert werden, gibt es für sie keine der Art Klassifizierung. Wobei es auch für die semantische Information so ein Hilfsgerüst wie Level of Information (LOI) für die Beschreibung von den Anforderung existiert.

Wenn ein topologisches Modell als Gerüst für das Erstellen vom geometrischen Modell oder für die Kollisionsprüfung, die Mengenabfragen (Quantity take-off) und für die sonstigen Applikationen, die mit den metrischen Eigenschaften des Modells zu tun haben, erstellt wird, darf der Detaillierungsgrad des topologischen Modells nicht niedriger als der definierte Level of Detail = Level of Geometry (LOD), falls in den Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) beschrieben. Da sonst wird das topologische Modell als das führende Modell ungeeignet.

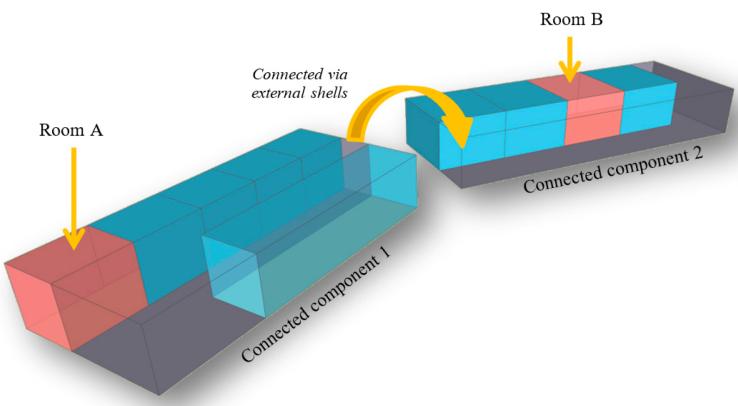
<b>Bezeichnung</b>	<b>Planungsphase</b>	<b>Beschreibung</b>
LOD 100	Vorentwurfsplanung	Architektur und Tragwerk Skizze, Form des Bauwerks und Raumaufteilung erkennbar
LOD 200	Entwurfsplanung	Dimensionierung von tragenden Bauteilen, Vordimensionierung von TGA Hauptelementen
LOD 300	Genehmigungsplanung	Exakte Dimensionierung vom Tragwerk, deren Verbindungen, TGA
LOD 400	Ausführungsplanung	Detaillierungsgrad für Werk - und Montageplanung
LOD 500	Objektdokumentation	Modellanpassung so dass as-built Modell entsteht zum Beispiel mittels Laserscanning

Tabelle 3.1.: Level of Details (Geometrie)

Besteht die Absicht ein topologisches Modell für die Analyse von Raumstruktur, Simulation von physikalischen Effekten oder Prozessen aus dem späteren Gebäudebetrieb zu verwenden, kann sein, dass es eine passende Abstraktion der realen Welt erforderlich sein wird. Damit ist gemeint, dass es beispielsweise die Bauteildicke vernachlässigt werden kann oder nur die Verbindungen zwischen den Räumen in der Form von Graphen modelliert werden (Huhnt und Gielsdorf o. D.). Auf dem Bild 3.1 ist so ein nicht besonders detailliertes topologisches Modell dargestellt. In dem Fall wird das Modell für die Traversierung von Räumen benutzt und dafür braucht man keine detaillierte Abbildung von Raumbildenden Bauteilen.

## 3.2. Gewährleistung der Korrektheit von topologischen Modellen

Es ist fast nicht mehr möglich die Entwicklung und Realisierung eines Großprojektes, ohne das digitale Gebäudemodell vorzustellen. In diesem Prozess nehmen meistens mehrere Personen teil



Quelle: Ujang, Anton Castro und Azri 2019

Abbildung 3.1.: Topologisches Modell für Traversierung von Räumen.

und es ist oft so, dass es diejenige gibt, die das Modell zum Beispiel als eine IFC Datei gegeben bekommen und sich auf die Information in dem Modell verlassen. Es gibt jedoch Untersuchungen und Erfahrungsberichte, die zeigen, dass es vorkommt, dass die IFC Dateien falsche geometrische und topologische Informationen enthalten (Abou Diakité und Sisi Zlatanova 2016). Es sind drei Hauptfehlerquellen bekannt:

- Besonderheiten von Zahlendarstellung in Computer - Ungenauigkeiten bei Rundung
- Unterschiede bei Datenstrukturen. Wenn mehrere mit der unterschiedlichen Software erstellten Modelle später in eine Datei geschrieben werden, kann passieren, dass die physikalisch gleichen Objekte unterschiedlich abgebildet sind.
- menschlicher Faktor - unsaubere Modellierung

Dazu kommt, dass auch die Softwarehersteller beim Entwickeln von ihren Produkten nicht ganz genau die Vorgaben aus solchen Standards wie IFC implementieren und das zu unerwünschten Ergebnissen beim Modellieren führt. An der Stelle könnte die Frage gestellt werden welche Möglichkeiten es gibt das Problem zu lösen, da es offensichtlich für alle Teilnehmer demotivierend wirkt, wenn das erstellte Modell fehlerhaft ist. Solche Situation ist auch für die Integration der BIM Methodik in Business Prozesse äußerst unerwünscht, da es dadurch Zweifeln an Vorteilhaftigkeit von BIM entstehen können.

Eine der Möglichkeiten die Verlässlichkeit des Modells zu beeinflussen ist in der Arbeit Abou Diakité und Sisi Zlatanova 2016 erläutert. Es wird ein Tool vorgeschlagen, dessen Ziel ist aus einer vorhandenen IFC Datei, wo es möglicherweise Fehlern bei *IfcSpace* Objekten gibt eine neue Datei mit den gültigen *IfcSpace* Objekten zu generieren.

Außerdem können Inkonsistenzen zwischen den topologischen Modellen, die von den unterschiedlichen Fachleuten erstellt sind, vorkommen. Zum Beispiel, wenn ein Gebäudemodell im Erdbereich

mit einem Geländemodell nicht stimmt. Hier könnte man auch über die Entwicklung von separaten Tools, die solche Grenzfälle fixen, denken. Die Problematik der Integration von BIM und Geographic Information System (GIS) Technologien ist heutzutage sehr aktuell und wird aktiv erforscht, als Beispiel eine Untersuchung zur Konsistenz von Daten (Basir u. a. 2020) .

### 3.3. Datenstrukturen für das Speichern von topologischen Daten

In welchem Format ist es am günstigsten ein oder anderes Modell zu speichern hängt von mehreren Faktoren ab. Alle Datenstrukturen haben Vor- und Nachteile, und es werden immer neue Format für Datenspeicherung und Datenaustausch entwickelt. In diesem Kapitel werden einige bekannte Datenstrukturen betrachtet.

Erstellen und pflegen von topologischen Modellen ist eine herausfordernde Aufgabe, da die erforderlichen Datenstrukturen, um diese Beziehungen auszudrücken, besonders schwierig zu entwickeln sind. (Jamali, Abdul Rahman und P. Boguslawski 2016) Innerhalb eines Objektes werden die topologischen Zusammenhänge oft gespeichert, jedoch endet die Topologie an der Außenhülle eines Objektes. Objekte werden wenn auch topologisch, aber nur einzeln in Datenbank dargestellt, somit fehlt die wertvolle Information bzgl. Beziehungen. Die primäre Schwierigkeit bezieht sich auf die Datenstrukturen, mit denen man die topologischen Modelle abbilden kann. Es existiert heutzutage keinen Standard und auch keine Technologie, die definieren würden, wie man mit Topologie arbeiten soll. Man kann aber schob sagen, dass die Beziehungen zwischen den benachbarten Objekten auszudrücken eine sehr komplexe Aufgabe ist.

#### 3.3.1. IFC - Industry Foundation Classes

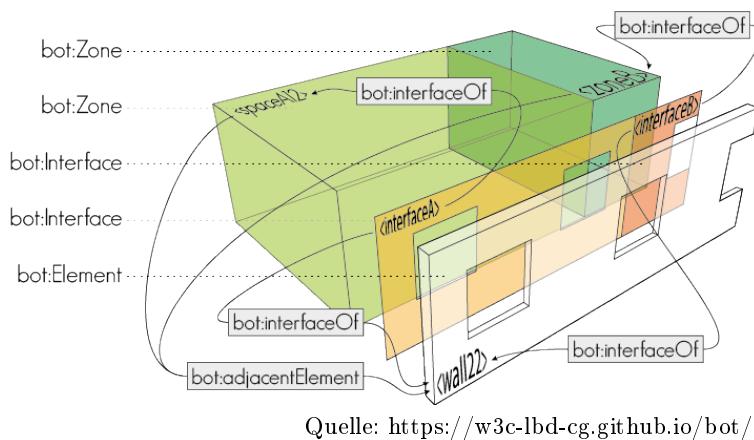
IFC ist ein objektorientiertes Datenmodell, das als internationaler Standard gilt. Die Spezifikationen dieses Formats sind für alle zugänglich, da der Hauptzweck bei deren Entwicklung war einen unkomplizierten Datenaustausch in der AEC Branche zwischen den verschiedenen Softwaredaten zu ermöglichen. Fraglich ist allerdings, ob ein Austausch überhaupt möglich und nötig ist. Aber auf jeden Fall besteht dank dieser Entwicklung die Möglichkeit die in der unterschiedlichen Software erstellten Modelle über Export in IFC auch in anderen Programmen anzuschauen.

IFC wird durch buildingSMART immer weiterentwickelt und man findet unter anderem auch Datenschemata für einige zur Topologie bezogenen Objekte, beispielsweise existieren in IFC solche Klassen wie: *IfcRelSpaceBoundary*, *IfcRelConnectsElements*, *IfcTopologyRepresentation*, etc. Da IFC ziemlich weitverbreitet ist, gibt es unter anderem Untersuchungen, die zeigen, dass sowohl geometrische als auch topologische Daten nicht immer ganz zuverlässig sind. Wobei das Format

trotzdem meistens für den Austausch von geometrischen und semantischen Daten gut geeignet ist.

### 3.3.2. BOT - Building Topology Ontology

Building Topology Ontology (BOT) ist eine Art für die Beschreibung von den Beziehungen zwischen den Elementen in BIM. Als Grundlage dieser Ontologie wurde Web Ontology Language (OWL) genommen. So ist das Hauptmerkmal und gleichzeitig die Grundidee beim Entwickeln dieser Ontologie, dass es webbasiert ist Rasmussen u.a. 2020. Somit wird jedes Element in BOT über seine Web-Adresse identifiziert. Daraus folgt, dass die mit Hilfe von BOT beschriebenen Modelle nicht unbedingt als Datei gespeichert werden müssen, sondern existieren als eine Kollektion von miteinander verbundenen Elementen in Web. In BOT wird großer Wert auf die Einfachheit gelegt, das heißt es gibt sowohl wenig Klassen als auch Objekte haben nur eine sehr begrenzte Anzahl an Eigenschaften, wobei beides könnte erweitert werden. Auf dem Bild 3.2 sind fünf Objekte dargestellt: zwei Zones, ein Element und zwei Interfaces. Die Interfaces werden über Objekteigenschaft `interfaceOf` den Objekten, zwischen denen das Interface liegt, zugeordnet. So mit ist es explizit gespeichert wie die Berührungsfläche zwischen den Objekten aussieht. Diese Information kann man nutzen, um zum Beispiel Zugangsmöglichkeiten zwischen den Räumen zu modellieren, was für die Indoor Navigation erforderlich ist.



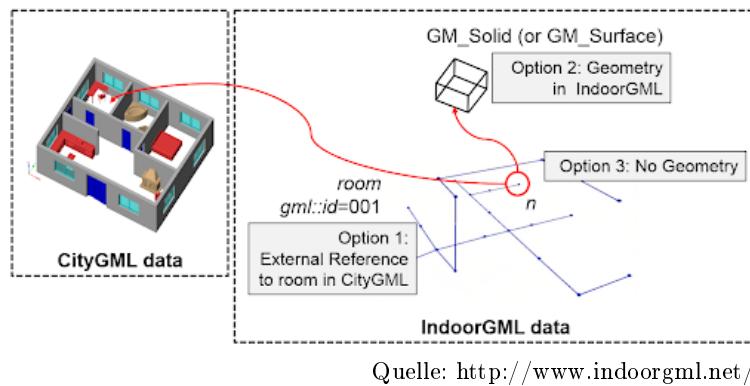
Quelle: <https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/>

Abbildung 3.2.: Topologische Beziehungen in BOT

### 3.3.3. IndoorGML

IndoorGML ist ein Standard für ein offenes Datenmodell, zu dem auch eine Spezifikation mittels XML existiert. Hauptziel dieses Standards besteht in das Etablieren vom Gerüst für die Beschreibung von Innenräumen. Dadurch sollte die Darstellung, die Analyse und der Datenaustausch von, zu Innenräumen gehörenden Informationen ermöglicht werden. Auf dem Bild 3.3 sind die drei

möglichen Arten der Geometriemodellierung in IndoorGML dargestellt. Ein wichtiges Merkmal dieses Standards ist, dass er Besonderheiten von Innenräumen vor allem für Indoor-Navigation berücksichtigt, was beispielsweise IFC und CityGML nicht so präzis behandeln. IndoorGML basiert auf dem Konzept von Raumpartitionierung und erlaubt die semantische und topologische Beschreibung von Räumen. Es besteht die Möglichkeit über die Multi-Layered Darstellung unterschiedliche Raumpartitionierung je nach der Semantik abzubilden (Li u. a. 2019). Außerdem besteht es die Möglichkeit mittels Erstellens von neuen Modulen auch die in IndoorGML noch nicht vorhandenen Modellierungsgebiete abzudecken. Solche Erweiterungen beziehen sich auf das semantische Teil vom Standard und werden über das Fortschreiben von XML-Schema gemacht.



