

Technische Universität Berlin

Fakultät VI Planen Bauen Umwelt

Institute für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Bauinformatik

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt



TOPOLOGISCHE BEZIEHUNGEN IN BIM

Bachelor Thesis

Anastasia Nekrasova

374397

anastasia.nekrasova@outlook.com

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr. Timo Hartmann

1. August 2021

Berlin

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Berlin, 1. August 2021

Anastasia Nekrasova

Abstract

Abgeschlossen wird diese Bachelorarbeit mit einem Anwendungsfall, und einer Übersicht von weiteren Einsatzmöglichkeiten dieser oder ähnlicher Softwareprodukte.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	ii
Abstract	iii
Tabellenverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	vii
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	1
1.3 Gliederung der Arbeit	1
2 Topologie	3
2.1 Definitionen	3
2.2 Beschreibung der Raumstruktur	4
2.3 Topologische Beziehungen zwischen Elementen	5
2.4 Topologie in unterschiedlichen Fachgebieten	8
3 Topologische Daten in BIM	9
3.1 Anforderungen an Detaillierungsgrad	9
3.2 Gewährleistung der Korrektheit auf dem Weg von Geometrie zu Topologie	10
3.3 Datenstrukturen fürs Speichern von topologischen Daten	10
3.3.1 IFC - Industry Foundation Classes	10
3.3.2 BOT - Building Ontology Topology	10
3.3.3 IndoorGML	11
3.3.4 Weitere Formate	11
3.4 Werkzeuge fürs Erstellen von topologischen Modellen	11
3.4.1 Revit + Dynamo	11
3.4.2 Topologic	11
4 Anwendungsfälle	12
4.1 Topologic	12

4.2 Vorteile für BIM Nutzer	12
4.3 Einstiegsmöglichkeiten	12
5 Zusammenfassung und Ausblick	13
Literatur	14

Tabellenverzeichnis

2.1	Simplexe vier Dimensionen	5
3.1	Level of Details (Geometry)	9

Abbildungsverzeichnis

2.1	Topologie als Teilgebiet der Mathematik	3
2.2	Dimensionally Extended Nine-Intersection Model	6
2.3	Adjazenzmatrix für Knoten, Kante und Fläche	7
2.4	Beispiel für Nachbarschaftsbeziehungen in CityGML	7

Abkürzungsverzeichnis

AIA Auftraggeber-Informationsanforderungen

CACC Compact Abstract Cell Complexes

CityGML The City Geography Markup Language

DHE Dual Half-Edge

IFC Industry Foundation Classes

LOD Level of Detail = Level of Geometry

LOI Level of Information

SSM The Simplified Spatial Model

XML Extensible Markup Language

Einführung

1.1 Motivation

Wie auch viele andere Facetten des Lebens beeinflusst die schnelle Entwicklung im Bereich der Informatik und Elektrotechnik auch die Baubranche. Bauingenieure, Architekten, Geologen und andere Fachleute werden bei ihren alltäglichen Aufgaben durch leistungsstarke Computer mit gutem Software und sonstige moderne elektronische Geräte enorm unterstützt. Dabei geht es nicht nur um Arbeitserleichterung, sondern auch um Entstehen von ganz neuen Aufgaben, die meistens mit großen Datenmengen verbundenen sind und per Hand nicht lösbar wären.

Parametrisches Design, Simulationen von unterschiedlichen Prozessen, Big Data Verarbeitung damit beschäftigen sich immer mehr Experten, die für ihre Probleme eine optimale Lösung finden wollen. Dabei konfrontiert man fast immer mit Anwendung von 2D oder 3D Modellen.

Herbert Stachowiak hat in seiner Arbeit geschrieben: "Modelle sind nicht nur Modelle von etwas. Sie sind Modelle für jemanden". 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.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Bachelorarbeit behandelt das Thema Topologie, Nachbarschaftsbez, dabei wird der Schwerpunkt auf topologische Modelle in Baubranche gelegt. Während das Ziel des praxisorientierten Teils ist die Untersuchung von Open-Source Software Bibliothek Topologic, die es ermöglicht mit topologischen Daten in unterschiedlichen Programmumgebungen zu arbeiten. Es wird auf einem konkreten Problem untersucht welche Funktionalitäten Topologic bietet bzw. ob man das Beispiel mit vorhandenen Mitteln vollständig lösen kann.

