

Immersives Design von Architektur
durch Kombination interaktiver Displays
mit Augmented Reality

Severin Engert

1. Oktober 2018



Fakultät Informatik
Institut für Software- und Multimediatechnik
Professur für Multimedia-Technologie

Bachelorarbeit

Immersives Design von Architektur durch Kombination interaktiver Displays mit Augmented Reality

Severin Engert

- 1. Gutachter* **Prof. Dr.-Ing. Raimund Dachsel**
Interactive Media Lab Dresden
Technische Universität Dresden
- 2. Gutachter* **Dr.-Ing. Annett Mitschick**
Interactive Media Lab Dresden
Technische Universität Dresden
- Betreuer* **Patrick Reipschläger (M.Sc.)**

1. Oktober 2018

Severin Engert

Immersives Design von Architektur durch Kombination interaktiver Displays mit Augmented Reality

Bachelorarbeit, 1. Oktober 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Raimund Dachsel und Dr.-Ing. Annett Mitschick

Betreuer: Patrick Reipschläger (M.Sc.)

Technische Universität Dresden

Professur für Multimedia-Technologie

Institut für Software- und Multimediatechnik

Fakultät Informatik

Nöthnitzer Str. 46

01062 Dresden

Kurzzusammenfassung

In der Architektur werden Gebäude entsprechend den Wünschen eines Kunden entworfen. Dabei entstehen neben den detaillierten Grundrissen heutzutage auch komplexe dreidimensionale Modelle. Daraus werden fotorealistische Ansichten des entworfenen Gebäudes erstellt. Diese helfen den Personen ohne Domänenwissen, wie beispielsweise den Kunden oder der Öffentlichkeit, einen besseren Eindruck vom Entwurf zu bekommen und fördern das Verständnis räumlicher Abhängigkeiten. Auch immersive Präsentationen in den Bereichen Augmented und Virtual Reality hielten in der Architektur Einzug. Zu Beginn dieser Arbeit werden zunächst verwandte Forschungen aus den Bereichen Architektur, Visualisierung und Interaktion analysiert. Dabei gewonnene Erkenntnisse fließen in die Entwicklung von Konzepten für eine Anwendung ein, welche auf die Kombination einer AR-Brille mit einem berührungsempfindlichen Display setzt. Ausgewählte Konzepte werden in einer prototypischen Anwendung umgesetzt. Diese Implementierung dient der Bewertung von kopfgebundener Augmented Reality in Kombination mit einem zusätzlichen Display für die Präsentation von architektonischen Entwürfen.

Abstract

Architects create buildings based on client requests. Nowadays they not only design detailed floor plans but also very complex three-dimensional CAD-models. Photo-realistic views of the building are computed from these models. They can help persons without special knowledge to understand the spatial relations of the draft. In the last years immersive presentations in Augmented and Virtual Reality came up in architecture. At the beginning of this work related research in the fields of architecture, visualization and interaction will be examined. Thereby gained knowledge will be transferred into the development of concepts for a new application which combines an AR Head Mounted Display with a multi-touch capable display. A chosen subset of concepts will be implemented in a prototyp. This implementation is then used to evaluate the combination of AR with an additional display for the presentation of architectural drafts.

Danksagung

Ich danke meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung, die zahlreichen Tipps sowie die Kontrolle dieser Arbeit. Ein besonderer Dank geht dabei an Louis, Remke, Felix, Laeticia sowie Mama und Papa.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Interactive Media Lab Dresden für die nette Atmosphäre während der Erarbeitung dieser Arbeit sowie für die Bereitstellung der benötigten Hardware. Besonders danke ich Patrick für die Betreuung meiner Bachelorarbeit und all die Hilfe, welche ich von ihm erhielt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel	3
1.2	Struktur dieser Arbeit	3
2	Verwandte Forschung	5
2.1	Architektur	5
2.2	Visualisierung in VR und AR	8
2.2.1	Virtual Reality	8
2.2.2	Augmented Reality	10
2.3	Interaktion mit dreidimensionalen Inhalten	12
2.4	Sonstige verwandte Forschung	16
2.5	Zusammenfassung	16
3	Konzepte	19
3.1	Modell-Präsentation	19
3.2	Modell-Interaktion	23
3.3	Modell-Manipulation	26
3.3.1	Materialien	27
3.3.2	Inneneinrichtung	31
3.4	Innenansicht	32
3.5	Mehrbenutzer-Betrieb	35
3.6	Alternative Darstellungsarten	36
3.7	Alternative Interaktionsmöglichkeiten	37
3.8	Zusammenfassung	39
4	Umsetzung	41
4.1	Hardware	41
4.2	Importe	43
4.3	Umgesetzte Konzepte	44
4.4	Prototyp	46
4.5	Performanz	53
4.6	Zusammenfassung	55
5	Evaluation und Ausblick	57
5.1	Evaluation	57
5.2	Ausblick	59
5.3	Zusammenfassung	62
	Literatur	65

Einleitung

Die Architektur ist seit Jahrtausenden eine imposante Kunst. Der Römer Marcus Vitruvius Pollio beschrieb sie im 1. Jahrhundert v. Chr. sogar als die "Mutter aller Künste" [PR65]. Sie ist seit jeher das Arbeitsfeld hochspezialisierter Fachkräfte. Neben einer umfangreichen Lehre ist auch jahrelange Berufserfahrung notwendig, um die Disziplin zu meistern. Dabei spaltete sich in den vergangenen Jahrhunderten der Beruf des Baumeisters immer mehr in einzelne Fachrichtungen aus architektonischen Gestaltern, Statikern, Ingenieuren, Bauplanern und Handwerkern auf, um modernen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Entwürfe von Projekten werden seit der Antike in Form von Grundrissen oder ähnlichen, zweidimensionalen Zeichnungen festgehalten und zwischen den beteiligten Parteien ausgetauscht. Ihre Komplexität sowie domänenspezifische Notationen machen es Laien oft nahezu unmöglich, die darin enthaltene Vielzahl an Informationen zu entschlüsseln. Zusätzlich bilden zweidimensionale Zeichnungen dreidimensionale Objekte ab, für welche ein ausgeprägtes räumliches Verständnis notwendig ist.

Mit der Entwicklung von Computern wurde auch das Zeichnen von Grundrissen digitalisiert. CAD-Programme (computer-aided design, zu Deutsch: rechnergestütztes Konstruieren) ermöglichen es, Geometrien zu erzeugen und zu verändern, was für den Entwurf genutzt werden kann. Mit zunehmender, grafischer Rechenleistung entstanden in den folgenden Jahrzehnten auch dreidimensionale CAD-Programme. Mit ihnen war es erstmals realisierbar, Gebäude direkt im dreidimensionalen Raum zu entwerfen. Auf die Architektur spezialisierte Versionen ermöglichen es dem Architekten, traditionelle Grundrisse und Seitenansichten zu zeichnen und daraus ein entsprechendes 3D-Modell des Gebäudes zu berechnen.

Schnell wurde die Bedeutung dieser Modelle für die Visualisierung eines Projektes erkannt. Laien bekommen einen guten Eindruck vom Aussehen und von der Wirkung eines Gebäudes bzw. einzelner Räume. Architekten können damit beispielsweise Kunden ein Projekt besser vorstellen als mit der Präsentation von Grundrissen. In den vergangenen Jahren entstanden dafür spezialisierte Anwendungen und Dienstleistungen, welche es erlauben, 3D-Modelle fotorealistisch darzustellen. Außenstehende bekommen dadurch einen ansprechenden Eindruck vom späteren Gebäudeaussehen.

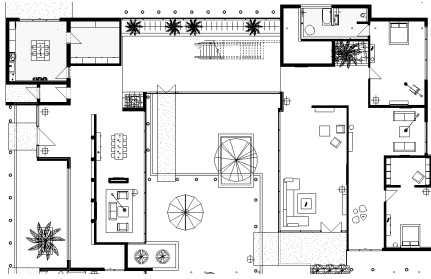


Abb. 1.1: Der Grundriss einer Etage ist detaillierter.



Abb. 1.2: Das 3D-Modell des Gebäudes ist ansprechender.

Digitale 3D-Modelle wurden traditionell auf zweidimensionalen Monitoren dargestellt, wo sie durch Rotation von allen Seiten betrachtet werden konnten. Stereodisplays erzeugten später auch einen Tiefeindruck der Inhalte durch eine stereoskopische Darstellung. Den nächsten Schritt in dieser Entwicklung stellen aktuelle Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) Geräte dar. Diese ermöglichen es, dreidimensionale Inhalte im Raum zu positionieren, sodass sie durch Bewegung des eigenen Körpers von allen Seiten aus betrachtet werden können. In VR taucht ein Nutzer komplett in eine virtuelle Welt ein, in AR wird seine reale Umgebung um virtuelle Inhalte erweitert. Aufgrund der eindrucksvollen Darstellungsmöglichkeiten hielten diese Technologien auch in der Architektur Einzug. Die ohnehin vorhandenen dreidimensionalen Gebäudemodelle werden beispielsweise für Außenstehende derart aufbereitet, dass sie im Virtuellen durch zukünftige Gebäude flanieren können.

Für VR- und AR-Technologien mussten traditionelle Interaktionen mit dem Computer, wie eine Eingabe per Maus und Tastatur, verworfen werden. Da sie eine räumliche Bewegungsfreiheit voraussetzen, mussten Alternativen gefunden werden. In Virtual Reality ist aufgrund der ausgeblendeten Umgebung die Verwendung von Controllern üblich. In Augmented Reality finden Gesten- und Sprachsteuerung Anwendung. Doch aufgrund der noch sichtbaren Umgebung ist auch eine Kombination mit anderen Ein- und Ausgabegeräten, wie beispielsweise mit berührungsempfindlichen Displays, möglich. Diese Verbindung beschreiben Reipschläger's und Dachsel't's "Augmented Displays" (unpubliziert) [RD18]. Demnach können virtuelle, dreidimensionale Inhalte in AR mit hochauflösenden Darstellungen auf dem Display und einer direkten Berührungseingabe verknüpft werden. In einer architektonischen Anwendung kann entsprechend auf dem Display mit den gewohnten Grundrissen interagiert werden, während in AR das 3D-Modell des Gebäudes dargestellt wird. Dies verbindet die Vorteile beider Teile optimal.



Abb. 1.3: Ein AR-Anwendung auf einem Tablet zeigt das passende Gebäudemodell zu einem Grundriss [Aug18].

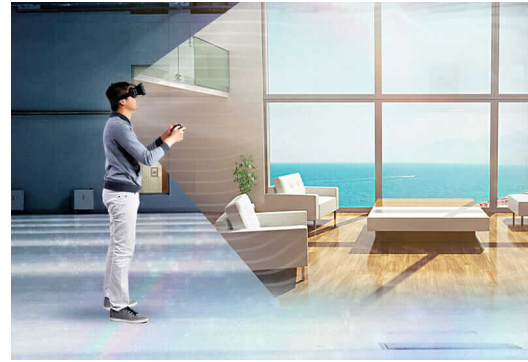


Abb. 1.4: In VR können virtuelle Räume erkundet werden [Ton18].

1.1 Ziel

Das Kernziel dieser Bachelorarbeit ist es, geeignete Konzepte für die Darstellung von und die Interaktion mit architektonischen Inhalten zu entwickeln. Dabei sollen dreidimensionale Elemente in AR und zweidimensionale Elemente auf einem Display gemäß des "Augmented Display"-Konzeptes [RD18] präsentiert werden. Eine Interaktion soll vorzugsweise über Berührung erfolgen.

Zur Realisierung dieses Ziels ist es zunächst notwendig, die aktuellen Entwicklungen in der Architektur sowie mit dem Thema verwandte Arbeiten zu analysieren. Bei Letzterem muss auf die Visualisierung in Virtual und Augmented Reality und die möglichen Interaktionen mit dreidimensionalen Inhalten eingegangen werden. Dabei gewonnene Erkenntnisse müssen in die Entwicklung geeigneter Konzepte für eine AR-Anwendung einfließen. Es sollten Alternativen aufgestellt, erläutert und gegeneinander abgewogen werden. Abschließend ist es notwendig, dass einige Konzepte in einem Prototypen umgesetzt werden. Die Auswahl sollte geeignet sein, um sowohl die Konzepte, als auch die Eignung der "Augmented Displays" für den architektonischen Kontext überprüfen zu können.

1.2 Struktur dieser Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden grundlegende Erkenntnisse aus der Forschung und der Wirtschaft zusammengetragen und analysiert. Dabei wird auf die Entwicklungen in der Architektur, die Forschungen zur Visualisierung im Bereich VR und AR sowie auf mögliche Interaktionen mit dreidimensionalen Inhalten eingegangen. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Erarbeitung von Konzepten für eine architektonische Augmented-Reality-Anwendung im darauffolgenden Kapitel. Im vierten Abschnitt wird die Implementierung einer prototypischen Umsetzung ausgewählter Konzepte

beschrieben. Abschließend erfolgt eine Auswertung der erarbeiteten Konzepte und des Prototypen sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze.

Verwandte Forschung

Für die Arbeit an einer architektonische Augmented-Reality-Anwendung ist es wichtig, verwandte Erkenntnisse im Bereich der Architektur im Allgemeinen, der Visualisierung und der Interaktion zu betrachten. Dabei werden der Zugriff auf architektonische Daten, die Präsentation dreidimensionaler Inhalte sowie die Interaktion mit diesen beleuchtet.

2.1 Architektur

Mit der fortschreitenden Digitalisierung veränderte sich auch die Arbeit der Architekten. Einfache Skizzen und technische Zeichnungen wurden durch komplexe CAD-Modelle abgelöst. Dreidimensionale Computer-Modelle ersetzen zweidimensionale Grundrisse und Seitenansichten. Hochrealistische Architekturvisualisierungen verbesserten die Vorstellung vom späteren Aussehen eines geplanten Gebäudes [Dit18].

Dabei entstand eine Vielzahl von Anwenderprogrammen mit auf die Arbeit eines Architekten zugeschnittenen Lösungen. Sie dienen u. a. der Erstellung von dreidimensionalen Modellen, der Akkumulation von weiteren Informationen rund um das Gebäude (vgl. BIM) oder der realitätsnahen Visualisierung der Objekte. Letztere wurde in den vergangenen Jahren um den Bereich Mixed Reality erweitert, welche Architekten interessante neue Möglichkeiten der Präsentation für den Kunden bietet.

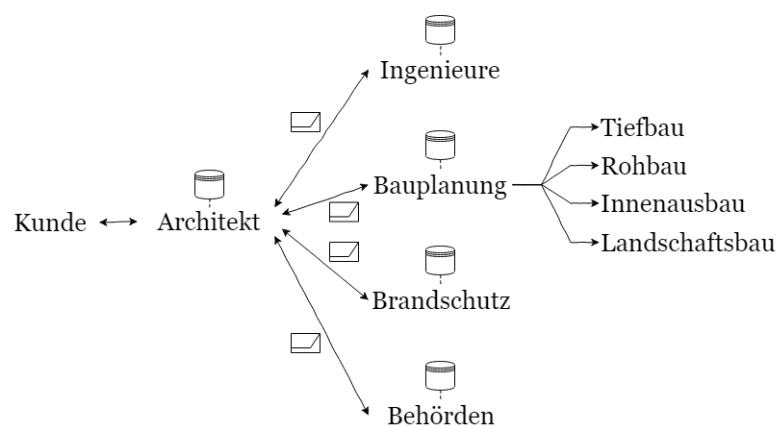


Abb. 2.1: Der traditionelle architektonische Workflow.

Traditionelle Arbeitsweise. In der klassischen Bauplanung entwirft ein Architekt ein Gebäude nach den Wünschen des Kunden. Dabei erstellt er Zeichnungen, früher auf Papier, heute mit Hilfe von CAD-Programmen. Diese werden manuell den beteiligten Fachingenieuren, den Brandschutzgutachtern oder den Behörden vorgelegt. Anschließend erfolgt jeweils eine Aufbereitung der vorgelegten Daten entsprechend fachspezifischer Anforderungen. Anhand der eigenen Datenbestände werden alle weiteren Schritte, wie Kostenkalkulationen auf Basis einer Mengenermittlung oder statische Berechnungen durchgeführt.

Treten Problem in den Daten eines Teilgewerbes oder eine Planungsänderung seitens des Architekten auf, so müssen die Zeichnungen aktualisiert und neu verteilt werden.

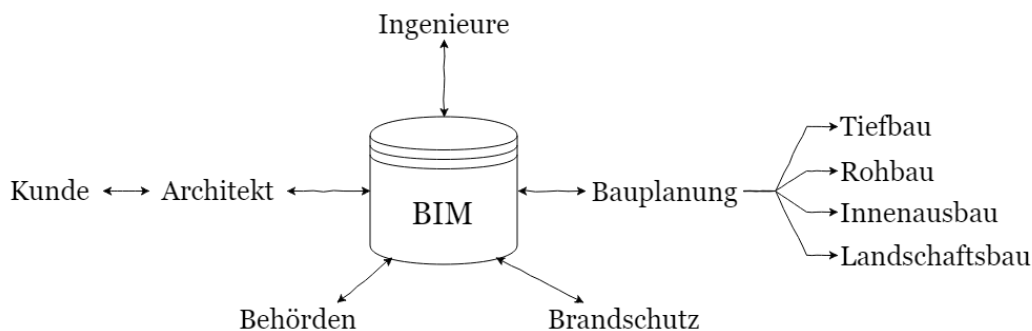


Abb. 2.2: Der architektonische Workflow mit BIM.

Modern dank BIM. BIM steht für "Building Information Modeling" und wurde von Autodesk geprägt, um einen "intelligenten, auf einem 3D-Modell basierenden Prozess" zu beschreiben, "der Architekten, Ingenieuren und Bauunternehmern Informationen und Werkzeuge für effiziente Planung, Entwurf, Konstruktion und Verwaltung von Gebäuden und Infrastruktur bereitstellt" [Aut18b]. In diesem Prozess werden ein dreidimensionales Modell des Gebäudes erstellt und dabei pro Objekt beliebige zusätzliche Daten akkumuliert. Das Modell inkludiert damit Informationen, welche z. B. zeitliche Bauplanung, Stücklisten oder statische Berechnungen ermöglichen. Alle am Lebenszyklus eines Gebäudes beteiligten Gewerbe arbeiten dabei auf dem gleichen Datenbestand und somit werden Änderungen intelligent in allen Ansichten angepasst. Diese automatische Synchronisation verbessert den Informationsaustausch zwischen den Gewerben und verringert dadurch Planungsmängel und Nachträge [Tek18]. Das senkt die Kosten, steigert die Produktivität und erhöht die Arbeitsqualität [Aut18b]. Zusätzlich hilft BIM bei der kontinuierlichen Datenaufbereitung in der lebenslangen Pflege des Gebäudes.

