

Tom Krüger  
Bachelor Informatik

Bachelorarbeit

# **Implementierung und Visualisierung informationeller Ungewissheit in virtuellen Umgebungen**

Tom Krüger

Abgabedatum: 05.11.2021

Text Technology Lab  
Prof. Alexander Mehler

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Begriffsdefinitionen</b>	<b>2</b>
2.1	Informationelle Ungewissheit . . . . .	2
2.2	Building Information Modelling (BIM) . . . . .	2
2.3	Heritage Building Information Modelling (H-BIM) . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Verwandte Arbeiten</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Konzept</b>	<b>9</b>
4.1	Ziele . . . . .	9
4.2	Erstellung der Wertung . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Das Certainty-Tool</b>	<b>15</b>
5.1	Voraussetzungen . . . . .	15
5.1.1	Gebäude Zerlegung . . . . .	15
5.1.2	Beispiel Zerlegung . . . . .	18
5.1.3	Dokumentation im Modellierungsprozess . . . . .	18
5.2	Funktionalität . . . . .	19
5.2.1	Präsentation . . . . .	19
5.2.2	Annotation . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Anwendungsfall: Rothschild-Palais</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Evaluation</b>	<b>30</b>
7.1	Scenario . . . . .	30
7.2	Ergebnisse . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>33</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	33
8.2	Ausblick . . . . .	33
	<b>Literatur</b>	<b>38</b>

## Zusammenfassung

In der Arbeit wird das Certainty-Tool, eine Erweiterung für den Unitybasierten Teil des Stolperwege Projektes, vorgestellt. Dieses verfolgt die Idee des *VAnnotatoR* weiter und erlaubt die Visualisierung von informationeller Ungewissheit der im Stolperwege-Praktikum digital rekonstruierten Gebäude. Dabei inkorporiert das Tool das Konzept hinter BIM (Building Information Modelling), eine neuartige Methode der Planung in der AEC-Branche, welches ein Selbstbewusstsein von Informationen für Teile eines Gebäudes ermöglicht. Dabei werden im Certainty-Tool Stufen der informationellen Ungewissheit entwickelt und diese auf Teile des Gebäudes zugewiesen. Das Tool wird anhand einer digitalen Rekonstruktion des zerstörten Rothschild-Palais vorgestellt. Des Weiteren wurde eine Evaluation basierend auf der *Usability Metric for User Experience* durchgeführt und weiterführende Entwicklungen und Verbesserungen des Tools diskutiert.

# 1 Einleitung

Das Projekt „Stolperwege“ ist ein aufgrund des „Solpersteine“ Kunst- und Historienprojekt entwickelte Applikation. In dem Stolpersteine-Projekt von dem Künstler Gunter Demnig wird an die Verfolgten der nationalsozialistischen Regierung in Deutschland erinnert. Dabei wird für jede Person ein Stein aus Messing in den Boden eingelassen, am letzten Ort wo einer der Verfolgten freiwillig lebte. Im Stein steht der Name der betroffenen Person, sowie ihr Deportations- und Todesdatum (Gunter Demnig 2009).

Das Stolperwege-Projekt ist eine web-basierte Applikation, in der die Biografien von Verfolgten visualisiert wird.

Das Projekt beinhaltet auch ein Unity-Projekt, in dem Nutzer jüdische Wohnorte in virtueller Realität erkunden können. Die Gebäude und Umgebungen dieser Wohnorte werden in einem Praktikum der Goethe-Universität mit dem 3D-Programm „Blender“ nachgebildet. Dabei werden die Gebäude so genau wie möglich aufgrund von überlebenden Quellen modelliert, und anschließend in das Unity-Projekt importiert (Mehler u. a. 2017).

Die Quellen werden in einer Datenbank hinterlegt und können als Objekte in dem Projekt eingesehen werden. Allerdings ist für den Endbenutzer zwar das Endergebnis und teilweise auch die benutzten Quellen einsehbar, doch es ist schwer festzustellen, wie genau die Pläne umgesetzt wurden, ob die Datenlage eine akkurate Modellierung zugelassen hat oder ob Teile des Gebäudes approximiert werden mussten. Kurzgesagt: Es fehlen Methoden, um die Datenlage, die Genauigkeit oder Gewissheit des Gebäudes oder dessen Teilen darzustellen.

Mit diesem Ziel muss erst eine sinnvolle Methode gefunden werden, diese Kriterien zu belegen. Um dies zu erreichen, wird sich Technik bedient, die bei BIM (Building Information Modelling), einer neuartigen Methode der Planung in der AEC-Branche, bei der Dokumentation von Gebäuden zur Verwendung kommen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Tool für das Stolperwege-Unity-Projekt entwickelt. Dieses erlaubt es sogenannte „Ratings“ für Gebäude zu erstellen, indem die Elemente, aus dem das Gebäude besteht, Bewertungen zugewiesen bekommen können. Diese repräsentieren quantifizierbare Attribute wie der Gewissheit des Elements. Es können auch Annotationen angefügt werden und Relationen für Attribute erstellt werden. Anhand dieser Ratings lassen sich anschließend Visualisierungen dieser erstellen.

## 2 Begriffsdefinitionen

### 2.1 Informationelle Ungewissheit

Um die Frage zu klären wie genau die nachgebildeten Gebäude dem Original treu sind und wie sicher die Quellenbasis ist, muss erst untersucht werden, was diese beinhalten.

In der digitalen Rekonstruktion von Objekten stellt die Erfassung von dem Grad der Vollständigkeit eine zentrale Problematik dar. Ein Weg diesen zu bestimmen, ist es alle Informationen und Parameter, anhand derer die Rekonstruktion geschaffen wurde, zu dokumentieren. Das gibt dem Beobachter die Möglichkeit, die Signifikanz der Rekonstruktion für den Kontext zu evaluieren (Stiller und Wintergrün 2016).

In der Tat handelt es sich hierbei um unscharfe Konzepte vergleichbar mit unscharfen Informationen aus der *theory of fuzzy information granulation* (TFIG) (Zadeh 1997).

Bei prozedural geschaffenen Rekonstruktionen ist das kein Problem. Hierbei wird die Rekonstruktion mithilfe der Regeln und Quellenmaterial, die dem prozeduralen Prozess zugrunde liegen, geschaffen.

Das bietet den Vorteil, dass diese klar definiert sein müssen und nicht verloren gehen. Im Gegensatz dazu stehen mit herkömmlichen Mitteln modellierten Rekonstruktionen, wie sie mit der Modellierung mittels Blender im Stolperwege-Praktikum verwendet wird, bei denen diese in der Hand derer liegen, die den Prozess vornehmen, und somit verloren gehen können. Dadurch kann prozedural geschaffene Rekonstruktionen als fähiger angesehen werden, den Prozess, der dieser zugrunde liegt, aufzuzeigen (Saldaña 2015).

In dem Fall von den im Praktikum modellierten Gebäuden müssen also sowohl die gesammelten Quellen, die für die Modellierung benutzt werden, und die Entscheidungen, die bei dem Rekonstruktionsprozess entstanden sind, offengelegt werden.

Für die Darstellung der Ungewissheit in den Rekonstruktionen des Stolperwege Projektes stehen also zwei zentrale Fragen:

1. Auf welchen Quellen basiert das virtuell modellierte Gebäude.
2. Wie wurden diese Quellen im Modellierungsprozess umgesetzt, also welche Entscheidungen sind gefallen.

### 2.2 Building Information Modelling (BIM)

Zur Erhaltung historischer Gebäude werden bereits heutzutage digitale Mittel eingesetzt. Eines dieser Mittel ist das sogenannte Building Information Modeling (BIM). BIM ist ein in der Architektur, Ingenieur- und Bauwesen (AEC-Branche) eingesetztes Verfahren, bei dem ein digitales Model eines Gebäudes konstruiert wird (Azhar 2011). Das unterscheidet sich von typischer 3D CAD dadurch, dass bei CAD verschiedene Veranschaulichungen wie Pläne oder

Sektionen unabhängig voneinander existieren. Wenn eines dieser verändert wird, müssen die anderen entsprechend angepasst werden. Das kann zu einem fehleranfälligen Prozess führen (Azhar u. a. 2008).

BIM unterscheidet sich auch ähnlich von traditioneller Planung in der AEC-Branche, da keine unabhängigen analogen Informationen ausgetauscht werden müssen. Dadurch benötigt es viel Zeit und Ressourcen, um kritische Informationen wie geschätzte Kosten oder Ökonomie für das Projekt zu generieren. Das führt dazu, dass diese zu spät berücksichtigt werden, um umfassendere Änderungen am Projekt durchzuführen. Dies kann wiederum zu Kompromissen vom ursprünglichen Design führen (Eastman u. a. 2011, s.18).

BIM beschreibt hingegen ein vereintes Modell von allen für das Gebäude relevanten Informationen. Dies beinhaltet physische und funktionale Charakteristika und Informationen relevant für dessen gesamten Lebenszyklus. Zum Beispiel kann das Belüftungssystem Informationen über dessen Leistungsvermögen, Hersteller oder Wartung beinhalten (Azhar u. a. 2008).

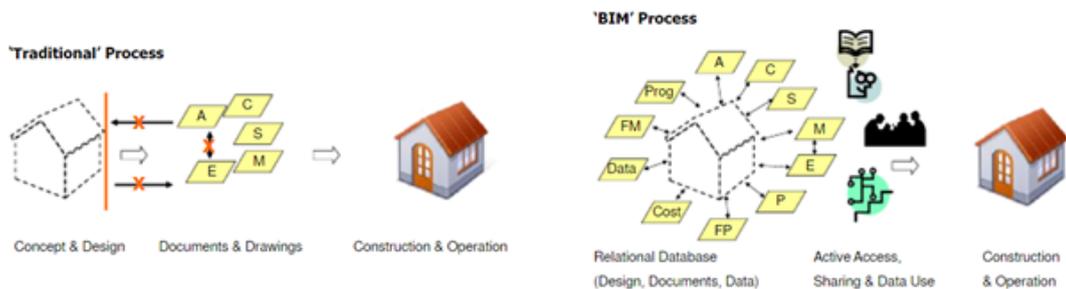


Abbildung 2.1: Unterschied zwischen BIM und traditioneller Methoden (Salman, Khalfan und Maqsood 2012, s. 17)

In BIM sind die einzelnen Teile des Gebäudes „intelligent“ in dem sie die Informationen, welche Elemente sie darstellen, mittragen (Salman, Khalfan und Maqsood 2012). In BIM werden parametrische Objekte benutzt, die sich über die Parameter für verschiedene Elemente anpassen lassen. Diese Parameter sind abhängig vom Typ des Elements (Fai, Filippi und Paliaga 2013).

BIM kann für alle Stadien der Planung, Konstruktion und Instandhaltung eines Gebäudes benutzt werden (Eastman u. a. 2011, s.17).

### 2.3 Heritage Building Information Modelling (H-BIM)

Obwohl BIM für Neubauten geschaffen ist, ist es möglich, es für bereits gebaute Gebäude zu adaptieren. Mithilfe von BIM lässt sich ein digitaler Zwilling des Gebäudes kreieren, der für das Fortbestehen und für die Dokumentation des Gebäudes verwendet werden kann (Khalil, Stravoravdis und Backes 2020). Eine der akkuratesten Methoden für die Dokumentation stellt dabei die Nutzung von Laser Scans, auf der das Modell basieren kann, dar (Fai und Rafeiro 2014).

Dabei stößt man jedoch auf Probleme, die bei Neubauten nicht existieren. So kann es zum Beispiel sein, dass für ein bereits bestehendes Gebäude keine vollständige Dokumentation existiert, oder dass sich Maße durch Deformation über die Jahre geändert haben. Hierzu benötigt BIM Standards spezifisch für ältere Gebäude und Infrastruktur (Graham, Chow und Fai 2018).

Auch können Probleme in der Informationserfassung auftreten. Wird zum Beispiel Laser Scanning verwendet, erhält man eine homogene Punktwolke, die zwar die Form von Gebäuden und seinen Elementen darstellen kann, aber keine Information über die Zugehörigkeit der Punkte zu den Elementen bietet. Das geht gegen das Prinzip von BIM in dem dessen Teile selbst Informationen über sich beinhalten, und kann dazu führen, dass diese per Hand für BIM neu modelliert werden müssen. Das kann auch bei Methoden wie der Photogrammetrie auftreten (Garagnani und Manferdini 2013).

Das ist vergleichbar mit einem unsegmentierten, anhand von Plänen geschaffenen 3D-Modell eines Gebäudes.

Dieser Gedanke wird in späteren Kapiteln weiterverfolgt, um eine Methodik zu entwickeln, die Gebäuden und Elementen im Stolperwege Projekt die Möglichkeit gibt, Informationen über sich selbst zu vermitteln.

### 3 Verwandte Arbeiten

Apollonio, Gaiani und Sun 2013 betrachtet die Repräsentation von Ungewissheit bei digitalen Rekonstruktionen, die nicht mehr existieren oder nur teilweise gebaut und nur unvollständig dokumentiert wurden. Mit diesem Ziel betrachtet die Studie BIM als Hilfsmittel und Grundstein für die semantische Modellierung von Informationen und der Informationsbereicherung von Objekten.

Die Ungewissheit von Teilen der Rekonstruktion wird in 8 Stufen eingeteilt und farblich auf dem Modell des rekonstruierten Gebäudes dargestellt (Abbildung 3.1).