Quelle: <http://www.indoorgml.net/>

Abbildung 3.3.: Geometrie in IndoorGML

### 3.3.4. Weitere Formate

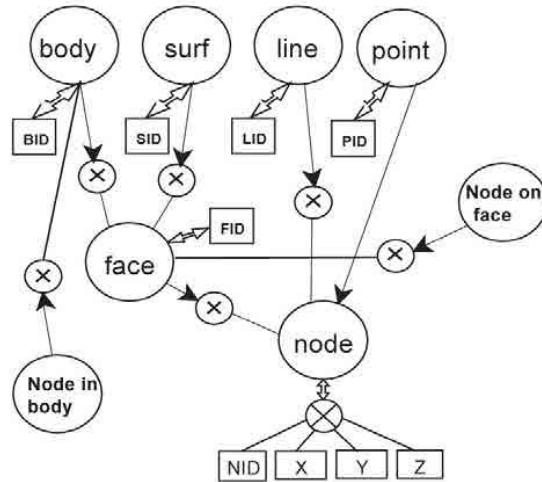
#### Dual Half-Edge (DHE)

Diese Halbkanten-Datenstruktur mit den explizit gespeicherten Nachbarschaftsbeziehungen wurde vom Herrn Boguslawski entwickelt, dabei haben das Konzept der Dualität von Graphen aus Delaunay Triangulation und Voronoi Diagram zusammen mit Boundary Representation und Euler Operatoren eine wichtige Rolle gespielt. Die Hauptidee war es zu ermöglichen gleichzeitig ein geometrisches und ein topologisches Model in 3D zu erstellen, Geometrie wird in der Regel durch den primären Graphen und Topologie durch den dualen abgebildet. (Pawel Boguslawski 2011). Die DHE besteht aus vier Objektarten: cell, face, edge und vertice, wobei jedem Element in primär Raum ein Element in duality entspricht. Man kann über Attribute semantische Eigenschaften Objekten zuordnen und mit Hilfe von Operatoren Objekte erstellen, verändern, löschen, zwischen Objekten navigieren und diverse Algorithmen implementieren.

#### The Simplified Spatial Model (SSM)

Diese Datenstruktur wurde von Frau Zlatanova in Rahmen ihrer Dissertation für 3D Daten in

GIS vorgeschlagen. Das war eine der ersten Datenstrukturen, die für die Visualisierung von Abfragen in web-basierten Applikationen mit 3D Modellen entworfen wurde (Sisi Zlatanova, Rahman und Shi 2004). In SSM wird zwischen vier geometrischen Objekten unterschieden, wobei für das Erstellen von Modellen werden nur zwei Elemente: node und face benutzt. Auf dem Bild 3.5 ist das SSM dargestellt.



Quelle: Sisi Zlatanova 2000

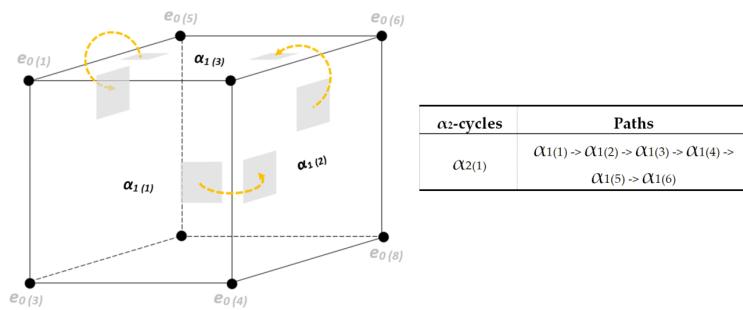
Abbildung 3.4.: Simplified Spatial Model

### Compact Abstract Cell Complexes (CACC)

Bei dieser Datenstruktur handelt es sich um das Speichern eines rein topologischen 3D Modells, das heißt ohne die geometrischen Details. Die Hauptidee besteht darin alle in dem Modell vorhandenen atomaren Zyklen aus den Elementen, aufgeteilt nach der Dimension, zu speichern (Ujang, Anton Castro und Azri 2019). Dadurch, dass es nicht die vollständige Raumzerlegung gespeichert wird, ist dem Entwickler gelungen den für das Speichern vom topologischen Daten erforderlichen Platz sehr gering zu halten. Eine weitere Besonderheit dieser Datenstruktur ist, dass das topologische Modell nicht unbedingt diskret werden muss. Auf dem Bild ist ein Zyklus aus den 2D Elementen dargestellt.

### Topologic

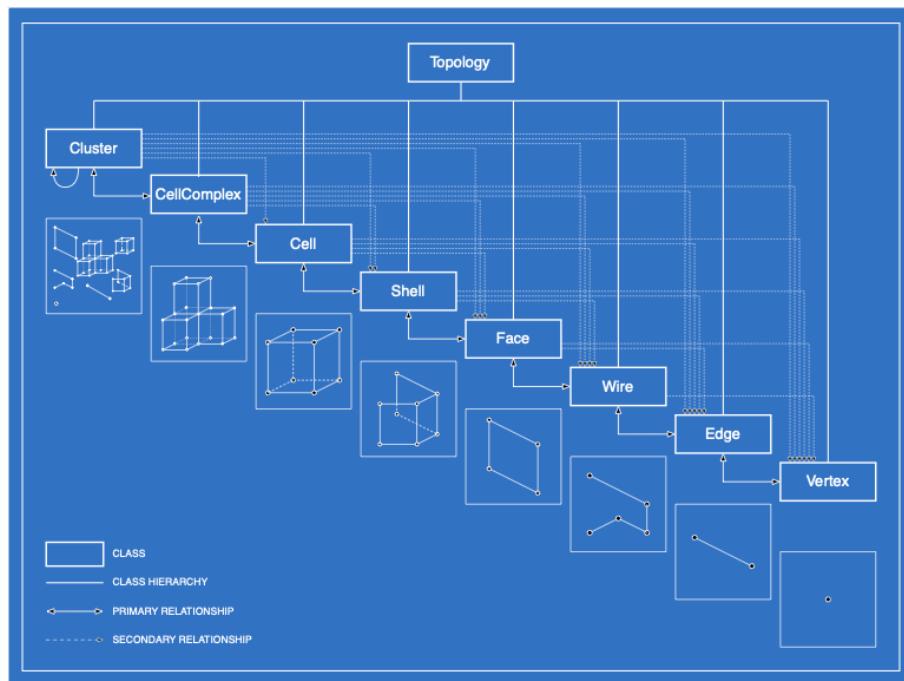
Topologic ist eine Open-Source Software Bibliothek und gleichzeitig eine Datenstruktur für das Speichern von topologischen Modellen (*Software – Topologic* 2021). Auf dem Bild 3.6 ist der Aufbau dieser Datenstruktur dargestellt, dabei erben alle weiteren Klassen Konstruktoren, Attribute und Methoden von der Klasse Topology. Im nächsten Kapitel wird diese Datenstruktur näher betrachtet, es wird auch anhand von in Topologic erstellten einfachen Modellen untersucht, wie



Quelle: Ujang, Anton Castro und Azri 2019

Abbildung 3.5.: CACC Zyklus aus 2D Elementen

ist der Funktionsumfang dieser Bibliothek.



Quelle: <https://topologic.app/software/>

Abbildung 3.6.: Topologic Klassenhierarchie

### 3.4. Werkzeuge für das Erstellen von topologischen Modellen

In diesem Abschnitt werden einige Möglichkeiten beschrieben, wie man in die Welt der topologischen Modellierung einsteigen kann. Dabei wird erläutert, wie der Prozess vom Erstellen eines topologischen Modells aussehen kann. Und welche von den auf dem Markt vorhandenen Softwareprodukten die topologische Modellierung unterstützen.

### 3.4.1. Autodesk Revit und Dynamo

Dynamo ist eine Open-Source visuelle Programmiersprache, die innerhalb von Revit, aber auch als eine separate Applikation existiert. Dynamo genau so wie Revit API bietet die Möglichkeit die sich wiederholenden Routine-Aufgaben in Revit zu automatisieren. Der Vorteil von Dynamo besteht darin, dass man Algorithmen dem Computer nicht über Code, sondern über die miteinander verbundenen Blöcke übergibt. Nicht selten kommt diese Art der Programmierung bei den Architekten, Designer und Bauingenieuren besser an (*Was ist visuelle Programmierung? / Dynamo Primer 2021*).

Da Revit eine proprietäre Software ist, wäre es problematisch ganz genau zu sagen wie die einzelnen geometrischen Objekte in den RVT Dateien gespeichert sind. Höchstwahrscheinlich besteht diese Datenstruktur aus einer Mischung von den Boundary Representation (BRep) und Constructive solid geometry (CSG) Modellen. Wie auch bei den üblichen Produkten werden in Revit die Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten nicht explizit gespeichert. Das bedeutet, dass, wenn zwei Objekte sich an einem Punkt berühren, beziehen sie sich global nicht auf das gleiche Element Punkt, sondern ist im Modell jeweils für jedes Objekt ein Datensatz vom Typ Punkt mit identischen Koordinaten gespeichert. Um die topologischen Beziehungen zwischen den Objekten des gesamten Modells nutzen zu können, kann man auf Dynamo zugreifen und Algorithmen programmieren, die die topologischen Abfragen erfüllen werden.

### 3.4.2. Topologic

Wie es schon erwähnt wurde, ist Topologic eine Bibliothek, in der Klassen und Methoden für das Erstellen und Analysieren von topologischen Modellen enthalten sind. Diese Bibliothek kann man in einer visuellen Programmierungsumgebungen wie Dynamo und Grasshopper, aber auch in Verbindung mit den anderen 3D Modelling Tools nutzen. Einer der Vorteile von Topologic ist, dass sie das Erstellen von topologischen Modellen mit nicht-Mannigfaltigkeit unterstützt, wodurch Designer mehr Freiheit beim Schaffen von Modellen haben. Topologic kann zum Beispiel im Bereich von Energie- und Tragwerksanalyse, aber auch als Tool für das Erstellen von leichten Modellen in Rahmen der Konzeptentwicklung eingesetzt werden.

### 3.4.3. Forschungsprojekte

Das Themengebiet bietet zahlreiche Forschungsmöglichkeiten, und insbesondere interessant ist die Frage wie kann man topologische Modelle erstellen. Weil solange der Modellierungsprozess zu umständlich oder mit mehreren Fehlerquellen verbunden ist, ist es schwer vorstellbar, dass das Verfahren sich als Standard in der Praxis etabliert.

Eine mögliche Vorgehensweise für das Erstellen von topologischen Modellen von den bestehenden Bauwerken wurde in der Arbeit A. Jamali, Abdul Rahman und P. Boguslawski 2016 vorgeschlagen. Um ein aktuelles und vor allem verlässliches Gebäudemodell zu generieren, wird das Gebäude als erstes mit Hilfe von Laser gescannt, dadurch bekommt man eine ganz exakte Abbildung mit allen erforderlichen Abmessungen. Danach wird die DHE Datenstruktur benutzt um aus den erhaltenen Daten ein Modell mit den explizit gespeicherten Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen zu generieren. Das Vorgehen kann man auch im Gebiet von GIS einsetzen und somit könnte man ein vollständiges Modell von Innen- und Außenräumen bekommen, das beispielsweise für ein durchgehendes Navigationssystem wichtig wäre. Diese Methode ist im Allgemeinen universell und für ein beliebiges Gebäude einsetzbar, jedoch insbesondere für die Bauwerke, bei denen das Projekt ursprünglich nur in der Form von 2D Zeichnungen existierte. Was heutzutage bei den meisten Gebäuden der Fall ist.

# Anwendungsfälle

---

In Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde entschieden ein Workflow unter Anwendung von Blender, Sverchok und Topologic zu untersuchen. Ein entscheidender Grund dafür war, dass sowohl Blender, als auch die beiden Bibliotheken Open-Source Produkte sind. Daraus folgt, dass man den freien Zugriff auf den Code hat, was für das Verständnis von Abläufen essenziell ist. Außerdem hat die Unabhängigkeit von den kostenpflichtigen Lizenzen eine große Rolle gespielt. Darüber hinaus gibt es eine Community mit den aktiven Teilnehmern, wo jeder von dem Wissensaustausch profitiert und sich gegenseitig motiviert weitere Workflows zu entwickeln. Dadurch bekommt man ziemlich schnell die erste Vorstellung über den Funktionsumfang der Software, aber sieht auch welche Probleme ungelöst sind, was für potenzielle Entwickler inspirierend wirken kann. Man hat somit mehrere Beispiele von aktuellen Anwendungsfällen und kann auch selbst einen Beitrag durch das Teilen eigener Erfahrung leisten. Beides hat einen positiven Effekt auf die Produktentwicklung.