1.3 Gliederung der Arbeit

Bevor Details und Anwendungsfälle von topologischen Modellen beschrieben werden, behandelt diese Arbeit zunächst das Thema Topologie allgemein. Im Kapitel 2 wird als erstes die Stelle

von Topologie in der Wissenschaft definiert und auf wichtige Grundlagen und Definitionen eingegangen. Im nächsten Kapitel werden einige Fragen, die mit Building Information Modelling (BIM) und topologische Modellierung verbunden sind, behandelt. Unter anderem wird untersucht wie man topologische Daten speichern kann und welche Möglichkeiten fürs Erstellen von topologischen Modellen vorhanden sind. Wobei der Fokus in diesem Abschnitt auf Detaillierungsgrad von topologischen Modellen gelegt wird. Nachfolgend wird das Software Produkt Topologic untersucht. Es wird dargestellt wie man mit dessen Hilfe ein konkretes Problem aus BIM lösen kann. Zuletzt wird auf Entwicklungsperspektive von topologischen Modellen in Baubranche eingegangen.

Topologie

Um das Thema Topologie einem wissenschaftlichen Bereich zuzuordnen schauen wir uns wie sich das Gebiet entwickelte und wer am meisten dazu beigetragen hat. Einer der ersten, wer sich mit einem Problem, das wir jetzt als topologisches bezeichnen würden, beschäftigt hat war Leonard Euler als er nach einer Lösung für das Königsberger Brückenproblem suchte. Allerdings erste schriftliche Erwähnung des Begriffs Topologie kam in 1847 vom Johahn Listig in seiner Arbeit "Vorstudien" zur Topologie". Ungefähr zur gleichen Zeit haben sich mit dieser Thematik auch solche bekannte Mathematiker befasst wie Henri Poincare mit seinem 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.

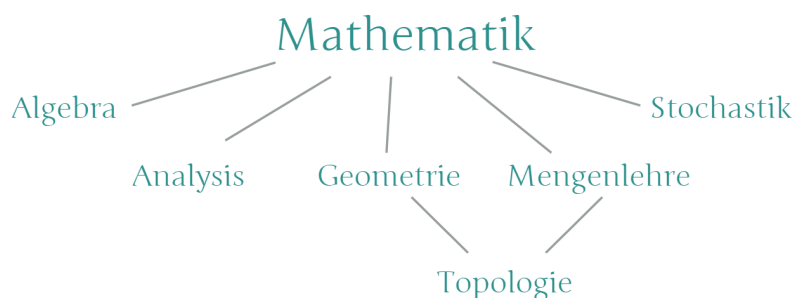


Abbildung 2.1: Topologie als Teilgebiet der Mathematik

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 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

gehören. 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 geometrische Koordinaten zu berücksichtigen (Boguslawski 2011).

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

Das nächste Konzept, das bei topologischen Modellen eine wichtige Rolle spielt ist *die vollständige Raumpartitionierung*. Damit wird ein Prozess beschrieben nachdem ein Raum in endliche Anzahl von disjunkten Teilräumen aufgeteilt ist. Dabei muss jeder Punkt des ursprünglichen Raums genau einem Teilraum gehören.

2.2 Beschreibung der Raumstruktur

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

Grundlegende Topologische Elemente sind Knoten, Kanten und Flächen. Üblicherweise bezeichnet man die Elemente mit drei Großbuchstaben:

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

Raumaufteilung erfolgt genau durch 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 zu einander 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 zum Beispiel anhand Dimension des 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 Tabelle ?? werden beispielhaft einige Simplexe aufgelistet, die ziemlich einfach visuell vorstellbar sind.