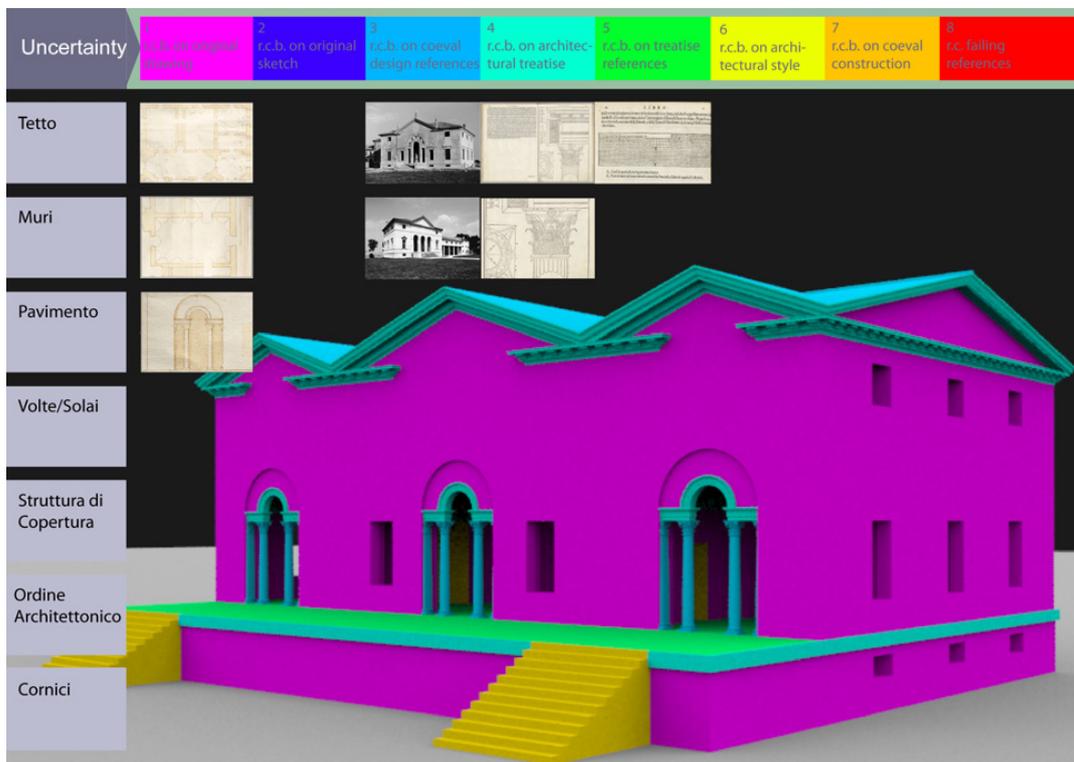


Abbildung 3.1: Ungewissheits Darstellung in Apollonio, Gaiani und Sun 2013, s. 47

Es wird auch eine Implementation der Modellierung der Quellen und Methodik der Rekonstruktion in einem kognitiven Graph präsentiert. In dieser lässt sich das rekonstruierte Modell in Relation zu dessen Quellen und Prozessen der Rekonstruktion darstellen (Apollonio, Gaiani und Sun 2013).

In BIM existieren Benchmarks um die Qualität und Quantität an Informationen über ein Objekt in einem Gebäude darzustellen. Diese Benchmarks und auch BIM Maßstäbe generell sind für die Planung und Konstruktion von neuen Gebäuden geschaffen wurden. Das

erschwert den Gebrauch bei der Sanierung und Erhaltung von bereits gebauten Strukturen. Somit wurden neue Benchmarks für den Gebrauch bei der Konservierung von existierenden Gebäuden entwickelt (Graham, Chow und Fai 2018).

Um dies zu erreichen, wurde in Graham, Chow und Fai 2018 eine Anzahl an existierenden Standards für BIM verglichen und ausgewertet. Insgesamt wurden über 30 betrachtet, allerdings stellten sich 4 als besonders relevant für das Projekt heraus.

Dabei enthalten alle Standards Grade mit Mindestmaßen für die graphische Darstellung und angefügten Informationen von Objekten in BIM, mit Ausnahme von einem. Dieser beschäftigt sich lediglich mit der Deformation von gebauten Konstrukten. Hierbei wird diese auch in Grade vereinfacht.

Ausgehend dieser im Detail betrachteten Protokolle wurden gemeinsame Attribute rausgearbeitet und drei unabhängige Standards geschaffen (LODIA), da in den existierenden Standards Informationen verschiedener Art zusammengefasst wurden. Diese stellen den Detailgrad von der graphischen Repräsentation des Modells (LOD), den Grad an eingebetteten Informationen eines Elements (LOI) und den Grad der Schwankungen in den digitalen Erfassungen des Gebäudes (LOA) dar. Diese werden in 5 Stufen, von 0 bis 4, gemessen.

Diese sind für LOD (Level of Detail):

0. Das Element ist nicht unbedingt modelliert und durch Referenzmaterial wie eine Punkte Wolke oder Bild repräsentiert. Wenn es modelliert ist, besitzt es eine verallgemeinerte Form und keine genauen Abmessungen und dient lediglich als Platzhalter.
1. Das Element ist modelliert und hat eine ungefähr richtige Größe und Form aber besitzt keine zusätzlichen Informationen wie Material oder Details.
2. Das Element ist graphisch repräsentiert und primäre Materialien werden angezeigt. Verbindungen und sekundäre Materialien sind minimal dargestellt.
3. Das Element ist mit den richtigen Abmessungen modelliert. Die Materialien sind vollständig etabliert und Verbindungen sind modelliert. Kleinere Details können noch fehlen.
4. Das Element beinhaltet alle graphischen Informationen.

Für LOI (Level of Information):

0. Keine Informationen notwendig. Wenn bekannt, bezeichnet diese die Klassifikation des Objekts.
1. Wenige nicht-graphische Informationen sind angefügt. Diese können auch nur den Standard für ein Objekt widerspiegeln und sind nicht auf das Projekt angepasst.
2. Es sind mehr nicht-graphische Informationen angefügt und teilweise für das Projekt angepasst. Die Materialität ist benannt aber nicht unbedingt ausgearbeitet.
3. Die Informationen beinhalten spezifische Anforderungen, wie zum Beispiel den Stromverbrauch von Lampen. Alle Materialien sind bekannt und klassifiziert. Der Hersteller muss nicht angegeben werden.

4. Hersteller und genaues Model der Elemente sind angefügt und zusätzliche Dokumentation verlinkt. Alle Spezifikationen sind dokumentiert.

Für LOA (Level of Accuracy):

0. keine Abweichung/Schwankungen sind dargestellt. Mittelwerte werden für Abmessungen benutzt.
1. Abweichung/Schwankungen sind für Ecken und Übergänge modelliert. Abweichung/Schwankungen sind durch die Position und nicht durch Materialdicke dargestellt.
2. Abweichung/Schwankungen auf einem Raster ist zwischen 1000 mm und 3000 mm modelliert. Abweichung/Schwankungen sind durch die Position und nicht durch Materialdicke dargestellt.
3. Zusätzlich sind starke Abweichung/Schwankungen zugefügt. Abweichung/Schwankungen sind durch die Position und durch Materialdicke dargestellt.
4. Modell, dass auf einer Punkte Wolke basiert und alle Abweichung/Schwankungen enthält.

Als Proof-of-Concept wurden die entwickelten Standards für ein BIM-Model, was für die Sanierung des zentralen Blocks des „Parliament Hill“ assistieren sollte, etabliert und verwendet. Dabei wurden aufgrund teils mangelndem oder unterschiedlichem Quellenmaterial verschiedene Stufen des „LODIA“ gewählt. Hierbei kamen unterschiedliche Quellen wie Laser Scans, Photogrammetrie, aber auch alte Baupläne und Fotos je nach Teil des Gebäudes zum Einsatz (Graham, Chow und Fai 2018).

In Saldaña 2015 wurde eine Methode für die prozedurale Generierung von römischer und griechischer Architektur und Städte vorgestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Modellierungsmethoden wird hier eine semantische Beschreibung des Modells programmiert, die dann ein polygonales Modell generiert. Dies erlaubt das Testen von theoretischen Rekonstruktionen von antiker Architektur in einer städtischen Umgebung.

Das prozedurale Verfahren hat den Vorteil, dass damit die genaue Art und Weise, wie die Rekonstruktion zu Stande gekommen ist, in den Regeln mit dem das Modell generiert wurde erhalten wird. Auch die Quellenbasis wird mit jedem Modell der Rekonstruktion konserviert. Das soll es erlauben, dass die Rekonstruktionen als Basis für weitere Forschung benutzt werden kann.

In der Veröffentlichung wird argumentiert, dass prozedurale Modellierung den wissenschaftlichen Wert der resultierenden Rekonstruktion steigert, indem ein Grundgerüst für die Validität der Modelle durch die Konservierung der genauen Methodik geschaffen wird (Saldaña 2015).

El-Hakim u. a. 2006 hebt auch einen wichtigen Aspekt von Digitalen Rekonstruktionen hervor, der häufig nicht genug betrachtet wird: die fehlende Dimension der Zeit. So können Quellen von unterschiedlichen Zeiten verschiedene Stadien der Planung oder Existenz

des Gebäudes widerspiegeln. Diese werden allerdings für eine Rekonstruktion kombiniert oder ignoriert. Hier wird eine interaktive Implementation der Zeitachse für Rekonstruktionen vorgestellt (El-Hakim u. a. 2006).

Auch wenn die Veränderlichkeit von Architektur über die Zeit eine interessante und wichtige Rolle spielt, geht diese über den Umfang dieser Arbeit hinaus und wird in der Diskussion über die Implementation dieses Projekts lediglich tangiert.

## 4 Konzept

### 4.1 Ziele

Um die Probleme der mangelnden Darstellung von informationeller Ungewissheit an modellierten Gebäuden zu lösen, wurde ein Konzept entwickelt, das auf den Informationsbewussten Elementen von BIM aufbaut. Es soll den Teilen der modellierten Gebäude in Unity die Möglichkeit gegeben werden, ihre „Ungewissheit“ selbst zu kennen und zu vermitteln.

Da genau diese Informationen leider selbst schwer quantifizierbar sind, wird sich für dieses Projekt also ähnlich wie in Graham, Chow und Fai 2018 auf Grade, die eine gewisse Schranke an Informationen, Gewissheit oder Genauigkeit repräsentieren, verlassen. Diese Grade haben auch das Ziel die Informationen, auf welchen das digitale Modell basiert und welche Entscheidungen getroffen wurden, zu verdeutlichen.

Damit diese Informationen von den einzelnen Objekten getragen werden können, die sie betreffen, muss das Gesamtobjekt erst in sinnvoll und abgegrenzte Elemente oder Teile unterteilt werden. Der genaue Unterteilungsprozess findet Gebäudespezifisch statt, folgt aber allgemeinen Regeln von funktioneller und struktureller Unterteilung.

Auf dieser Skala bekommen die einzelnen Elemente des Gebäudes also Wertungen, damit sie ihren Grad an Ungewissheit und Genauigkeit repräsentieren können. Der Grad wird hierbei anhand der Informationen aus dem Modellierungsprozess in Unity annotiert. Dies unterscheidet sich jedoch im Ansatz von prozedural erstellten Wertungen dieser Art, da die Informationen, auf denen die hier entwickelten Wertungen basieren, beim Modellieren der Studenten im Praktikum entstehen. Kurzgesagt sind die Informationen Metadaten des Rekonstruktionsprozesses die momentan nur über manuelle Dokumentation zur Verfügung stehen.

Der Vorteil an diesem Ansatz ist das wir für das Tool sowohl konkret bestehende und entwickelte Skalen und dessen Werte an Gebäude anfügen können, es aber auch offen lassen das über den Verlauf des Projektes möglicherweise neue Skalen oder Attribute entwickelt und dokumentiert werden können.

Es lässt auch zu, Informationen von Wertungen beliebig aufzuspalten oder zusammenzufügen, um eine komplexere oder einfachere Ansicht darzustellen. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass dafür neue Wertungen erstellt werden müssen, und sich nicht prozedural generieren lassen.

So können für neue Rekonstruktionen neue oder gebäudespezifische Standards erschaffen werden um Informationen, die außerhalb dieser Arbeit sind, einzubinden und zu visualisieren. Das ist sinnvoll, wenn das Rekonstruieren von Gebäuden unterschiedlichen Objekten betrachtet wird. So kann eine Rekonstruktion einer Statue, Büste oder Ornaments mittels eigener dafür entwickelter Skalen bewertet werden, ohne dass hierfür ein anderes Werkzeug verwendet werden müsste.

Bei der Visualisierung verlässt sich das Tool auf bewährte Methoden wie die farbliche

Darstellung der Elemente in Relation zu ihren Wertungen. Des Weiteren sollte es eine interaktive Möglichkeit geben, nur Objekte anzuzeigen, die eine untere oder obere Schranke von Wertungen erfüllen.

Das Annotieren der Wertungen soll einfach und unkompliziert in VR stattfinden, wo auch andere Methoden der Annotation des *VAnnotatoR* zu Verfügung stehen.

Somit soll auch eine einfache Verständlichkeit für Betrachter hergestellt werden, die keine große Erklärungen benötigt.

Das UI wird auf den schon bestehenden Elementen des Stolperwege Projekts bestehen, mit neuen Elementen, wenn diese nötig sind.

## 4.2 Erstellung der Wertung

Im Folgenden werden drei mögliche Skalen entwickelt, mit dem das entwickelte Tool benutzt werden kann.

Dabei wird auf dem Ansatz von Apollonio, Gaiani und Sun 2013 aufgebaut. Hierbei kann die Qualität der Quelle anhand ihrer Aussagekraft bewertet werden. Das heißt es werden aussagekräftige Quellen besser als weniger aussagekräftige Quellen beurteilt. Um diese zu bestimmen, sollten folgende für die Situation relevanten Attribute berücksichtigt werden:

- Wie glaubwürdig ist die Quelle?
- Wie qualitativ hochwertig ist die Quelle?