## 4.1. Blender + Sverchok und Topologic als Beispiel für Softwarelösung

Blender ist ein Open-Source Softwareprodukt, was für ein breites Spektrum von Anwendungsfälle geeignet ist. 3D Modellierung, Computerspiele, Animationen und Virtual Reality sind nur einige Gebiete, wo man Blender anwenden kann. Blender bietet auch seine eigene Umgebung, die *Geometry Nodes Editor* heißt, da kann man analog zu Dynamo aus vordefinierten Knoten gesamte Programme aufbauen. Jedoch gibt es ein sehr nützliches add-On - Sverchok, welches eine umfangreiche Knotenkollektion enthält und im Vergleich mit einfachen geometrischen Blender Knoten für eine größere Anzahl von Aufgaben geeignet ist.

Der Name Sverchok kommt aus russischer Sprache und steht für eine Grille. Sverchok ist ein add-on für Blender, das viele diverse Knoten für visuelle Programmierung enthält. Mit Hilfe von in Sverchok vordefinierten Blöcken kann man parametrisch komplizierte Geometrien wie NURBS und Mesh erstellen. Außerdem kann man den in Sverchok vorhandenen Funktionsumfang über eigene in Python geschriebene Knoten oder über solche Bibliotheken wie Topologic erweitern.

Von den Entwicklern von Topologic gibt es eine gute Anleitung wie man Topologic für Blender mit Sverchok installieren kann (Jabi 2021), wobei laut Entwicklern wird der Installationsprozess noch optimiert. So gab es zuerst gewisse Schwierigkeiten beim Installieren, die jedoch ziemlich schnell dank der Beratung von Entwicklerteam gelöst werden konnten.

## 4.2. Untersuchte Szenarien

Als Grundfunktionalität von Topologic kann man die Untersuchung von topologischen Beziehungen zwischen Objekten innerhalb eines Modells nennen. Daher liegt der Schwerpunkt dieses Abschnitts auf die Beschreibung von Nutzungsmöglichkeiten von im Modell explizit vorhandenen topologischen Zusammenhängen. Als erster Schritt muss man jedoch entweder ein Modell importieren und umwandeln oder direkt beim Modellieren topologische Datenstrukturen benutzen. So betrachten wir zuerst welche Formate beim Import durch Topologic unterstützt werden und danach wie das Vorgehen bei der Modellierung aus topologischen Primitiven aussehen kann.

### 4.2.1. Import und Transformation

In der Bibliothek Topologic sind unter anderem Knoten speziell für den Import und die Transformation von in anderen Formaten gespeicherten Modellen vorhanden. Als Input wird dem Knoten eine Pfad auf konkrete Datei übergeben und als Output bekommt man ein Modell mit explizit gespeicherten topologischen Beziehungen, die man mit Hilfe von Methoden der Topologic weiterarbeiten und analysieren kann.

Momentan ist das Instanziieren vom topologischen Modell über folgende Wege möglich:

- String
- OCCTShape
- BREP Datei
- IFC Datei
- Geometrie in Blender

Dabei greift der Knoten *Topology.ByImportedIFC* zur Methoden der Bibliothek *ifcopenshell*, die dafür da sind um den Entwicklern Arbeit mit IFC Dateien zu ermöglichen. *Ifcopenshell* basiert seinerseits auf Methoden von Open CASCADE Technology (OCCT). Somit als erstes werden aus der gesamten IFC Datei ausgewählten Daten, die Geometrie beschreiben, in Textform gebracht. Das ist erforderlich, da der Methode von OCCT, die Objekte generiert, als Parameter ein String übergeben werden muss. Die Daten von BREP Dateien sind in einer einfachen

Textform gespeichert, was man als String darstellen kann. Somit benutzen alle vorhandenen Importmethoden intern Methoden von OCCT.

IFC - ein offenes und weitverbreitetes Dateiformat zum Austausch von verschiedenen bauwerksbezogenen Daten beispielsweise Geometrie, Topologie und Semantik. Topologic unterstützt den Import, aber man muss berücksichtigen, dass Objekte während des Imports auf verschiedenste Art und Weise verformt werden können. Mögliche Gründe von den Unstimmigkeiten wurden in Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, aber es muss beachtet werden, dass es ziemlich starke Redundanzen zwischen dem Original und dem Modell nach dem Import vorkommen können.

BREP - ein eigenes Format von Open CASCADE für den Austausch von den ausschließlich geometrischen Daten in 3D (*BRep Format - Open CASCADE Technology Documentation 2021*). Da Topologic die Open-Source Bibliothek Open CASCADE Technology (OCCT) nutzt, wird die Format für den Datenaustausch unterstützt. Während global wird das Format eher selten gebraucht. Zudem gibt fast keine Tools die BREP Dateien schreiben.

Darüber hinaus gibt es in der Bibliothek Topologic einen Knoten *Topology.ByGeometry*, der dazu dient ein geometrisches Model ohne die explizit gespeicherten Nachbarschaftsbeziehungen in die Datenstruktur von Topologic umzuwandeln. Diese Vorgehensweise kann angewendet werden bei den schon fertigen in Sverchok aus geometrischen Objekten aufgebauten Modellen, die man ohne neu zu modellieren mit Hilfe dieses Knotens in ein topologisches Modell transformieren kann. Dabei muss man nicht unbedingt das gesamte Modell über einen Knoten transformieren, sondern es ist durchaus möglich die verschiedene Primitive getrennt voneinander zu transformieren. Auf dem Bild A.1 ist die Transformation eines Models aus einem geometrischen Modell von Sverchok dargestellt.

Das Vorgehen kann außerdem angewendet werden, wenn das geometrische Modell in der Modeling Umgebung von Blender über Bearbeitung von Mesh und nicht mittels Code erzeugt wird. Dann kann man den Knoten *Get Object Data* anwenden und so auf geometrische Primitiven aus denen ein Mesh besteht zugreifen und auf dessen Grundlage Topologien erzeugen. Jedoch wurde an der Stelle das Problem festgestellt, dass jedes mal beim Versuchen aus Topologien zur Geometrie zurückzukommen, hat Blender abgestürzt. Ein möglicher Weg das Problem umzugehen wäre mit Hilfe von *BlenderBIM* ein IfcProject zu erzeugen, als IFC Datei zu exportieren und über den Knoten von Topologic wieder zu importieren.

#### 4.2.2. Analyse

Topologische Modelle stellen trotz den möglichen Schwierigkeiten beim Erstellen, eine sehr wichtige Entwicklung für das Lösen von Problemen und Fragestellungen des Ingenieurwesens, die

während der Gebäudeplanung auftreten. Dafür muss das Modell unbedingt korrekt, aktuell und im Allgemeinen verlässlich sein. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann das Modell hervorragend für die analytischen Aufgaben und für die Suche von Lösungen genutzt werden. Beispielsweise kann man abfragen welche Räume an den Außenraum angrenzen, welche Nutzungseinheiten an einem Rettungsweg liegen. Außerdem gibt es die Möglichkeit die unterschiedlichen Simulationen für die bauphysikalische Planung durchzuführen, beispielsweise könnte man das für die Konzipierung von Brandschutzmaßnahmen benutzen P. Boguslawski u. a. 2015.

Als eine der grundlegenden Erkenntnisse der Untersuchung von der Arbeitsweise der Bibliothek Topologic gilt, dass die topologischen Beziehungen nicht direkt beim Import ausgerechnet werden. Zunächst wird das importierte Modell als einen Zellen Komplex abgebildet, den man für die tiefere Analyse auf weitere topologische Substrukturen zerlegen soll. Dabei stellt das Tool Topologic alle erforderlichen Funktionen, um ein überschneidungsfreies Modell zu erzeugen, zur Verfügung. Man muss jedoch berücksichtigen, dass keine Schnittmengen oder ähnliche Analyseergebnisse automatisch gebaut werden. Des Weiteren gibt es keine Möglichkeit, das geometrische Modell anzupassen, somit bleiben beispielsweise die aus unterschiedlichen Gründen entstandenen Voids bestehen.

### **Import einer IFC Datei: Hausmodell**

Um eine Datei für den Import in Blender mit Topologic zu erzeugen, wurde in Revit ein dreigeschossiges Haus mit Innenräumen modelliert und in IFC exportiert. Nach der Untersuchung von Importmöglichkeiten von Topologic wurde deutlich, dass das topologische Modell, das nach dem Import der IFC Datei erscheint, lediglich ein Kantenmodell ohne die semantischen Details ist. Demzufolge kann man ohne weiteres zwischen einer Zelle, die ein Volumen einer Wand darstellt und einer Zelle, die den tatsächlichen Raum abbildet, nicht unterscheiden. Diese Unterscheidung ist jedoch essenziell, um mit dem Modell weiter arbeiten zu können. Man könnte sich im weiteren nun Gedanken darüber machen, wie man nötige Informationen aus einer IFC Datei in dem topologischen Modell speichern könnte oder über eine Schnittstelle verfügbar machen. Es ist wichtig, die einzelnen Objekte, wie sie in der IFC Datei existieren, mit den topologischen Elementen in Beziehung zu setzen, so dass man in dem topologischen Modell die ursprünglichen Objekte referenzieren kann. Das könnte mit Hilfe eines globalen Identifikators, über *Dictionaries* oder eines ähnlichen Konzepts gelöst werden. In welcher Form könnte man das in einer Datenstruktur für das Speichern von Kantenmodellen integrieren und ob es überhaupt nötig ist, wäre die erste grundlegende Frage. Auf die Fragen wird in Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen, aber es wäre wichtig das Problem zu beachten. Dabei muss man feststellen, dass die momentan in Topologic vorhandenen Methoden keinen Rückschluss von den topologischen Elementen auf

die ursprünglichen Geometrieobjekten zulassen. Insgesamt würde ein Benutzer bei der Anwendung dieser Bibliothek zwei Modelle zur Verfügung haben. Erstens ein Modell in IFC mit allen Informationen ohne die explizit gespeicherten Topologien und zweitens ein Modell in Topologic ohne die semantischen Informationen.

Auf dem Bild A.6 ist das Hausmodell in Revit rechts und nach dem Import in Blender links dargestellt. Man sieht, dass nach dem Import die Geometrien teilweise verschoben sind und die topologischen Zusammenhänge des ursprünglichen Modells nicht erhalten bleiben. Ohne eine detaillierte Untersuchung ist es kompliziert zu beurteilen, warum das beim Importieren passieren kann, aber es wäre durchaus wichtig dieses Problem zu untersuchen. Des Weiteren kommt es zu Problemen beim Import der Dachgeometrie, und zwar geht der unter dem Dach liegende Raum durch das Dach. Das Problem kommt aber auch in den anderen Softwareprodukten regelmäßig vor. In einem nächsten Schritt wurde das gleiche Modell in Blender ohne Anwendung von Topologic importiert. Das auf diesen Weg importierte Modell kann man auf dem Bild A.7 sehen. Zusätzlich sieht man in dem Fenster *Scene Collection* (auf dem Bild rechts), dass das Gebäude in die einzelnen IFC-Objekte gegliedert ist. Diese Sichtweise ermöglicht das add-on *blenderBIM BlenderBIM Add-on 2021*, das als sein grundlegendes Ziel die Unterstützung der OpenBIM Arbeitsweise vorgibt.

### **Import einer IFC Datei: zwei Räume**

Als nächstes Beispiel wurde in Revit ein geometrisches Modell aus vier Außenwänden, einer Innenwand und zwei Decken erstellt und in Blender als eine IFC Datei importiert. Wenn man von den Konzepten der Mengenlehre und der vollständigen Raumpartitionierung ausgeht, erwartet man, dass das dem geometrischen Modell entsprechende topologische Modell aus mindestens zehn Zellen bestehen sollte. Der gesamte Zellkomplex besteht aus den genau zehn Zellen: fünf Wänden, zwei Decken, zwei Räumen und einem Außenraum nur dann, wenn diese Objekte in dem geometrischen Modell sich nicht geschnitten haben. Für das Beispiel war diese Bedingung erfüllt, jedoch konnte man die Zelle Außenraum in dem topologischen Modell nicht finden. Gerade dieses Element wäre jedoch für eine vollständige topologische Beschreibung essenziell. Ein möglicher Grund dieser Unstimmigkeit liegt darin, dass ein Element Außenraum aus dem Revit nicht exportiert werden kann, da es in dem Revit Modell auch nicht vorhanden ist. Und nach dem Import einer IFC Datei werden in Topologic keine weiteren Berechnungen für die gegebenenfalls fehlenden topologischen Elemente durchgeführt. Für die Vermutung spricht auch die Tatsache, dass für nicht explizit in Revit erstellte Raumelemente die entsprechenden Zellen in dem topologischen Modell ebenso fehlen.