Dimension	Simplex
0	Punkt
1	Strecke
2	Dreieck
3	Tetraeder

Tabelle 2.1: Simplexe vier Dimensionen

2.3 Topologische Beziehungen zwischen Elementen

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

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

Wie es schon oben geschrieben wurde kann man einen topologischen Raum auf Innen, Außen und Rand unterteilen. Um räumliche Beziehungen zu betrachten, braucht man mindestens zwei Elemente, die können sowohl gleicher als auch unterschiedlicher Dimensionen sein. Wichtig ist ob Elemente miteinander verbunden sind und wenn ja, wie sieht die Verbindung aus. Als ein der Standards für Klassifizierung von räumlichen Beziehungen zwischen Elementen bestimmter Dimension (2D oder 3D) hat sich das DE-9IM (Dimensionally Extended 9-Intersection Model) oder Clementini-Matrix etabliert. Das Modell ist von OGC (Open Geospatial Consortium) akzeptiert und wird für die Beschreibung von Beziehungen zwischen Objekten in Geowissenschaft

benutzt. Auf dem Bild 2.4 ist das Modell dargestellt, es basiert auf dem Konzept der vollständigen Raumaufteilung, das schon oben erwähnt wurde. Man betrachtet zwei Elementen und dementsprechend insgesamt sechs Teilräume (Innen, Rand und Außen für jedes Element), bildet Schnittmengen für jeden Teilraum eines Element mit jedem Teilraum des anderen und fixiert das Ergebnis in eine Matrix. Die 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 die Schnittmenge Element enthält: ja oder nein, und in der zweiten Form steht welche dimension die Schnittmenge besitzt. Auf diese Weise kann man invariante binäre Beziehungen untersuchen und 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).

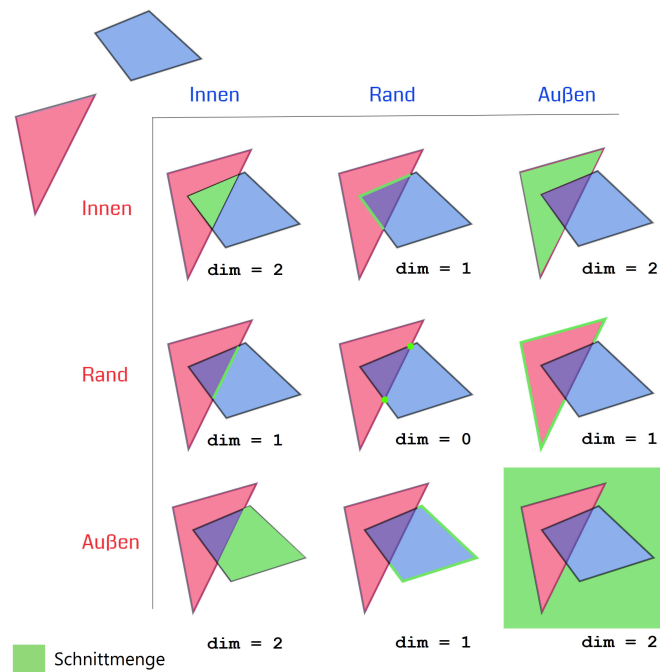


Abbildung 2.2: Dimensionally Extended Nine-Intersection Model

Angaben über die angrenzenden Elementen bzw. Nachbarschaftsbeziehungen sind die grundlegende Daten, die beim Modellieren von Topologie gepflegt werden. Eine übliche Art für die Beschreibung von Nachbarschaftsbeziehungen ist *Adjazenzmatrix*. Die Anzahl von Nachbarschaftsbeziehungen in einer Topologie entspricht der Anzahl geordneter Paaren aus den Elementen und ist gleich n^2 , wenn n 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.

Die Nachbarschaftsbeziehungen können mittels Graphen, in einer Extensible Markup Language (XML) Datei oder mit Hilfe einer anderen Datenstruktur wie zum Beispiel Compact Abstract

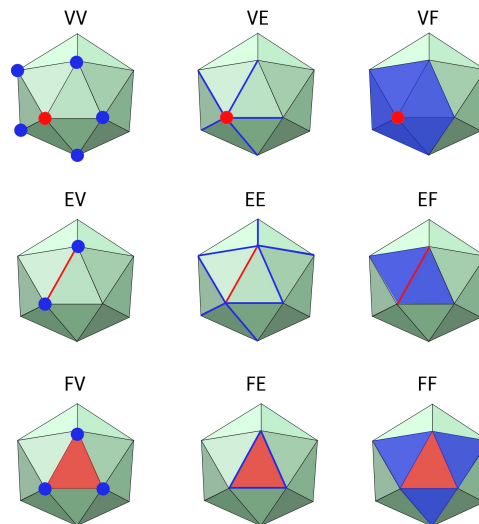


Abbildung 2.3: Adjazenzmatrix für Knoten, Kante und Fläche

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) Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Elementen verschiedener Dimensionen nicht beschrieben. Es besteht die Möglichkeit über gespeicherte Referenzen zu erfahren welche Flächen gehören zu einem Volumen, aber zum Beispiel nicht welche Flächen sind Nachbarn einer Kante (Salleh u. a. 2019).