In Apollonio, Gaiani und Sun 2013 wird folgende Skala benutzt, um die Ungewissheit von den einzelnen Teilen einer Rekonstruktion einzustufen:

1. Rekonstruktion basierend auf originalem Design oder einer Vermessungszeichnung.
2. Rekonstruktion basierend auf einer Skizze, und somit von geringerer Genauigkeit.
3. Rekonstruktion basierend auf Designreferenzen aus der gleichen Zeit wie das Gebäude mit signifikanten stilistischen Gemeinsamkeiten.
4. Rekonstruktion basierend auf Vereinbarungen, Büchern oder Architektur-Guidelines die von Architekten des betroffenen Gebäudes verfasst wurden.
5. Rekonstruktion basierend auf Vereinbarungen oder Material das als Referenzmaterial für das Gebäude verwendet wurde oder hätte können.
6. Rekonstruktion basierend auf interpretativen Theorien basierend auf dem architektonischen Stil.
7. Rekonstruktion basierend auf interpretativen Theorien die allerdings keine eindeutige Lösung ergeben.
8. Rekonstruktion basierend auf Annahmen ohne Referenzen.

(Apollonio, Gaiani und Sun 2013)

Diese Stufen können als guter Anhaltspunkt für die Gewissheit von Elementen dienen, sind jedoch auf die in dem Projekt benutzten Quellen zugeschnitten und bilden auch nicht ab, inwiefern Elemente umgesetzt wurden.

Dabei sollte auch die Situation betrachtet werden, die für die Quellen der Rekonstruktionen im Stolperwege-Projekt gilt:

- Die Gebäude sind häufig zerstört.
- Pläne sind unvollständig oder ungenau oder nicht erhältlich.
- Es existiert keine Garantie, dass erlangte Pläne das tatsächliche Aussehen des Gebäudes widerspiegeln (Metainformationen fehlen).
- Bilder sind selten und bilden häufig nur Teile vom Gebäude ab.

Für die Glaubwürdigkeit der Quellen können wir schließen, dass Bilder eine hohe Glaubwürdigkeit widerspiegeln, da diese einen real existierenden Zeitpunkt des Gebäudes darstellen. Die höchste Glaubwürdigkeit können wir Messungen von aktuell noch stehenden Gebäuden zuweisen. Pläne hingegen müssen nicht unbedingt das tatsächliche Aussehen des Gebäudes darstellen, da von diesen später in der Entwicklung abgewichen worden sein kann. Das gilt vor allem, wenn Pläne ohne zusätzliche Dokumentation zu ihrem tatsächlichen Nutzen erlangt wurden. Außerdem sind Pläne mit Imperfektionen wie Verzerrungen (wie zum Beispiel bei abfotografierten Plänen) oder Verwitterung weniger aussagekräftig als die ohne, da sie nicht notwendigerweise die korrekten Proportionen ihres Inhalts widerspiegeln.

Beim Stolperwege-Projekt wurden auch bereits Modelle mit denkbaren Elementen modelliert. In einer Kirche werden zum Beispiel Kirchengestühl platziert, die als Platzhalter für die tatsächlichen unbekanntes Gestühle dienen. Auch der Fall, dass es keinen ersichtlichen Grund für das Dasein von Elementen gibt, sollte berücksichtigt werden. Beispielsweise wenn nachträglich bereits modellierte Gebäude bewertet werden. Ebenso ist es sinnvoll, wenn aus diversen Gründen es sinnvoll erscheint, ein fremdes Objekt in das finale Gebäude einzufügen. Daraus resultiert folgende Stufen der Sicherheit der Quellen:

Stufe	Erklärung
0	erfüllt keine anderen Stufen.
1	Mangelhafter Plan. Das kann zum Beispiel ein Foto eines Plan sein, ein schlecht erhaltener Plan oder ähnliches.
2	Geeigneter Plan
3	Foto

Tabelle 4.1: Stufen für die Reliabilität von Quellen

Daraus muss jetzt jedoch noch die Gewissheit für ein Element gefolgert werden. Bei diesen kann es dazu kommen, dass sich Quellen gegenseitig widersprechen oder Quellen diese nur teilweise widerspiegeln, sodass mehrere Quellen von verschiedener Qualität für ein Element benutzt werden müssen. Es kann auch vorkommen, dass es keine vollständige Repräsentation von Elementen in den Quellen gibt und diese interpretiert werden müssen, um ein vollständiges 3D-Objekt modellieren zu können. Diese Fälle werden in Apollonio, Gaiani und Sun 2013 durch die Stufen 3 bis 7 abgebildet. Da den annotierenden Personen jedoch häufig kein Wissen über Architekturstile oder Gebäude aus der gleichen Ära vorliegt, wird für das Stolperwege-Projekt eine simplere Einteilung verfolgt.

Da Interpretation und widersprüchliche Quellen erhöhte Ungewissheit bedeutet, ergibt sich folgende Skala:

Stufe	Erklärung
0	Element basierend auf keinen oder unzureichenden Quellen.
1	Element basierend auf Quellen, die es allerdings nicht vollständig abbilden und somit interpretiert werden mussten.
2	Element basierend auf Quellen, die das Element vollständig abbilden, allerdings Widersprüche oder Ungenauigkeiten beinhalten.
3	Element basierend auf Quellen von hoher Reliabilität (wie Fotos), die das Element vollständig abbilden.

Tabelle 4.2: Stufen für die Reliabilität von Elementen anhand ihrer Quellenbasis

Des Weiteren muss bewertet werden, inwieweit die Quellen umgesetzt wurden. Dabei wird sich an einem Schema bedient ähnlich wie in Graham, Chow und Fai 2018 mit dem der Detailgrad abgebildet wurde.

0. Das Element ist nicht unbedingt modelliert und durch Referenzmaterial, wie eine Punkte Wolke oder Bild, repräsentiert. Wenn es modelliert ist, besitzt es eine verallgemeinerte Form und keine genauen Abmessungen und dient lediglich als Platzhalter.
1. Das Element ist modelliert und hat eine ungefähr richtige Größe und Form, aber besitzt keine zusätzlichen Informationen wie Material oder Details.
2. Das Element ist graphisch repräsentiert und primäre Materialien werden angezeigt. Verbindungen und sekundäre Materialien sind minimal dargestellt.
3. Das Element ist mit den richtigen Abmessungen modelliert. Die Materialien sind vollständig etabliert und Verbindungen sind modelliert. Kleinere Details können noch fehlen.
4. Das Element beinhaltet alle graphischen Informationen.

(Graham, Chow und Fai 2018)

Hier wird in der LOD Skala zwischen grob repräsentierten und akkurat nachgebildeten Elementen unterschieden. Dabei ist von Belang, ob die Dimensionen des Elements korrekt abgebildet sind und wie viel Detail in dem Modell des Elements umgesetzt wurde. Des Weiteren bezieht sich die Skala auch auf eine Repräsentation der Materialien, die wir bei dem Stolperwege Projekt mit Texturen darstellen könnten.

Somit ergeben sich folgende Stufen:

Stufe	Erklärung
0	Grobe, nicht drei-dimensionale Repräsentation wie ein Plan, Label oder Punkt.
1	Grobe Repräsentation in 3D ohne oder mit wenig Details. Maße müssen nicht stimmen.
2	Detailgetreue Repräsentation in 3D. Maße müssen nicht stimmen.
3	Detailgetreue und maßgenaue Repräsentation in 3D.

Tabelle 4.3: Repräsentations-Skala

Hierbei stellen wir maßgenauigkeit auf die letzte Stufe, da angenommen wird, das detaillierte aber ungenaue Modelle von Elementen im Stolperwege Projekt häufiger auftauchen als maßgetreue, aber undetaillierte Elemente. Dies wird aus dem Quellenmaterial geschlussfolgert, welches häufig detaillierte, aber ungenaue, Quellen enthält wie abfotografierte Pläne oder Bilder. Alternativ wäre natürlich auch eine Skala denkbar, in der der Detailgrad der Repräsentation als letzte Stufe verwendet wird:

Stufe	Erklärung
0	Grobe, nicht drei-dimensionale Repräsentation wie ein Plan, Label oder Punkt.
1	Grobe Repräsentation in 3D ohne oder mit wenig Details. Maße müssen nicht stimmen.
2	Maßgenaue aber undetaillierte Repräsentation in 3D.
3	Detailgetreue und maßgenaue Repräsentation in 3D.

Tabelle 4.4: Repräsentations-Skala (Alternative)

Zuletzt ist eine kombinierte Skala auch sinnvoll, die auf Anhieb sowohl die Güte der Quellengrundlage als auch die Genauigkeit und Vollständigkeit der Umsetzung zusammenfasst. Dafür wird die Skala in Tabelle 4.5 vorgeschlagen. Diese orientiert sich an den in Apollonio, Gaiani und Sun 2013 definierten Stufen der Ungewissheit und in den Tabellen 4.2 und 4.3 etablierten Skalen. Die Reihenfolge der Attribute und dessen Eigenschaften ist so gewählt das die Gewissheit und Qualität der Darstellung mit höheren Stufen zunehmen.

Stufe	Erklärung
0	Erfüllt keine Bedingungen der weiteren Stufen
1	Element, dessen Existenz durch Quellen belegt ist, jedoch keine genaue Repräsentation folgern lässt. Das Objekt kann lediglich in repräsentierter oder simplifizierter Form dargestellt werden.
2	Element, das zumindest teilweise von einer Quelle abgebildet ist, allerdings nicht ohne interpretative Hypothesen nachstellbar ist. Das Element sollte 3D repräsentiert sein, kann aber einen geringeren Detailgrad haben.
3	Element, dessen Quellen eine gutes Abbild erzeugen, sodass keine Theorien zur Nachbildung verwendet werden mussten. Das Element sollte 3D repräsentiert sein kann aber einen geringeren Detailgrad haben.
4	Element, dessen Quellen eine gutes Abbild erzeugen und eine detailgetreue Rekonstruktion ermöglichen.
5	Element, dessen Quellen eine gutes Abbild erzeugen und eine detailgetreue und maßgenaue Rekonstruktion ermöglichen.

Tabelle 4.5: Kombinierte Skala

Skalen wie diese dienen dabei als Schranken von der „Gewissheit“ von Elementen der Rekonstruktionen der Gebäude. Diese werden später im Certainty-Tool verwendet um diese Abzubilden.

## 5 Das Certainty-Tool

Für die Bachelor-Arbeit wurde das Certainty-Tool, sowie zugehörige Systeme wie das User Interface entwickelt. Insgesamt erlaubt das entwickelte Tool sowohl das Annotieren von Gebäuden basierend teilweise auf Systemen des *VAnnotatoR* als auch die Darstellung der Annotationen. *VAnnotatoR* bietet bereits die Möglichkeiten der Annotation in VR (Spiekermann, Abrami und Mehler 2018).

Damit dies jedoch möglich ist, muss das Gebäude, was annotiert werden soll, Voraussetzungen erfüllen, die während des Modellierens in Blender von Bedeutung sind.

### 5.1 Voraussetzungen

#### 5.1.1 Gebäude Zerlegung

Das entwickelte Tool hat das Ziel Teile von Objekten, insbesondere Gebäuden und ihrer Umgebung, aber auch für allgemeinere Objekte, bewerten zu können und diese Bewertungen sinnvoll und übersichtlich darzustellen. Dabei wird ein Objekt planmäßig anhand einer im Vorhinein bestimmten Skala bewertet. Dies passiert während der Laufzeit des VR-Projektes in der Virtuellen Umgebung.

Damit das Tool benutzt werden kann, muss ein Objekt so modelliert sein, dass es aus Unterobjekten besteht, die dem ganzen hierarchisch untergeordnet sind. Diese Unterobjekte sind das, was letztendlich mit den Bewertungen versehen wird und sind dann auch, solange sie nicht selbst aus Unterobjekten bestehen, im Tool nicht mehr einzuteilen. Es können jedoch auch im Nachhinein annotative Elemente hinzugefügt werden.

Dabei ist die vorgeschlagene Unterteilung wie folgt:

Ein Gebäude ist möglichst in sinnvolle atomare Elemente einzuteilen, damit diese später als einzelne „GameObjects“ in Unity existieren. So werden Gebäude in Stockwerke eingeteilt. In Stockwerken sollten Wände so unterteilt sein, dass sie einzeln existieren, sofern eine Unterscheidung zwischen ihnen sinnvoll ist. Hierbei sollte man auch neue Elemente benutzen, wenn sich die Quellen oder die Methodik, die für das Modellieren benutzt werden, ändern. Das ermöglicht später eine Unterscheidung zwischen beispielsweise der Gewissheit, die für die nachgebildeten Elemente existiert oder die Genauigkeit, mit der diese modelliert werden konnten. Insbesondere die Wände der Fassade des Gebäudes sind sinnvoll abzugrenzen, da deren Quellen sich häufig von denen für den Innenraum unterscheiden. Das passiert zum Beispiel, wenn die Fassade des Gebäudes sowohl auf Blaupausen als auch von Fotos des Gebäudes basieren, allerdings für die Innenräume keine Fotos existieren oder nicht benutzt werden konnten.

Objekte, die Teil der Wände oder Fassade sind, allerdings klar identifizierbare Elemente darstellen, wie zum Beispiel Türen, Fenster oder Ornamente sollten ebenfalls als eigene Teilobjekte existieren. Mit Dächern sowie deren Elementen ist genauso zu verfahren.