Element	Anzahl in Blender Topologic	Anzahl in IFC Viewer
Vertex	70	35
Edge	105	70
Face	37	36

Tabelle 4.1.: Vergleich der Anzahl von Elementen in IFC Datei

### Import einer IFC Datei: runde Wand

Schwierigkeiten mit der Berechnung und Darstellung von runden Elementen in der Modellierungssoftware kommen häufig vor. Sie sind beispielsweise mit der Notwendigkeit verbunden die gekrümmten Flächen in den kartesischen Koordinaten als ebene Facetten darzustellen. Dafür müssen die runden Elemente auf eine Art und Weise approximiert werden, aber jede Approximation hat ihre Grenzen und stellt aus dem Grund eine Fehlerquelle dar. Für die Untersuchung wurde ein Raum, der durch eine runde Wand begrenzt ist, ausgewählt. Auf dem Bild A.8 kann man sehen, dass das Raumelement aus 37 Flächen besteht und dass die runde Wand über Rechtecke approximiert wird. Diese Approximation entsteht bei der Transformation, die eine Datei durchgeht. Als erstes wird ein in Revit erstelltes Modell in IFC exportiert, danach wird die IFC Datei intern in eine BRep transformiert und erst auf diese Daten greift die Topologic als Grundlage zu. Die IFC Datei enthält auch prozeduale oder komplexere Geometriebeschreibung, während bei der BRep alles mit Kanten und ebenen Flächen beschrieben wird. Des Weiteren wird die BRep Darstellung bei Methoden von Topologic ausgewertet und mit Hilfe von Klassen dieser Bibliothek dargestellt. Infolge von diesen Transformationen kann die in IFC enthaltene Parametrik durch das Tool nicht ausgewertet werden. Es gab die Vermutung, dass die Anzahl von Primitiven Elementen in der IFC Datei gleich der Anzahl von den Elementen nach dem Import in Topologic sein soll. Um das zu kontrollieren wurde die gleiche Datei in dem IFC Viewer OPEN CASCADE CAD Assistant (*CAD Assistant - Open Cascade 2021*) untersucht, das Ergebnis ist in der Tabelle 4.3 dargestellt. Den Unterschied in der Anzahl von *Vertices* liegt daran, dass das Element in Revit mit Extrusion erzeugt wurde, daher sind in der ursprünglichen Datei lediglich Punkte einer Seite des Elements gespeichert. Während nach der Transformation in BRep es nicht mehr darauf geachtet wird wie das Element erzeugt wurde, sondern es wird bewertet aus welchen geometrischen Primitiven es besteht. Die gleiche Ursache gilt auch für die Anzahl von *Edges*. Für die Differenz bei der Anzahl von *Faces* konnte aber ohne eine tiefere Untersuchung keine Begründung gefunden werden.

Des Weiteren ist bei der Untersuchung dieser zwei Elemente folgendes aufgefallen:

- Existenz eines unbestimmten Raums zwischen dem Raumelement und der Wand. Der Be-

reich entspricht keiner Zelle und ist daher topologisch gesehen ein Leerraum. Den Bereich kann man auf dem Bild A.9 zwischen Raum und Wand sehen. Wegen dieser Ungenauigkeit ist es nicht möglich die Raumzelle und die Wandzelle als Nachbarelemente zu erkennen und weitere Berechnungen durchzuführen. Hätte man an der Stelle die richtige topologische Abbildung, könnte man die Berührungsfläche ausrechnen oder die Information über die Nachbarschaft der beiden Elemente benutzen. Eine Option wäre das Modell so zu vervollständigen, dass der Void gefüllt wird. Eine weitere Möglichkeit wäre durch die Änderung von Toleranzen die Unstimmigkeiten der Approximation auszugleichen. Jedoch konnte das Problem mit Hilfe von in der Topologic vorhandenen Funktionen nicht gelöst werden.

- Unterschiede in der Approximation bei den gekrümmten Flächen sind als Standardproblem bekannt und kommen in den meisten Tools vor. Auch hier zeigt das Bild A.10, dass beim Abfragen der Schnittfläche zwischen einem Raum und einer an den Raum angrenzenden Wand erscheint als Ergebnis eine Menge von Kanten. Die Schnitte kommen dadurch zustande, dass sich die Rechtecke, aus denen die gekrümmten Flächen wegen der Approximation bestehen, schneiden. Ein korrektes Ergebnis würde man dann bekommen, wenn die beiden aneinander angrenzenden gekrümmten Elemente gleich approximiert werden. Dann würde die Schnittfläche aus einer Menge von Rechtecken bestehen, was, wenn auch mit einer kleinen Abweichung, der Fläche des gekrümmten Elements entsprechen würde. In der Abbildung A.11 sieht man eine Draufsicht mit einem kleinen Stück Fläche, die als Ergebnis der booleschen Operation *Intersect* zwischen Raum und Wand entstanden ist. Falls die Approximation dieser beiden Elemente identisch wäre, würden die Kantenzüge, die auf der Draufsicht eine gekrümmte Fläche abbilden, übereinstimmen.

### Nachbarschaftsbeziehung

In der Topologie spielt die Antwort auf die Frage, welche Elemente sind an einander angrenzend, eine zentrale Rolle. Vorhandensein von den explizit gespeicherten Nachbarschaftsbeziehungen ist einer der Hauptgründe warum man topologische Modelle untersucht. In der Bibliothek Topologic gibt es eine Menge von Methoden, die man nutzen kann um Information über Relationen zwischen einzelnen Objekten zu erhalten.

In der Tabelle 4.1 findet man eine Übersicht von topologischen Beziehungen, und konkret von den Nachbarschaftsbeziehungen, die man über die in Topologic vorhandenen Methoden abfragen kann.

Auf dem Bild A.3 ist ein in Blender Sverchok aus geometrischen Elementen erstelltes Modell eines fünfstöckigen Bauwerks mit einem durchgehenden Schacht in Zentrum dargestellt. Mit Hilfe der Bibliothek Topologic wurde das geometrische Modell durch die topologischen Informationen

Methodenname	Anwendungsbeispiel
Edge.AdjacentFaces	Bei der 2D Planung könnte man Wände als Kanten und Räume als Flächen darstellen. Dann wäre es möglich über diese Methode alle Räume die an die Außenwände angrenzen abzufragen.
Edge.AdjacentEdges	In einem 2D Modell kann man Räume als Knoten und Verbindungen dazwischen als Kanten modellieren. So dass, wenn ein Raum aus dem anderen erreichbar ist, sind die entsprechenden zwei Knoten verbunden. Solches Modelle könnte für zwischenräumliche Navigation geeignet sein.
Face.AdjacentCells	Bei der 3D Planung werden Raumeinheiten als Volumen dargestellt, während einer Fläche können diverse Objekte entsprechen. Über die Methode kann man beispielsweise abfragen welche zwei Räume sind durch die Tür verbunden, angenommen die Tür entspricht einer Fläche. Das könnte bei der Planung von Flughafen, Gefängnis und überall da, wo die Kontrolle der Raumtrennung wichtig ist, nützlich sein.
Cell.AdjacentCells	Wenn alle Volumenelemente eines 3D Modells topologische Beziehungen enthalten, gibt es die Möglichkeit darauf basierend die Clash Detection durchzuführen. Dadurch würde die Qualität des Modells deutlich verbessert und die potenzielle Planungsfehler können vermieden werden.
Vertex.AdjacentEdges	In einem TGA-Modell können Sensoren, Lampen oder sonstige Geräte als Knoten und die Leitungen als Kanten modelliert werden. Die Methode könnte die Frage beantworten, welche Leitungen sind an einen Sensor angeschlossen.

Tabelle 4.2.: Methoden für die Darstellung von den Nachbarschaftsbeziehungen in der Bibliothek Topologic

ergänzt. Die Methode *Cell.AdjacentCells* wurde angewendet um die an ein bestimmtes Volumenelement (gelb) angrenzende Volumenelemente (lila) abzufragen.

Das Bild A.4 stellt das Ergebnis der Methode *Face.AdjacentCells* dar. Hier werden die Volumenelemente(lila) gekennzeichnet, die als Nachbarn einer ausgewählten Fläche(gelb) gelten. Dabei ist es wichtig zwischen den diversen Arten von den Nachbarschaftsbeziehungen zu unterscheiden. Bei dieser Methode werden wird ein Volumenelement nur dann als Nachbar einer Fläche gekennzeichnet, wenn eine seine Fläche dem ausgewählten Flächenelement entspricht. Das heißt Elemente, die eine gemeinsame Kante, aber keine Fläche haben, werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt. Jedoch ist diese Vorgehensweise nicht unbedingt die einzige zulässige und man könnte diese in Frage stellen. Zu der vollständigen Beschreibung von Beziehungen von 3D Objekten gehört auch die Darstellung von Beziehungen zwischen den Primitiven, aus denen die 3D Objekte bestehen. Würden diese Beziehungen ebenfalls berücksichtigt, würden als Nachbarn auch die Zellen gekennzeichnet, die eine gemeinsame Kante oder einen Punkt haben. Diese Frage bezieht sich auf die Definition von Nachbarn, die beim Programmieren dieses Tools gegeben

wurde.

Im Laufe der Untersuchung dieser Gruppe von Methoden ist aufgefallen, dass alle Methoden, die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Elementen diverser Klassen bestimmen, als einen weiteren Parameter eine *Parent Topology* benötigen. Daraus kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass Nachbarn immer innerhalb einer Menge von Elementen gesucht werden und nicht direkt für das ganze Modell. Gleichzeitig, wenn Nachbarn innerhalb von Elementen der gleichen Klasse gesucht werden, fehlt die Eingabe des zusätzlichen Parameters weg. Somit kann man vermuten, dass alle Elemente der gleichen Klasse in einer listenartigen Datenstruktur gespeichert sind und für die Suche nach Nachbarn iteriert werden.

### Boolesche Operatoren

Außer dem Nutzen, das durch das Speichern von den Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Elementen entsteht, ermöglicht das topologische Modell die Anwendung von booleschen Operatoren. Das Konzept spielt eine sehr wichtige Rolle in der Programmierung, da man damit Befehle und im Fall von Datenbanken Abfragen formal beschreiben kann. Die Tabelle 4.2 dient zur Übersicht von den booleschen Operatoren, die in der Bibliothek Topologic vorhanden sind.

Um das tatsächliche Ergebnis von den Operatoren zu untersuchen, wurde stellvertretend ein typischer boolescher Operator - *Intersect* betrachtet. Dafür wurde das gleiche Modell wie bei der Untersuchung von den Nachbarschaftsbeziehungen gewählt. Zuerst wurde das gesamte Modell, das als *Cluster* erzeugt war, mit Hilfe des Knotens *Topology.SubTopologies* auf Zellen aufgeteilt. Danach wurde der Knoten *Topology.Boolean* benutzt und anschließend für die Visualisierung der Knoten *Viewer Draw*. Als Ergebnis wurde erwartet, dass Schnittmenge einer Zelle mit sich selbst ein Volumenelement ist. In sonstigen Fällen kann die Schnittmenge von zwei Volumenelementen entweder als eine Fläche, eine Kante oder ein Punkt aussehen, je nachdem, wie sich die Zellen befinden. Jedoch stimmte das Ergebnis mit den Erwartungen nicht überein. Auf dem Bild A.5 sieht man die zwei ausgewählten Zellen (gelb) und die Schnittmenge von denen (rot). Somit besteht die Schnittmenge aus den vier Kanten und nicht aus der gesamten Fläche. Die Ursachen dieser Unstimmigkeit können unterschiedlich sein. Um die Schnittmenge von zwei Zellen zu bestimmen, werden auf eine Weise alle einzelnen Elemente einer Zelle mit den einzelnen Elementen anderer Zelle iterativ verglichen. Da die Fläche, die zu der Schnittmenge gehören muss, dazu nicht gehört, kann man vermuten, dass das Element nicht als die gemeinsame Fläche erkannt wird. Das könnte dadurch verursacht werden, dass es beim Vergleich von Flächen das Ergebnis davon abhängig ist, zu welcher Zelle eine Fläche gehört.