Das deutsche BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) verabschiedete 2015 den "Stufenplan Digitales Planen und Bauen" [BMV18], welcher die Umsetzung von BIM vorantreiben soll. Demzufolge wird BIM ab 2020 im deutschen Verkehrsinfrastrukturbau verpflichtend. Dies ist ein wichtiger Schritt

zur Verbreitung von BIM im deutschen Raum, welcher sich bisher nur auf große Architekturbüros und Bauunternehmen beschränkte [Gre18; Bau18].

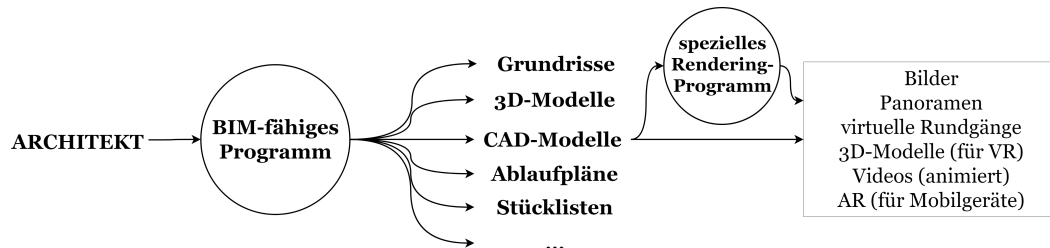


Abb. 2.3: Vorgehensweise eines Architekten vom Modell zur Visualisierung.

Neue Funktionen. Mit dem steigenden Interesse der Wirtschaft an BIM erweiterten viele namhafte Anbieter entsprechender CAD-Programme ihre Produkte um BIM-Funktionalitäten. Die führenden Anbieter sind hierbei Autodesk mit Revit [Aut18d] und AutoCAD [Aut18], Nemetschek Group mit Allplan [NEM18] und Graphisoft mit ArchiCAD [GRA18]. In den entsprechenden Programmen können alle Gewerbe bequem an einem Datenbestand arbeiten und die für sie relevanten Informationen hinterlegen.

Die meisten Programme verwenden dabei ihre eigene Datenstruktur, um alle Informationen zu speichern. Da dies den Austausch zwischen Software verschiedener Anbieter erschwert, etablierte die internationale Organisation buildingSMART in den vergangenen Jahren openBIM [bui18]. Dafür entwickelte sie Industry Foundation Classes (IFC). Dieses Datenmodell ermöglicht den standardisierten Austausch der normalerweise in den Programmen gekapselten Informationen zwischen verschiedenen Anwendungen. Die textbasierten Austauschformate erlauben die Programmierung von entsprechenden Parsern. Damit ist es Drittanbietern möglich, auf Daten aus den großen CAD-Programmen zuzugreifen, um sie für eigene Anwendungen oder Plug-Ins zu verwenden [Ger18].

Aufgrund der Fülle an Informationen eines BIM-Modells bieten die meisten CAD-Programme eine Vielzahl möglicher Exporte an (siehe Abb. 2.3). Neben den üblichen CAD- oder 3D-Modellen und Grundrissen können beispielsweise auch zeitliche Ablaufpläne des Baus, Stücklisten für benötigte Materialien oder Flächenauswertungen exportiert werden.

Die meisten Anwendungen bieten auf Basis der CAD-Modelle auch eine grundlegende Visualisierung des Projektes für den Kunden. Dafür ist es möglich, virtuelle Kameras für Bilder, Videos oder virtuelle Rundgänge zu platzieren und zu bewegen. Für den Bereich Mixed Reality (kurz MR, siehe Kapitel 2.2) können außerdem einfache Inhalte generiert werden, welche anschließend per VR-Brille oder per Tablet

betrachtet werden können.

Mit der Entwicklung hochrealistischer Computer-Visualisierungen ist auch im Bereich der Architektur der Wunsch nach realitätsnahen Präsentationen aufgekommen. Dadurch entstanden spezialisierte Anwendungen wie Lumion [Act18] oder V-RAY [Cha18] für das komplexe Rendern der Inhalte. Sie verwenden die dreidimensionalen Modelle aus den CAD-Programmen und erweitern sie um fotorealistische Materialien, Beleuchtungen und weitere Eigenschaften. Dabei entstehen Bilder, Videos und MR-Inhalte, welche der Realität sehr ähnlich sind.

Realitätsnahe Präsentationen von geplanten Gebäuden gehören damit inzwischen zu den normalen Erwartungen, welche ein Kunde an seinen Architekten stellen kann. Da Fotos, Simulationen, virtuelle Rundgänge und MR-Inhalte auf Tablets heutzutage zu den üblichen Angeboten zählen, sind neue Arten der Visualisierung notwendig, damit sich ein Architekt von seiner Konkurrenz abhebt. Die Verwendung von AR- oder VR-Brillen zur Präsentation des Objektes stellt dabei den nächsten Schritt in Form eines immersiven Erlebnisses dar.

2.2 Visualisierung in VR und AR

Der Term Mixed Reality (kurz MR, zu Deutsch: Gemischte Realität) beschreibt Systeme, welche die natürliche Wahrnehmung des Menschen mit künstlichen, computererzeugten Inhalten verbinden. Nach der Taxonomie von Milgram und Kishino umfasst MR dabei das gesamte Kontinuum zwischen den beiden Extremen *nur Realität* und *nur Virtualität* (Virtual Reality, kurz VR, zu Deutsch: Virtuelle Realität) [MK94]. Demnach fallen sowohl die Augmented Virtuality (Erweiterung virtueller Inhalte um reelle Informationen) als auch die Augmented Reality (kurz AR, zu Deutsch: Erweiterte Realität) darunter. Letztere überlagert die menschliche Realitätswahrnehmung mit digitalen Informationen.

2.2.1 Virtual Reality

Im Bereich der Virtual Reality sind zwei wichtige Arten der Visualisierung zu nennen, CAVEs und Head-Mounted Displays (kurz HMD).

CAVE (Cave Automatic Virtual Environment, zu Deutsch: Höhle mit automatisierter, virtueller Umwelt) ist ein Konzept, welches 1993 von Cruz-Neira et al. beschrieben wurde [CN+93]. Dabei handelt es sich um einen Raum, an dessen Wände, Decke und Boden visuelle Inhalte projiziert werden. Die Nutzer, welche sich in diesem Raum befinden, bekommen die Illusion einer künstlichen dreidimensionalen Welt. Verwendet wird diese Art der Virtual Reality sowohl in der Forschung [FW00] als auch in der Industrie, beispielsweise im Design oder der Konstruktion, sowie in der

Bildung, z. B. bei Flugsimulatoren. Auch in der Architektur finden CAVE-Systeme Anwendung, da sie mehreren Nutzern auf einmal die Möglichkeit der Interaktion in virtuellen Umgebungen bieten. CAVEs haben ihre Grenzen vor allem im meist geringen Bewegungsspielraum bei großem Platzverbrauch und in der Komplexität der notwendigen Technik und Software.

HMDs sind auf dem Kopf getragene, visuelle Ausgabegeräte, welche Inhalte entweder auf kleinen Bildschirmen vor dem Auge zeigen oder direkt auf die Netzhaut projizieren. Das erste HMD wurde 1968 von Sutherland entwickelt [Sut68]. Sie stellen mit Abstand die verbreitetste Form der VR-Geräte dar. Dabei sind im kommerziellen Bereich Playstation VR [Pla18], HTC Vive [Viv18] und Oculus Rift [Ocu18] zu nennen.

Laut einer Umfrage von 2003 [Why03] war die Verwendung von VR im Bereich der Architektur und des Baus anfangs kaum üblich. Sie beschränkte sich außerdem auf die Präsentation für (potentielle) Kunden, verteilte Arbeit an einem Entwurf, Simulation dynamischer Menschenmassen sowie Bauplanung. Doch mit der Zeit hielt VR auch in der Architektur und den verwandten Bereichen Landschaftsarchitektur und Umweltplanung [Por+15] Einzug. Dabei fördert VR besonders die Kooperation, das kreative Arbeiten an Entwürfen sowie das Verständnis räumlicher Beziehungen und Zusammenhänge. Außerdem können Architekten in VR ihre Ideen besser ausdrücken bzw. visualisieren.

In der Wirtschaft finden im VR-Bereich besonders die HMDs Verwendung. Sie sind verhältnismäßig kostengünstig und kommerziell erhältlich. Viele architektonische bzw. Rendering-Programme sind in der Lage, Gebäudeinformationen für die stereoskopische Sicht des HMDs aufzubereiten und auf Eingaben aus dem System zu reagieren. Dadurch sind Szenarien, wie virtuelle Rundgänge, immersiv erlebbar. Architekten und Kunden können durch zukünftige Innenräume gehen und dabei über die Controller in ihren Händen Eigenschaften, wie Wandfarbe oder Einrichtungsgegenstände, direkt anpassen.

VR hat gegenüber AR den Vorteil, dass der Nutzer ausschließlich virtuelle Informationen wahrnimmt und dadurch kein Tracking der Umgebung notwendig ist. Dies bedeutet weniger Rechenaufwand und macht VR-Anwendungen umgebungsunabhängig.

Zu den Problemen zählt trotzdem die komplexe Berechnung von dreidimensionalen Inhalten in Echtzeit. Dies wird verstärkt durch das verhältnismäßig große Sichtfeld bei heutigen VR-Technologien. Ebenso müssen Anwendungen eine hohe Bildwiederholungsrate erreichen, um Bewegungsübelkeit vorzubeugen. Problematisch ist weiterhin die geringe Auflösung heutiger Technologien, welches das immersive Erlebnis aller Anwendungen limitiert.

2.2.2 Augmented Reality

Augmented Reality findet in immer mehr Bereichen Verwendung. Mekni und Lemieux beschrieben 2014 eine repräsentative Auswahl an Anwendungsgebieten [ML14], darunter Medizin, Militär, Entertainment und Architektur. Die Bedeutung für Letzteres wird durch de Freitas und Ruschel unterstrichen, welche in ihrer Arbeit 200 verschiedene Paper im Bereich Architektur und AR verglichen [FR13].

Für Augmented Reality existieren verschiedenste Arten der Visualisierung, von HMDs über Projektionen bis hin zu Mobilgeräten.

Head-Mounted Displays sind besonders in der Forschung weit verbreitet. Webster et al. verwendeten 1996 ein HMD, um Methoden der Inspektion und Renovierung von architektonischen Strukturen zu verbessern, indem sie in den Wänden versteckte Strukturen darstellten [Web+96]. Thomas et al. entwarfen 1999 TINMITH2, ein Prototyp, welcher in der Lage war, mögliche Modifikationen an einem existierenden Gebäude zu visualisieren [Tho+01]. Dabei konnten gespeicherte 3D-Daten, z. B. eines Balkons oder der Verlauf von Leitungen direkt an der Gebäudefassade dargestellt werden. Behzadan und Kamat konzipierten 2005 ein System, welches die Sicht auf eine Baustelle mit virtuellen Inhalten wie Baggern oder Kränen überlagern konnte [BK05]. Santos et al. entwarfen 2010 ein AR-HMD, welches gezielt einfallendes Licht ausblenden konnte, um z.B. virtuelle Schatten zu erzeugen oder störendes Gegenlicht auszugleichen [San+10].

Im Bereich AR existieren verschiedene Alternativen der Präsentation von virtuellen Inhalten neben HMDs. Klinker et al. beschrieben 2001 ausführlich ein Vorgehen zur Überlagerung von bereits aufgenommenem Videomaterial mit virtuellen Inhalten [Kli+01]. Dafür wurden großräumige Außenszenen aufgenommen, verarbeitet und mit detaillierten Modellen zukünftiger Bauprojekte überlagert. Nach ähnlichem Prinzip arbeitete auch Sareika's und Schmalstieg's Urban Sketcher [SS07]. In einem Zelt vor Ort konnten Live-Aufnahmen der Baustelle mit selbstgezeichneten Skizzen überlagert werden. Dies sollte die Kommunikation der Beteiligten verbessern und einen gemeinsamen, kreativen Gestaltungsprozess fördern. Einen völlig anderen Ansatz verfolgten Zhang et al. [Zha+14]. Sie projizierten die Innenansicht eines Gebäudes auf die Außenseite eines physischen Modells desselben, sodass es für den Betrachter aussah, als würde er perspektivisch in das Innere schauen können. Dieses System ähnelt dem Ansatz der DisplayObjects von Akaoka et al. [Aka+10].

Mit der fortschreitenden Entwicklung von Handys und Tablets wurden diese auch für die Visualisierung in AR interessant. Sie sind weit verbreitet und einfach zu bedienen. Außerdem erfüllen sie alle notwendigen Anforderungen, wie z. B. Touch-Display, Existenz einer Kamera und ausreichende Rechenkapazität. Damit können digitale Inhalte direkt die Live-Aufnahmen der Kamera überlagern. Zusätzlich kann die Umgebung analysiert werden, was die Möglichkeit bietet, virtuelle Objekte an bestimmte Positionen im Raum zu heften oder bestimmte Informationen im richtigen

Moment anzuzeigen.

Sareika und Schmalstieg beschrieben 2010 ein Tablet-AR-Interface zur Stadtplanung, in welchem Nutzer in ein physisches Modell eines Straßenzuges virtuelle Objekte wie Bäume, Zäune oder Autos einfügen konnten [SS10]. Sánchez Riera et al. verwendeten Mobilgeräte zum Training von Architekturstudenten, da diese keine Hemmungen vor der Verwendung dieser Technologien zeigten [SR+15]. AR-Darstellungen der Entwürfe der Studierenden vor Ort halfen ihnen bei der Bewertung dieser sowie beim Verständnis räumlicher Beziehungen. Ebenso nutzten Chu et al. zur Wissensvermittlung eine Anwendung auf einem Mobilgerät [Chu+17]. Dadurch waren die Schüler motivierter und konnten sich schneller mehr Wissen über das verwendete historische Gebäude aneignen. Lee et al. programmierten die Apps CityViewAR und CCDU 3D infolge der Zerstörung der Innenstadt von Christchurch, Neuseeland, durch ein Erdbeben [Lee+12]. Damit können sich Nutzer vor Ort die historischen Fassaden der zerstörten Gebäude anschauen bzw. sich neu geplante Bauprojekte der Stadt über den Ruinen anzeigen lassen.

Fortschritte im Bereich der Darstellung von AR-Inhalten ließen vorher ungeahnte Möglichkeiten insbesondere für die Innenarchitektur entstehen [Aug18]. So laufen Kunden heutzutage mit einem Tablet durch den Rohbau ihrer Gebäude und richten sie interaktiv ein. Es können Wandfarben, Einrichtungsgegenstände und Beleuchtungen ausprobiert werden, um einen immersiven Eindruck des späteren Aussehens zu bekommen (siehe Abb. 2.4).

In der Entwurfsphase von Gebäuden ist es durch die Immersion ebenfalls möglich, frühzeitig Probleme zu entdecken. Manche Räume, welche auf dem Grundriss angemessen aussehen, wirken beispielsweise in AR/VR zu groß oder zu beengt. Statt durch rechenintensive Simulationen können dadurch auch Fehler entdeckt werden, wie z. B. zu schmale Eingangsbereiche in öffentlichen Gebäuden.

Tablet- oder Handy-Anwendungen mit AR-Inhalten dienen in der Architektur, ähnlich wie in anderen Gebieten, schon länger Marketingzwecken [Aug18]. Es existieren Apps, mit welchen ein Kunde die Fotos in Katalogen von Makler- oder Architektenbüros scannen kann. Erfasst die Anwendung ein bekanntes Bild, wird das passende Werbevideo oder ein zugehöriges 3D-Modell eingeblendet. Gleiches existiert für Visitenkarten von Architekten, um zukünftigen Kunden die besten eigenen Projekte zu präsentieren.

Der größte Vorteil von AR-Darstellungen im Gegensatz zu VR ist, dass nur in Teilen des Sichtfeldes Inhalte gerendert werden müssen. Da die reale Welt nur mit einigen virtuellen Objekten überlagert wird, ist das Rendering weniger rechenintensiv.

Die Forschung benennt außerdem einige Probleme bzw. Anforderungen für AR-Anwendungen [Azu+01; Kli+01; Wan09; ML14; Beh+15]. So muss bei der Entwicklung auf eine angemessene Wahl der Realitätsnähe der virtuellen Inhalte geachtet werden, um zwischen Immersion und Rechenaufwand abzuwägen. Ebenso gilt es, visuelle Paradoxe zu vermeiden. Gemeint sind damit die richtige Platzierung virtueller

Objekte im Raum sowie die korrekte Berechnung von Verdeckungen, Schatten und Reflexionen zwischen digitalen und realen Objekten. Die Echtzeitberechnung von virtuellen Inhalten stellt dadurch hohe Anforderungen an die Hard- und Software. Das Tracking der Umgebung muss akkurat, robust und unabhängig von Umgebungslicht sein und in unbekannter Umgebung funktionieren. Außerdem sollten Sensoren auf kleine und große Entfernung funktionieren. Als problematisch wird außerdem der geringe Sichtbereich aktueller AR-Technologien sowie deren fehlende soziale Akzeptanz beschrieben.



Abb. 2.4: Auf einem Tablet können virtuelle, dreidimensionale Inhalte, wie ein Waschbecken, passend im Raum platziert werden [Hur18].



Abb. 2.5: Eine reale Szene wird mit einer virtuellen Brücke überlagert [Kli+01].

2.3 Interaktion mit dreidimensionalen Inhalten

Für die Interaktion im Dreidimensionalen werden Lösungen benötigt, um sechs Freiheitsgrade (engl. "degrees of freedom", DOF) abzudecken. Dabei sind jeweils für die Translation und Rotation auf drei Achsen entsprechend drei DOF notwendig. Da mit der zweidimensionalen Bewegung normaler Computer-Mäuse nur zwei DOF erreichbar sind, bedarf es anderer Lösungen, um im Dreidimensionalen zu interagieren.