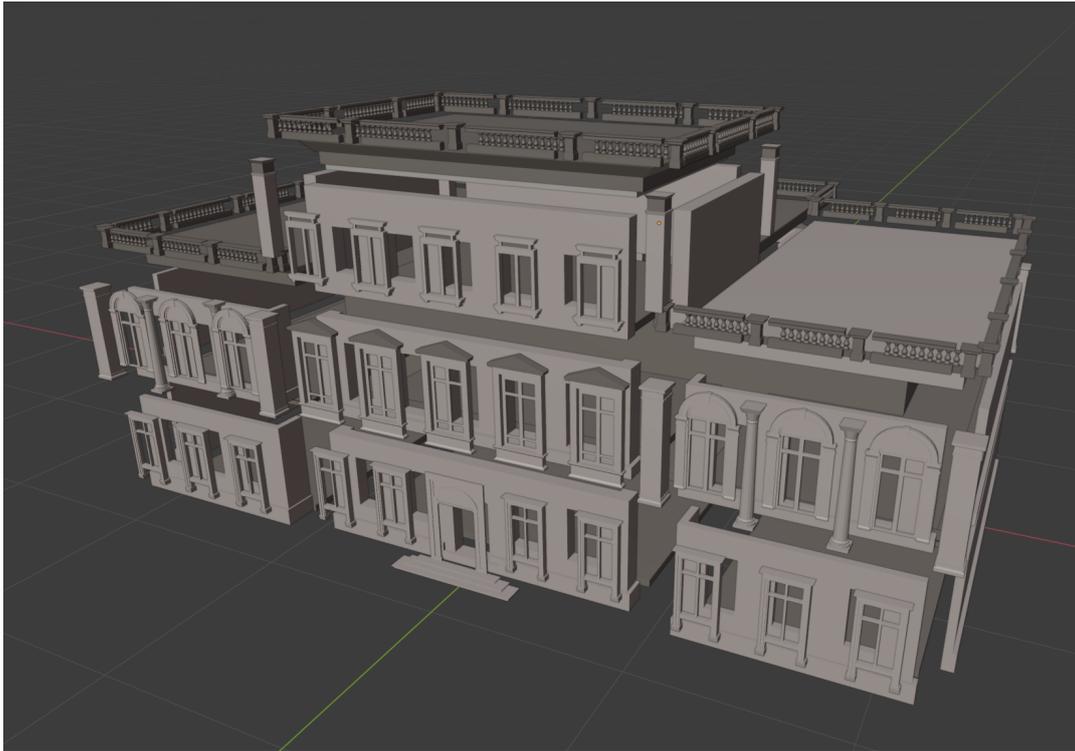


Abbildung 5.1: Rothschild-Palais (Hoffman und Krüger 2019), Einzelteildarstellung

Nicht klar zum Gebäude gehörende Elemente wie Einrichtung sollte auch aus Effizienzgründen während der Modellierung als einzelne Objekte existieren und sogar eventuell erst im Unity-Projekt der Gebäudehierarchie untergeordnet werden.

Über den genauen Unterteilungsprozess lässt sich natürlich diskutieren und nicht für jedes Projekt oder Gebäude wird der oben beschriebene Prozess eine ideale Unterteilung darstellen. Deswegen ist die Diskretion der Modellierenden extrem wichtig. Auch bei anderen Verwendungszwecken des Modells muss sich der Unterteilungsprozess anpassen, um dessen Bedingungen zu erfüllen.

Abbildung 5.1 zeigt eine mögliche Unterteilung der Rekonstruktion des Rothschild-Palais in der explodierten Ansicht.

Je nachdem welche Bewertung später angefügt werden soll, kann es sinnvoll sein, Objekte weiter zu unterteilen. Damit bei großen Projekten (zum Beispiel einem Gebäude) das Annotieren effizient aber flexibel bleibt, sollte die Hierarchie entweder beim Modellieren oder in Unity sinnvoll gewählt werden. Das Tool ermöglicht es, alle in der Hierarchie tiefer gelegenen Objekte auf einmal zu bewerten. Es können somit effektiv Gruppen von Objekten, die beim Modellierungsprozess getrennt wurden, immer noch als eine Einheit behandelt werden.

Es ist sinnvoll vor allem für physisch zusammenhängende Objekte (beispielsweise alle Elemente eines zusammenhängenden Gebäudeelementes) oder auch funktional oder logisch zusammenhängenden Elementen wie Kolonnaden aus Säulen oder die Pflanzen eines Blumenbeets unter einem Elternobjekt zusammenzuordnen. Damit lassen sich später, wenn zum Beispiel nur die gleichen Quellen für alle Objekte in so einer Kolonnade benutzt wurden, die-

se alle zusammen bewerten. Dies erleichtert den Bewertungsprozess, da nicht alle einzeln mit dem gleichen Rating-Wert belegt werden müssen.

Diese hierarchische Struktur ist später auch integral für die Funktionalität des Tools. Alle Teile des Gebäudes und dessen Umgebung müssen Kinder des Elternobjektes sein, damit es als ein Gebäude behandelt werden kann. Das ist wichtig, da die Ratings für ein Gebäude diesem zugewiesen sind.

Die Hierarchie beginnt planweise mit einem leeren Objekt, also eines das selbst nur als hierarchischer Ordnungspunkt gilt. Unter diesem sind anschließend die Teile des Grundstücks, sofern es sich um ein Gebäude mit Umgebung handelt, unterzuordnen. Dabei sind logisch zusammenhängende Elemente zu kategorisieren. Das heißt, dass diese bei einem Grundstück mit einem Haus, einem Garten und einer Straße als Kategorien für dessen Elemente verwendet werden. Anschließend folgen filigranere Unterteilungen dieser. Diese können bei dem Gebäude zum Beispiel die Form dessen Segmente annehmen, also die Flügel des Gebäudes oder ein Anbau. Diese Segmente können wir nun wieder weiter unterteilen in Stockwerke. Den Stockwerken wird anschließend alle tatsächlichen modellierten Objekte zugewiesen.

Letztendlich reflektiert die Hierarchie also einen Graphen, bei dem die Knoten die Unterteilung und die Blätter die modellierten Objekte darstellen.

Das Tool lässt sich immer noch anwenden, auch wenn modellierte Objekte selbst noch hierarchisch tiefer gelegene und modellierte Objekte zugewiesen bekommen. Dies sollte allerdings vermieden werden, da dies zu Komplikationen im Workflow beim Bewerten des Objektes führen kann.

Als Konsequenz sollten also bei einem sinnvoll hierarchisch strukturierten Objekt keine Schwierigkeiten aufgrund zu häufiger Unterteilung auftreten.

Letzten Endes müssen sich die Personen, die den Modellierungsprozess ausüben, darüber bewusst sein, dass die Objekthierarchie in Unity darüber entscheidet, welche Objekte einzeln bewertbar sind und welche nicht. Dabei ist jedes Objekt in der Hierarchie bewertbar. Objekte die aus mehreren Elementen bestehen, allerdings nur als ein einzelnes *GameObject* in Unity existieren, sind nur zusammen bewertbar. Das gilt auch wenn sie Ziel oder Ursprung von Relationen sein sollen. Hierbei ist jedes einzelne *GameObject* ansteuerbar.

Dies ist entscheidend, wenn das Tool für andere Objekte als Gebäude benutzt wird. Dabei sollte erst eine sinnvolle Methodik zum Zerlegen von Objekten in ihre Elemente ausgearbeitet werden, bevor der Modellierungsprozess beginnt. Der anschließende Annotationsprozess der Ratings in VR verändert sich dabei nicht grundlegend.

### 5.1.2 Beispiel Zerlegung

- Gebäudesegmente
  - Gebäudesegmente
    - \* Boden
    - \* Tragende Elemente (Säulen, Arkaden, Brückenbögen)
    - \* Geländer, Zäune, Mauern
    - \* Möbel
    - \* Balkone
      - Geländer, Zäune, Mauern
      - ...
    - \* ...
- - Gartensegmente
  - Areale
    - \* Logisch/Funktional zusammenhängende Elemente
    - \* Hecken
    - \* Zäune
    - \* Bäume
    - \* Beleuchtung
    - \* ...
- ...

Hierbei stellen die Punkte mit Unterpunkten Kategorien dar und die ohne Unterpunkte repräsentieren die einzelnen Objekte. Dies stellt keine vollständige Liste dar, sondern gilt lediglich als Orientierung für die Segmentierung und hierarchische Struktur in der Modellierungsphase.

### 5.1.3 Dokumentation im Modellierungsprozess

Damit die Bewertung in Unity erfolgen kann, sollte schon während des Modellierungsprozesses die für die Annotation relevanten Daten protokolliert werden. So ist zum Beispiel für ein Rating, dass die Güte der Quellenlage der nachgebildeten Elemente bewerten soll, essenziell, welche Quellen für die Elemente benutzt wurden. Ein Rating, was die Unsicherheit im Erstellungsprozesses der Nachbildung darstellen soll, benötigt ebenfalls solche Metainformationen.

Ein weiterer Fall in dem solche Daten relevant sind, ist bei der Bewertung von metrischen Abweichungen der Quellenlage.

Im Modellierungsprozess kann es auch zu Entscheidungen kommen, Elemente zu substituieren. Das kann zum Beispiel der Fall sein, wenn kleiner Elemente wie Möbel aus anderen Projekten genommen werden und als Ersatz für tatsächlich präsente Objekte dienen. Um spätere Bewertungen zu erleichtern, indem man zum Beispiel für substituierte Elemente eigene Stufen in Bewertungen schafft oder diese bewusst von den Bewertungen ausschließt, sollten solche Schritte auch klar für das Annotieren hinterlegt werden. Damit ist es später auch möglich, die Ursprünge dieser Elemente klar zu kennzeichnen und falsche oder unklare Wertungen zu vermeiden.

Für bereits bestehende Modelle ist entweder eine Approximation dieser Daten möglich oder es werden alternative Skalen für Ratings erstellt oder herangezogen die diese nicht benötigen. Auch hier kann es sinnvoll sein, aufgrund der im Modellierungsprozess benutzten Methoden, entweder die Segmentierung des Gebäudes oder die Bewertungs-Skala zu modifizieren.

## 5.2 Funktionalität

### 5.2.1 Präsentation

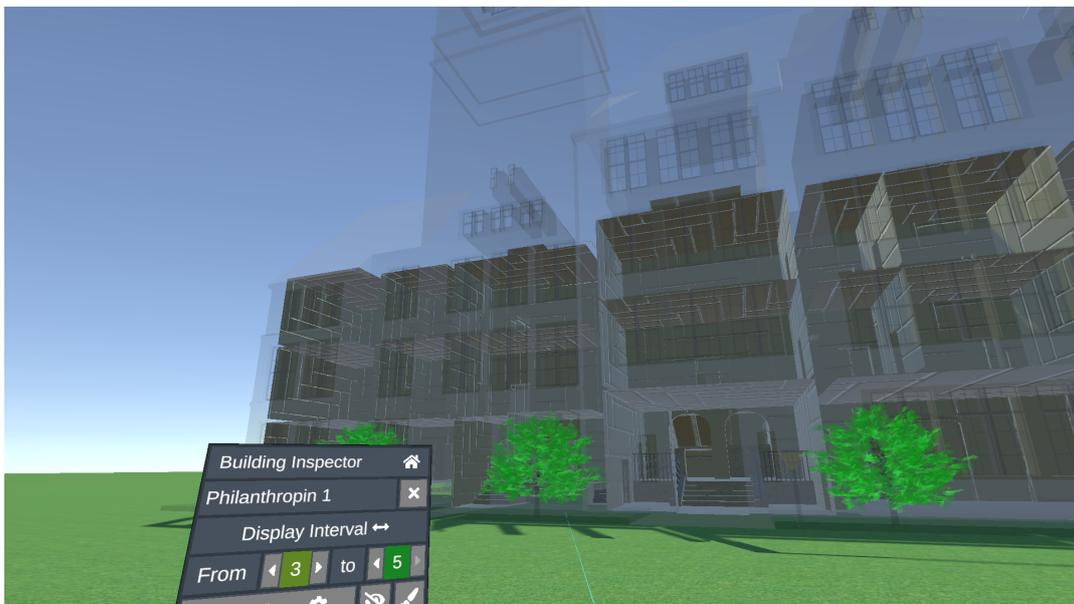


Abbildung 5.2: Transparente Darstellung der Elemente des Philanthropins (Schwarz 2019) außerhalb des Anzeige Intervalls

Den Endnutzer\*innen wird ein bereits bewertetes Gebäude oder anderes Objekt präsentiert. Das heißt den Teilen des Gebäudes ist ihre Gewissheit sozusagen bekannt. Die Elemente eines Gebäudes lassen sich durch Anklicken inspizieren. Dabei wird das Rating für das gewählte Objekt angezeigt. Um die Wertungen des gesamten Gebäudes in Relation zu sehen, kann es mittels des Menüs eingefärbt werden (Abbildung 5.3). Hierbei wird jedes Objekt auf

einer Farbskala, die von Grün zu Gelb und schließlich Rot übergeht, dargestellt. Die Farben werden automatisch für die Anzahl an Stufen prozedural generiert. Niedrig bewertete Objekte werden rot und hoch bewertete Objekte grün dargestellt.

Des Weiteren lässt sich ein Intervall der Wertungen festlegen. Alle Objekte dessen Wertung außerhalb des Intervalls liegen, werden entweder transparent dargestellt oder ausgeblendet (Abbildung 5.2). Dabei ist es weiterhin möglich, die farbliche Darstellung der Elemente zu behalten. Dies passiert in Echtzeit und lässt sich während der Laufzeit interaktiv anpassen.