Da das Problem zu den grundlegenden Fragen der Topologie gehört und das Ergebnis unbefrie-

Operator	Besreibung	Abbildung
Merge	Objekte werden vereinigt und aus der Schnittmenge entsteht ein neues Objekt	
Union	Objekte werden vereinigt und verschmelzen, somit bleibt als Ergebnis immer ein Objekt	
Difference	Aus dem Objekt A wird die Schnittmenge mit dem Objekt B abgezogen	
Intersect	Das Ergebnis ist die Schnittmenge	
SymDif	Objekte ohne deren Schnittmenge bleiben als Ergebnis	
Slice	Objekt, das das andere Objekt schneidet, und die Schnittmenge stellen das Ergebnis dar	
Impose	Das Ergebnis besteht aus beiden Objekten, wobei aus dem Objekt B wird die Schnittmenge abgezogen	
Imprint	Das Ergebnis besteht aus dem Objekt B und der Schnittmenge	

Tabelle 4.3.: Boolesche Operatoren in Topologic

digend war, wurde nach einem alternativen Weg gesucht. Für die Untersuchung wurde das einfachere Modell mit zwei Räumen genommen. Es wurde versucht die Schnittmenge eines Raums mit den vier angrenzenden Wänden zu bestimmen. Dafür werden zuerst alle Wände ausgewählt, das müsste an der Stelle manuell erfolgen, da die topologischen Elemente erstmals keine Parameter oder sonstige semantische Daten beinhalten. Als nächstes werden aus den ausgewählten Zellen mit Hilfe des Knotens *Topology.SubTopologies* die Shells abgeleitet und aus denen die Schnittmenge gebaut. Als Ergebnis der Operation *Intersect* bekommt man eine Menge von *Cluster*, diese wird mittels des gleichen Knotens in *Faces* aufgeteilt. Auf dem Bild A.14 kann man die Visualisierung dieser Vorgehensweise ansehen. Nachdem die Schnittflächen bestimmt sind, kann man beispielsweise die Gesamtfläche von denen ausrechnen.

### Internal und External Boundaries

Die Bibliothek Topologic ermöglicht außer der Abfrage von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Elementen verschiedener Dimension auch die Untersuchung von Elementgrenzen, die ebenfalls andere Dimension als Objekt selbst haben. Es wird untersucht wie das Vorgehen beim Erstellen von Elementen mit Innengrenzen unter der Anwendung des Knoten *Face.ByWires* und *Cell.ByFaces* aussieht und wie man die Grenzen quantitativ bewerten kann. Als erstes wird ein dreidimensionaler Würfel mit einem Innenwürfel modelliert, dabei sind die beiden Elemente über den booleschen Operator *Merge* vereinigt. Für das entstandene Element werden im nächsten Schritt die Innen- und Außengrenzen bestimmt, das Ergebnis entsprach den Erwartungen und ist auf dem Bild A.12 dargestellt. Die Grenzen entsprechen dabei dem Element *Shell*, für welches beispielsweise die Fläche ausgerechnet werden kann. Bei dem nächsten Versuch wird eine zweidimensionale ebene Form mit einem Loch untersucht, das Loch entstand dabei als Ergebnis der booleschen Operation *Difference*. Wie man auf dem Bild A.13 sehen kann, wurde das Loch weder als eine Innengrenze noch als eine Außengrenze des Elements erkannt. Auf die Ursache dieses Fehlers konnte nicht abschließend geklärt werden, aber das wäre durchaus wichtig das Problem anzuschauen, da die Innengrenzen bei vielen Abfragen erforderlich sein können. Bei einem Modul während des Studiums wurde ein praxisbezogenes Beispiel betrachtet, bei welchem die Fläche von den Innengrenzen benötigt würde. Die Aufgabe bestand in der Bestimmung von Holzmengen, die für die Schalung von Deckenausschnitten benötigt werden. Anschließend wurde betrachtet wo sich ein Punkt in Bezug zu dem Element befindet. Es wurde einen Punkt ausgewählt, der in dem Bereich innerhalb des Innengrenzen liegt somit in dem Außenraum des Elements. Das Ergebnis kann man auf dem Bild A.13 sehen. Richtigerweise wurde mit dem Knoten *Face.IsInside* ermittelt, dass der Punkt mit den Koordinaten (0;0;0) außerhalb des Elementes liegt.

### 4.2.3. Modellierung mit topologischen Datenstrukturen

Die Funktionalität von Topologic ist allerdings nicht nur auf Bearbeitung und Analyse von Modellen begrenzt. Diese Bibliothek bietet auch die Möglichkeit direkt aus topologischen Objekten Modelle zu erstellen. Jedoch wurde während den Recherchen im Internet festgestellt, dass meistens basieren sich die Workflows auf die Transformation eines fertigen geometrischen Modells. Die Ursache dafür ist, dass es eine Menge von unterschiedlichen Softwareprodukten vorhanden ist, die man seit langem für das Erstellen von Modellen nutzt. Die Tools wurden meistens lange Zeit entwickelt und sind gut für das Erzeugen von geometrischen Formen geeignet. Momentan sind das meistens Applikationen, die eine Objektorientierte Modellierung in 3D ermöglichen, daher ist es nicht üblich die topologischen Primitive beim Modellierungsprozess zu benutzen. Wie es schon in einem vorherigen Punkt beschrieben wurde, gibt es dafür den Knoten *Topology.ByGeometry*. Der Prozess bei der Erstellung eines Modells aus topologischen Datenstrukturen von Topologic fängt mit Instanziieren von Punkten (*Vertices*), die in der Klassenhierarchie von Topologic das primitivste Element darstellen. Aus den Punkten werden Kanten (*Edges*), danach Kantenzüge (*Wires*) und daraus Flächen (*Faces*) aufgebaut. Da sich Topologic momentan in der Entwicklungsphase befindet, sind noch nicht alle Funktionalitäten fehlerfrei. Das ist auch der Fall beim Instanziieren von topologischen Objekten, jedoch es gibt immer mindestens einen Weg um aus solchen topologischen Primitiven wie Knoten(*Vertices*) ein Volumenelement(*Cell*) aufzubauen. Die genaue Reihenfolge von Elementen beim Erstellen eines *Cells* ist auf dem Bild 4.1 dargestellt. Der Aufbau entspricht im Großen und Ganzen der Klassenhierarchie von Topologic, außerdem kann man sich auf Namen von Knoten orientieren. Dann ist es ziemlich intuitiv welche Elemente für den Aufbau eines nächsten Element erforderlich sind. Der große Nachteil und der Grund warum man in der Regel mit den importierten Geometrien arbeitet, besteht daran dass es eine sehr mühsame Vorgehensweise ist. Das Bild A.15 zeigt, wie der Code für den Aufbau einer simplen Prisma mit zehn Knoten, fünfzehn Kanten und sieben Flächen aussieht. Somit ist der Weg definitiv uninteressant für die Praxis.



Abbildung 4.1.: Modellieren mit topologischen Datenstrukturen von Vertices bis zum Cell

# Zusammenfassung und Ausblick

---

Das Kernziel dieser Arbeit war es das Thema der Modellierung und Nutzung der Topologie in BIM im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeit und bestehende Barrieren zu beleuchten. Themen wie Verlässlichkeit von topologischen Modellen, Datenstrukturen für das Beschreiben und Speichern von Topologien wurden behandelt. Im praktischen Teil konnte der Funktionsumfang eines aktuellen Werkzeugs zur Modellierung und Analyse von topologischen Modellen untersucht und bewertet werden.

Zunächst einmal wurde der Überblick über die beim Import unterstützten Dateiformate geschaffen. Es wurde außerdem überprüft, ein topologisches Modell mittels den in dem Tool vorhandenen Werkzeugen zu erstellen, was sich jedoch als ein unpraktisches Vorgehen herausgestellt hat. Die Hauptaufgabe der Beispiele war es unter der Anwendung der visuellen Programmierungsumgebung Blender + Sverchok zu analysieren, was das Tool Topoogic zur Analyse der Nachbarschaftsbeziehungen leisten kann. Es wurde festgestellt, dass die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Elementen sowohl der gleichen als auch verschiedener Dimensionen ausgerechnet werden können. Des Weiteren stehen die unterschiedlichsten booleschen Operatoren zur Verfügung, die bei vielen analytischen Fragestellungen nützlich sein können.

Der Entwicklungsstand des Tools ist schon jetzt für die Erledigung von ganz komplexen Aufgaben geeignet, aber es bieten sich trotzdem noch viele Möglichkeiten zur Erweiterung der Funktionalität. Ähnlich wie bei allen anderen Applikationen bietet momentan das Tool keine Lösung für die Probleme, welche bei der Arbeit mit gekrümmten Flächen entstehen. Weiterhin unterstützt zu dem heutigen Zeitpunkt die Applikation die Integration eines wichtigen Teils der Information - der Semantik nicht direkt beim Import. Das bringt das gesamte Modell zu dem Stand vor der Einführung der BIM Methodik zurück, Semantik muss manuell referenziert werden. Darüber hinaus wäre es vorteilhaft, wenn es möglich wäre, die importierten Modelle mit topologischen Strukturen zu ergänzen. Die Implementierung einer solchen Funktionalität wäre beispielsweise nützlich, wenn es sich nachträglich herausstellt, dass das topologische Modell Voids enthält. Die Antworten zu den Fragen oder zumindest die Entwicklung von Vorgehensweisen, die diese Schwierigkeiten minimieren würden, sollten bereits für den Anfang genügen, um mehr Akzeptanz in Bezug auf topologische Modellierung im Bauwesen zu bekommen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Thema Topologie momentan eher in dem wissenschaftlichen Raum diskutiert wird und in der Praxis noch nicht sehr oft angewendet. Jedoch ist das für eine ziemlich neue Arbeitsmethode zu erwarten, da sich zuerst best practice Abläufe ergeben müssen und die Funktionen weiterentwickelt werden sollten. Erst dann, wenn die Abläufe stabil funktionieren, ist die Etablierung der Vorgehensweise in der Praxis möglich. Dabei bieten jedoch auch die bereits vorhandenen Analysen der Überschneidungen, Berührungen und direkten Nachbarschaftsbeziehungen großes Potential in der Auswertung und Weitergabe von Bauwerksdatenmodellen.

# Blender Code

Der vollständige Code ist unter dem Github zu finden: <https://github.com/ana0406/bachelor>

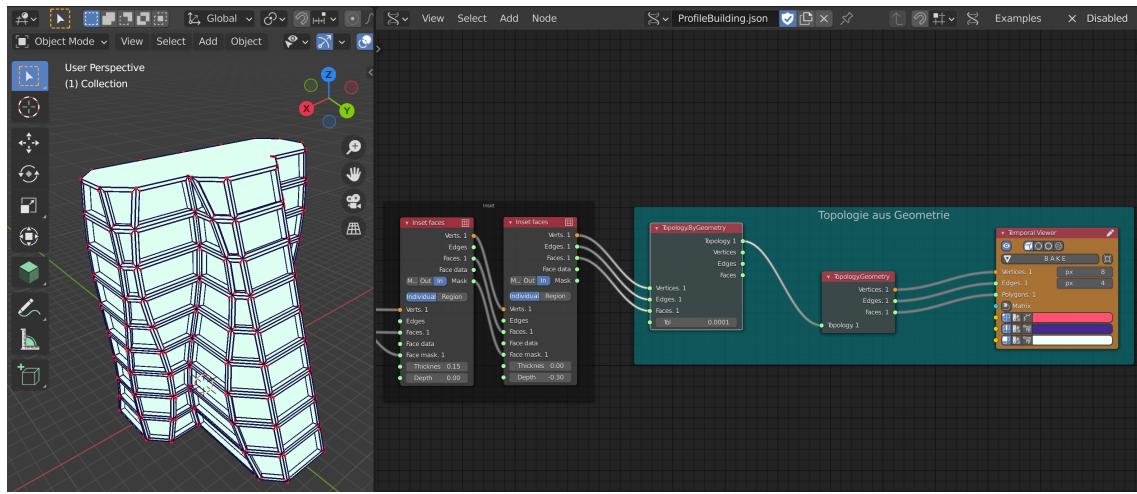


Abbildung A.1.: Transformation eines existierenden geometrischen Modells in ein topologisches