Ein möglicher Ansatz wäre die Verwendung von sechs verschiedenen, eindimensionalen Schiebereglern, jeweils für einen Freiheitsgrad [Zha98]. Dies ließe sich einfach per normaler Maus bedienen, wäre jedoch sehr umständlich. Aus diesem Grund entwickelten die Forscher neue Eingabegeräte, welche mehr DOF bedienen können als eine gewöhnliche Maus. So entstanden Computermäuse, welche in Längsrichtung neigbar waren ("The Rockin' Mouse") oder ein Scrollrad für die z-Achse besaßen. Letzteres wird bekanntermaßen bis heute standardmäßig verbaut. Sechs Freiheitsgrade bieten jedoch erst komplexere Geräte, wie "Flying Mice" (the "Bat", "The Cricket", "the MITS Glove"). Diese wurden direkt an der Hand befestigt und dreidimensionale Bewegung sowie Rotation im Raum konnte z. B. direkt auf dreidimensionale Modelle abgebildet werden. Auch die überwiegende Zahl von kommerziell erhältlichen Joysticks und Trackballs bedienen sechs DOF. Dadurch

finden sich entsprechende Geräte bei 3D-Entwicklern oder 3D-Designern und somit auch bei Architekten wieder.

Da die Verwendung von Eingabegeräten mit sechs Freiheitsgraden viel Erfahrung und Konzentration erfordern, ist deren Nutzung in der Architektur nicht weit verbreitet. Stattdessen wird auf zweidimensionalen Arbeitsflächen zurückgegriffen. Dafür wird eine Ebene festgelegt, welche das 3D-Modell schneidet. Auf dieser Ebene können Schnittkanten des Modells mit der Ebene manipuliert werden. Wird die mögliche Interaktion nun noch auf Translation oder Rotation beschränkt, sind die übrigen zwei Freiheitsgrade mit einer Maus bedienbar.

In architektonischen Programmen spiegeln sich diese Schnittflächen in Grundrissen oder Seitenansichten wider. Der Architekt zeichnet beispielsweise Wände im Grundriss ein, wählt die Höhe der Etage in der Seitenansicht und anschließend kann ein dreidimensionales Modell des Hauses berechnet werden. Die dafür nötige Interaktion ist mit einer gewöhnlichen Computermaus realisierbar.

Architektonische TUIs

Eine andere Lösungsstrategie für die Interaktion mit dreidimensionalen Inhalten bieten Tangible User Interfaces, kurz TUIs. Sie beschreiben das Konzept einer anfassbaren Benutzerschnittstelle, bei welcher digitale Inhalte an physische Objekte gebunden werden [IU97]. In der Geschichte dieser Interfaces entstanden viele Prototypen im Bereich der Architektur. Dabei vereinfachte sich die traditionelle Interaktion mit Maus und Tastatur durch die haptisch greifbaren physischen Objekte.

Im grundlegenden Stadtplanungs-Prototypen Urp [UI99] konnten dreidimensionale Gittermodelle von Gebäuden auf einem Arbeitstisch platziert und verschoben werden. Die Position der Modelle wurde erkannt und es wurden auf dem Tisch entsprechende digitale Simulationen präsentiert, wie z. B. für Sonneneinstrahlung oder Wind (Abb. 2.6).

Einige Jahre später entstand mit einer ähnlichen Idee der "Luminous Table" [Ish+02]. Er integrierte sowohl physische als auch digitale Repräsentationen von zweidimensionalen Zeichnungen, dreidimensionalen Modellen und digitalen Simulationen. Diese Kombination half nicht nur, komplexe Beziehungen zwischen den verschiedenen Elementen der Stadtplanung zu entdecken, sondern förderte auch die Kreativität und die Kommunikation der an der Planung beteiligten Architektur-Studenten.

Im Bereich Augmented Reality entstanden Prototypen wie BenchWorks [Sei15] oder MagicCup [Kat+03]. Die physischen Modelle wurden durch dreidimensionale digitale Modelle ersetzt, die Werkzeuge zur Interaktion blieben aber haptisch greifbar. Dadurch konnten detaillierte, veränderbare Repräsentationen der Gebäude verwendet und das Verständnis für komplexe räumliche Beziehungen verbessert werden. Trotzdem blieb der Vorteil der haptischen Interaktion der TUIs erhalten.

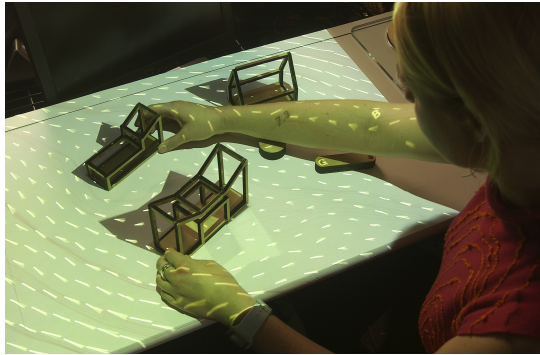


Abb. 2.6: Urp [UI99].

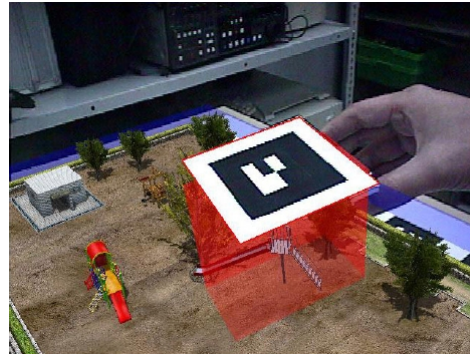


Abb. 2.7: MagicCup [Kat+03].

Interaktion in VR und AR

Die Interaktion in VR und AR unterscheidet sich grundlegend von der an einem zweidimensionalen Monitor. Eine Eingabe über Maus und Tastatur ist aufgrund der Mobilität und des dreidimensionalen Raumes unangebracht.

Besonders im VR-Bereich finden Controller Verwendung [Nie+17; Gor+14]. Diese Eingabegeräte werden im Raum, früher meist magnetisch, heute optisch, getrackt. Dabei kann sowohl ihre Position, als auch ihre Ausrichtung bestimmt werden, was in Anwendungen als eine Art virtueller Zeigestock genutzt werden kann. Außerdem bieten Controller meistens noch zusätzliche Buttons, Trackpads oder Joysticks zur Interaktion an. Damit können u. a. Objekte im Raum selektiert oder manipuliert werden. Meist finden dabei für alle Interaktionen dieselben universellen Controller Verwendung, doch wegen der Vielzahl an anwendungsspezifischen Bedeutungen gibt es auch Bestrebungen zur Entwicklung spezialisierter Formen [BP18]. Arisandi et al. beschreiben beispielsweise eine Zange, ein Messer, einen Hammer und einen Pinsel als Eingabegeräte für ihre AR-Anwendung [Ari+12]. Controller können außerdem für die Gestenerkennung genutzt werden [Hsi+17].

Gestensteuerung ist eher im AR-Bereich verbreitet [Bil13; Fun+17]. Gesten, also semantisch bedeutsame Bewegungen der Hände, Arme oder des gesamten Körpers, können z. B. über externe Geräte wie die Microsoft Kinect oder ein HMD aufgenommen werden. Sie werden analysiert und danach auf bestimmte Funktionen einer Anwendung abgebildet. Entsprechende Bewegungen des Körpers können aber auch direkt verwendet werden, beispielsweise um in einer 3D-Szene ein Objekt aufzuheben oder zu verschieben [Buc+04].

Ein Datenhandschuh kann dabei durch äußerlich angebrachte Marker oder interne Sensoren das Tracking der Hände verbessern. Außerdem ist er die verbreitetste Möglichkeit, taktiles Feedback bei Interaktionen mit den dreidimensionalen Inhalten zu geben. Über schwingende, akustische Elemente [Wu+17] oder elektrische Muskelstimulation [Lop+17] kann das Gefühl der Immersion von AR/VR-Szenarien dadurch verbessert werden.

Des Weiteren wird noch an anderen, alternativen Eingaben geforscht. Mirzaei et al. und Billinghurst integrierten Spracheingabe in AR-Anwendungen [Mir+12; Bil13],

Tanriverdi und Jakob, Cournia et al. und Pfeiffer setzten Blicksteuerung zur Interaktion in Virtual Reality ein [TJ00; Cou+03; Pfe07] und Lecuyer et al. steuerten mithilfe der eigenen Gedanken [Lé+08].

Insgesamt bieten besonders multimodale Konzepte die meisten Vorteile. Dies schließt sowohl beidhändige Bedienung [Kot+06] als auch die parallele Verwendung mehrerer Eingabekanäle [Mir+12] ein.

Aufgrund der ausgeblendeten Umgebung in VR, kann der Nutzer externe Eingabegeräte, wie eine Tastatur, nicht sehen. Erst durch das Einblenden virtueller Darstellungen des jeweiligen Gerätes wird eine Verwendung möglich. Dafür ist es allerdings ebenfalls nötig, die Hände des Nutzers virtuell zu präsentieren und ihm dadurch die Koordination des eigenen Körpers zu vereinfachen [Lin+17]. Ebenso sollte die räumliche Lage der gehaltenen Controller dargestellt werden. In kollaborativen Szenarien ist es außerdem notwendig, eine Repräsentation des Gegenübers oder einen Hinweis auf den aktuellen visuellen Fokus des Anderen darzustellen, um die Kommunikation zu erleichtern [Wan09].

O. g. Probleme sind in AR-Szenarien nicht gegeben, da es dem Nutzer noch möglich ist, seine Umgebung wahrzunehmen. Dies ermöglicht die Verwendung bekannter Eingabegeräte. Besonders der Einsatz berührungsempfindlicher, interaktiver Oberflächen ist an dieser Stelle zu nennen. Sie bieten, entgegen den bisher genannten Möglichkeiten, eine direkte Interaktionen. Die Eingaben sind präzise und können multimodal sein, sowohl durch beidhändige Interaktion als auch durch parallele Verwendung von Stift- und Berührungseingabe. Außerdem haben Eingaben den Vorteil des taktilen Feedbacks und die Benutzung entsprechender Geräte ist bekannt sowie sozial akzeptiert. Allerdings ist die Interaktion auf die Reichweite der Arme der Nutzer beschränkt.

Dabei können die interaktive Oberfläche und die Darstellungseinheit in einem Gerät verbunden, wie im Fall von Handys und Tablets, oder getrennte Geräte sein. Letzteres trifft auf das Konzept der "Augmented Displays" zu [RD18]. Dabei wird der Inhalt auf berührungsempfindlichen Displays um dreidimensionale Inhalte in einem AR-HMD erweitert. Dies verbindet die Vorteile der Eingabe über Touch und Stift mit der Möglichkeit der kombinierten Darstellung von 2D-Inhalten auf dem Display und 3D-Inhalten im Raum.

2.4 Sonstige verwandte Forschung

Neben den wichtigen Punkten Visualisierung von dreidimensionalen Inhalten und Interaktion mit diesen existieren noch einige weitere, interessante Forschungen.

Zum Rendern von hochrealistischen Szenarien ist es notwendig, natürliche und künstliche Beleuchtung in Übereinstimmung zu bringen. Ichikari et al. schlugen dafür eine Methode für die künstliche Beleuchtung von MR-Szenen vor [Ich+09]. Im ersten Schritt müssen dafür alle Schatten entfernt werden, um Paradoxa vorzubeugen. Dann kann der Farbton der Szene entsprechend der gewünschten Tageszeit angepasst werden. Im letzten Schritt muss die Szene mit künstlichen Lichtquellen neu beleuchtet werden. Dafür ist es notwendig, die ungefähre Geometrie der Szene zu kennen und das Reflektionsvermögen jeder Oberfläche zu schätzen. Auch Santos et al. beschrieben ein ähnliches Vorgehen, bei welchem HDR-Aufnahmen der Szene im Voraus auf globale Beleuchtungseffekte analysiert wurden, um in Echtzeit die Beleuchtung der Szene frei anpassen zu können [San+10].

Um zusätzliche, textuelle Informationen neben einem dreidimensionalen Modell richtig zu präsentieren, ist es notwendig, die veränderten Möglichkeiten in AR zu beachten. Rzayev et al. untersuchten die bestmögliche Platzierung und Art der Präsentation von Text in AR-Brillen wie der Microsoft HoloLens [Rza+18]. Dabei fanden sie heraus, dass ein Text in der Mitte oder mittig-unten platziert sein sollte. Außerdem schlagen sie für sich nicht bewegende Nutzer die Verwendung von RSVP (Rapid Serial Visual Presentation), anstelle von zeilenweisem Scrollen des Textes, vor, welche einzelne Wörter in schneller Folge nacheinander präsentiert.

Eine letzte zu nennende Arbeit ist ein Artikel von Yan et al [Yan+11]. In ihrem BIM-Spiel müssen die Nutzer erst ein Gebäude designen, um anschließend darin einen Avatar bewegen zu können. Die Software wandelt dabei im Hintergrund die Daten des Architekturprogramms Revit von Autodesk in Inhalte und Logik für das Spiel um. Dieser spielerische Ansatz fördert die Kreativität und verbessert das Verständnis der Nutzer für die Zusammenhänge zwischen Entwurf und späterer Nutzung.

2.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend werden nochmals einige wichtige Punkte im Bereich der Architektur, der Visualisierung und der Interaktion genannt.

In der Architektur bringt die Verbreitung von BIM viele Vorteile mit sich. Zum einen wird die Zusammenarbeit zwischen den Gewerben an einem Projekt effektiver, einfacher und weniger fehleranfällig. Zum anderen ermöglichen standardisierte Austauschformate den Zugriff auf eine große Menge akkumulierter Daten, was die Programmierung von Parsern und Erweiterungen für kommerziellen CAD-Programme ermöglicht.

Zwischen Virtual und Augmented Reality zeigen sich in der Architektur deutliche Unterschiede. Während in der Forschung oft AR-HMDs Verwendung finden, setzen Architekten in der Wirtschaft eher auf VR-HMDs oder AR-Anwendungen auf Mobilgeräten. Dies liegt sicher an der kommerziellen Verfügbarkeit entsprechender Geräte. In AR ist dabei besonders auf eine schnelle Bildwiederholfrequenz, ein genaues, robustes Tracking sowie die Vermeidung visueller Paradoxe zu achten.

Auch bezüglich der Interaktion mit dreidimensionalen Objekten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Virtual und Augmented Reality. Controller bieten mehr Möglichkeiten als Gesten, sind aber meist weniger natürlich und intuitiv. Dagegen kann die Verbindung mit weiteren Arten der Eingabe wie beispielsweise Sprachsteuerung helfen.

In VR müssen visuelle Hinweise auf die eigenen Gliedmaßen oder verwendete Eingabegeräte gegeben werden, um die Interaktion zu verbessern. In AR trifft diese Beschränkung nicht zu und außerdem können traditionelle Eingaben wie Tastatur oder berührungsempfindliche Oberflächen weiterhin verwendet werden.

Diese Erkenntnisse müssen in den Entwurf von Konzepten einfließen, um Probleme zu vermeiden. Außerdem bieten verwandte Forschungen auch eine Vielzahl an Ideen, um sie in einer Augmented-Reality-Anwendung im Bereich der Architektur anzuwenden.

Konzepte

Im folgenden Kapitel werden Konzepte für eine AR-Anwendung im Bereich der Architektur erläutert. Diese nutzt die dreidimensionale Darstellung in einem AR-HMD in Verbindung mit zweidimensionalen Inhalten auf einer interaktiven Oberfläche. Dafür werden die Informationen aus einem typischen BIM-Projekt verwendet und entsprechend aufbereitet. Zusätzlich sollen, gemäß den im Kapitel 2 beschriebenen Prototypen aus der Forschung, Interaktionen mit dem Modell möglich sein.

Zur Illustration des Rahmens für die Diskussion der Konzepte soll folgendes grundlegendes Szenario dienen:

Architektin Alice will ihrem Kunden Bob den Entwurf des neuen Wohnhauses präsentieren, welches sie für ihn entwickelt hat. Dafür hat sie Bob in den Präsentationsraum ihres Architektenbüros eingeladen. Hier setzen sich beide ein AR-HMD auf und positionieren sich um ein Tabletop-Display. Nach dem Start der Anwendung erscheint auf dem touchfähigen Display ein Grundriss und exakt darüber ausgerichtet sehen sie ein entsprechendes dreidimensionales Modell des Gebäudes. Nun beginnt Alice damit, die groben und feinen Details ihres Entwurfes zu erläutern. Anschließend diskutieren beide über mögliche Änderungen des Modells ganz nach den Vorstellungen von Bob.

3.1 Modell-Präsentation

Dieser Abschnitt erörtert die Möglichkeiten der Darstellung des gesamten Gebäudes beziehungsweise einzelner, selektierter Etagen. Abb. 3.1 stellt verschiedene Arten der Präsentation dar, welche im Folgenden näher erklärt werden.