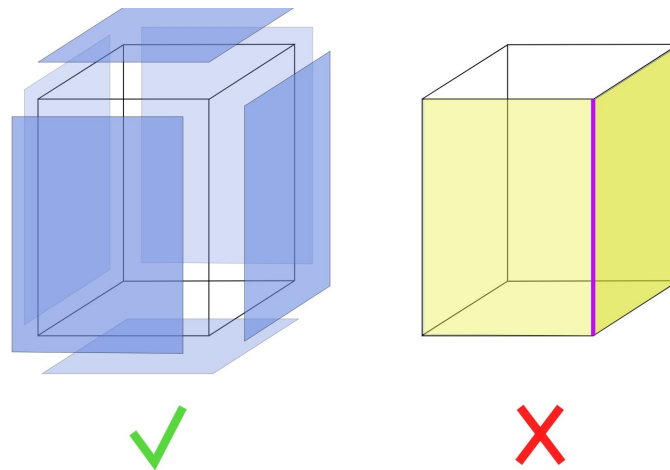


Abbildung 2.4: Beispiel für Nachbarschaftsbeziehungen in CityGML

Während Information über Verbindungen zwischen Elementen, auch zwischen Elementen verschiedener Dimension, für solche Gebiete wie 3D Navigation, Design Optimierung, Energiesimulation hilfreich sein kann.

2.4 Topologie in unterschiedlichen Fachgebieten

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

Wie es so oft in Forschung ist, waren topologische Modelle ziemlich früh zu militärischen Zwecken eingesetzt damit zum Beispiel eine 3D Umgebung für Flugsimulation zu generieren. (Ellul und Haklay 2006) Auch für Medizin kann Topologie Vorteile bringen, wie (Gross 1998) in seiner Arbeit erwähnt hat, für beispielsweise Simulation von chirurgischen Eingriffen und anatomischen Modellen von Menschen.

Das Gebiet, in dem 2D topologische Information, aber auch 3D, immer öfter Anwendung findet, ist Geographic Information System (GIS). Es gibt eine umfangreiche Menge an Arbeiten, die sich auf das Thema beziehen, aber in Rahmen dieser Arbeit wird das Thema nicht konkretisiert. Allerdings um zu veranschaulichen wie weit das Themengebiet ist hier einige Anwendungsbeispiele: Simulation von Verkehr und Notfallsituationen in Stadtgebieten, Modellieren und Analysieren von Gelände, Gewässer, unterirdischen Räumen, etc..

Weiterhin sind topologische Modelle für Building Information Modelling (BIM) wichtig. Sie werden gerade sowohl in Forschung als auch in Praxis anhand von Case-Studies viel untersucht und auch Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in diesem Bereich. Indoor Navigation, 3D Visualisation, Energie- und Beleuchtungssimulation um nur ein paar Punkte zu nennen. Und im nächsten Kapitel wird das Thema näher betrachtet.

Topologische Daten in BIM

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. "Wegen zu viele Details in einem Modell kann Untersuchung zu komplex werden, andererseits wenn ein Modell nicht detailliert genug ist, kann sie ungenaue Ergebnisse liefern, weil die notwendigen Beziehungen fehlen. To analyze space with objects and concomitant phenomena it has to be simplified first. This 'compressed' version is called a model. Too many details in the final model can make investigation too complex - too little can make it inaccurate, because of the lack of necessary relations." (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 die projektspezifisch präzisiert werden kann. Da topologische Modelle aktuell nicht häufig implementiert werden, gibt es für sie keine der Art Klassifizierung. Wobei es auch für semantische Information so ein Hilfsgerüst wie Level of Information (LOI) für Beschreibung von Anforderung existiert.