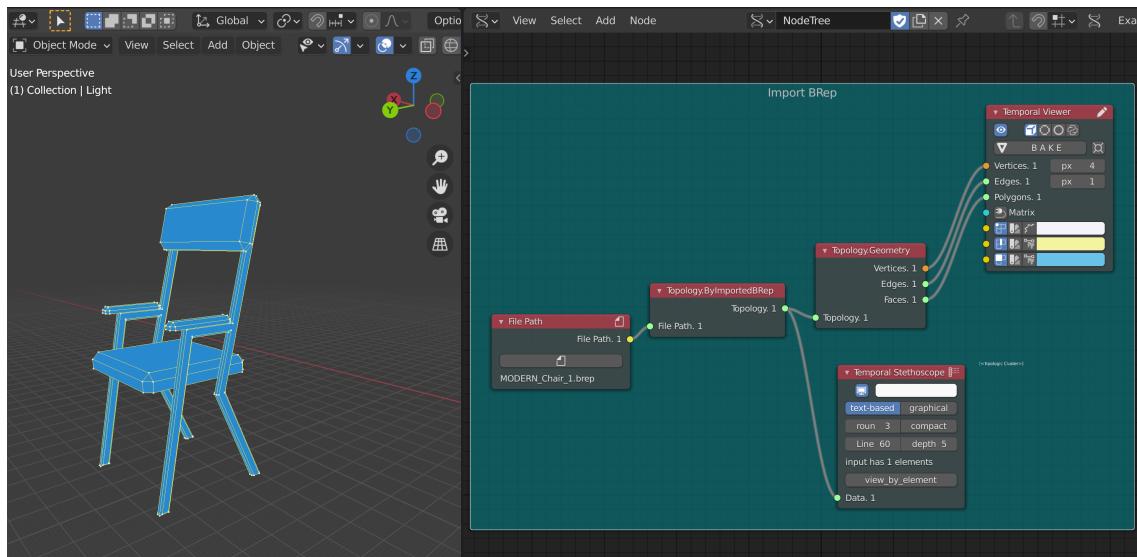


Abbildung A.2.: Importieren von BREP Datei

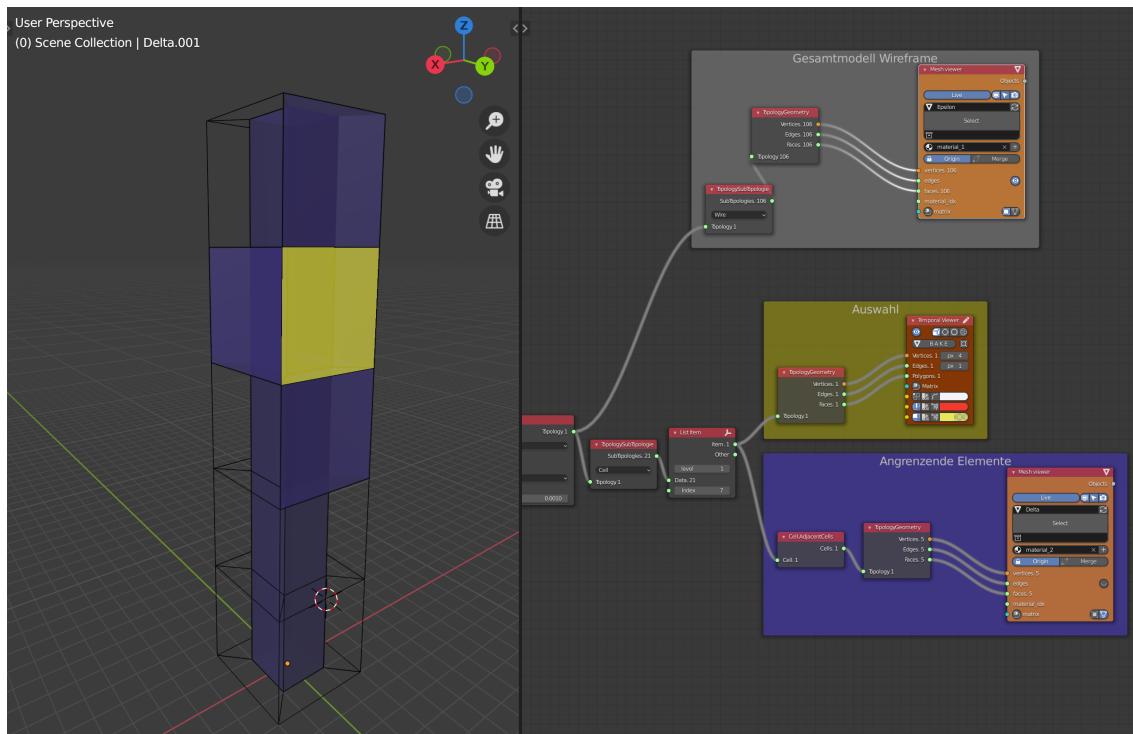


Abbildung A.3.: Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Volumenelementen

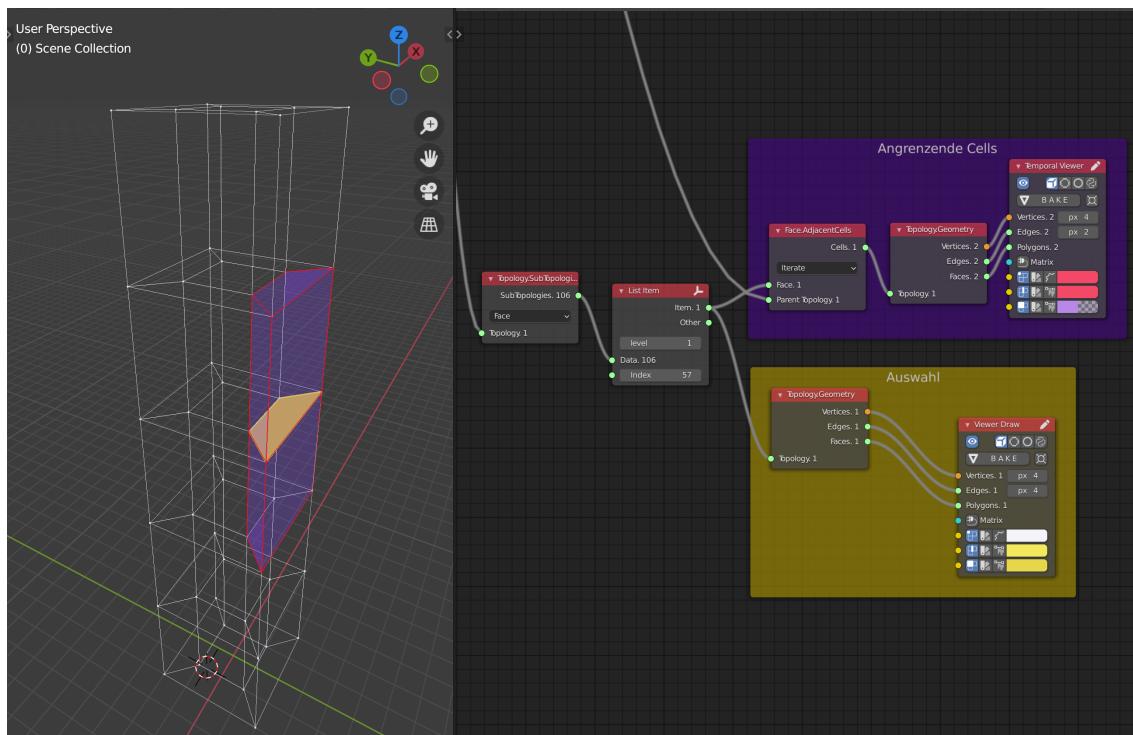


Abbildung A.4.: Nachbarschaftsbeziehungen zwischen einer Fläche und Volumenelementen

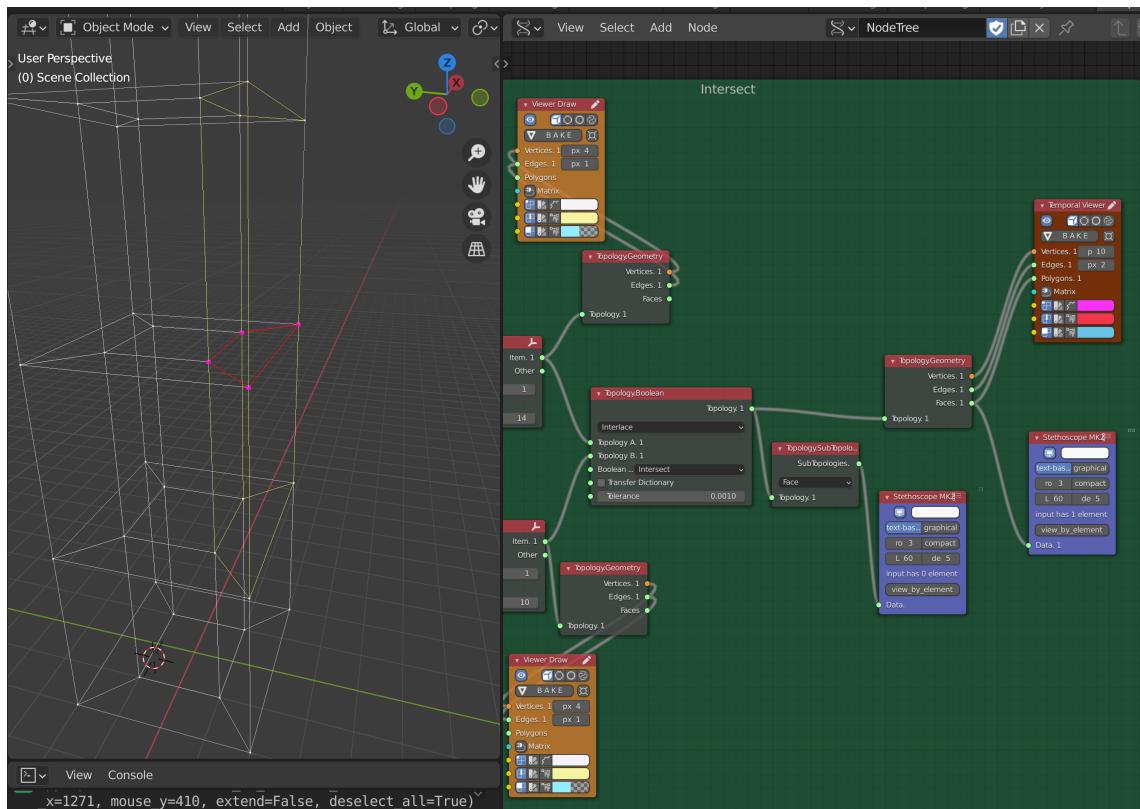


Abbildung A.5.: Boolescher Operator Schnittmenge

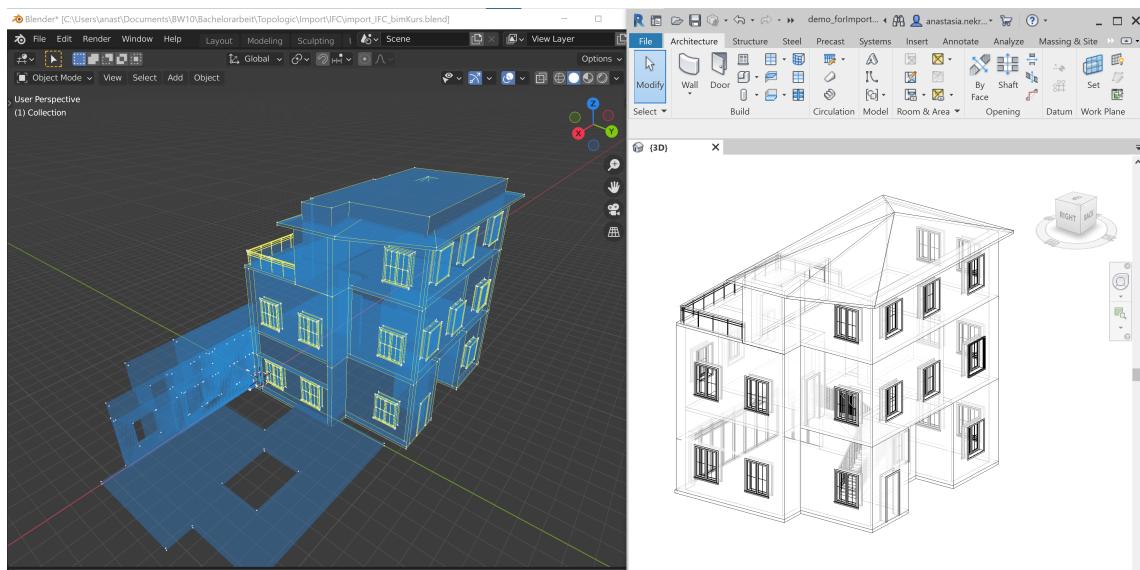


Abbildung A.6.: Ungenauigkeiten beim Importieren einer IFC Datei mit Topologic.

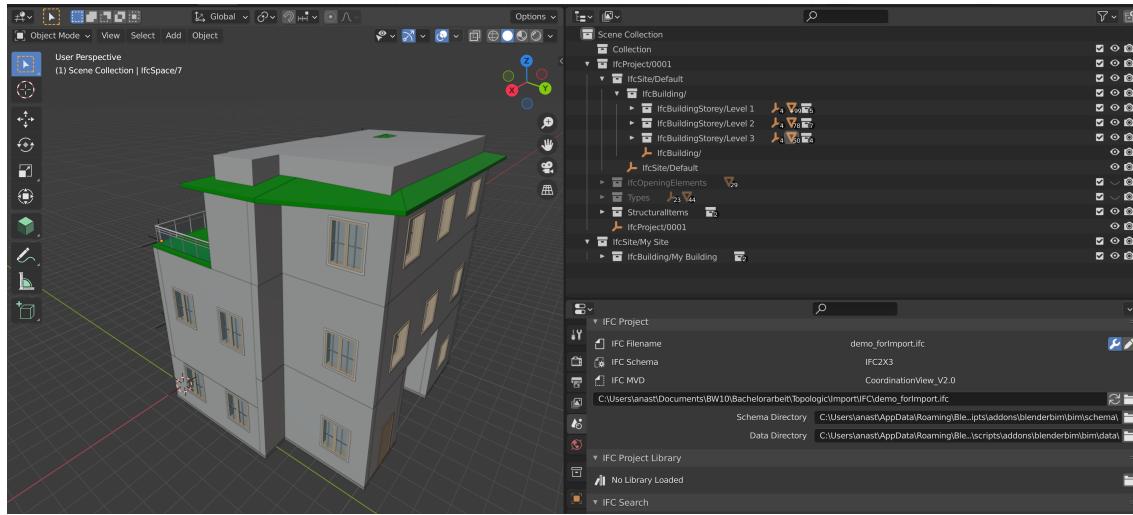


Abbildung A.7.: Importieren einer IFC Datei in Blender ohne Topologic.