Variante A ist die Darstellung des gesamten Gebäudes. Die Unterkante des Erdgeschosses befindet sich dabei direkt auf der Tischoberfläche. Die Untergeschosse sind darunter im Volumen des Displays enthalten und sichtbar, die Obergeschosse entsprechend darüber angeordnet. Alle Wände sind opak, durch die Fenster kann aber in das Innere der Räume geschaut werden. In Variante B ist ebenfalls das gesamte Gebäude sichtbar, allerdings wird eine einzelne Etage selektiert. Dadurch werden alle anderen Etagen teildurchsichtig und schwarz-weiß, sodass der Blick auf die gewählte Etage frei ist. In Variante C werden bei der Auswahl einer Etage alle darüber liegenden Geschosse ausgeblendet, sodass ein Betrachter von oben in

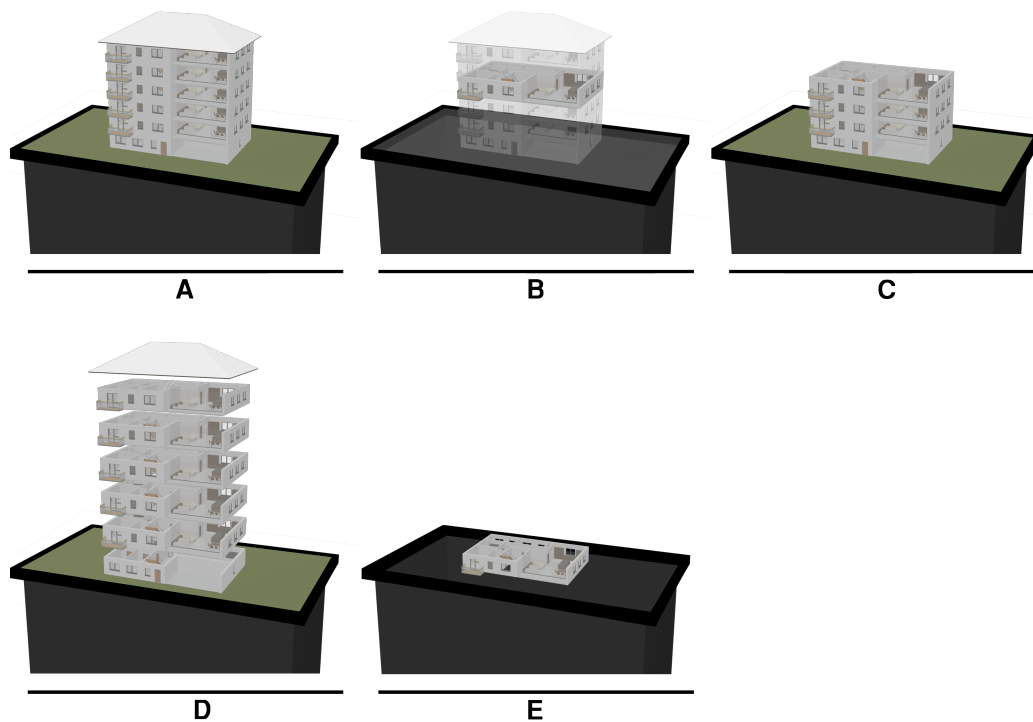


Abb. 3.1: Verschiedene Arten der Darstellung des Gebäudes.

die Räume schauen kann. In Variante D sind die Etagen der Reihe nach vertikal aufgefächert. Das Erdgeschoss ist dabei abermals auf der Displayoberfläche fixiert. Der Abstand zwischen den Etagen ist angemessen groß, sodass ein Blick in jede Etage möglich ist. Dafür müssen alle Geschossdecken ausgeblendet werden. Bei Variante E ist nur eine einzelne selektierte Etage sichtbar, alle anderen Geschosse sowie die Geschossdecken sind ausgeblendet. Dieser Teil des Modells ist dabei auf die Displayebene verschoben, unabhängig von der realen Position der Etage.

In den Varianten A, B und D ist es möglich, das Haus in seiner Gesamtheit zu betrachten. Dies unterstützt die Gewinnung eines Gesamteindrucks. Werden zusätzlich zum Modell noch Nachbargebäude oder das Grundstück eingeblendet, dann helfen diese Ansichten dem Betrachter auch bei der Eingliederung des Gebäudes z. B. in einen Straßenzug. Dieser Eindruck ist bei der opaken, zusammenhängenden Fassade von Variante A am stärksten ausgeprägt, allerdings bietet diese keine Möglichkeit des Einblickes in die einzelnen Räume. Alle anderen Varianten bieten hingegen diese Möglichkeit, wobei der Einblick unterschiedlich gut ist. In Variante B versperrt eine Vielzahl von halbtransparenten Wänden und eventuellen Einrichtungsgegenständen die Sicht in die Räume. In Variante D ist, abhängig vom Abstand der gefächerten Etagen, nur ein Blick von der Seite möglich und keine direkte Draufsicht. Die Varianten C und E gewähren eine direkte, ungestörte Sicht in die selektierte Etage. Allerdings sind nicht mehr alle Teile des Modells dargestellt, was dem Gesamteindruck des Gebäudes schadet.

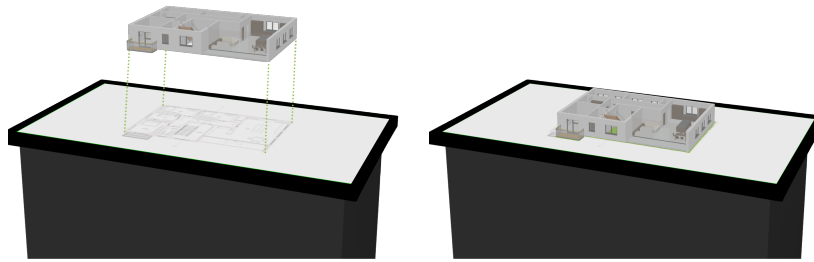


Abb. 3.2: Bezug zwischen Grundriss und Modell bei verschiedenen Anordnung der selektierten Etage.

Weiterhin ist der Bezug zum Grundriss von Bedeutung. Auf dem Display wird jeweils der zur selektierten Etage passende Grundriss angezeigt. In den Varianten A bis D ist jedoch die selektierte Ebene auf der maßstabsgerechten Höhe dargestellt. Durch den Abstand zwischen Etage und Display entsprechend Abb. 3.2 (linke Seite) geht die Referenz zum Grundriss verloren, was jedoch der grundlegende Gedanke hinter der Kombination von AR und Tabletop ist. Deswegen erweist es sich als vorteilhaft, das Modell so auf der z-Achse zu verschieben, dass die jeweils selektierte Etage bündig auf der Oberfläche des Displays dargestellt wird. Dadurch stehen die Wände des dreidimensionalen Modells immer direkt auf der Darstellung im Grundriss (entsprechend Abb. 3.2 rechts). Dies ist optimal für spätere Interaktionen (3.2) oder Manipulationen des Modells (Kapitel 3.3). Allerdings diente vorher die Oberfläche des Displays als Referenz für die Erdoberfläche des Grundstückes und damit der Unterteilung in Ober- und Untergeschosse. Dieser Hinweis muss bei der Verschiebung erhalten bleiben, z. B. durch die Darstellung einer halbtransparenten horizontalen Fläche, welche zusammen mit dem Modell verschoben wird und die Oberfläche repräsentiert.

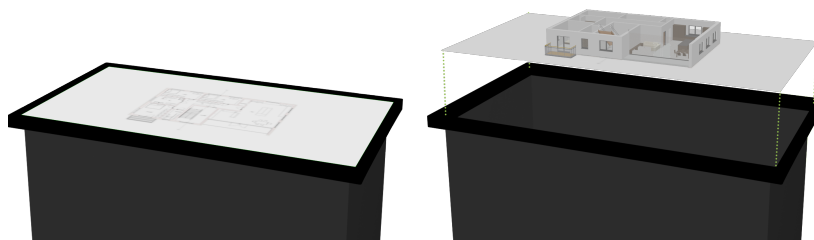


Abb. 3.3: Darstellung des Grundrisses auf dem Display oder in AR.

Der Grundriss kann sowohl in 2D auf dem Tabletop-Display als auch im AR-HMD als zweidimensionales Element dargestellt werden (siehe Abb. 3.3). Letzteres hätte den Vorteil, dass anstelle des Modells auch der Grundriss auf der z-Achse verschoben werden könnte, sodass er immer unterhalb der selektierten Etage platziert ist. Außerdem wären Abweichungen in der Registrierung zwischen Grundriss und Modell damit

ausgeschlossen. Allerdings ist bei dem heutigen Stand der Technik ein deutlicher Unterschied zwischen der Darstellungsqualität eines Tabletops und eines AR-HMDs festzustellen. Deswegen wäre ein auf dem Display angezeigter Grundriss detaillierter, kontrastreicher und somit besser lesbar.

Dabei ist auf die Helligkeit des Displays zu achten. Weiße Inhalte wie im Falle eines Grundrisses interferieren mit den Darstellungen des Modells im AR-HMD. Eine Möglichkeit wäre die Invertierung des Plans, sodass alles schwarz ist und nur die Linien weiß hervortreten. Dies ist allerdings im Bereich der Architektur eine ungewohnte Art der Darstellung. Deshalb sollte ein *Toggle* zwischen beiden Varianten wechseln, um auf Präferenzen reagieren zu können.

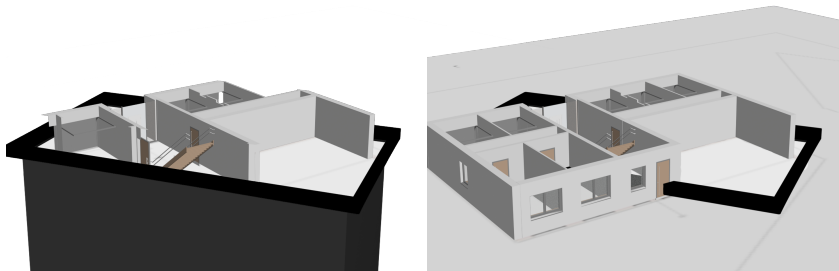


Abb. 3.4: Clipping am Rand des Displays verhindert visuelle Paradoxe.

Wegen der beschränkten Ausdehnung der Displayfläche muss über die Darstellung des Modells außerhalb der Grenzen reflektiert werden. Entsprechend Abb. 3.4 kann das Modell an der Kante beschnitten werden (links) oder darüber hinauslaufen (rechts). Der letztere Fall setzt eine virtuelle Grundrisserweiterung voraus, da sonst der Bezug zwischen dem überhängenden Modellteil und dem dazugehörigen Abschnitt des Plans verloren geht. Dieser Überlauf kann außerdem zu visuellen Paradoxien führen, beispielsweise wenn eine Ecke des Modells den Körper eines Betrachters schneidet. Eine Begrenzung auf die Kanten des Displays vermeidet derartige Probleme. Dabei ist auf die Art der Beschneidung des Modells zu achten. Wird das Modell direkt an den Flächen, senkrecht zu den Kanten des Displays, abgeschnitten, entstehen visuelle Artefakte, wie halbierte Schränke o. ä. Ansprechender ist eine vollständige Ausblendung eines Einrichtungsgegenstandes, sobald eine Ecke des Objektes die Kanten des Displays überlappt. Wände hingegen können ohne visuelle Auffälligkeiten direkt senkrecht zur Kante abgeschnitten werden.

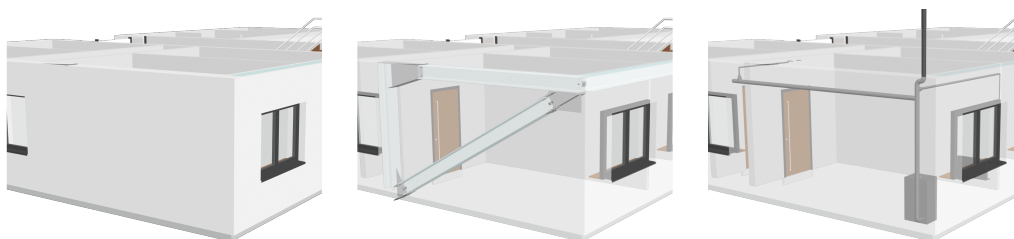


Abb. 3.5: Verschiedene Ansichten zeigen unterschiedliche Elemente des BIM-Projektes.

Die einfachste Art der Darstellung des Modells zeigt ausschließlich alle Wände, Fenster und Türen. Doch Dank der in einem BIM-Projekt enthaltenen Daten (siehe Kapitel 2.1) ist eine Vielzahl möglicher Ansichten denkbar. Entsprechend Abb. 3.5 können in den Wänden verborgene Stützstrukturen abgebildet werden. Dafür müssen Wände Halbtransparenz zugewiesen bekommen, um die Sicht auf enthaltene Elemente, wie Träger oder Bewehrungen freizugeben. Eine weitere Möglichkeit stellt die Visualisierung der Verläufe von Rohren und Stromkabeln dar. Dabei sollten sich Leitungen für Regen-, Leitungs-, und Abwasser durch entsprechende farbliche Markierung unterscheiden. Ebenso ist eine Kennzeichnung voneinander getrennter Stromkreise sinnvoll, um die räumliche Platzierung von Großgeräten, wie Herd oder Waschmaschine, zu vereinfachen. Weiterhin ist eine Visualisierung von Wärmeleitungen, (Fußboden-) Heizungen oder Belüftungssystemen denkbar.

Diese genannten Darstellungen erweitern die Inhalte eines gewöhnlichen Grundrisses um ein Vielfaches, da auf einem Plan keine dreidimensionalen Informationen abgebildet werden können. Die Präsentation verschiedener Aspekte eines BIM-kompatiblen 3D-Modells in AR bietet somit die Möglichkeit, dem Kunden sowohl den räumlichen Eindruck des Gebäudes im Detail als auch die Abhängigkeiten zwischen Wänden, Strukturen und Leitungen zu vermitteln. Damit lässt sich eine Prüfung des angestrebten Raumkonzeptes realisieren, z. B. in der Frage, ob ausreichend Steckdosen an den richtigen Stellen vorhanden sind. Auch der Architekt profitiert von zusätzlichen 3D-Informationen. Er hat alle Daten im Blick und kann damit auf Wünsche des Kunden gezielt eingehen. Mögliche Fragen wie: "Kann diese Wand noch entfernt werden?" lassen sich nach kurzer Betrachtung der Stützstrukturen und Leitungen leicht beantworten. Mit einem normalen Grundriss wäre diese Entscheidung nicht sofort möglich, da erst in anderen Plänen, z. B. des Statikers oder der Ingenieure, nachgeschaut werden müsste.

3.2 Modell-Interaktion

Die Interaktion mit dem Modell beinhaltet eine affine Transformation sowie die Selektion einer einzelnen Etage. Beide Funktionen lassen sich sowohl direkt am Modell als auch über den Grundriss oder dedizierte Schaltflächen auf dem Display realisieren.

Eine Transformation des Modells mit Hilfe von Gesten ist denkbar. Mit der flachen Hand kann das Modell verschoben und mit einem Griff an zwei Punkte am Modell skaliert und rotiert werden. Da eine derartige Interaktion allerdings wenig verbreitet und damit den meisten Nutzern unbekannt ist, wäre es optimaler auf eine indirekte Model-Transformation über den Grundriss zurückzugreifen. Die direkte Abbildung

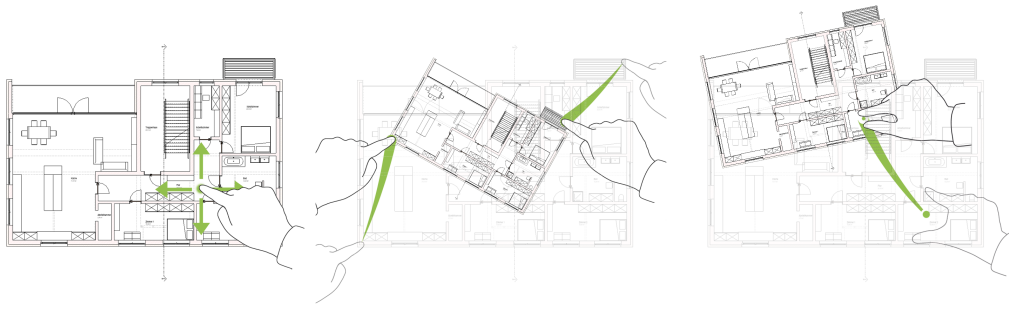


Abb. 3.6: Berührungsinteraktion mit einem Finger für Translation und zwei Fingern für Rotation, Skalierung und Translation.

zwischen Grundriss und Modell führt über eine affine Transformation des Plans zu einer entsprechenden Transformation des Modells.

Entsprechend Abb. 3.6 ist eine Eingabe per Finger denkbar. Bewegungen mit einem Finger verschieben den Plan. Jeweils ein Finger beider Hände auf dem Display führt zu einer gleichzeitigen Rotation, Skalierung und Translation des Grundrisses. Zwei Finger derselben Hand erfüllen dieselbe Funktion. Diese Abbildung von Bewegungen auf Transformationen knüpft an den Umgang mit gedruckten Grundrissen bzw. an bekannte Interaktionsmuster wie die Pinch-Geste an. Dadurch sind genannte Interaktionen intuitiv sowie einfach zu verstehen und können mit beiden Händen gleichermaßen ausgeführt werden.

Bezüglich der einzelnen Bestandteile der Transformation bestehen unterschiedliche Einschränkungen. Die Translation sollte auf die Kanten des Displays beschränkt werden, um Verschiebungen weit außerhalb des Tabletop und visuelle Paradoxe, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, zu vermeiden. Die Skalierung sollte durch einen Mindest- und einen Maximalwert beschränkt sein. Zu kleine Modelle sind schlecht zu erkennen und bei Beschneidung des 3D-Modells an den Kanten des Displays, sollte es nicht zu groß werden. Eine Rotation kann generell überflüssig sein, da die Betrachter um den Tisch herum laufen können, um das Modell von allen Seiten zu betrachten. Sitzen der Architekt und der Kunde hingegen am Tabletop, ist eine Rotation hilfreich, um das Modell aus allen Himmelsrichtungen betrachten zu können. Ein *Toggle* bietet die Möglichkeit, auf beide Ausgangslagen zu reagieren. Ebenso ist eine Beschränkung auf 90°-Drehwinkel hilfreich, da die Grundfläche von Häusern für gewöhnlich ein Rechteck ist und somit vier Betrachtungsrichtungen ausreichend sind. Eine Scherung ist in der Architektur unangebracht, weil die Verhältnisse sowie die Winkel zwischen den Wänden verloren gehen.