1. Topologisches Modell fürs Erstellen von geometrischen (wie Gerüst), fürs Prüfen (Kollisionsprüfung), Mengenabfragen (Quantity take-off) und sonstige Fragen, die mit metrischen Eigenschaften eines Modells zu tun haben. In dem Fall darf der Detaillierungsgrad des topologischen Modells nicht niedriger als der definierte Level of Detail = Level of Geometry (LOD) (falls in Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) beschrieben).

Bezeichnung	Planungsphase	Beschreibung
LOD 100	Vorentwurfsplanung	
LOD 200	Entwurfsplanung	
LOD 300	Genehmigungsplanung	
LOD 400	Ausführungsplanung	
LOD 500	Objektdokumentation	

Tabelle 3.1: Level of Details (Geometry)

2. Topologisches Modell für Analyse von Raumstruktur, Simulation von physikalischen Effekten oder Prozessen aus dem späteren Gebäudebetriebs. Für die Anwendungsfälle ist eine passende

Abstraktion von zentraler Bedeutung. Damit ist gemeint, dass in einem Fall könnten zum Beispiel Bauteildicken vernachlässigt werden, und in anderem gar nur die Verbindungen zwischen Räumen modelliert werden. Um Analyse durchzuführen muss Realität zuerst vereinfacht werden, und diese vereinfachte Abbildung wird Modell genannt (Boguslawski 2011).

3.2 Gewährleistung der Korrektheit auf dem Weg von Geometrie zu Topologie

Ghawana and Zlatanova - 2012 - INCREASING SIGNIFICANCE OF 3D

Basir et al. - 2020 - THE INTEGRATION OF BIM AND GIS IN CONSTRUCTION PR

3.3 Datenstrukturen fürs 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 Formate für Datenspeicherung und Datenaustausch entwickelt. In diesem Kapitel werden einige ziemlich bekannte Datenstrukturen betrachtet.

3.3.1 IFC - Industry Foundation Classes

Industry Foundation Classes (IFC) ist ein objektorientiertes Datenmodell, das auch als internationaler Standard gilt. Die Spezifikationen dieser Formate sind für alle zugänglich, da der Hauptzweck bei deren Entwicklung war einen unkomplizierten Datenaustausch in AEC Branche zwischen verschiedenen Softwareprodukten zu ermöglichen. Fraglich ist allerdings ob ein Austausch überhaupt möglich und nötig ist.

3.3.2 BOT - Building Ontology Topology

BOT - Building Ontology Topology, semantic web Format - jedes Objekt hat eine Web-Adresse, Erstellen einer Datei um Modell zu Speichern ist nicht unbedingt erforderlich. OWL liegt diesem Modell zugrunde.

3.3.3 IndoorGML

3.3.4 Weitere Formate

Dual Half-Edge (DHE)

The Simplified Spatial Model (SSM) (Zlatanova, 2004) was the first topological structure that focused on visualization aspects of the queries. It was designed to serve web-oriented applications where spatial queries need to be visualized on the screen as 3D models.

CACC

Topologic

3.4 Werkzeuge fürs Erstellen von topologischen Modellen

3.4.1 Revit + Dynamo

3.4.2 Topologic

Anwendungsfälle

- Prüfen von Geometrien (Clash Detection)
- Geometrie Modellieren
- Indoor Navigation
- Simulationen von zB physikalischen Prozessen

4.1 Topologic

4.2 Vorteile für BIM Nutzer

Fall wenn es schon mit 3D Modellen gearbeitet wird und die als Grundlagen fürs topologische Modell benutzt werden können.

4.3 Einstiegsmöglichkeiten

Zusammenfassung und Ausblick

Literatur

- Boguslawski, Pawel (2011). „MODELLING AND ANALYSING 3D BUILDING INTERIORS WITH THE DUAL HALF-EDGE DATA STRUCTURE“. en. In: S. 141.
- 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 05.05.2021).
- 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.
- Paul, N und A Borrmann (o.D.). „Using Geometrical and Topological Modeling Approaches in Building Information Modeling“. en. In: (), S. 10.
- 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).
- Stachowiak (1973) (1973). *Stachowiak (1973): Allgemeine Modelltheorie*. ger. URL: <http://archive.org/details/Stachowiak1973AllgemeineModelltheorie> (besucht am 01.07.2021).
- Weiler, Kevin James (Aug. 1986). *Topological structures for geometric modeling*.