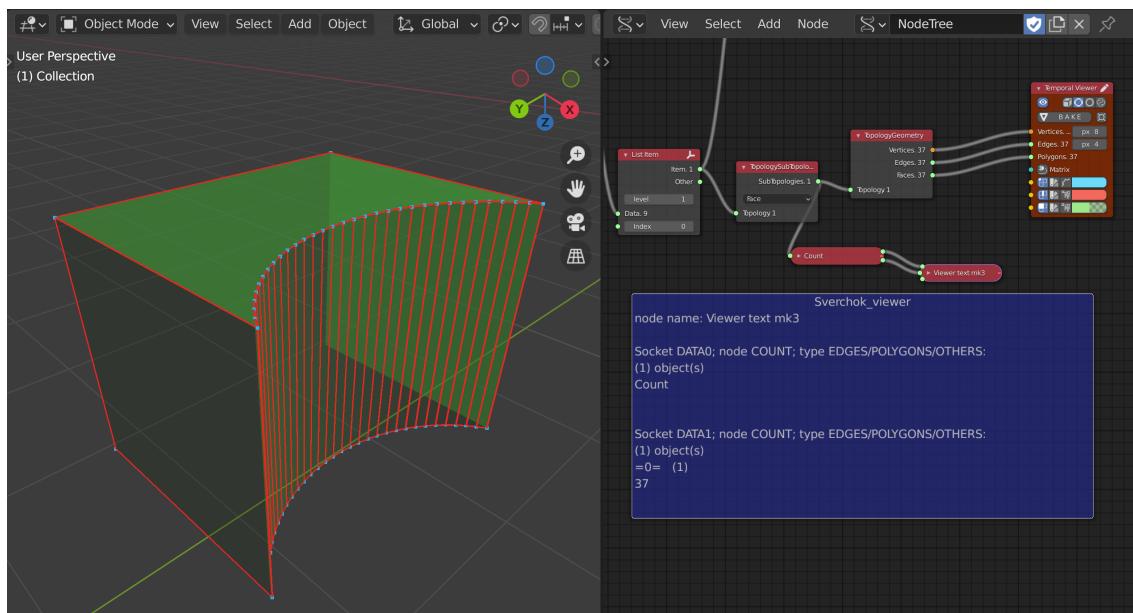


Abbildung A.8.: Import von IFC Datei. Darstellung einer runden Wand.

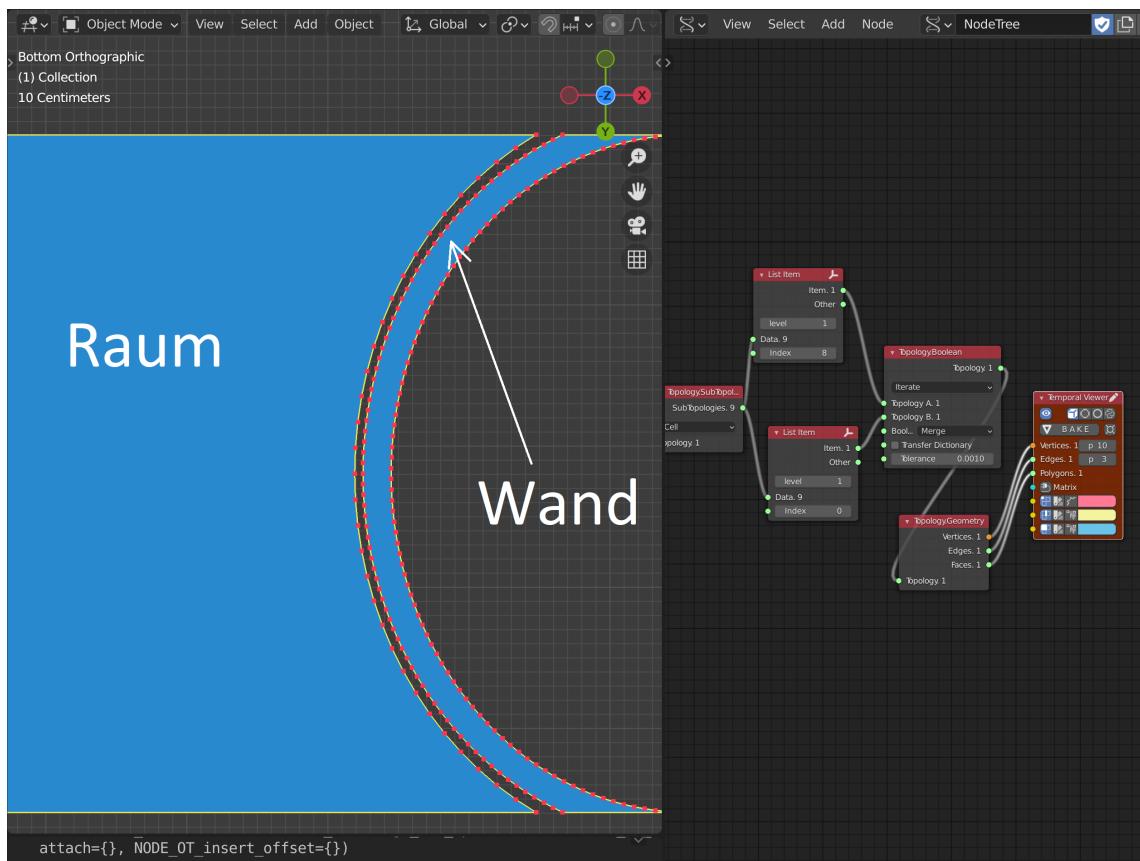


Abbildung A.9.: Import von IFC Datei: ein topologischer Leerraum zwischen zwei gekrümmten Elementen.

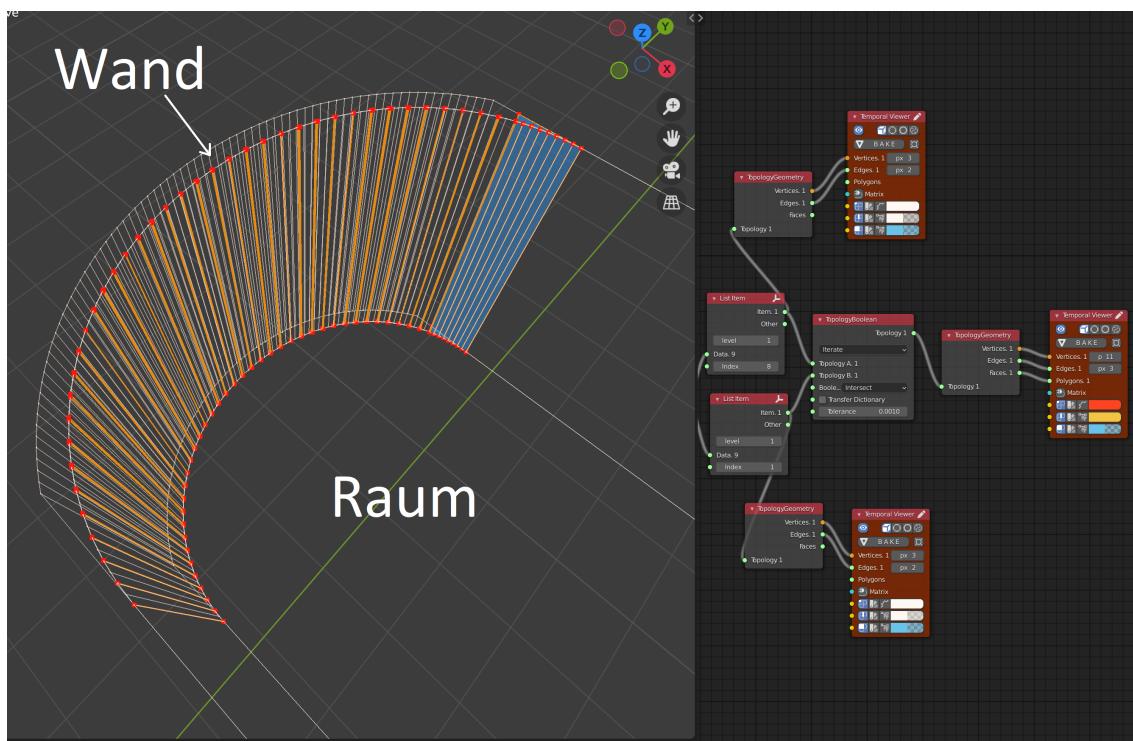


Abbildung A.10.: Import von IFC Datei: unterschiedliche Approximation von gekrümmten Elementen.

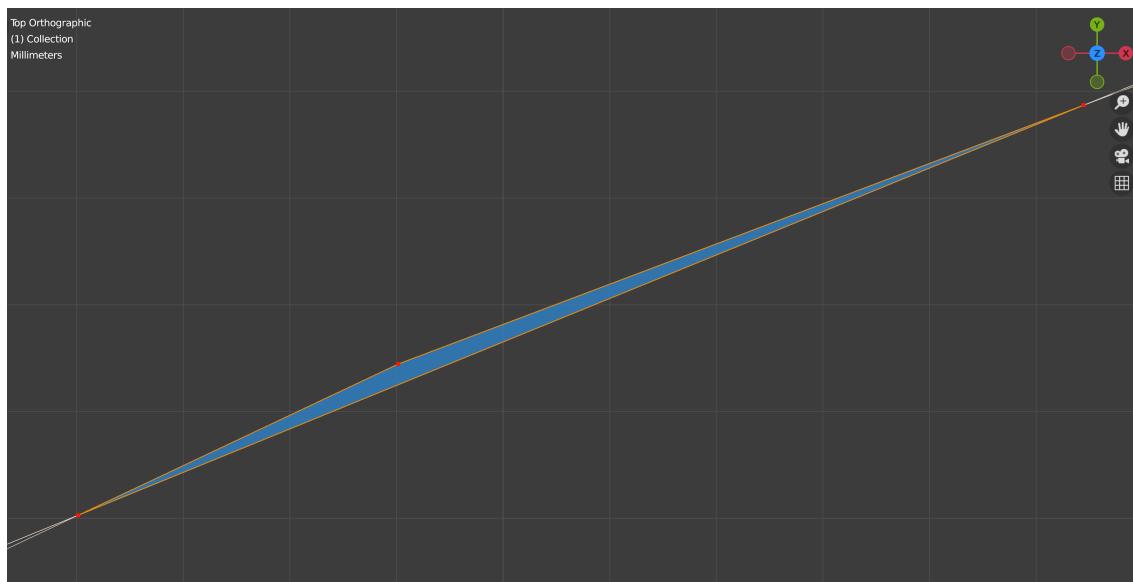


Abbildung A.11.: Import von IFC Datei: Schnittfläche von gekrümmten Elementen. Draufsicht.

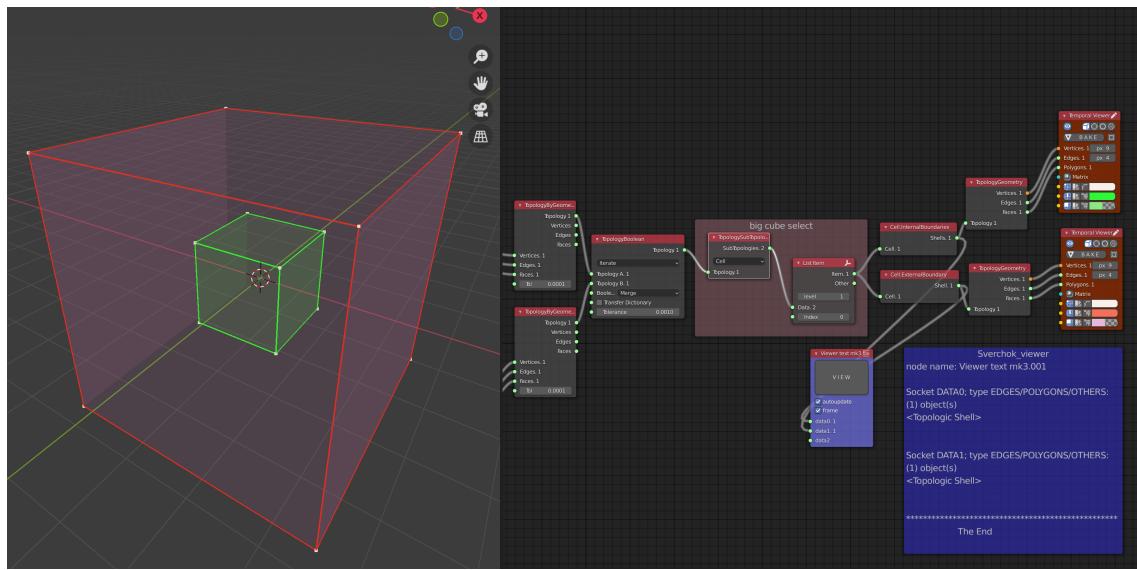


Abbildung A.12.: Innen- und Außengrenzen eines Volumenelementes.