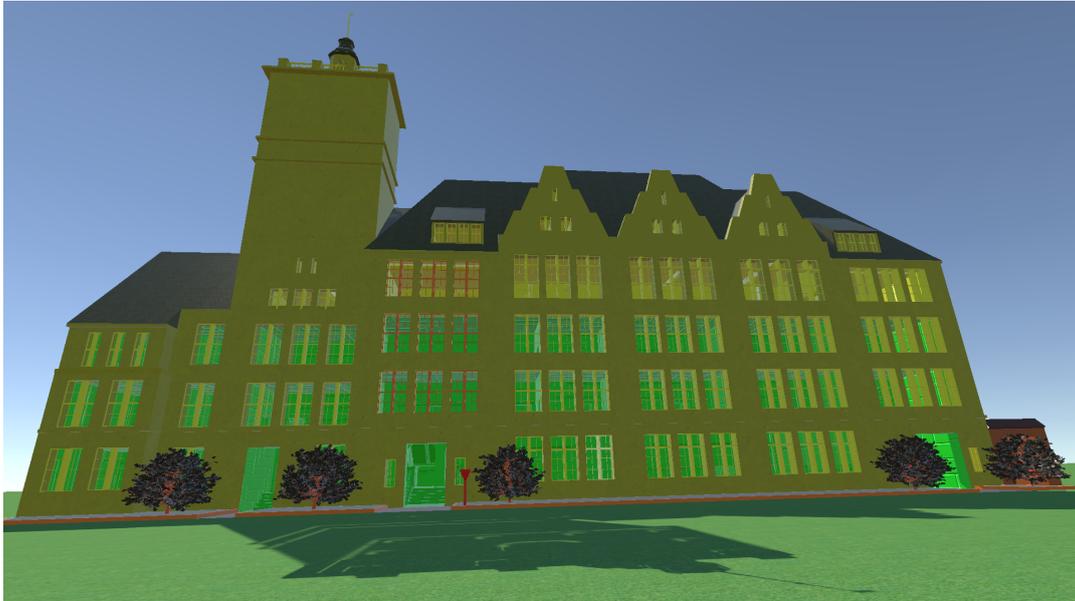


Abbildung 5.3: Farbliche Darstellung des demonstrativ bewerteten Philanthropin (Schwarz 2019)

Referenzen, die mithilfe des Certainty-Tools erstellt wurden, lassen sich auch in einem dafür spezialisierten Modus einblenden. In diesem steht die farbliche Darstellung des Gebäudes jedoch nicht mehr zu Verfügung. Allerdings findet der Farb-Modus auch hier Verwendung, da die Relationen genauso wie die Elemente des Gebäude eine Bewertung bekommen können und diese ebenso farblich darstellen.

Die Funktionen stehen auch für sonstige Objekte wie Annotationen zur Verfügung, solange diese als solche definiert wurden.

Alle Präsentationsfunktionen stehen über das Hauptmenü zur Verfügung und benötigen kein Wissen über die restlichen (Annotations-) Funktionen. Dies erlaubt eine schnelle und interaktive Präsentation der Wertungen. Eine Limitation dabei ist, dass sich nicht mehrere Wertungen simultan anzeigen lassen. Diese müssen einzeln geladen und präsentiert werden. Jedoch ist es möglich, zusammenfassende Wertungen zu erstellen, die eine kombinierte Wertung darstellen.

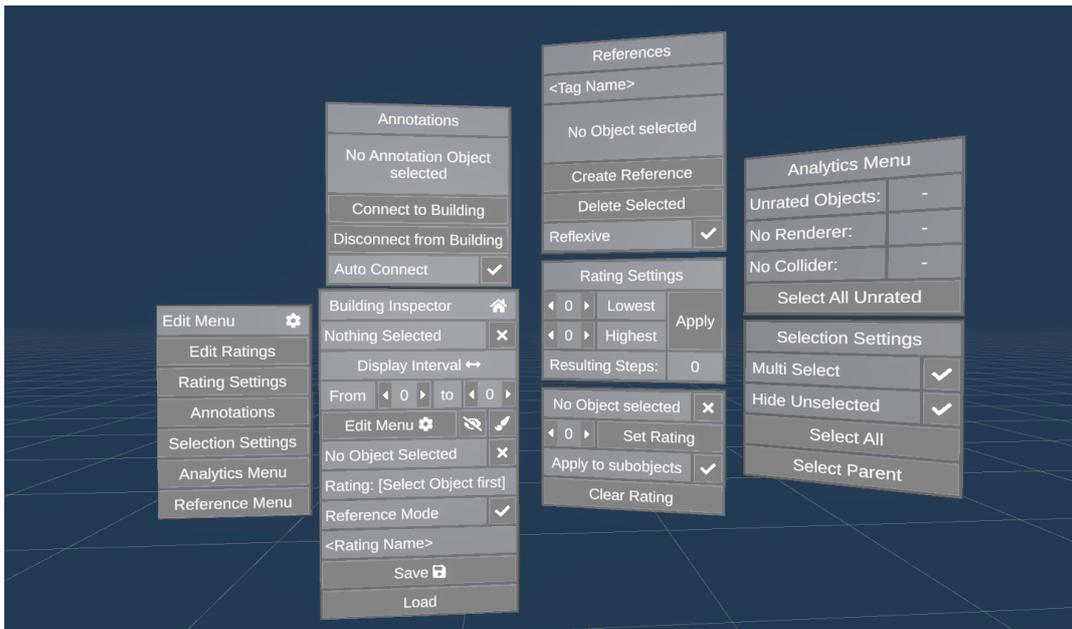


Abbildung 5.4: Menü des Certainty-Tools, voll ausgeklappt

### 5.2.2 Annotation

Damit das Gebäude oder Objekt mit dem Tool vorgestellt werden kann, muss dafür vorher dessen Bewertung und Annotation erfolgt sein. Dies geschieht von annotierenden Personen. Damit ein Gebäude bewertet werden kann, muss zuerst das „BuildingController“ Skript an das hierarchisch oberste Objekt angefügt werden.

Da die Funktionalität des Tools auf der vorangehenden Segmentierung und hierarchischen Ordnung beruht, sollte diese wie in Kapitel Zerlegung 5.1 geschehen sein. Des Weiteren benötigen die annotierenden Personen die gesamte Dokumentation der zu bewertenden Attribute. Diese ergibt aus dem Modellierungsprozess.

Das Bewerten und Annotieren beginnt während der Laufzeit im VAnnotatoR, indem ein neues Rating im Tool erstellt wird. Dies ist möglich, indem das Intervall für eine Wertungsskala festgelegt wird.

Daraufhin stehen alle Funktionen, die zur Präsentation der Wertungen genutzt werden können, während des Bewertungsprozesses zur Verfügung. Dies erleichtert den Prozess und erlaubt den Annotierenden sowie den Endnutzer\*innen, die Wertungen auf die gleiche Art und Weise zu betrachten. Bei jeder Bewertung eines Objektes wird diese aktualisiert, um den derzeitigen Bewertungsstand des Gebäudes widerzuspiegeln.

Einzelne ausgewählte Objekte können entweder einzeln oder als Gruppe bewertet werden. Hierbei werden ausgewählte Objekte visuell hervorgehoben. Dabei erlaubt das Tool entweder mehrere Objekte auszuwählen und zu bewerten, oder die Hierarchie kann hierfür ausgenutzt werden. Dabei kann von einem Objekt auch dessen hierarchisch höhergelegenes Eltern-Objekt ausgewählt werden. Insbesondere bei diesen, aber auch bei allen anderen Objekten können nun auch alle dessen Kind-Objekte gleichzeitig mit derselben Wertung be-



Abbildung 5.5: Bewerten des Philanthropin (Schwarz 2019)

wertet werden. Dies erlaubt, bei sinnvoll strukturierten Gebäuden, eine effiziente Methode der Bewertung, da somit ganze Abschnitte auf einen Schlag bewertet werden können. Da es schwer sein kann, genau zu wissen, welche Objekte wie hierarchisch sortiert sind, können alle nicht ausgewählten Objekte transparent verborgen werden. Dies erlaubt eine einfache visuelle Identifizierung der hierarchischen Struktur. Ebenfalls wird es bei einer Mehrfachauswahl von Objekten erleichtert, zu sehen, ob alle gewollten Objekte ausgewählt wurden oder fälschlicherweise andere Objekte markiert wurden. Diese Funktion unterstützt auch weiterhin das Verstecken beziehungsweise Hervorheben des zu zeigenden Intervalls aus den Präsentationsfunktionen und diese können im Tandem benutzt werden.

Es steht auch eine Anbindung an das Surface-Tool zu Verfügung. Dabei können mit dem Surface-Tool erstellte Flächen oder Objekte an das Gebäude angebunden werden. Nachdem dies passiert ist, lassen sich die angebundenen Objekte genauso wie die anderen Objekte des Gebäudes bewerten. Das steht unter dem Fenster „Annotation“ zur Verfügung. Angebundene Objekte werden beim Speichern der Bewertung in Textform konvertiert und gespeichert, damit diese beim Laden von Bewertungen nicht verloren gehen.

Über das Reference-Menu können gerichtete oder ungerichtete Kanten erzeugt werden. Dies dient der Visualisierung von Relationen und relationalen Eigenschaften des Gebäudes.

Bei einer Multi-Auswahl von Objekten wird dabei eine Anzahl von Kanten gleichzeitig erstellt, die von den ausgewählten Objekten zu dem Ziel-Objekt gerichtet sind, sofern der gerichtete Modus aktiviert ist. Das Zielobjekt ist immer das als letzte ausgewählte Objekt. Angefügte Objekte des Surface-Tools können auch Ursprung oder Ziel von gerichteten Kanten sein. Momentan ist es jedoch nicht möglich, Relationen zwischen verschiedenen Gebäuden zu erstellen.

Die Relationen lassen sich in einem dafür dedizierten Modus anzeigen, ansonsten sind

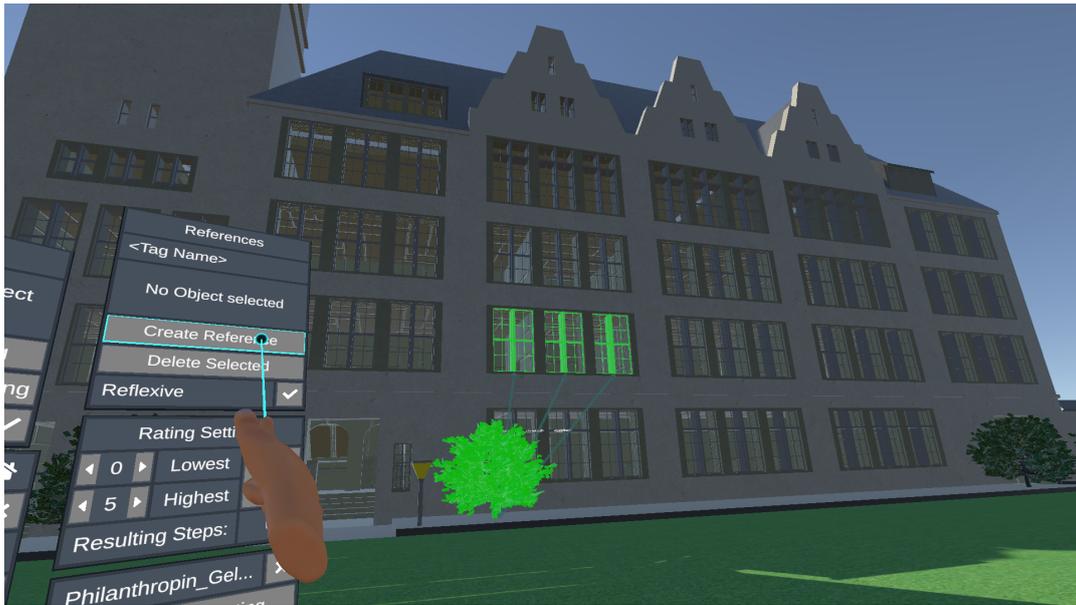


Abbildung 5.6: Erstellung von Referenzen am Beispiel vom Philanthropin (Schwarz 2019)

sie nicht sichtbar. Allerdings wird, sobald eine Kante erstellt wird, auch automatisch der Relations-Modus aktiviert, um die Bedienbarkeit zu erleichtern.

Auch hier stehen für die Relationen wieder die Bewertungs- und Anzeigefunktionen zur Verfügung. Dabei werden aber im Relationsmodus für das Intervall der Wertungen keine Objekte mehr ausgeblendet, die keine Kanten sind. Ebenfalls werden Kanten nur noch im Farbmodus eingefärbt dargestellt.

Schlussendlich stehen auch Quality-of-Life (QoL) Features für Annotierende zu Verfügung. Es lassen sich die Anzahl der Objekte, die noch nicht bewertet sind, anzeigen, sowie die Anzahl der Objekte, die selbst kein Render-Component besitzen und somit auch nie angezeigt werden können.

Dies macht die Bewertung bei großen Gebäuden übersichtlicher machen.

## 6 Anwendungsfall: Rothschild-Palais

Das Tool wurde für das Rothschild Palais demonstrativ angewendet.