Die Auswahl einer Etage kann direkt am Modell im Raum erfolgen. Zur Selektion kann eine *Tap*-Geste in Kombination mit einem Blick auf einen zur Etage gehörenden Fassadenabschnitt dienen. Eine derartige Eingabe ist intuitiv und leicht auszuführen. Um Gesten im Raum zu vermeiden, muss die Auswahl der Etage über das Display er-

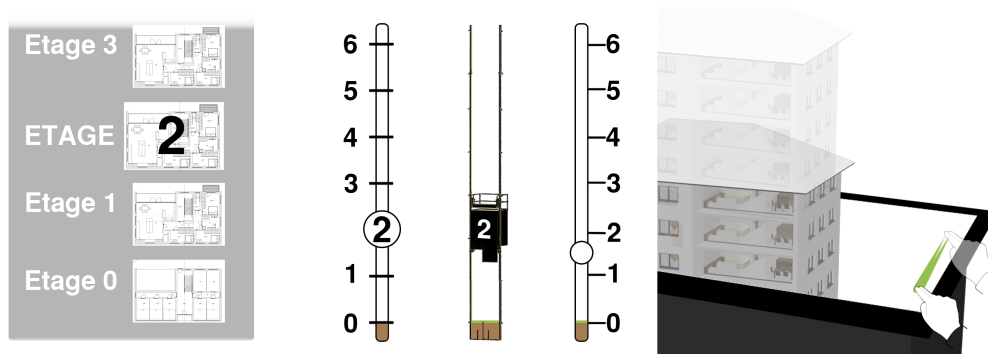


Abb. 3.7: Verschiedene Möglichkeiten um eine Etage zu wählen.

folgen. Dabei können dedizierte Schaltflächen oder Schieberegler verwendet werden. Entsprechend Abb. 3.7 ist ein Menü mit Vorschauen jeder Etage denkbar. Berührt ein Nutzer eine bestimmte Grafik, wird die dazugehörige Etage selektiert und die Vorschau entsprechend markiert. Zur Auswahl können auch Schieberegler genutzt werden. Dabei sollten die Etagen sowie die Erdoberfläche gekennzeichnet sein, um dem Betrachter die Orientierung zu vereinfachen.

Alternativ kann auch eine Geste auf dem Display erkannt werden. Bewegen sich zwei Finger direkt nebeneinander vertikal über den Grundriss, kann dies einen Etagensprung nach oben bzw. unten bedeuten. Um Probleme mit der Zwei-Finger-Skalierung/Rotation zu vermeiden, kann für diese Scroll-Geste auch ein bestimmtes Gebiet am Rand des Displays bereitstehen.

Besonders bei der Verwendung einer Geste ohne dedizierte Schaltflächen muss der Betrachter stets einen direkten Hinweis darauf bekommen, welche Etage er gerade betrachtet. An dieser Stelle hilft ein vereinfachtes Hausmodell als "Minimap". In dieser dreidimensionalen Vorschau muss die Fassade enthalten und die aktuelle Etage deutlich hervorgehoben sein. Ein derartiger Hinweis verwendet die Vorteile von AR, anstatt einen einfachen Text auf dem Display mit der aktuellen Etagennummer darzustellen.

Wenn die aktuelle Etage immer auf dem Display platziert wird (siehe Kapitel 3.1), sollte beim Wechsel der Etage auf einen kontinuierlichen Übergang geachtet werden. Dies gibt den Betrachtern einen Hinweis auf eine erfolgte Verschiebung und beugt damit Verwirrung vor.

In einigen architektonischen Präsentationsprogrammen werden Funktionalitäten angeboten, um einen Schnitt in einer beliebigen Höhe des Gebäudes zu machen. Oberhalb des Schnittes wird alles ausgeblendet und somit kann der Architekt in Wände schauen oder mehrere Etagen überspannende Räume betrachten. Ähnliches könnte im Modell mithilfe eines kontinuierlichen anstelle eines diskreten Schiebereglers erreicht werden. Ebenso könnte die Scroll-Geste keinen Etagensprung bewirkt, sondern die Schnittfläche verschiebt. Da den meisten Kunden aber eine Darstellung der einzelnen Etagen ausreicht, ist eine entsprechende Funktionalität für den gewählten Anwendungsfall nicht nötig.

3.3 Modell-Manipulation

Neben der Transformation des Modells und der Wahl einer Etage sind verschiedene Arten der Manipulation des Modells möglich. Durch die Kombination des zweidimensionalen Grundrisses und dem dreidimensionalen Modell kann über Berührung in 2D gearbeitet werden, während Änderungen in 3D zu sehen sind.

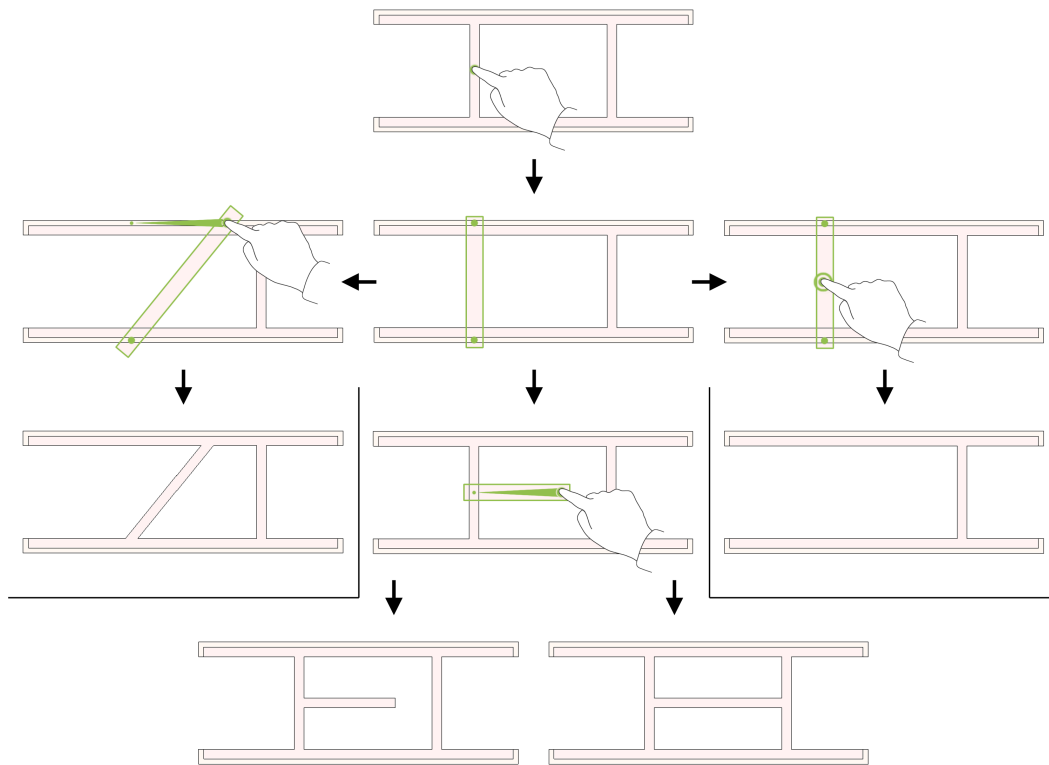


Abb. 3.8: Möglichkeiten, um im Grundriss Wände zu verändern (links), zu erstellen (Mitte) und zu löschen (rechts).

Wie in Abb. 3.8 dargestellt, können Wände des importierten Grundrisses verändert werden. Mit einem *Tap* auf eine Wand wird diese selektiert, hervorgehoben und es erscheinen Kontrollpunkte in den Ecken. Mit einem *Drag* können diese Ecken entlang der Wand, auf welcher sie liegen, oder auch frei verschoben werden. Mit einem *Drag* aus dem Inneren der Wand kann eine neue Wand erstellt werden. Das eine Ende bleibt auf dem Ausgangspunkt auf der selektierten Wand hängen, das andere folgt dem Finger. Beim Loslassen verweilt der zweite Endpunkt an entsprechender Stelle oder springt auf eine benachbarte Wand, wenn sie nah genug ist. Durch ein doppeltes, schnelles Tippen auf eine selektierte Wand kann diese entfernt werden. Die beschriebenen Mechaniken wären ausreichend, um Wände zu kreieren, zu bearbeiten und zu löschen.

Die dreidimensionalen Präsentationen von Wänden sollten während der Bearbeitung

ausgeblendet werden, um den Blick auf den Grundriss freizugeben. Bei Selektion müssen die Wände also deaktiviert und beim Abschluss der Aktion in veränderter Form wieder aktiviert werden. Ebenso wäre eine Drahtgitterdarstellung während der Bearbeitung möglich, um nicht den dreidimensionalen Eindruck zu verlieren.

Neben den Änderungen am Haus selbst ist besonders die Inneneinrichtung für den Eindruck auf den Kunden wichtig. Dabei spielen die gewählten Materialien für Wände, Böden und Decken ebenso wie die Platzierung von Objekten eine bedeutende Rolle.

3.3.1 Materialien

Für fotorealistische Visualisierungen von Gebäuden ist es besonders in den Innenräumen wichtig, allen Wänden, Böden und Decken physikalisch korrekte Materialien zuzuweisen. Sobald simpel eingefärbte Wände durch fotorealistische Tapeten bedeckt sind und das verlegte Parkett täuschend echt aussieht, erhöht sich die Immersion deutlich. Unterschiede sind dabei am kleinen Modell nicht so auffällig wie später in der Innenansicht (siehe Kapitel 3.4).

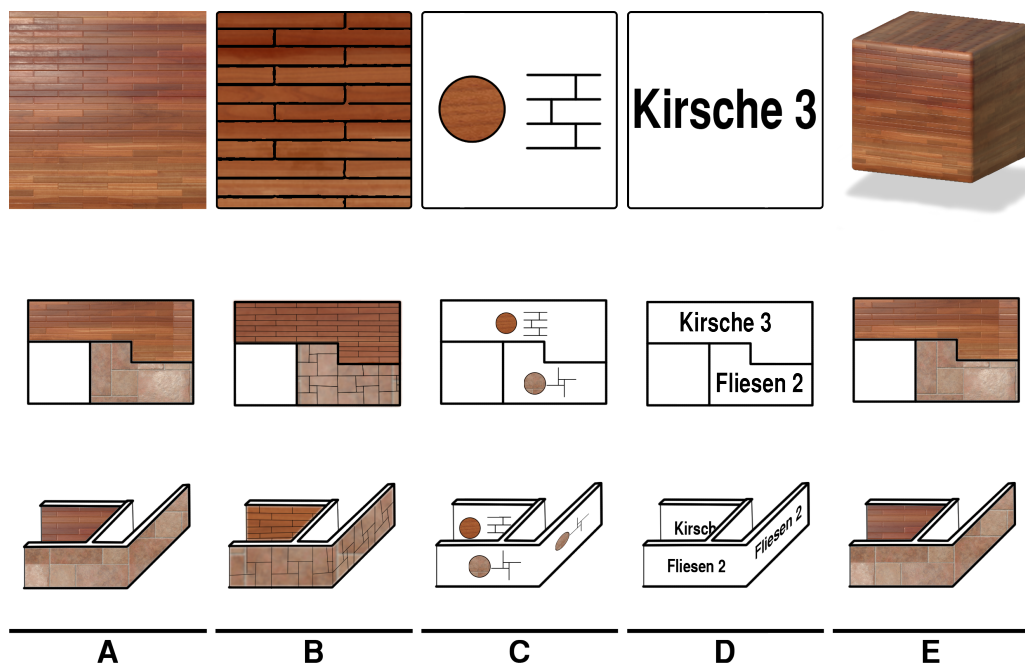


Abb. 3.9: Möglichkeiten der Darstellung der Materialien.

Materialien können auf unterschiedliche Arten dargestellt werden. Abb. 3.9 zeigt verschiedene Möglichkeiten. Die Zeilen stellen dabei das Aussehen im Material-Menü, im Grundriss und im Modell dar. Die Darstellungsvariante A ist das fotorealistische Aussehen des Materials. Durch komplexe Berechnungen werden Materialeigenschaften wie Farbe, Rauigkeit oder Reflektionen korrekt wiedergegeben. Für Variante B

wird das Material vereinfacht und stilisiert, die grobe Farbe und Musterung ist dabei noch zu erkennen. In Variante C wird das Material durch eine Symbolkombination ersetzt. Eine mögliche Konvention für Symbole wäre die Kombination aus dem grundlegenden Material und der Kachelung. In Abb. 3.9 steht der Kreis für Kirschholz und das Muster für gleichmäßiges Parkett. Für Variante D werden textuelle Bezeichner für jedes einzelne Material verwendet. Die Variante E nutzt die Möglichkeiten des AR-HMDs aus und stellt schwebende Objekte dar, welche in die Materialien gekleidet sind. Dabei wird auch die physikalisch korrekte Präsentation verwendet.

Zur Darstellung im Menü eignen sich die Varianten A (auf Tabletop) oder E (in AR) am besten, weil der Nutzer sofort einen Eindruck vom späteren Aussehen des Materials bekommt. Letzteres hat außerdem einen Vorteil bei der Betrachtung aus der Ferne. Unabhängig von seinem Standpunkt sieht ein Betrachter mindestens eine Seite frontal. Durch eine Bewegung des Würfels können außerdem veränderte Lichtverhältnisse und somit Reflektionen dargestellt werden. Zur Unterscheidung von sehr ähnlichen Materialien kann eine Kombination mit einem textuellen Bezeichner wie in Variante D vorteilhaft sein.

Im Grundriss sowie im Modell sind A oder B zu verwenden. Dabei ist B eher für kleine Modelle sinnvoll, da die stilisierte Form als Repräsentant dienen kann und nicht wie A korrekt skaliert sein muss. Variante A sollte für Darstellungen im Maßstab 1:1 verwendet werden, da an dieser Stelle die Immersion wichtig ist und abstrahierte Materialien somit nachteilig wären (siehe Kapitel 3.4).

Weiterhin ist auf die Art der Darstellung der einzelnen Untergruppen Wand, Boden und Decke zu achten. Wände können nur im Modell ein Material zugewiesen bekommen, da sie im Grundriss auf eine Linie beschränkt sind. Böden können sowohl im Grundriss als auch im 3D-Modell dargestellt werden. Allerdings würde ein Boden im Modell die Sicht auf den Grundriss überlagern. Deswegen ist es sinnvoller, das Material im Zweidimensionalen darzustellen. Dabei muss die Überlagerung von Materialien mit anderen grafischen Darstellungen, z. B. von Einrichtungsgegenständen oder Raumbezeichnungen, vermieden werden. Decken sind in den meisten Modell-Ansichten ausgeblendet (siehe Kapitel 3.1), wodurch eine Materialzuweisung nicht erkennbar ist. Erst in der Innenansicht sind Decken sichtbar. Deswegen müssen im Grundriss oder im Modell Hinweise auf ein zugewiesenes Deckenmaterial gegeben werden, z. B. in Form eines Symbols, damit der Nutzer nicht den Eindruck einer fehlgeschlagenen Zuweisung bekommt.

Da Materialien sowohl Wänden, als auch Böden oder Decken zugewiesen werden können, sind pro Material auch mehrere Ziele denkbar. Beispielsweise können Fliesen sowohl den Boden bedecken, als auch eine Wand zieren. Im System müssen Materialien dementsprechend einen Verweis darauf bekommen, auf welche der bis zu drei Ziele sie anwendbar sind. Alternativ können auch separate Materialien für Wand, Decke und Boden angelegt werden, welche aber im Modell identisch aussehen.

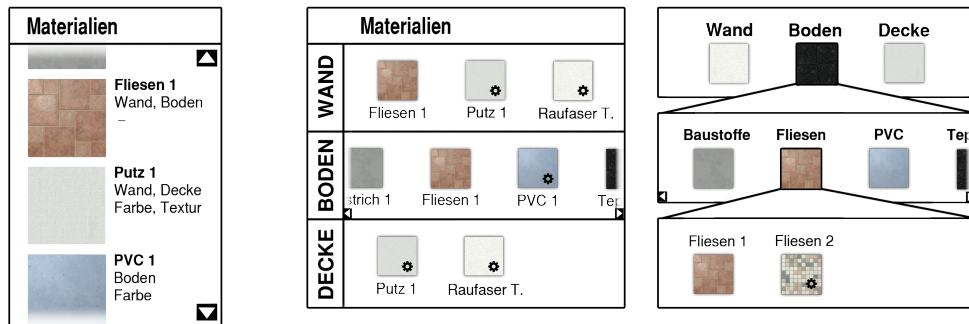


Abb. 3.10: Drei verschiedene Möglichkeiten eines Menüs für die Materialauswahl.

Je nachdem wie Materialien angelegt werden, ändert sich der Aufbau des Menüs zur Wahl eines Materials für die spätere Zuweisung. Eine Liste wie in Abb. 3.10 links wäre geeignet, um Materialien mit mehreren Zuweisungsoptionen anzubieten. Das Material ist sichtbar und dessen Eigenschaften sind daneben annotiert. Eine Anordnung der Materialien wie in der mittleren Abbildung wäre für beide Varianten geeignet. Dabei sind die Materialien in einzelnen Gruppen angeordnet, sortiert nach Wand, Boden und Decke. Materialien mit mehrfachen Zuweisungsoptionen wären in mehreren Gruppen dargestellt. Die rechts abgebildete Art eines Menüs setzt auf eine hierarchische Ordnung der Materialien. Dabei existieren die Oberklassen Wand, Boden und Decke. Diese unterteilen sich jeweils in verschiedenen Materialarten, wie Tapeten, Fliesen oder Putz. Darin sind jeweils eine Vielzahl möglicher Materialien enthalten. Die Übersichten für Gruppen zeigen die Präsentation eines typischen Vertreters dieser Gruppe. Alternativ ist eine Darstellung mehrerer Vertreter als miniaturisierte Vorschau möglich. Allerdings ist dies unübersichtlicher.

In allen drei Konzepten sind die Darstellungsbereiche meist nicht ausreichend, um alle möglichen Materialien zu präsentieren. Demnach ist im ersten Beispiel vertikales, in den beiden anderen horizontales Scrollen nötig.

Die ersten beiden Arten eines Menüs sind schnell und intuitiv zu bedienen. Sie stoßen jedoch mit zunehmender Anzahl an möglichen Materialien schnell an ihre Grenzen. Der Nutzer müsste in einer Liste mit hunderten Materialien sehr lange scrollen, um das Gewünschte zu finden. Eine hierarchische Anordnung verhilft hingegen zu einer schnelleren Eingrenzung der Liste an Möglichkeiten.