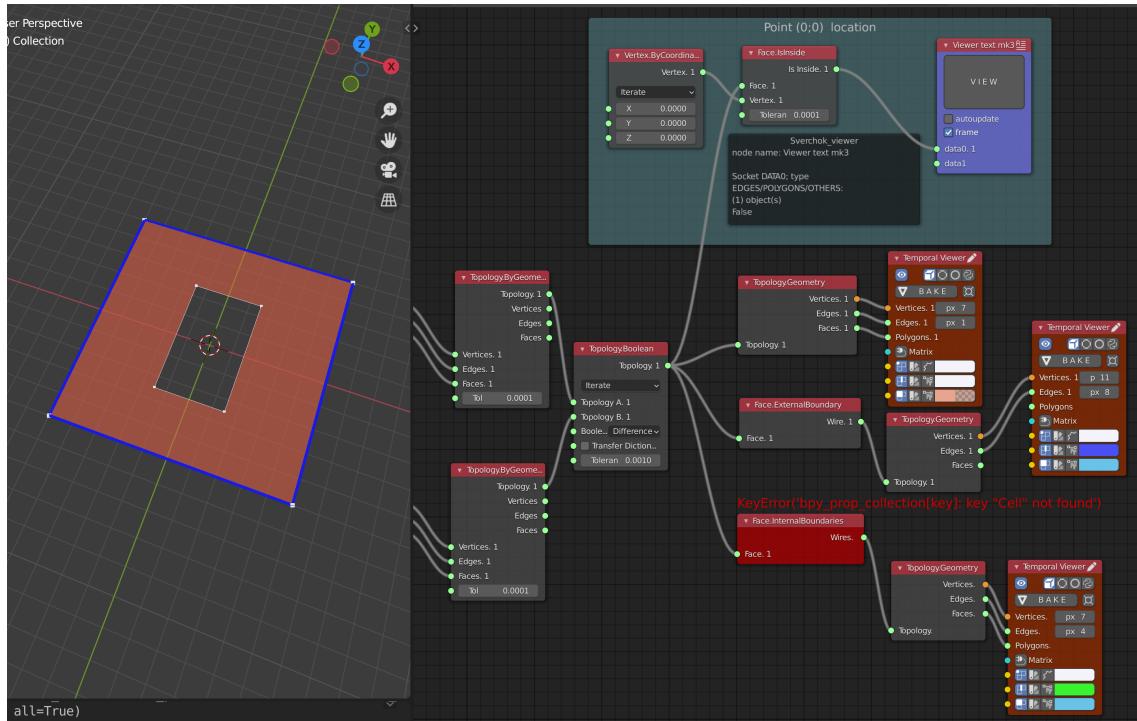


Abbildung A.13.: Innen- und Außengrenzen eines 2D Elementes.

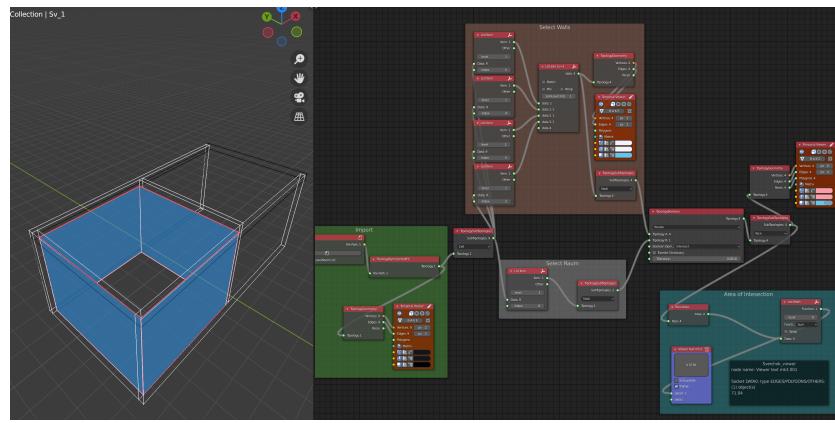


Abbildung A.14.: Bestimmung von Wandflächen eines Raums mit Hilfe des booleschen Operators.

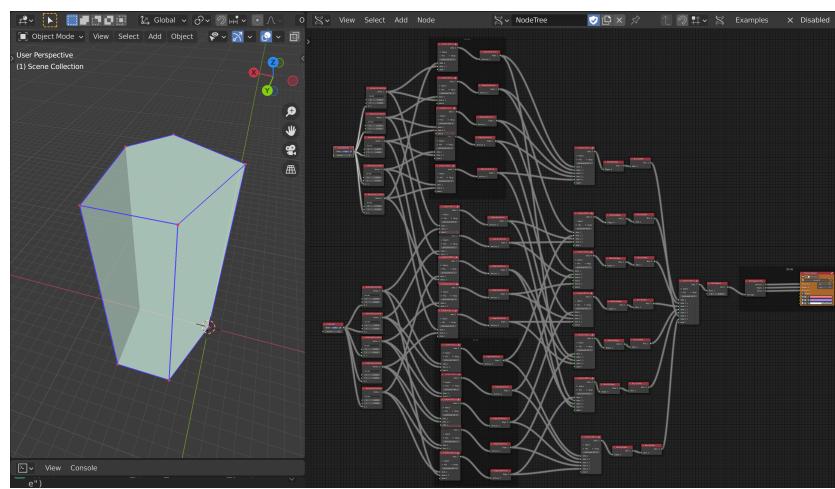


Abbildung A.15.: Das aus topologischen Instanzen aufgebaute Modell vom Prisma

# Literatur

---

- Abou Diakité, Abdoulaye und Sisi Zlatanova (Juli 2016). „Valid Space Description in BIM for 3D Indoor Navigation.“ en. In: *International Journal of 3-D Information Modeling* 5.3, S. 1–17. ISSN: 2156-1710, 2156-1702. DOI: 10.4018/IJ3DIM.2016070101. URL: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/IJ3DIM.2016070101> (besucht am 03.07.2021).
- Basir, W. N. F. W. A. u. a. (Nov. 2020). „THE INTEGRATION OF BIM AND GIS IN CONSTRUCTION PROJECT – A DATA CONSISTENCY REVIEW“. en. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIV-4/W3-2020, S. 107–116. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-107-2020. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-infsci.net/XLIV-4-W3-2020/107/2020/> (besucht am 02.07.2021).
- BlenderBIM Add-on* (2021). URL: <https://blenderbim.org/> (besucht am 05.11.2021).
- Boguslawski, P. u. a. (Sep. 2015). „BIM-GIS modelling in support of emergency response applications“. en. In: Bristol, UK, S. 381–391. DOI: 10.2495/BIM150321. URL: <http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=BIM15-032-1> (besucht am 02.11.2021).
- Boguslawski, Paweł (2011). „MODELLING AND ANALYSING 3D BUILDING INTERIORS WITH THE DUAL HALF-EDGE DATA STRUCTURE“. en. In: S. 141.
- BRep Format - Open CASCADE Technology Documentation* (2021). URL: [https://dev.opencascade.org/doc/occt-6.7.0/overview/html/occt\\_brep\\_format.html](https://dev.opencascade.org/doc/occt-6.7.0/overview/html/occt_brep_format.html) (besucht am 05.10.2021).
- CAD Assistant - Open Cascade* (2021). en. URL: <https://www.opencascade.com/products/cad-assistant/> (besucht am 25.10.2021).
- Egenhofer, Max J. (1989). „A formal definition of binary topological relationships“. en. In: *Foundations of Data Organization and Algorithms*. Hrsg. von Witold Litwin und Hans-Jörg Schek. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 457–472. ISBN: 978-3-540-46186-9. DOI: 10.1007/3-540-51295-0\_148.
- Ellul, Claire und Muki Haklay (März 2006). „Requirements for Topology in 3D GIS“. en. In: *Transactions in GIS* 10.2, S. 157–175. ISSN: 1361-1682, 1467-9671. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2006.00251.x. URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2006.00251.x> (besucht am 05.07.2021).
- Foundation, Blender (2021). *About*. en. URL: <https://www.blender.org/about/> (besucht am 08.09.2021).

Ghawana, Tarun und Sisi Zlatanova (Apr. 2012). *INCREASING SIGNIFICANCE OF 3D TOPOLOGY FOR MODELLING OF URBAN STRUCTURES*.

Gross, Markus H. (Feb. 1998). „Computer graphics in medicine: from visualization to surgery simulation“. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 32.1, S. 53–56. ISSN: 0097-8930. DOI: 10.1145/279389.279462. URL: <https://doi.org/10.1145/279389.279462> (besucht am 25.07.2021).

Huhnt, W und F Gielsdorf (o. D.). „TOPOLOGICAL INFORMATION AS LEADING INFORMATION IN BUILDING PRODUCT MODELS“. en. In: (), S. 11.

Jabi, Wassim (Sep. 2021). *wassimj/topologicsverchok*. original-date: 2021-02-13T14:47:12Z. URL: <https://github.com/wassimj/topologicsverchok/blob/f09e5d03a0e461d1c84d78f16ee25387bed1fd43/README-windows.md> (besucht am 09.09.2021).

Jamali, A., A. Abdul Rahman und P. Boguslawski (Sep. 2016). „3D TOPOLOGICAL INDOOR BUILDING MODELING INTEGRATED WITH OPEN STREET MAP“. en. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-4/W1, S. 111–117. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-111-2016. URL: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W1/111/2016/> (besucht am 05.07.2021).

Jamali, Ali u. a. (Feb. 2017). „An automated 3D modeling of topological indoor navigation network“. en. In: *GeoJournal* 82.1, S. 157–170. ISSN: 0343-2521, 1572-9893. DOI: 10.1007/s10708-015-9675-x. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10708-015-9675-x> (besucht am 21.05.2021).

Li, Ki-Joune u. a. (2019). „OGC IndoorGML: A Standard Approach for Indoor Maps“. en. In: *Geographical and Fingerprinting Data to Create Systems for Indoor Positioning and Indoor/Outdoor Navigation*. Elsevier, S. 187–207. ISBN: 978-0-12-813189-3. DOI: 10.1016/B978-0-12-813189-3.00010-1. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128131893000101> (besucht am 05.09.2021).

*LODs - Der Fertigstellungsgrad* (März 2017). de-DE. URL: <https://www.buildinformed.com/fertigstellungsgrad-lod/> (besucht am 31.07.2021).

Paul, N und A Borrmann (o. D.). „Using Geometrical and Topological Modeling Approaches in Building Information Modeling“. en. In: (), S. 10.

Rasmussen, Mads Holten u. a. (Nov. 2020). „BOT: the Building Topology Ontology of the W3C Linked Building Data Group“. In: *Semantic Web*. DOI: 10.3233/SW-200385.

Salleh, S. u. a. (Okt. 2019). „SPATIAL ADJACENCY ANALYSIS OF CITYGML BUILDINGS VIA 3D TOPOLOGICAL DATA STRUCTURE“. en. In: *ISPRS - International Archives of*

- the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-4/W16, S. 573–579. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-573-2019. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W16/573/2019/> (besucht am 05.05.2021).
- Software – Topologic* (2021). en. URL: <https://topologic.app/software/> (besucht am 08.09.2021).
- Stachowiak, Herbert (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. de. Springer. ISBN: 978-3-211-81106-1.
- Stachowiak (1973) (1973). *Stachowiak (1973): Allgemeine Modelltheorie*. ger. URL: <http://archive.org/details/Stachowiak1973AllgemeineModelltheorie> (besucht am 01.07.2021).
- The Home of Location Technology Innovation and Collaboration / OGC* (2021). URL: <https://www.ogc.org/> (besucht am 25.10.2021).
- Ujang, Uznir, Francesc Anton Castro und Suhaibah Azri (Feb. 2019). „Abstract Topological Data Structure for 3D Spatial Objects“. en. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8.3, S. 102. ISSN: 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi8030102. URL: <http://www.mdpi.com/2220-9964/8/3/102> (besucht am 12.07.2021).
- Was ist visuelle Programmierung? / Dynamo Primer* (2021). URL: [https://primer.dynamobim.org/de/01\\_Introduction/1-1\\_what\\_is\\_visual\\_programming.html](https://primer.dynamobim.org/de/01_Introduction/1-1_what_is_visual_programming.html) (besucht am 09.09.2021).
- Weiler, Kevin James (Aug. 1986). *Topological structures for geometric modeling*.
- Zlatanova, Sisi (Sep. 2000). „3D GIS for urban development“. Diss.
- Zlatanova, Sisi, Alias Rahman und Wenzhong Shi (Mai 2004). „Topological models and frameworks for 3D spatial objects“. In: *Computers & Geosciences* 30, S. 419–428. DOI: 10.1016/j.cageo.2003.06.004.
- Zlatanova, Siyka und Klaus Tempfli (o. D.). „MODELLING FOR 3D GIS: SPATIAL ANALYSIS AND VISUALISATION THROUGH THE WEB“. en. In: *Part B* (), S. 8.