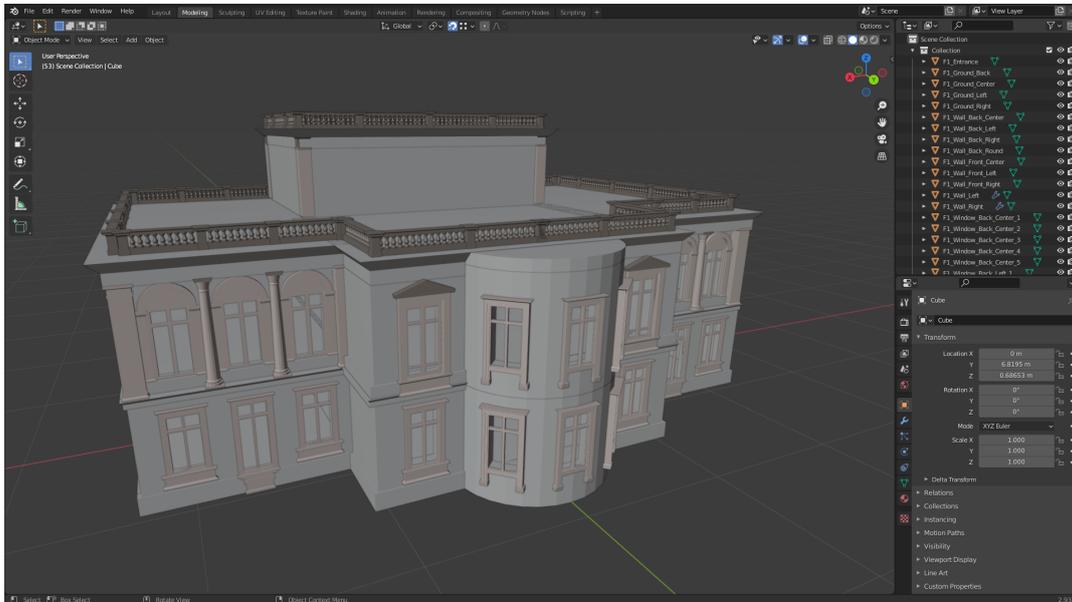


Abbildung 6.1: Das unterteilte Rothschild-Palais (Hoffman und Krüger 2019) (Südseite) in Blender

Als Vorlage wurde die im Praktikum bereits modellierte Rekonstruktion (Hoffman und Krüger 2019) genommen. Diese ist allerdings nicht wie in Kapitel 5.1 in einzelne Teilobjekte zerlegt. Dies musste manuell nachgeholt werden. Dafür wurde der Hauptbestandteil des Gebäudes in Blender anhand des existierenden Modells nachmodelliert.

Zur Bewertung des Gebäudes wurde die Skala aus Tabelle 4.5 auf Seite 14 verwendet.

Das Gebäude wurde damals hauptsächlich anhand von Quellen, die die Vorderseite des Gebäudes darstellen, nachgebildet. Es gab nur wenige Quellen für die anderen Seiten des Gebäudes. Die Quellen konnten auch nicht in der Originalform oder als Scans erworben werden, weswegen viele von ihnen optisch leicht verzerrte Fotos von Plänen sind. Deswegen wurde das Gebäude zwar so genau wie möglich, aber nicht maßgenau repliziert. Das Gebäude musste durch mehrere Quellen, die erst zusammen ein zufriedenstellendes Gesamtbild liefern, nachgebildet werden. Da es jedoch viele Quellen gab, die entweder dieselben Elemente dargestellt haben oder die nicht zuweisbare Elemente abbildeten, war die Anzahl der verwendeten Quellen relativ gering.

Das liefert ein gutes Beispiel für die Gewissheit der Nachbildung: Die Elemente der Südseite haben eine relativ hohe Gewissheit, da diese von mehreren Quellen abgebildet werden



Abbildung 6.2: Vergleich von Stadtbild (S. 2014) und Rekonstruktion (Hoffman und Krüger 2019) Vorderseite (Südseite)

und sich gut nachbilden ließen. Bei dem Modellieren wurden manche Objekte auf der Südseite jedoch vereinfacht dargestellt, da sie komplexe Strukturen wie zum Beispiel Verzierungen in den Fenstern und Säulen enthielten. Dagegen ist für die Nordseite des Westflügels keine Quelle vorhanden, die diese gut abbildet. Hierbei wurde die vermeintliche Symmetrie des Gebäudes benutzt, um die Rekonstruktion fertigzustellen, denn für die Nordseite des Ostflügels gibt es eine Quelle, die diese gut abbildet (Abbildung 6.4).

Auf der Nordseite des Gebäudes wurden den Wänden, rechteckigen Säulen, Dachgeländer, sowie den Fenstern des Erdgeschosses die höchste Wertung, die für dieses Gebäude verwendet wurde, gegeben. In diesem Fall war dies eine 4, welche eine detailgetreu und quellenbasierte drei-dimensionale Nachbildung darstellt. Eine 5 konnte aufgrund der fehlenden Maßgenauigkeit allerdings nicht vergeben werden. Elemente, deren Repräsentation einen niedrigeren Detailgrad hatten, wurden mit einer 3 bewertet. Das waren zum Beispiel beide Fenstertypen im 1. Stock und die runden Säulen, sowie die Tür des Erdgeschosses, die mit nicht repräsentierten Verzierungen ausgestattet waren, wie in Abbildung 6.3 gut zu sehen ist.

Die meisten Elemente der Nordseite des Ostflügels erfüllen die Bedingungen der Stufe 1 nicht, da es keine Quellen gibt, die diese abbilden. Dementsprechend wurden diese mit 0 bewertet. Die Ausnahme bilden hierbei die Wände, die zumindest teilweise auf einem Grundriss zu sehen sind.

Auf der Nordseite (Abbildung 6.1) des Gebäudes findet sich eine runde Ausbuchtung. Diese wird allerdings nur auf Plänen abgebildet, die die Grundrisse des Gebäudes zeigen (Abbildung 6.6). Eine Ansicht von der Seite ist nicht vorhanden. Aufgrund der Grundrisse ist allerdings bekannt, dass sich in der Ausbuchtung im ersten Stockwerk mindestens drei Fenster befunden haben. Das Aussehen der Fenster ist nicht bekannt. Dies ist ein ideales Beispiel für ein Element, dessen Existenz definitiv bekannt ist, allerdings keine anderen Informationen vorliegen. In der Rekonstruktion wurden Fenster des ersten Stockwerks als Ersatz verwendet. Im Erdgeschoss des Gebäudes ist diese Ausbuchtung auch vorhanden, jedoch ist die Anzahl oder Position der Fenster nicht bekannt. Aus dem Rest des Gebäudes lässt sich jedoch die Vermutung schließen, dass sich an den gleichen Positionen im Erdgeschoss ebenfalls drei Fenster befunden haben.



Abbildung 6.3: Vergleich von Zeichnung der Fenster (Mehs 1942) und Säulen der Vorderseite und Wireframe der Rekonstruktion (Südseite) (Hoffman und Krüger 2019)

Deswegen wurden die Elemente der Ausbuchtung mit der Wertung 1 versehen, mit Ausnahme der Fenster des Erdgeschosses, die mit einer 0 bewertet wurden.

Des Weiteren wurden diverse Elemente wie die Dachdekoration nicht detailgetreu dargestellt. Dies lag an teilweise sehr detaillierten Elementen wie Verzierungen in der Dachdekoration.

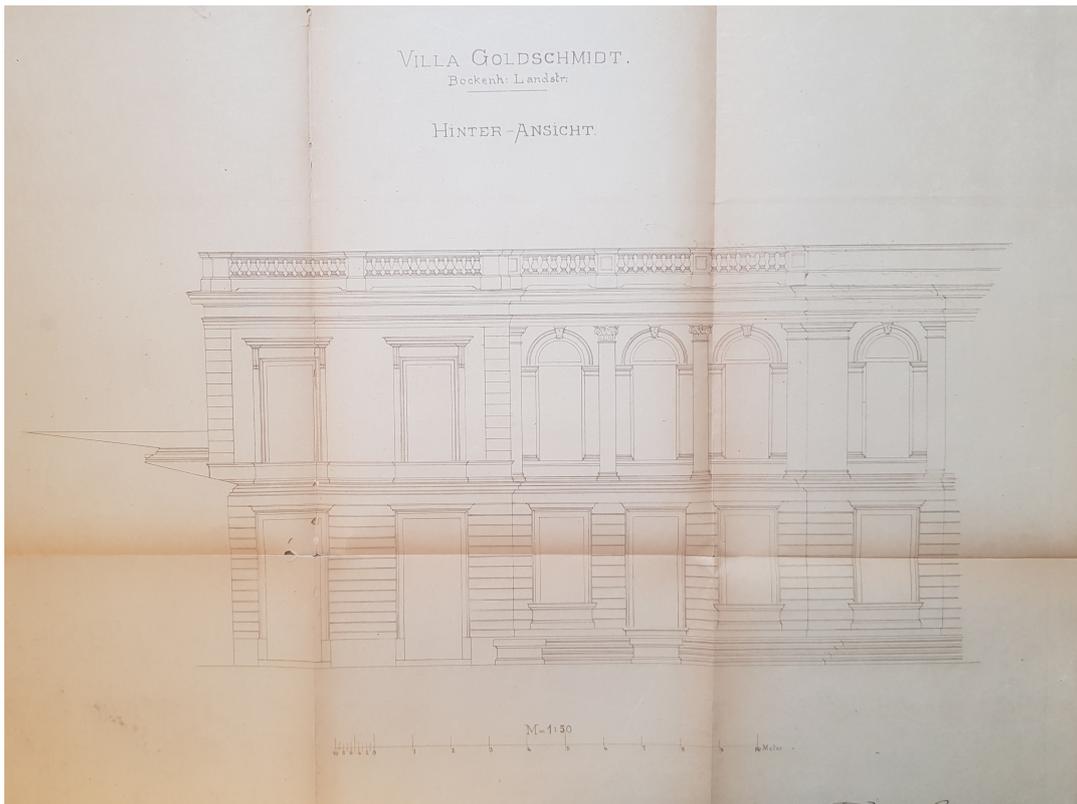


Abbildung 6.4: Plan der Nordseite des Rothschild-Palais (Mehs 1942)

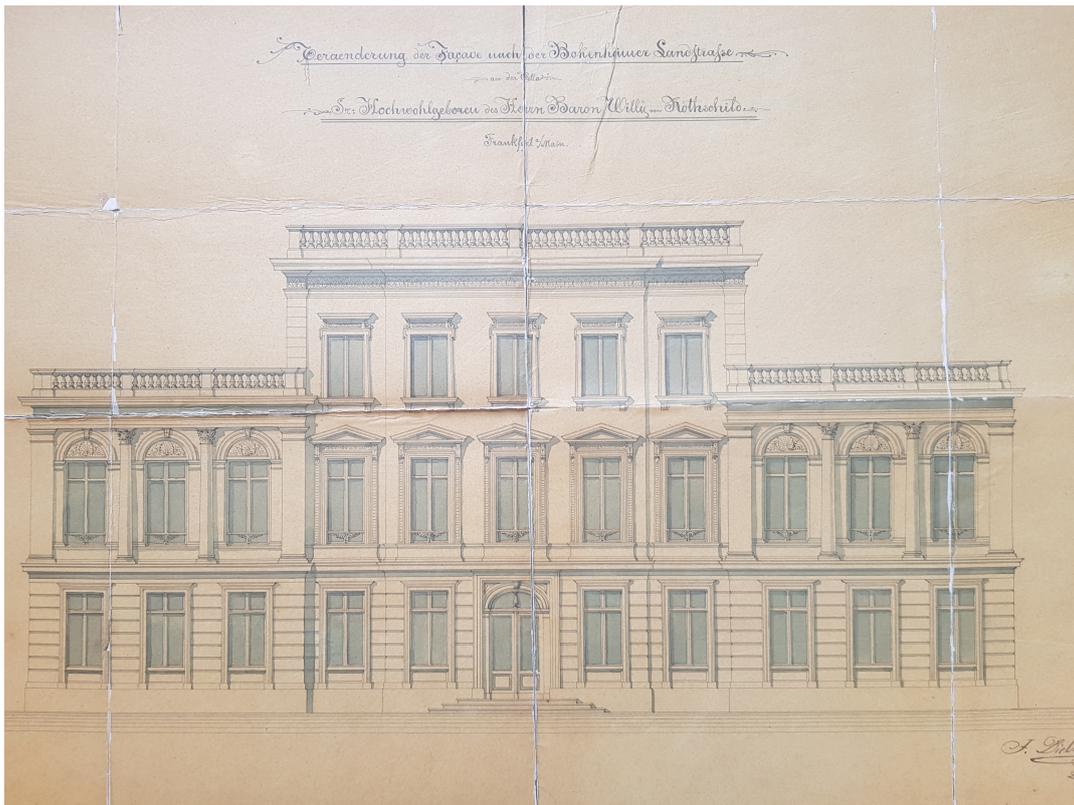


Abbildung 6.5: Plan der Südseite des Rothschild-Palais (Mehs 1942)

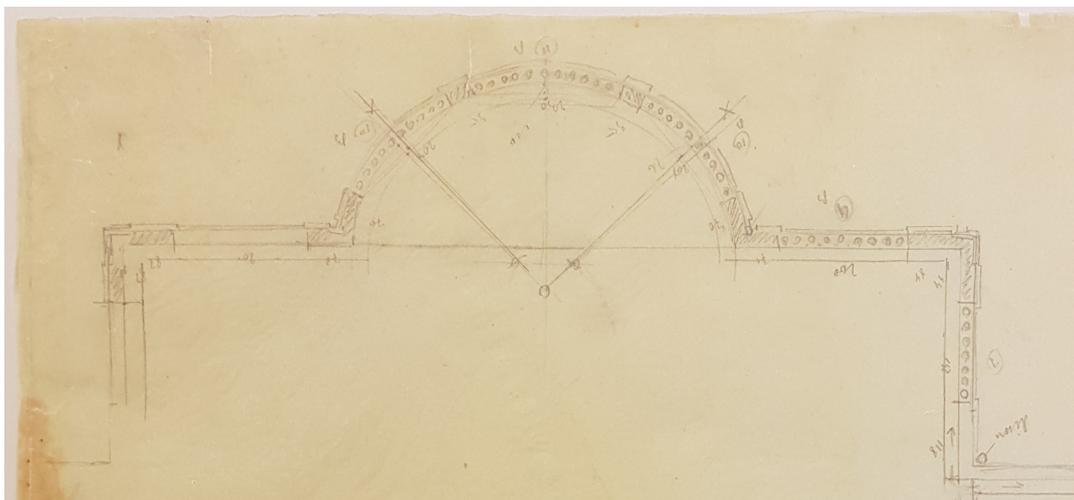


Abbildung 6.6: Grundriss der Nordseite (Mehs 1942)