Zur leichteren Bedienbarkeit des Materialmenüs können folgende zusätzliche Bereiche eingeführt werden. Eine Liste an zuletzt verwendeten Materialien hilft dabei, erneutes Suchen im Menü zu vermeiden. Weiterhin wäre das Anlegen einer Favoritenliste vorteilhaft, da sich der Nutzer nur die für ihn wichtigen Materialien abspeichern kann. Eine Favoritenliste setzt auf einen aktiven Vorgang der Speicherung, eine Zuletzt-Verwendet-Liste nimmt dem Nutzer diese Arbeit ab, ist jedoch nicht persönlich anpassbar. Eine weitere Vereinfachung wäre die Präsentation von Alternativen bei der Selektion eines Materials, z. B. mit ähnlicher Farbe oder Preisklasse. Wenn der Kunde nur eine ungefähre Vorstellung hat, wie ein Raum aussehen

soll, kann er seine Idee über diese Vorschläge möglicherweise konkretisieren. Der Architekt hingegen kann schnell auf geringe Änderungswünsche wie z. B. etwas breitere Dielen reagieren.

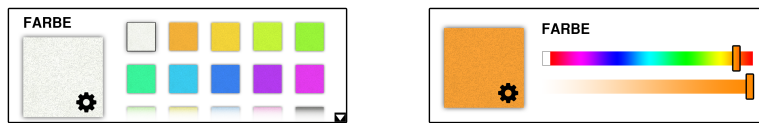


Abb. 3.11: Zwei Möglichkeiten zur Anpassung von Materialeigenschaften.

Um die Materialauswahl zu reduzieren, können bestimmte Eigenschaften als Variable in einem Material gekapselt werden. Beispielsweise ist dieselbe Art an Raufasertapete mit verschiedenen Farben streichbar. Entsprechend Abb. 3.11 erscheinen nach der Materialelektion Auswahlmöglichkeiten für bestimmte Eigenschaften. Dabei können entweder Thumbnails des Materials mit verschiedenen Werten der Eigenschaft angezeigt oder über eine Schaltfläche direkt angepasst werden. Letzteres führt zu Problemen, wenn derselbe Eigenschaftswert reproduziert werden muss, z. B. um dieselbe Farbe unter 16 Millionen Farben erneut zu treffen. Eine endliche Auswahl an definierten Eigenschaftswerten spiegelt außerdem die Realität wider. Architekten bzw. ihre Vertragspartner verwenden das Pantone- oder RAL-Farbsystem für Wände und favorisieren dabei bestimmte Materialien und Farbkombinationen. Eine Liste bestimmter Eigenschaftswerten gibt diese Favorisierung entsprechend wieder.

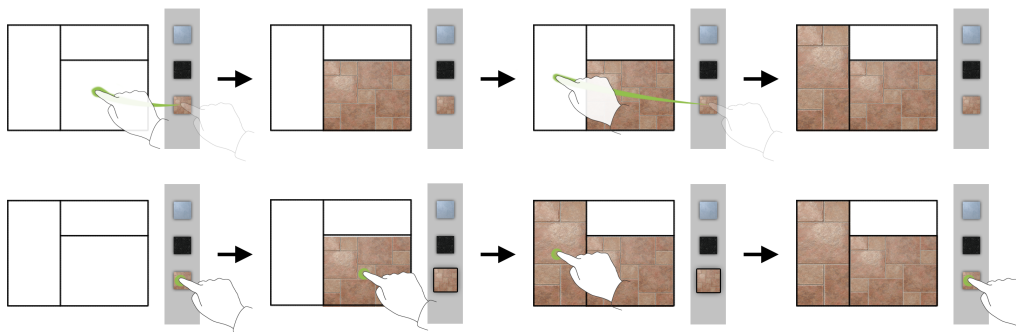


Abb. 3.12: Zuweisung von Materialien per *Drag'n'Drop* oder per Selektion und mehrfachen Raumwahl.

Ausgewählte Materialien müssen anschließend zugewiesen werden. Dies kann am Grundriss oder im Modell bzw. in der Innenansicht erfolgen. Allerdings ist die direkte Eingabe über den Tabletop zu bevorzugen. Gemäß Abb. 3.12 kann die Zuweisung vom Menü zum Grundriss per *Drag'n'Drop* erfolgen. Der Nutzer legt seinen Finger auf ein Material, verschiebt ihn zum gewünschten Raum und hebt ihn wieder ab. Das gewählte Material wird im Raum zugewiesen. Alternativ kann ein Material selektiert werden, wodurch es hervorgehoben wird. Nun kann der Nutzer beliebige Räume antippen, wobei jedem die Selektion zugewiesen wird. Durch erneutes Tippen auf das hervorgehobene Material oder durch Wahl eines anderen wird die Selektion auf-

gehoben bzw. verändert. Erstgenanntes benutzt eine einheitliche Bewegung und gibt dem Nutzer durchgängiges Feedback zu seiner Aktion. Allerdings kann auf einem Tabletop die Entfernung zwischen Start und Ziel sehr lang sein, was zu Fehlern in der Zuweisung sowie Ermüdung führen kann. Die zweite Methode erlaubt es, dasselbe Material mehreren Räumen gleichzeitig zuzuweisen. Jedoch sind drei aufeinanderfolgende Aktionen nötig: Selektion, Zuweisung, Deselektion. Beide Möglichkeiten können parallel implementiert sein, um auf die jeweiligen Präferenzen des Nutzers einzugehen.

Bei der Zuweisung muss die Anwendung wissen, ob das Material den Wänden, dem Boden oder der Decke zugeordnet werden soll. Diese Entscheidung ist leicht getroffen, wenn jedes Material nur jeweils einem Typ zugewiesen werden kann. Ist dies nicht der Fall, kann das Ziel vor der Zuweisung per Schaltfläche bestimmt werden. Alternativ können im Grundriss bestimmte unterscheidbare Zielgebiete dargestellt sein, beispielsweise in Form von Kreisen nahe den Wänden sowie im Inneren eines Raumes mit der Beschriftung "Decke" oder "Boden".

Wenn Materialeigenschaften angepasst werden können, ist zu entscheiden, ob diese auch nach der Zuweisung eines Materials zu einem Raum noch veränderbar sind. Sollte dies möglich sein, muss zwischen der Zuweisung als Referenz oder als Instanz unterschieden werden. Bei Referenzen würde die nachträgliche Änderung eines Materials zu einer Anpassung in allen zugewiesenen Räumen führen. Bei Zuweisung von Instanzen beeinflusst die Änderung eines Materials in einem Raum keine anderen Räume. Um die Interaktion bezüglich der Materialien zu vereinfachen, ist es sinnvoll, auf eine nachträgliche Änderung zu verzichten. Stattdessen kann ein Nutzer das bereits zugewiesene Material erneut im Menü selektieren, Eigenschaften nach Wunsch anpassen und das veränderte Material anschließend überschreibend zuweisen. Dies führt zu einer einheitlicheren Interaktion.

3.3.2 Inneneinrichtung

Neben den Materialien an Wänden, Böden und Decken spielt besonders die Inneneinrichtung einen großen Faktor für den Eindruck eines Raumes. Deswegen werden im Schritt der fotorealistischen Visualisierung eines Projektes alle Räume mit Möbeln und Beleuchtung eingerichtet. Diese müssen nicht der zukünftigen realen Ausstattung entsprechen, aber die spätere Verwendung eines Raumes widerspiegeln. Die Immersion des zukünftigen Gebäudes erhöht sich allerdings, wenn der Kunde selbst in der Lage ist, alles nach seinen Wünschen einzurichten.

Eine derartige Einrichtung kann sowohl am Grundriss, im Modell oder in der Innenansicht erfolgen. Abb. 3.13 zeigt dabei exemplarisch, wie eine Interaktion aussehen kann. Die Einrichtungsgegenstände können aus einem Menü, ähnlich dem der Materialien, in den Räumen platziert werden. Eine Änderung an Objekten kann durch

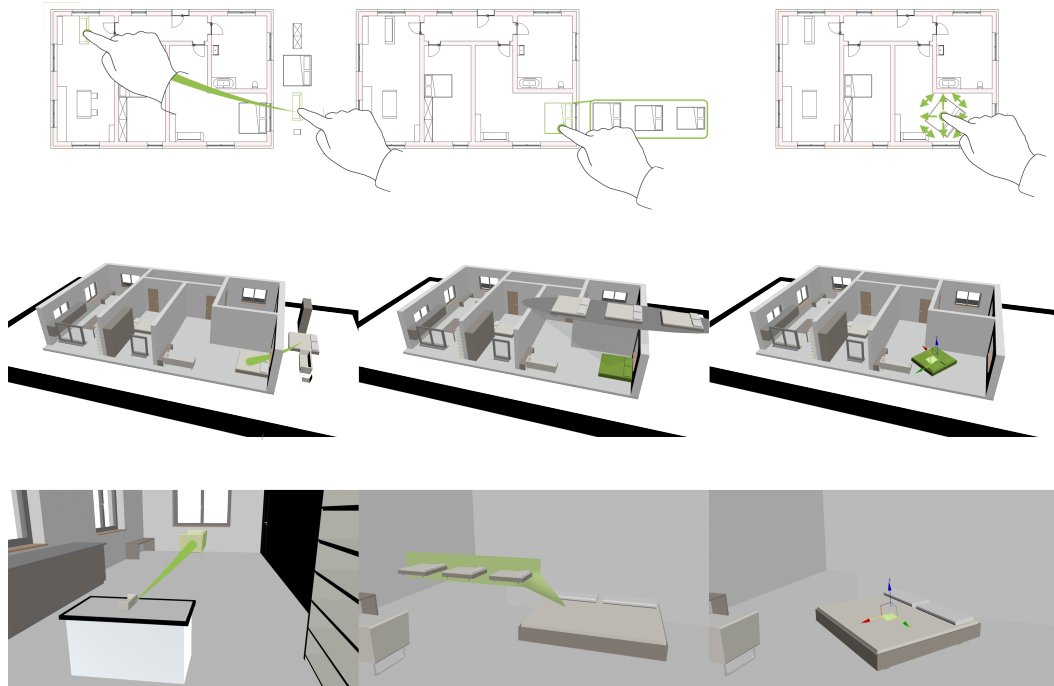


Abb. 3.13: Anpassung der Inneneinrichtung kann sowohl am Grundriss, im Modell als auch direkt in der Innenansicht erfolgen.

Selektion und Vorschläge von Alternativen erfolgen. Bei erneuter Auswahl eines Objektes kann ein *Gizmo* erscheinen, um das Objekt zu bewegen und zu rotieren. Die Positionierung von Objekten sollte dabei durch physikalische Berechnungen unterstützt werden, sodass beispielsweise Schränke nicht in Wänden stehen oder Fernseher auf Lowboards platziert werden können. Bei einer Darstellung im Grundriss ist eine Platzierung entlang der z-Achse nicht darstellbar. Deswegen sollten Objekte von oben her entlang der z-Achse gestapelt werden, beispielsweise erst das Lowboard und darüber der Fernseher.

Werden Beleuchtungen platziert, müssen die Art der Leuchte sowie ihre physikalischen Eigenschaften bekannt sein, um die Umgebung neu und korrekt berechnen zu können. Diese veränderte Beleuchtung des Raumes kann dynamisch angezeigt werden, was zwar viel Rechenleistung benötigt, jedoch auch ein gutes Hilfsmittel darstellt, um die richtige Leuchte sowie deren Platzierung zu finden.

3.4 Innenansicht

VR- und AR-Technologien erlauben es dem Nutzer, fremde Welten immersiv zu erleben. Diese Immersion beschreibt das Gefühl, dass sich die virtuelle Umgebung für den Nutzer real anfühlt. In der Architektur kann dies genutzt werden, um ein

Gebäude zu erleben, als wäre es bereits gebaut und vollständig eingerichtet. Dafür werden 360°-Innenansichten oder virtuelle Rundgänge für den Kunden aufbereitet.

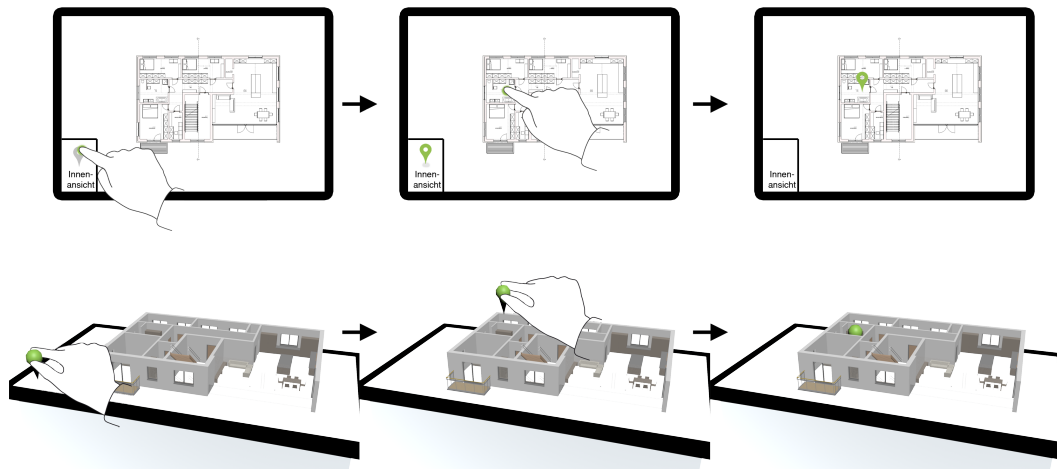


Abb. 3.14: Wahl des Standpunktes für die Innenansicht kann im Grundriss und am Modell im Dreidimensionalen erfolgen.

Die Wahl einer Position für eine derartige Innenansicht kann sowohl im Zweidimensionalen, als auch im Dreidimensionalen erfolgen (siehe Abb. 3.14). Auf dem Tabletop muss ein Nutzer eine entsprechend gekennzeichnete Schaltfläche zu Beginn der Standortwahl antippen, um anschließend eine Position im Inneren eines Gebäudes zu wählen. Eine Interaktion per *Drag'n'Drop* ist parallel implementierbar. In 3D nimmt der Nutzer einen virtuellen Marker auf und lässt ihn senkrecht in das Innere eines Raumes fallen. Allerdings ist die Verwendung des berührungsempfindlichen Displays intuitiver und weniger fehleranfällig.

Nach der Wahl des Standortes wird eine virtuelle Innenansicht von diesem Standpunkt aus erzeugt und angezeigt. Eine Bewegung des Standortes ist nun durch eine Neuwahl wie bei der ersten Platzierung oder über eine Verschiebung des Markers möglich. Beide Alternativen sollten implementiert werden, um auf Präferenzen des Nutzers eingehen zu können.

Bei einer Positionierung außerhalb des Gebäudes sollte der Standpunkt auf die Erdoberfläche gesetzt und das gesamte Haus dargestellt werden. Damit ist es dem Betrachter möglich, die Fassade des Gebäudes in seiner realen Größe zu betrachten und einen Eindruck von den späteren Dimensionen zu bekommen.

Gemäß Abb. 3.15 (links) kann die Darstellung der Innenansicht überall um den Nutzer herum präsentiert werden. Damit ist er in der Lage, seinen Kopf in eine beliebige Richtung zu drehen, um sich den Raum anzuschauen. Dies erhöht die Immersion, kann aber in AR zu Paradoxen mit der Umgebung führen, beispielsweise wenn sich der virtuelle Raum weiter ausdehnt, als der reale Raum oder wenn sich virtuelle Einrichtungsgegenstände mit realen Objekten überschneiden. Eine andere Möglichkeit wäre die Darstellung auf einer virtuellen Leinwand. Diese kann auf



Abb. 3.15: Möglichkeiten zur Darstellung der Innenansicht (AR-Inhalte in Falschfarbe).

einer leeren Wand oder zwischen zwei Wänden (rechts) platziert werden. Durch diese planare, vertikale Fläche kann der Nutzer wie durch ein riesiges Fenster in den virtuellen Raum schauen. Dies verhindert Überschneidungen zwischen realer und virtueller Welt. Allerdings ist es dafür nötig, zusätzlich zur Position noch eine Blickrichtung zu bestimmen, da nur ein Ausschnitt des Raumes dargestellt werden kann.

Wenn ausreichend Daten im BIM-Modell hinterlegt sind, lässt sich die Immersion durch Umgebungsinformationen verbessern. Beispielsweise kann die Umgebung des Gebäudes durch die Fenster sichtbar sein oder Geräuschquellen wie Straßen oder ein Spielplatz imitiert werden.

In der Architektur spielen Licht und Schatten eine fundamentale Rolle und bestimmen maßgeblich die Raumwirkung. Außerdem ist, abhängig von der Nutzung, eine bestimmte Beleuchtung nötig, wobei auf Tages- als auch auf Kunstlicht geachtet werden muss. Jedoch wird versucht, weitgehend natürliches Sonnenlicht anstelle von künstlichem, elektrischen Licht zu verwenden. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, die Darstellung einer Innenansicht um eine korrekte Licht- und Schattenberechnung zu erweitern. Dafür müssen der Breitengrad der Gebäudeposition sowie die Ausrichtung der Fassaden zu den Himmelsrichtungen bekannt sein. Abhängig von Tag und Uhrzeit kann daraus der nahezu reale Stand der Sonne berechnet werden. Aus den Verdeckungen und den physikalisch korrekten Materialien können nun Schattenwurf und Reflexion berechnet und abgebildet werden.

Eine direkte Wahl des Sonnenstandes ist unangebracht, da sie sich nach physikalischen Regeln bewegt. Diese hängen von den Parametern Uhrzeit und Jahreszeit ab. Um ein ungefähres Gefühl der Beleuchtung zu bekommen, sind dabei keine feinen Parameterunterteilungen nötig. Entsprechend Abb. 3.16 können Uhr- und Jahreszeit über eine Vielzahl klassischer Schaltflächen, wie Schieberegler, Knöpfe oder Aus-

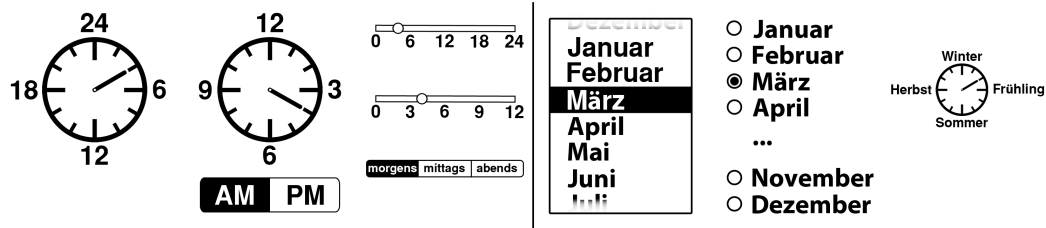


Abb. 3.16: Verschiedene Schaltflächen zur Wahl der Uhrzeit (links) und der Jahreszeit (rechts).

wahllisten gewählt werden. Metaphorisch wertvoller ist jedoch die Verwendung von Uhren, sowohl für die Uhrzeit, als auch in Form einer Jahreszeitenuhr.