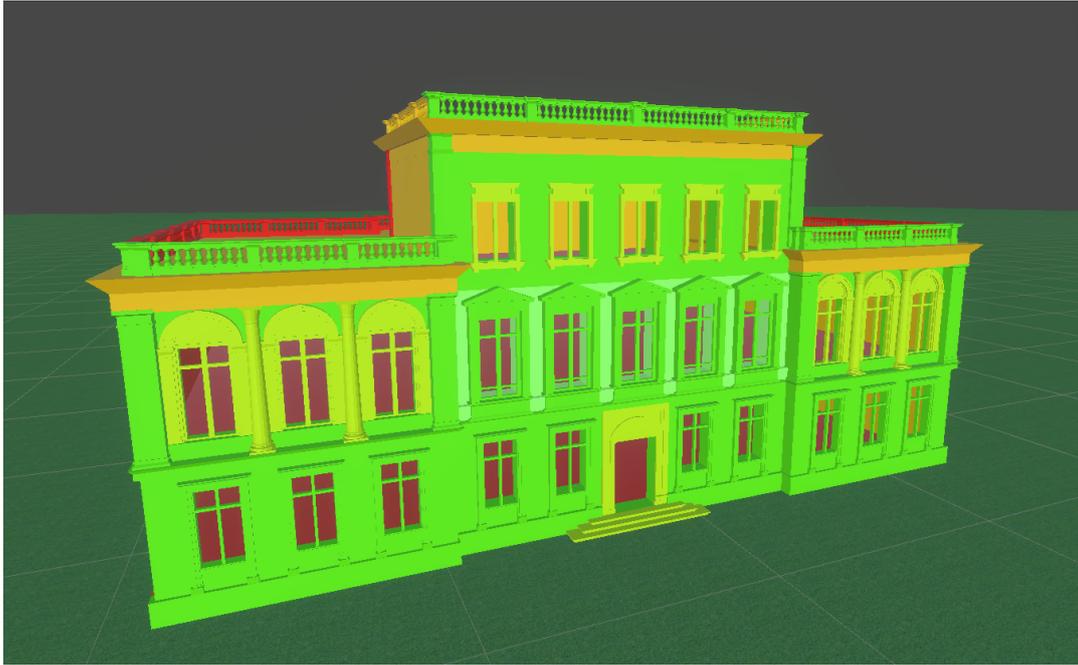


Abbildung 6.7: Rothschild Palais (Hoffman und Krüger 2019) mit Farbdarstellung der Wertung (Südseite)

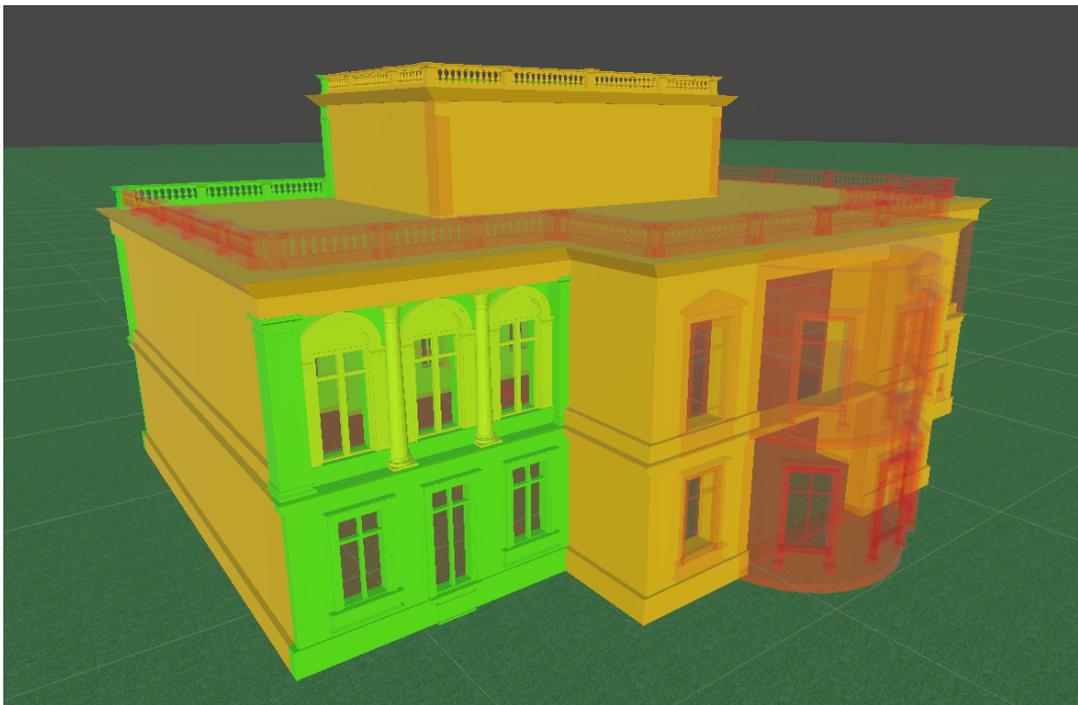


Abbildung 6.8: Rothschild Palais (Hoffman und Krüger 2019) mit Farbdarstellung der Wertung und ausgeblendeten niedrig bewerteten Elementen (Nordseite)

## 7 Evaluation

### 7.1 Scenario

Für die Evaluation wurden vier Nutzer mit einem Anwendungsbeispiel beauftragt. Hierbei sollte das bei dem Rothschild-Palais mithilfe der verwendeten Quellenbasis eine Wertung für die Gebäuderekonstruktion erstellt werden. Aufgrund der Situation, dass die Testpersonen keine Informationen über die Entscheidungen während des Nachbildungsprozess hatten, wurde hierfür eine vereinfachte Skala verwendet, die lediglich die verwendete Quellenlage reflektiert, jedoch nicht die Genauigkeit der modellierten Elemente. Diese sollten aus den verwendeten Quellen ersichtlich sein.

Insgesamt wurden die Nutzer von sechs verschiedenen Quellen, die in der Szene um das Gebäude verteilt wurden, informiert. Diese spiegeln die Quellen wieder, die hauptsächlich bei der Modellierung des Gebäudes zum Einsatz kamen. Die Quellen wurden dabei so platziert, dass sie neben den Elementen, die diese abbilden, sichtbar sind.

Um die Nutzbarkeit und Nutzerfreundlichkeit des Tools zu bestimmen und mögliche Probleme mit der Bedienung und Funktionsweise zu identifizieren, wurde außerdem die „Usability Metric for User Experience“ (Finstad 2010) verwendet.

Die Aufgabe war es eine Bewertung des Gebäudes zu erstellen für die gilt:

- Elemente, die auf einem Foto abgebildet werden, erhalten 3, die höchste Wertung.
- Elemente, die vollständig auf einem Plan abgebildet werden erhalten eine 2.
- Elemente, die teilweise oder ungenau auf Plänen abgebildet werden, erhalten eine 1.
- Elemente, die überhaupt nicht abgebildet werden, erhalten eine 0.

Die Testpersonen wurden vorher über alle Funktionen des Tools aufgeklärt.

Bei den Tests wurden folgende Daten erhoben:

- Die resultierende Wertung
- Die Ergebnisse des UMUX-Fragebogens

### 7.2 Ergebnisse

Die Bewertung des Gebäudes war in allen Fällen erfolgreich. Die resultierenden Wertungen unterschieden sich größtenteils nicht. Teilweise kam es jedoch zu verschiedenen Ergebnissen, was von dem Foto oder manchen Plänen noch genügend abgebildet wird. Dies galt vor

allem für Elemente, die im Stadtbild des Palais teilweise hinter einem Baum verdeckt wurden. Neben dem Stadtbild gab es auch eine Frontansicht eines Bauplans, der die gesamte Front des Gebäudes klar abbildet. Somit kam es bei den teilweise versteckten Elementen zu den Wertungen 3 oder 2 je nach Testperson. Die Subjektivität der Frage, was eine genügende Abbildung auf Plänen oder Fotos ausmacht wurde allerdings erwartet. Ähnlich verhielt es sich bei der Rückseite, also der Nordseite, des Gebäudes, wo ein Plan lediglich ein Teil der östlichen Fassade abbildete. Der Rest der Fassade der Nordseite des Gebäudes wurde Anhand eines horizontalen Bauplans des ersten Stocks extrapoliert und es gab keine Pläne oder Fotos, die diesen seitlich darstellten. Dabei kam es je nach Person zu Wertungen von 2, 1 oder sogar 0.

Der „Usability Metric for User Experience“ (Finstad 2010) Test umfasst folgende vier Fragen:

1. The Certainty-Tool's capabilities meet my requirements.
2. Using the Certainty-Tool is a frustrating experience.
3. The Certainty-Tool is easy to use.
4. I have to spend too much time correcting things with the Certainty-Tool.

Den Nutzer stehen sieben mit von 1 bis 7 nummerierte Felder für die Bewertung der Aussagen zu Verfügung, wobei 1 „Strongly Disagree“ (Stimme überhaupt nicht zu) und 7 „Strongly Agree“ (Stimme voll zu) repräsentiert. Für die Auswertung der Fragen wurden die Ergebnisse wie in Finstad 2010 berechnet und anschließend für die einzelnen Fragen wie auch insgesamt nach 100 gewichtet (Tabelle 7.1).

Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl des Usability-Tests lassen sich nur bedingt Schlüsse aus den Ergebnissen ziehen. Da jedoch zu diesem Zeitpunkt kein besseres Maß zu Verfügung steht, wird dies hier dennoch versucht.

Ein Kritikpunkt, der bei dem Usability-Test wiederholt aufkam, war die Unterteilung der Funktionen in den Untermenüs der UI. Hierbei wurde kritisiert, dass der Großteil der Funktionen nur über die Menüs anwendbar ist. Damit sind diese auch nicht sichtbar, wenn diese nicht ausgeklappt wurden. Das deckt sich mit der Wertung von Frage 2 und Frage 3, denn durch diese nicht intuitive Aufteilung der Funktionen wird der Prozess der Nutzung unterbrochen.

Aus Frage 1 lässt sich jedoch schließen, dass das Tool für das in der Evaluation benutzten Anwendungsbeispiels geeignet ist. Weiterhin führt es zu keinem großen Zeitaufwand bei der Korrektur von Eingaben, was sich an dem Ergebnis von Frage 4 zeigt.

Frage	Versuchsperson	Wertung	Score	Score Durchschnitt (Gewichtet nach 100)	Gesamt (Gewichtet nach 100)
1.	1	7	6	79,17	63,54
	2	5	4		
	3	5	4		
	4	6	5		
2.	1	6	1	37,5	
	2	5	2		
	3	3	4		
	4	5	2		
3.	1	3	2	58,34	
	2	6	5		
	3	4	3		
	4	5	4		
4.	1	1	6	79,17	
	2	3	4		
	3	3	4		
	4	2	5		

Tabelle 7.1: UMUX Ergebnisse. Score ist nach Finstad 2010 angepasste Wertung (Score = [Wertung - 1] bei Fragen 1 und 3 und Score = 7 - [Wertung] bei Fragen 2 und 4. Im Gegensatz zu den Wertungen spiegelt ein höherer Score immer ein besseres Ergebnis dar). Der Durchschnitt sowie der Gesamtwert wurden nach 100 gewichtet.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

In der Arbeit wurde gezeigt, wie das Certainty-Tool die Modellierung von informationeller Ungewissheit in dem bestehenden Stolperwege-Unity-Projekt umsetzt. Hierbei wurde der Wert von selbstbewussten Elementen für diesen Zweck in dem Projekt demonstriert und Stufen für die Ungewissheit der Einzelteile von Gebäuden anhand ihrer Quellen und Rekonstruktion entwickelt. Obwohl bei der Evaluation des Tools nur wenige Subjekte teilgenommen haben, wurden dennoch alternative Nutzen aufgezeigt und Schwachstellen in der derzeitigen Implementation des User-Interfaces aufgedeckt.

### 8.2 Ausblick

Insgesamt sollte das Certainty-Tool lediglich als Grundlage für ein ausgefeiltes Bewertungssystem der Ungewissheit betrachtet werden. Ein wie in Apollonio, Gaiani und Sun 2013 umgesetztes Graphenmodell (Abbildung 8.1) ist eine sinnvolle Weiterführung des Tools. Um die Prozesse, Methodik und Quellen des Modellationsprozesses offenzulegen, ist ein Modell denkbar, indem die Prozesse mittels Knoten und Relationen im *VAnnotatoR* dargestellt werden.

Dabei werden selbstbewusste Objekte erstellt, die einen Teil des Prozesses darstellen. Damit kann zum Beispiel ein Quellen-Knoten mit Prozess-Knoten verbunden werden. Diese werden letztendlich mit dem Element des Gebäudes verbunden. Aus diesen Graphen wird anschließend eine Wertung der Ungewissheit und Genauigkeit automatisch generiert. Dies erfordert zwar immer noch die manuelle Annotation der Prozesse im *VAnnotatoR*, aber aus der Methodik heraus, wie Gebäude im Moment im Stolperwege-Praktikum modelliert werden, ist diese notwendig. Der Vorteil einer solchen Architektur wäre, dass die Informationen wie die Wertung zustande gekommen ist weiterhin erhalten bleibt. Damit kann auch automatisch eine Wertung generiert werden, die auf eine bestimmte Eigenschaft konzentriert ist.