3.5 Mehrbenutzer-Betrieb

Entsprechend des beschriebenen Szenarios benutzt mehr als eine Person die Anwendung parallel. Stellt ein Architekt sein Projekt einem Kunden vor, sind es zwei Benutzer. Doch bei angemessener Größe des Tabletops ist auch eine gleichzeitige Nutzung durch deutlich mehr Personen möglich, beispielsweise im Falle der Präsentation eines Objektes vor einer Gruppe von Bauplanern.

Dank dem Einsatz von AR-HMDs ist jeder Einzelne dabei in der Lage, alle anderen Personen zu sehen. Dies ermöglicht die natürliche Kommunikation untereinander. Außerdem sehen alle dieselben Inhalte auf dem Tabletop, was eine gute Diskussionsgrundlage bietet. Beispielsweise ist es möglich, direkt auf Räume oder Wände zu zeigen, um eine Diskussion darüber zu beginnen. Außerdem sieht jeder, welche Interaktionen ein Anderer ausführt, was Irritationen bei plötzlicher Veränderung der Inhalte vorbeugt.

Da jeder Nutzer sein eigenes AR-HMD trägt, ist die Darstellung der virtuellen, dreidimensionalen Inhalte personalisierbar. Zwar sollte das Modell immer auf den Grundriss registriert sein, jedoch kann die Darstellung variieren (siehe Kapitel 3.1). Entsprechend des Domänenwissens des jeweiligen Nutzers kann die Darstellung komplex oder einfach sein. Während der Kunde nur die Wände sowie die Inneneinrichtung sieht, werden dem Architekten alle vorhandenen 3D-Informationen dargestellt. Damit kann er schnell auf Anfragen der Kunden reagieren. Sitzt dem Architekten hingegen ein Bauplaner mit ausreichend Wissen gegenüber, können beide über komplexe Darstellungen von Stützstrukturen oder Ähnlichem diskutieren. Alternativ lassen sich die Ansichten phasenweise wechseln. Stellt der Architekt erst das Gebäude allgemein vor, dann reicht eine einfache Ansicht. Wird später über die Nutzung der Räume und die dafür notwendige Verteilung an Steckdosen gesprochen, können für alle Nutzer entsprechende Stromleitungen angezeigt werden.

Die wichtigen Darstellungen, wie Grundriss und Modell, sind von allen Seiten aus betrachtbar. Allerdings sind andere Inhalte des Displays, insbesondere Text, vor-

rangig aus einer Richtung lesbar sind. Sitzen sich Architekt und Kunde gegenüber, sollten diese zur Seite des Architekten ausgerichtet sein, da dieser die dominante Rolle einnimmt. Der Architekt präsentiert sein Gebäude dem Gegenüber und stellt alle Aspekte dessen vor. Außerdem benutzt er die Anwendung häufiger, kennt sich also mit ihr aus und wird deswegen vorrangig die Interaktionen ausführen. Will der Kunde etwas sehen oder anpassen, dann kann er dies über Kommunikation mit dem Architekten erreichen. Eine Transformation des Grundrisses und damit des Modells kann von allen Seiten ausgeführt werden.

Die gewählte Kombination aus AR-HMD und Tabletop ist somit geeignet, um für eine Anwendung mit Mehrbenutzer-Betrieb genutzt zu werden. AR ermöglicht die natürliche Kommunikation und das Display dient dafür als Grundlage. Dabei müssen Inhalte des Displays so ausgelegt werden, dass sie für alle Teilnehmer wichtige Informationen enthalten. Die Inhalte in AR können aufgrund der einzelnen Nutzung der HMDs personalisiert und damit an das Wissen und die Anforderungen der einzelnen Nutzer angepasst werden.

3.6 Alternative Darstellungsarten

Die beschriebene architektonische Anwendung kann mit anderen Geräten entsprechend Kapitel 2.2 visualisiert werden. Anstelle eines AR-HMDs kann ein VR-HMD benutzt werden. In VR ist das Gefühl der Immersion um ein Vielfaches gesteigert, da die reale Umgebung ausgeblendet wird. Dies ist ein Grund, wieso in der Wirtschaft VR-Visualisierungen häufiger als Visualisierungen in AR verwendet werden. Im Fall dieser Anwendung wäre demnach besonders die Darstellung der Innenansicht (Kapitel 3.4) in VR eindrucksvoller. Aufgrund der nicht sichtbaren Umgebung wäre allerdings die Interaktion deutlich komplizierter. Alle Inhalte des Displays müssten virtuell dargestellt und im Raum auf dem Tabletop fixiert werden. Eine virtuelle Präsentation des Displays müsste eingebaut werden ebenso wie eine Darstellung der anderen Nutzer und ihrer Blickpunkte. Weiterhin wäre die Kommunikation mit dem Gegenüber eingeschränkt, da man sich nicht real sieht. Einen Mittelweg würde das AR-HMD von Santos et al. darstellen, welches gezielt Umgebungslicht ausblenden kann [San+10]. Damit wäre es möglich, die allgemeine Interaktion am Modell und die Kommunikation zwischen Architekt und Kunde in AR zu vollziehen und bei einer Darstellung der Innenansicht die Umgebung ausblenden.

Aufgrund der häufigen Verwendung von Mobilgeräten zur Darstellung von AR-Inhalten in der Architektur, könnten Architekt und Kunde die Anwendung auch auf einem Tablet oder Smartphone benutzen. Das Modell wäre dabei im Raum auf einem gewöhnlichen Tisch fixiert und könnte von allen Seiten betrachtet werden. Mit dem Mobilgerät könnte der Nutzer das Modell von Nahem betrachten und Materialien

oder Einrichtungsgegenstände platzieren. Beim Wechsel in die Innenansicht wird die reale Umgebung ausgeblendet und nur der virtuelle Raum angezeigt. Die Interaktion würde ausschließlich über die in der Hand gehaltenen Geräte selbst ablaufen. Dies wäre für den Nutzer intuitiv, da er Entsprechendes aus dem Alltag gewöhnt ist. Die Immersion wäre allerdings aufgrund der geringen Größe des Displays deutlich eingeschränkt. Anstatt selbst in einer virtuellen Umgebung zu sein, hat der Nutzer vielmehr das Gefühl, eine virtuelle Welt auf einem Bilderrahmen zu betrachten.

3.7 Alternative Interaktionsmöglichkeiten

Anstelle einer Interaktion über das berührungsempfindliche Display sind andere Arten der Eingabe möglich (siehe Kapitel 2.3). Im Folgenden werden Alternativen sowie einige beispielhafte Interaktionen vorgestellt.

Parallel zur Berührungseingabe kann ein Stift für eine beidhändige Interaktion genutzt werden, was neue Möglichkeiten bietet. Gemäß Hinckley et al. [Hin+10] nutzt der Mensch dabei die Berührungseingabe zur Transformation sowie als Kontext für die stiftführende dominante Hand. Der Stift hingegen wird zum Schreiben, Zeichnen oder für feinmotorische Aufgaben genutzt. In der beschriebenen architektonischen Anwendung würde Touch also weiterhin für die Transformation des Grundrisses verwendet werden. Der Stift würde für Manipulationen wie beispielsweise das Bearbeiten der Wände genutzt. Damit erfolgt ein impliziter Wechsel zwischen Transformation und Manipulation über die Verwendung des Stiftes. Eine derartige beidhändige Interaktion wäre nicht nur schneller, sondern würde auch die natürliche Verwendung eines Stiftes und der Hände widerspiegeln.

Gesten im Raum können entweder direkt mithilfe von Infrarot-Tiefenkameras oder über Geräte wie beispielsweise Controller aufgenommen werden. Dementsprechend können sie verwendet werden, um direkt am Modell oder in der Innensicht zu interagieren. Denkbar sind symbolische Auf- und Abwärtsbewegungen der Hand zum Wechsel der Etage oder manipulative Gesten, welche einen virtuellen Schrank verschieben, bis er an der richtigen Stelle steht. In der Verbindung mit Datenhandschuhen wäre außerdem haptisches Feedback möglich, um dem Nutzer die Oberfläche des Schrankes zu signalisieren. Auch Controller können haptisches Feedback liefern, wenn auch nicht zielgerichtet. Außerdem bieten sie weitere Knöpfe, Joysticks oder berührungsempfindliche Flächen, welche zur Interaktion genutzt werden können. Damit ist es möglich durch virtuelle Menüs zu navigieren, einen *Drag'n'Drop* im Raum zu vollziehen oder Elemente in der Ferne zu selektieren. Insgesamt wären alle beschriebenen Konzepte mithilfe eines Controllers machbar.

Tangibles, also physische Objekte, welche von einer interaktiven Oberfläche erkannt werden, finden Verwendung, um einige Aktionen zu vereinfachen. Ähnlich den Konzepten von Urp [UI99] ist die Verwendung einer physischen Uhr auf dem Display

denkbar, um die Uhrzeit und die Jahreszeit für die Berechnung des Sonnenstandes zu wählen. Ebenso kann ein greifbarer Marker auf dem Display platziert werden, um den Standpunkt für die Innenansicht zu wählen. Denkbar ist auch ein Stempel, welcher erst auf die Darstellung eines Materials und danach auf die Räume gepresst wird, um das gewählte Material zuzuweisen. Tangibles machen vom Wissen des Nutzers über die Eigenschaften physischer Objekte Gebrauch. Die Interaktion wird damit intuitiver und haptisch begreifbar.

Bei Unterstützung von Spracheingabe wären Aussagen wie "Gehe zu Etage 3.", "Zeige Bad." und "Wende blaue Fliesen auf den Boden an." zu interpretieren. Mit einer robusten Spracherkennung wäre dadurch eine Interaktion möglich, ohne dass sich der Nutzer bewegen muss. Ebenso können Sprachbefehle parallel zur normalen Interaktion verwendet werden. Dies führt zu einer effizienteren und natürlicheren Eingabe, da der Mensch die Fähigkeit besitzt, Sprache und Bewegung gleichzeitig zu koordinieren.

Mit Analyse des Blickpunktes wäre nicht nur eine Visualisierung dessen im dreidimensionalen Modell möglich, sondern auch Interaktionen. Beispielsweise könnte bei längerer Betrachtung desselben Punktes in das Modell hineingezoomt werden, bis sich der Betrachter in der Innenansicht wiederfindet. Sein Standpunkt wäre dabei der vorherige Fokuspunkt. Während des "virtuellen Fluges" in das Modell könnte der Nutzer aufgrund der Geschwindigkeit der Augenbewegung das Wunschziel noch dynamisch anpassen. Eine blickbasierte Interaktion würde von impliziten Informationen über interessante Aspekte eines architektonischen Modells Gebrauch machen.

Alle genannten Alternativen bringen ihre eigenen Vorteile mit sich. Allerdings ist immer zusätzliche Hard- und Software notwendig, wenn sie parallel zur gewählten Kombination von AR-HMD und Tabletop verwendet werden. Bei Gesten, Sprache und Blick fehlt das direkte Feedback bei einer Eingabe, da diese erst interpretiert werden muss. Controller sind in der Verwendung parallel zur berührungsempfindlichen Oberfläche unpraktisch, da sie die Hände der Nutzer belegen. Werden Controller alternativ zur Berührungseingabe verwendet, ist ausschließlich eine Interaktion im Raum möglich, was ungenau und fehleranfällig ist. Stift und Tangibles verhelfen der Anwendung zu deutlichem Mehrwert. Dabei können Eingaben per Berührung, Stift oder Tangible durchaus zum selben Ergebnis führen. Jedoch müssen die Erkenntnisse der Forschung beachtet werden, welche Art der Eingabe zu welcher Interaktionsart passt.

3.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Konzepte für eine architektonische Anwendung auf einer Kombination von AR-HMD und Tabletop vorgestellt. Diese Verbindung erlaubt es, die Vorteile beider Geräte zu vereinen. Das AR-HMD bietet eine stereoskopische Darstellung von dreidimensionalen Inhalten im Raum. Allerdings ist eine Interaktion mit diesen Inhalten für die meisten Nutzer ungewohnt und aufgrund der aktuellen Technik umständlich und fehleranfällig. Das Tabletop hingegen bietet eine direkte Berührungseingabe, wie sie aus dem Alltag von Mobilgeräten bekannt ist, sowie eine kontrastreiche, hoch aufgelöste, aber zweidimensionale Darstellung von Inhalten. Im ersten Abschnitt wurden, auf diesen Bedingungen aufbauend, Konzepte für die Darstellung eines Gebäudemodells und des dazugehörigen Grundrisses beschrieben. Dabei wurde auf die jeweiligen Eigenheiten sowie den Bezug zwischen beiden Teilen geachtet. Anschließend wurden Möglichkeiten zur Interaktion mit dem Modell über den Grundriss auf dem Display erläutert. Aufgrund der genannten vorteilhaften Eingabe über das Display wurde auf eine Interaktion über Gesten im Raum verzichtet. Die nachfolgende Beschreibung von Manipulationen des Modells ermöglicht es, das Modell nach den Vorstellungen des Kunden *Bob* anzupassen. Änderungen sind dabei sofort am Modell und im Dreidimensionalen sichtbar. Anschließend wurde die Darstellung des Modells als lebensgroße Innenansicht erläutert und auf welche Art und Weise diese das Gebäude immersiv erlebbar macht. Abschließend wurden alternative Darstellungsarten und Interaktionsmöglichkeiten erklärt. Andere Geräte zur Darstellung zeigen dabei Vorteile, allerdings außerhalb der beschriebenen Rahmenbedingungen des Szenarios. Stift und Tangibles stellen sich als vorteilhaft für die Eingabe auf einer interaktiven Oberfläche heraus, da sie bei paralleler Verwendung mit Berührungseingabe zu einer umfangreichen, multimodalen Interaktion führen können.

Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung eines Prototyps auf Basis der beschriebenen Konzepte erläutert.

Umsetzung

Eine Auswahl von den zuvor beschriebenen Konzepten soll in einer prototypischen Anwendung umgesetzt werden. Der Prototyp soll mit Hilfe der Spiele-Engine Unity [Uni18] entwickelt werden. Dafür wird zuerst der technische Rahmen für die Umsetzung festgelegt. Anschließend werden Importe aus Programmen abseits von Unity vorgestellt. Darauf folgt die Beschreibung der Bestandteile des Prototyps sowie der möglichen Interaktionen mit diesen. Abschließend wird auf Performanz-Probleme sowie mögliche Lösungen eingegangen.

4.1 Hardware

Der Prototyp besteht aus zwei verschiedenen Programmen. Das eine läuft dabei auf einer Microsoft HoloLens, das andere auf einem berührungsempfindlichen Display.

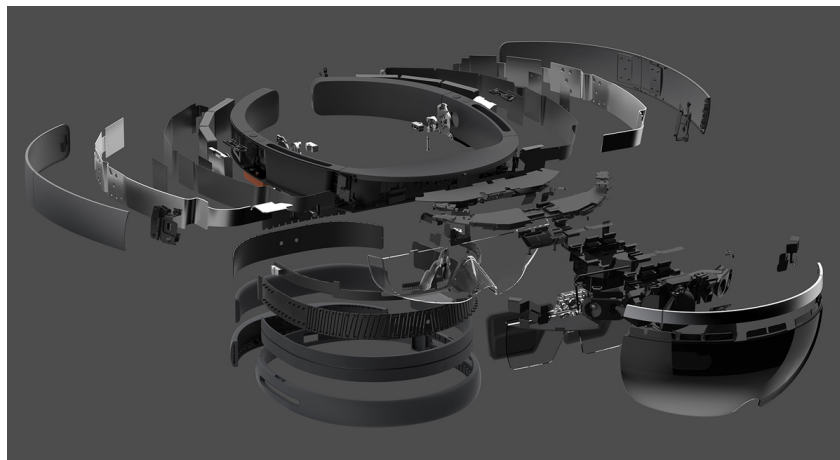


Abb. 4.1: Eine Zerlegung der Microsoft HoloLens macht die Komplexität des Gerätes deutlich [Beh18].

Die HoloLens ist ein von Microsoft entwickeltes AR-HMD [Mic18b]. Es ist mit über 50.000 verkauften Exemplaren der wichtigste Vertreter unter den AR-Brillen. Sie ist ein tragbarer, akkubetriebener Computer und damit für eine kabellose, autarke Verwendung geeignet. Durch eine Erfassung der Umgebung in Echtzeit können dreidimensionale Hologramme im Raum platziert werden.

Die Darstellung von entsprechenden Inhalten erfolgt über zwei von Microsoft entwickelte durchsichtige Linsen. In ihnen bricht sich das Licht von zwei Kleinstprojektoren

und fällt direkt auf die Netzhaut, wo das Bild entsteht. Dreidimensionale Objekte werden intern auf beide Augen aufgeteilt, wodurch ein Tiefeneindruck entsteht. Die Brille stellt Inhalte in einem großen Farbspektrum mit 240 Bildwiederholungen pro Sekunde dar und bietet ein 35° weites, diagonales Sichtfeld. Außerhalb des Darstellungsbereiches oder bei fehlenden Inhalten ist es dem Nutzer möglich, durch die Linsen seine reale Umgebung zu sehen. Aus diesem Grund zählt die HoloLens zu den AR-HMDs.

Die HoloLens ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Vier Kameras dienen dem optischen Tracking der Umgebung sowie der Positionsbestimmung der Brille im Raum. Eine weitere Tiefenkamera, basierend auf dem Laufzeitverfahren, ermöglicht die Erkennung von Gesten. Die Inertiale Messeinheit (IMU) setzt sich unter anderem aus Gyro- und Beschleunigungssensoren zusammen und dient der Berechnung der Orientierung im Raum. Die meisten Sensoren sind an die sogenannte Holographic Processing Unit (HPU) angeschlossen. Sie verarbeitet die große Menge an Daten, welche die HoloLens durchgängig aufnimmt und sie bietet Hardwareunterstützung für aufwändige Berechnungen, welches gegenüber einer reinen Software-Berechnung bis zu 200-fach schneller sein soll. Weiterhin ist sie ebenso wie die verbaute 32-bit CPU besonders energiesparend, was einen Akkubetrieb und eine passive Kühlung ermöglicht. Von den verbauten 2 GB Arbeitsspeicher stehen 900 MB für Anwendungen zur Verfügung, welche nicht überschritten werden dürfen.