Dies könnte auf Basis der *theory of fuzzy information granulation* (TFIG) (Zadeh 1997) geschehen. Sollte zum Beispiel nur der Detailgrad von Objekten visualisiert werden, ohne dabei auch die Gewissheit darzustellen, lässt sich dieses aus dem Graphen heraus errechnen und anzeigen, ohne dass die Eigenschaft zusätzlich annotiert werden müsste.

Eine weitere denkbare Erweiterung des Tools wäre die Darstellung mehrerer Wertungen zum gleichen Zeitpunkt. In der aktuellen Implementation ist es nicht möglich, mehr als eine Wertung gleichzeitig anzuzeigen oder zu bearbeiten. Dafür müsste jedoch eine neue Methode der farblichen Darstellung der Wertungen gefunden werden, da diese im Moment die

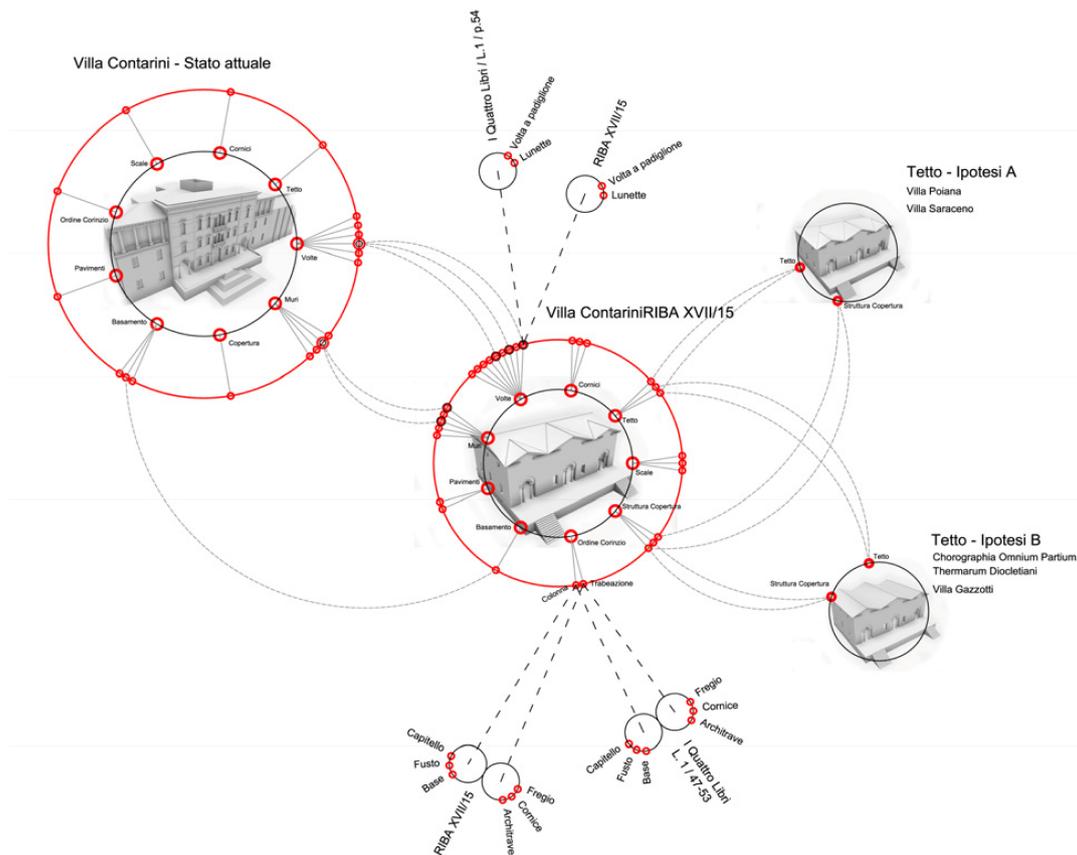


Abbildung 8.1: Kognitiver Graph in Apollonio, Gaiani und Sun 2013, s. 47

primäre Visualisierung von den Wertungen auf einen Blick ist.

Der UMUX-Test deckte mehrere Probleme bei der Bedienung des Certainty-Tools auf. Diese sind teilweise auf im Stolperwege-Projekt verwendete UI-Elemente zurückzuführen. Hierbei wurde häufig das fehlende Feedback von Buttons bei deren Bedienung erwähnt.

Andere haben mit der Struktur der UI zu tun. Funktionen, die bei der Selektion von Elementen hilfreich sein können und für größere Gebäude unumgänglich sind, sind in einem dedizierten Untermenü versteckt.

Da ein großer Teil des Arbeitsaufwands für die Entwicklung des Certainty-Tools für die Schaffung des User-Interfaces und dessen Elementen aufgewandt wurde, allerdings nur eine sehr begrenzte Anzahl an Elementen bereits im Projekt zur Verfügung stehen, empfiehlt sich eine Weiterentwicklung der existierenden UI-Elemente in ein umfangreiches Framework für zukünftige Projekte im *VAnnotatoR*. Des Weiteren sollte ein übergeordnetes Hauptmenü für die Funktionen des *VAnnotatoR* zur Verfügung stehen. Ein Problem während der Entwicklung des *VAnnotatoR* war es, die Kontrolle mittels einer kleinen Anzahl an Knöpfen auf den VR-Controllern zu ermöglichen, da viele davon bereits für andere Funktionen außerhalb des Certainty-Tools benutzt wurden. Hierfür empfiehlt sich ein simples Menü in dem Tools de-/ und aktiviert werden können und möglicherweise eine Überlagerung von Controller-Button-

Zuweisungen vermieden werden kann.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Unterschied zwischen BIM und traditioneller Methoden (Salman, Khalfan und Maqsood 2012, s. 17) . . . . .	3
3.1	Ungewissheits Darstellung in Apollonio, Gaiani und Sun 2013, s. 47 . . . . .	5
5.1	Rothschild-Palais (Hoffman und Krüger 2019), Einzelteildarstellung . . . . .	16
5.2	Transparente Darstellung der Elemente des Philanthropins (Schwarz 2019) außerhalb des Anzeige Intervalls . . . . .	19
5.3	Farbliche Darstellung des demonstrativ bewerteten Philanthropin (Schwarz 2019) . . . . .	20
5.4	Menü des Certainty-Tools, voll ausgeklappt . . . . .	21
5.5	Bewerten des Philanthropin (Schwarz 2019) . . . . .	22
5.6	Erstellung von Referenzen am Beispiel vom Philanthropin (Schwarz 2019) . . . . .	23
6.1	Das unterteilte Rothschild-Palais (Hoffman und Krüger 2019) (Südseite) in Blender . . . . .	24
6.2	Vergleich von Stadtbild (S. 2014) und Rekonstruktion (Hoffman und Krüger 2019) Vorderseite (Südseite) . . . . .	25
6.3	Vergleich von Zeichnung der Fenster (Mehs 1942) und Säulen der Vorderseite und Wireframe der Rekonstruktion (Südseite) (Hoffman und Krüger 2019) . . . . .	26
6.4	Plan der Nordseite des Rothschild-Palais (Mehs 1942) . . . . .	27
6.5	Plan der Südseite des Rothschild-Palais (Mehs 1942) . . . . .	28
6.6	Grundriss der Nordseite (Mehs 1942) . . . . .	28
6.7	Rothschild Palais (Hoffman und Krüger 2019) mit Farbdarstellung der Wertung (Südseite) . . . . .	29
6.8	Rothschild Palais (Hoffman und Krüger 2019) mit Farbdarstellung der Wertung und ausgeblendeten niedrig bewerteten Elementen (Nordseite) . . . . .	29
8.1	Kognitiver Graph in Apollonio, Gaiani und Sun 2013, s. 47 . . . . .	34

## Tabellenverzeichnis

4.1	Stufen für die Reliabilität von Quellen . . . . .	11
4.2	Stufen für die Reliabilität von Elementen anhand ihrer Quellenbasis . . . . .	12
4.3	Repräsentations-Skala . . . . .	13
4.4	Repräsentations-Skala (Alternative) . . . . .	13
4.5	Kombinierte Skala . . . . .	14
7.1	UMUX Ergebnisse . . . . .	32

## Literatur

- Apollonio, F. I., M. Gaiani und Z. Sun (2013). „3D MODELING AND DATA ENRICHMENT IN DIGITAL RECONSTRUCTION OF ARCHITECTURAL HERITAGE“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W2*, S. 43–48. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-43-2013. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W2/43/2013/>.
- Azhar, Salman (2011). „Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry“. In: *Leadership and Management in Engineering* 11.3, S. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29LM.1943-5630.0000127>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29LM.1943-5630.0000127>.
- Azhar, Salman, Abid Nadeem, Johnny Mok und Brian Leung (Aug. 2008). „Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects“. In:
- Eastman, Charles M., Paul Teicholz, Rafael Sacks und Kathleen Liston (2011). *BIM Handbook*. 2. Aufl. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fai, Stephen, Mauro Filippi und Silvia Paliaga (Juli 2013). „Parametric modelling (BIM) for the documentation of vernacular construction methods: a BIM model for the Commissariat Building, Ottawa, Canada“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W1*, S. 115–120. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-115-2013.
- Fai, Stephen und Jesse Rafeiro (Juni 2014). „Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information model (BIM) – West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada“. In: Bd. 2.
- Finstad, Kraig (Sep. 2010). „The Usability Metric for User Experience“. In: 22, S. 323–327.
- Garagnani, Simone und Anna Maria Manferdini (Feb. 2013). „Parametric accuracy: Building information modeling process applied to the cultural heritage preservation“. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1*, S. 87–92. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-87-2013.
- Graham, Katie, L. Chow und Stephen Fai (Nov. 2018). „Level of detail, information and accuracy in building information modelling of existing and heritage buildings“. In: *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development* 8, S. 495–507. DOI: 10.1108/JCHMSD-09-2018-0067.
- Gunter Demnig (2009). *Stolpersteine*. <http://www.stolpersteine.eu/start/>. Abgerufen am: 2021-12-10.
- El-Hakim, Sabry F., George MacDonald, Jean-François Lapointe, Lorenzo Gonzo und Michael Jemtrud (2006). „On the Digital Reconstruction and Interactive Presentation of Heritage Sites through Time“. In: *VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*. Hrsg. von Marinos Ioannides, David Arnold, Franco

- Niccolucci und Katerina Mania. The Eurographics Association. ISBN: 3-905673-42-8. DOI: 10.2312/VAST/VAST06/243-250.
- Hoffman, Felix und Tom Krüger (2019). *Digitale Rekonstruktion des Rothschild-Palais (auch Villa Goldschmidt) im Rothschildpark*.
- Khalil, Ahmed, Spyros Stravoravdis und Dietmar Backes (Juni 2020). „Categorisation of building data in the digital documentation of heritage buildings“. In: *Applied Geomatics* 13. DOI: 10.1007/s12518-020-00322-7.
- Mehler, Alexander u. a. (2017). „Stolperwege: An App for a Digital Public History of the Holocaust“. In: *Proceedings of the 28th ACM Conference on Hypertext and Social Media*. HT '17. Prague, Czech Republic: Association for Computing Machinery, S. 319–320. ISBN: 9781450347082. DOI: 10.1145/3078714.3078748. URL: <https://doi.org/10.1145/3078714.3078748>.
- Mehs, Claus (1942). *Villa von Rothschild - Goldschmidt, Bockenheimer Landstr. 10*. Bestand: Kartensammlung nach Formaten, Bestandskürzel: S8-3, Signatur: 26. Institut für Stadtgeschichte Frankfurt am Main.
- S., Frank (2014). *Schloß Rothschild - Bild von 1943*. <https://www.mittelalterweb.de/frankfurt/f14.jpg>. Abgerufen am: 02.11.2021.
- Saldaña, Marie (Juni 2015). „An Integrated Approach to the Procedural Modeling of Ancient Cities and Buildings“. In: *Digital Scholarship in the Humanities* 30.suppl\_1, S. i148–i163. ISSN: 2055-7671. DOI: 10.1093/lc/fqv013. eprint: [https://academic.oup.com/dsh/article-pdf/30/suppl\\_1/i148/1035380/fqv013.pdf](https://academic.oup.com/dsh/article-pdf/30/suppl_1/i148/1035380/fqv013.pdf). URL: <https://doi.org/10.1093/lc/fqv013>.
- Salman, Azhar, Malik Khalfan und Tayyab Maqsood (Dez. 2012). „Building information modeling (BIM): Now and beyond“. In: *Australasian Journal of Construction Economics and Building* 12, S. 15. DOI: 10.5130/ajceb.v12i4.3032.
- Schwarz, Lukas (2019). *Digitale Rekonstruktion des Philanthropin*.
- Spiekermann, Christian, Giuseppe Abrami und Alexander Mehler (2018). „VAnnotatoR: a Gesture-driven Annotation Framework for Linguistic and Multimodal Annotation“. In: *Proceedings of the Annotation, Recognition and Evaluation of Actions (AREA 2018) Workshop*. AREA. Miyazaki, Japan.
- Stiller, Juliane und Dirk Wintergrün (2016). „Digital Reconstruction in Historical Research and Its Implications for Virtual Research Environments“. In: *3D Research Challenges in Cultural Heritage II*. Hrsg. von Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński und Marinos Ioannides. Cham: Springer International Publishing, S. 47–61. ISBN: 978-3-319-47647-6.
- Zadeh, Lotfi A. (1997). „Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic“. In: *Fuzzy Sets and Systems* 90.2. Fuzzy Sets: Where Do We Stand? Where Do We Go?, S. 111–127. ISSN: 0165-0114. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00077-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011497000778>.