Weiterhin bietet die HoloLens über zwei Lautsprecher die Möglichkeit der Tonwiedergabe mit Raumeffekt. Eine Wireless LAN Schnittstelle nach dem 802.11ac Standard ermöglicht eine drahtlose Kommunikation mit lokalen oder globalen Endgeräten.

Für die Implementierung wurde aufgrund der Verfügbarkeit am Interactive Media Lab Dresden ein berührungsempfindliches Display von Acer verwendet. Dieser Monitor der T2-Serie bietet bei 23 Zoll Bildschirmdiagonale eine FullHD-Auflösung (1920 x 1080 Pixel) mit 60 Hz Aktualisierungsrate. Dank einer LED-Hintergrundbeleuchtung wirken Inhalte hell und farbenfroh und aufgrund der verbauten IPS-Displaytechnologie sind Betrachtungen aus einem Blickwinkel von 178° möglich. Außerdem ist es neigbar bis zu einem Winkel von 8°. Damit lässt es sich fast wie ein horizontales Display benutzen und Inhalte können von allen Seiten aus gesehen werden. Das Gerät ist weiterhin berührungsempfindlich, so dass eine direkte Eingabe per 10-Punkt-Multitouch möglich ist.

Da es kein eigenständiges Gerät ist, muss es an einen Computer per HDMI und USB angeschlossen werden. Dies ermöglicht es, beliebige Rechenleistung für die Anwendung auf dem Display bereitzustellen. Im Test wurde ein Ultrabook von Lenovo verwendet. Dieses bietet einen Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU mit einer Taktfrequenz von 1.70 GHz, einen internen Grafikchip der Intel(R) HD Graphics Family, 8 GB DDR3 RAM und eine 256 GB SSD. Außerdem erlaubt eine Wireless LAN Schnittstelle nach dem 802.11n Standard eine drahtlose Kommunikation.

4.2 Importe

Die grundlegenden Inhalte des Prototyps wurden außerhalb von Unity erstellt und importiert. Das dreidimensionale Gebäude entstand in Revit und die Materialien in Substance Designer.



Abb. 4.2: Die finale Version des in Revit entworfenen Hauses.

Abb. 4.3

Revit ist eine BIM-fähige Software von Autodesk, "für die architektonische Planung und Konstruktion, Gebäudetechnik, konstruktiven Ingenieurbau und Bauausführung" [Aut18d]. Im Gegensatz zu Programmen wie 3DS Max [Aut18a] oder Maya [Aut18c], welche allgemeine Modellierungsfunktionen bieten, ist Revit speziell für die Architektur ausgelegt.

Zur Erstellung eines Gebäudes werden in einer beliebigen Seitenansicht Etagentrennlinien eingezeichnet, wobei die Abstände zwischen den Linien die spätere Deckenhöhe bestimmen. Daraufhin werden automatisch Grundrisse für jede gezeichnete Etage angelegt. In diesen können nun sogenannte *Familien* platziert werden. Dabei existieren systeminterne *Familien* wie Wände oder Dächer, aber auch externe 3D-Objekte können als *Familie* geladen werden, wie beispielsweise Türen, Fenster oder Inneneinrichtung. Revit setzt dafür auf parametrisierte Objekte, was die Manipulation von Eigenschaften mehrerer Instanzen gleichzeitig vereinfacht. Da importierte *Familien* neben der Darstellung im Grundriss auch eine dreidimensionale Präsentation haben, kann automatisch ein 3D-Modell des Gebäudes erzeugt werden. Für den Prototyp entstand ein Gebäude nach beschriebener Vorgehensweise (siehe Abb. 4.2). Dabei wurde darauf geachtet, das Modell interessant zu gestalten, ohne dass es zu komplexe Geometrien beinhaltet (siehe Kapitel 4.5). Vom Modell in Revit konnten nun ein 3D-Modell (.fbx) und alle Grundrisse (.png) exportiert und in Unity importiert werden.

In Unity liegt das Gebäude zerlegt in einzelne Objekte wie Wände, Fenster oder Schränke vor. Für die Anwendung ist jedoch eine andere Aufteilung nötig, deswegen

erfolgt eine automatisierte Gruppierung der Objekte nach Material und Etage. Anschließend werden automatisch alle Wandflächen jeweils einem Raum zugewiesen. Danach liegt das Modell entsprechend Abb. 4.3 vor und kann effizient verwendet werden.

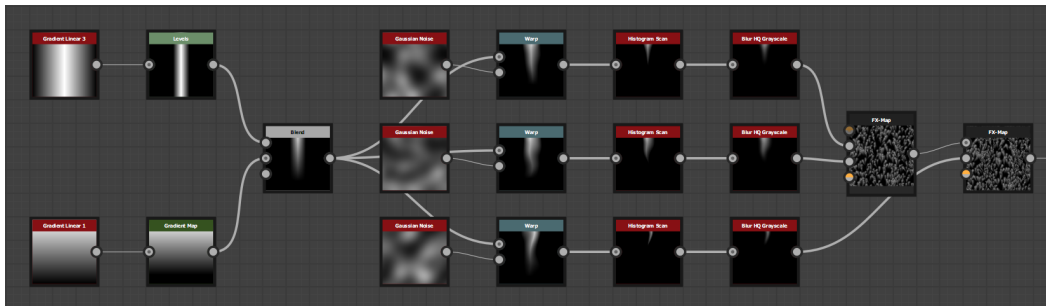


Abb. 4.4: In der prozeduralen Erstellung von Materialien in Substance Designer entsteht aus einem Gradienten das Muster eines Teppichs.



Abb. 4.5: Eine Auswahl an erstellten Materialien für die Verwendung im Modell.

Substance Designer ist eine verbreitete Software in der Unterhaltungsindustrie zur Erstellung von Materialien [All18]. Sie bietet die Möglichkeit der Entwicklung hochrealistischer, physikalisch korrekter Materialien (physical based rendering). Dabei setzt Substance Designer auf eine graphbasierte, prozedurale Erstellung der einzelnen Komponenten. Entsprechend Abb. 4.4 entstehen aus einigen linearen Gradienten Teppichfasern und später die hochrealistische Darstellung eines Teppichs.

Auf diese Art entstanden für den Prototyp über 20 verschiedene Materialien, welche auf das Modell angewendet werden können. Aus Substance Designer können zwar einzelne Bitmaps für Farbe, Normalen oder Reflektion erstellt und in Unity eingebunden werden, allerdings unterstützt Unity nativ *ProceduralMaterials*. Aufgrund dieser Integration können mit Substance erzeugte Materialien direkt importiert und sogar nachträglich angepasst werden (siehe Kapitel 4.5).

4.3 Umgesetzte Konzepte

Die Anwendung integriert viele der beschriebenen Konzepte, um ihre Wirkung zu testen. Es folgt an dieser Stelle eine Auflistung und entsprechende Begründung.

Für die Präsentation des Modells werden zwei verschiedene Möglichkeiten verwendet. Um einen Eindruck vom Gebäude zu bekommen wird es komplett und opak dargestellt, wobei das Erdgeschoss auf der Displayebene verweilt. Die Untergeschos-

se sind im Volumen des Tisches enthalten, alle höheren Etagen obenauf dargestellt. Bei der Selektion einer Etage wird diese isoliert und auf die Displayebene verschoben, damit der direkte Bezug zum Grundriss erkennbar wird. Der Grundriss wird immer auf dem Display dargestellt, um die hohe Auflösung dessen auszunutzen. Das Modell wird an den Kanten des Displays derart beschnitten, dass es dieses nicht überragt. Das ermöglicht außerdem einen seitlichen Blick in die Räume, sobald die Wände abgeschnitten sind. Um verschiedene Arten der Darstellung des Modells zu demonstrieren, ist es möglich, ein Heizungssystem bzw. Kabeltrassen einzublenden, welche das Modell überlagern.

Neben dem Display zeigt sich in AR ein Rahmen, der als "Portal" dient. Nach Wahl eines Standpunktes eröffnet sich dahinter der Blick in das Innere. In Echtgröße kann der Nutzer das Gebäude betrachten bzw. durch das "Portal" ins Innere gelangen.

Interaktionen erfolgen generell nur über das Display. Dabei können alle Funktionen sowohl per Berührung auf dem Display als auch per Maus betätigt werden. Die Transformation ist entsprechend der beschriebenen Konzepte umgesetzt. Auch die genannten Beschränkungen für Translation, Rotation und Skalierung sind angewendet. Die Wahl einer Etage erfolgt über ein Menü, in welchem Vorschauen der einzelnen Grundrisse sowie eine Nummer der Etage dargestellt sind. Dabei sind nur diskrete Sprünge zwischen den Etagen und kein kontinuierlicher Schnitt durch das Modell möglich.

Materialien können nur jeweils einem Ziel zugewiesen werden. Aus diesem Grund ist das Materialmenü hierarchisch aufgebaut. Dies ermöglicht außerdem eine schnelle Eingrenzung der Materialien auf eine kleine Auswahl. Als Vorschauen im Menü die grundlegenden Farbtexturen der Materialien verwendet, am Modell erscheinen die physikalisch korrekten Materialien. Ein Material kann dabei per Auswahl im Menü und Zuweisung im Grundriss angewendet werden.

Einige Konzepte kamen in der Anwendung nicht zur Umsetzung. Um einfache Bilder verwenden zu können, wurden keine komplexen, interaktiven Texturen oder Vektorgrafiken eingebaut, was eine Manipulation der Grundrisse unmöglich macht. Aus demselben Grund ist keine Funktionalität für Inneneinrichtungen verbaut. Wegen der geringen Auswahl an Materialien wurden keine Favoriten- oder Zuletzt-Verwendet-Listen eingebaut. Auf eine Manipulation des Sonnenstandes wurde verzichtet, da eine fixierte Sonneneinstrahlung aus Südwesten für ausreichend Licht und Schattenwurf im Modell sorgt. Aufgrund des beschränkten Gestensets der HoloLens wurde auf die Verwendung von Gesten im Raum verzichtet und auf die intuitive, den meisten Nutzern bekannte Interaktion per Berührung zurückgegriffen.

4.4 Prototyp

Die Details des Prototyps erscheinen in nachfolgender Beschreibung. Dabei wird auf die verwendeten Frameworks (Bibliotheken), den grundlegenden Aufbau sowie alle möglichen Interaktionen eingegangen.

Die Anwendung wurde mit Hilfe von Unity entwickelt [Uni18]. Dies ist eine der verbreitetsten Laufzeit- und Entwicklungsumgebung für Spiele (Game Engine). Neben der Entwicklung von Spielen wird sie aufgrund ihrer umfangreichen Funktionalität häufig auch in den Bereichen Film, Werbung, Design oder AEC (Architecture, Engineering & Construction, zu Deutsch: Architektur, Technik & Bau) eingesetzt. In der Entwicklungsumgebung können 3D-Szenen erstellt werden. Diese bestehen aus Objekten (*GameObject*), welche mit Komponenten angereichert werden können. Diese *Components* können u. a. grafische 2D- oder 3D-Darstellungen, physikalische Eigenschaften oder selbstgeschriebene Skripte sein. Letztere können beliebige Funktionalitäten erreichen und in C# oder einem JavaScript-ähnlichem UnityScript programmiert sein. Zu Laufzeit kümmert sich Unity um die grafische Darstellung der Inhalte samt Licht und Effekten, um physikalische Berechnungen wie Gravitation und Kollisionen sowie um das Ausführen aller programmierten Verhalten. Damit werden dem Entwickler eine Vielzahl komplexer Berechnungen sowie plattformspezifische Modifikationen abgenommen. Die Anwendung kann trotzdem durch eigene Skripte frei an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Für die Entwicklung von Anwendungen für die HoloLens benötigt ein Programmierer das hauseigene Visual Studio sowie die allgemeine Windows 10 SDK. Doch Microsoft empfiehlt die Verwendung von Unity zur Entwicklung von 3D-Anwendungen. Dafür wird das MixedRealityToolkit-Unity angeboten [Mic18a]. Dies ist "eine Sammlung von Skripten und Komponenten, um die Entwicklung von Anwendungen für die Microsoft HoloLens [...] zu beschleunigen". Es bietet Funktionalitäten, um 3D-Inhalte für die HoloLens aufzubereiten, Sprach- oder Gesteneingabe aufzunehmen oder die Umgebung zu analysieren. Außerdem ermöglicht es die Bereitstellung und Übertragung der Anwendung auf die HoloLens.

Für die Entwicklung der Anwendung wurde außerdem das Augmented Display Framework des Interactive Media Lab Dresden verwendet. Diese Bibliothek bietet vorgefertigte Inhalte und Funktionalitäten für Anwendungen, welche auf die Verbindung von HoloLens und anderen Displays setzen. Es besteht es aus einem Prefab (dreidimensionales Modell mit Funktionalitäten) und einer Netzwerkkomponente. Erstgenanntes bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung der Anwendungen und Letzteres ermöglicht die Kommunikation zwischen Display und HoloLens. In den vergangenen Jahren entstanden aus diesem Framework eine Reihe verschiedener Anwendungsfälle, wodurch auf vorangegangene Erkenntnisse und Entwicklungen zurückgegriffen werden konnte.



Abb. 4.6: Benutzeroberfläche, wie sie auf dem Display dargestellt wird.

Wie bereits erwähnt, teilt sich die Anwendung in zwei Teile, wobei der eine Teil auf dem Display und der andere Teil über die HoloLens dargestellt wird. Auf dem Display sieht der Nutzer eine gewohnte, zweidimensionale Benutzeroberfläche (siehe Abb. 4.6). Wenn sie alleine betrachtet wird, fällt sie in die Gruppe der WIMP-GUIs. Diese Abkürzung steht für eine grafische Benutzeroberfläche, welche sich durch Fenster, Symbole und Menüs auszeichnet. Auf dem Display ist zentral ein Grundriss dargestellt. Diese Grafik nimmt den überwiegenden Teil des Displays ein. Die Darstellung von Inhalten, wie Wänden oder Einrichtungsgegenständen, entspricht den in der Architektur üblichen Konventionen. Somit wirkt die Abbildung auf den Architekten wie jede andere digitale oder gedruckte Version eines Grundrisses. Am rechten Rand befindet sich ein Menü, welches sich in drei Unterpunkte gliedert. Der größte Unterabschnitt zeigt Miniaturansichten aller Etagen in aufsteigend sortierter Reihenfolge. Dabei sind alle Grundrisse zusätzlich mit der jeweiligen Etagennummer gekennzeichnet. Darüber befinden sich zwei Schaltflächen zum Aktivieren bzw. Deaktivieren der Darstellungen von Heizungsanlage oder Kabeltrassen. Am linken Rand liegt ein weiteres Menü, welches sich ebenfalls in drei Abschnitte unterteilt. Der erste Teil ist eine Schaltfläche zum Aktivieren oder Sperren der Rotation des Grundrisses. Der zweite Bereich dient der Darstellung des Materialmenüs. Dieses besteht aus quadratischen Vorschauen des Materials, annotiert mit dessen Namen. Darüber befindet sich eine weitere Schaltfläche, welche die Wahl eines Standpunktes für die Innenansicht startet. Der gewählte Standpunkt wird dabei im Dreidimensionalen dargestellt und die Blickrichtung als Sichtkegel im Grundriss.

In der HoloLens sind zwei verschiedene Bereiche zu sehen. Zum einen eine virtuelle Präsentation des Displays, zum anderen ein drei Meter hoher Rahmen. Erstgenanntes besteht aus einem Rahmen zur Registrierung mit dem reellen Umriss des Displays und der Darstellung des Modells (siehe Abb. 4.7). Das Modell ist auf die Kanten des Displays beschnitten, sodass der Nutzer bei Überlappung in das Innere der Räume blicken kann. Je nach gewählter Darstellungsart ist entweder das gesamte Gebäude



Abb. 4.7: Nach Start der Anwendung ist das Modell im Ganzen zu sehen.

oder nur eine selektierte Etage sichtbar. Dabei sind stets alle Geschossdecken entfernt und das Dach durchsichtig, sodass in das Innere geschaut werden kann und die Sicht bis zum Grundriss auf dem Display frei ist. Die Darstellungen von Heizungsanlage und Kabeltrassen sind einfarbig und immer obenauf dargestellt (siehe Abb. 4.11). Diese Art der Präsentation ist zwar unrealistisch, ermöglicht es aber, von jedem Blickpunkt aus ohne störende, überlagernde Objekte gesehen zu werden. Eine überdimensionierte Pinnnadel markiert den Standort für die Innenansicht (siehe Abb. 4.10). Diese wird hinter dem Rahmen dargestellt. Wie durch eine Art "Portal" kann ein Nutzer in das Innere des Gebäudes schauen (siehe Abb. 4.9). Durch die Größe des Rahmens und die korrekte dreidimensionale Darstellung des Innenraums bekommt er Tiefe und wirkt realistisch.

Bei Start der Anwendung erscheint in AR das beschriebene Modell mit dem Haus in der Gesamtansicht (siehe Abb. 4.7). Über die Funktionalitäten des Augmented Display Prefabs kann die gesamte virtuelle Darstellung so verschoben werden, dass sie gut mit dem realen Display registriert ist. Auf dem Tabletop erscheint die beschriebene Benutzeroberfläche. Am oberen Bildschirmrand zeigt nun eine Fortschrittsleiste eine Bearbeitung im Hintergrund an. Während diese läuft, kann auf dem Display keine Interaktion ausgeführt werden. Ist die Hintergrundaufgabe beendet, verschwindet die Leiste und die Anwendung kann benutzt werden. Durch eine Tap-Geste auf einen der Grundrisse an der Seite kann nun eine beliebige Etage selektiert werden. Die angeklickte Miniaturansicht wird dadurch etwas größer und zeigt somit die aktuelle Selektion an. Außerdem wird der nun aktuelle Grundriss in der Mitte groß dargestellt. In AR werden alle anderen Etagen, bis auf die selektierte, ausgeblendet (siehe

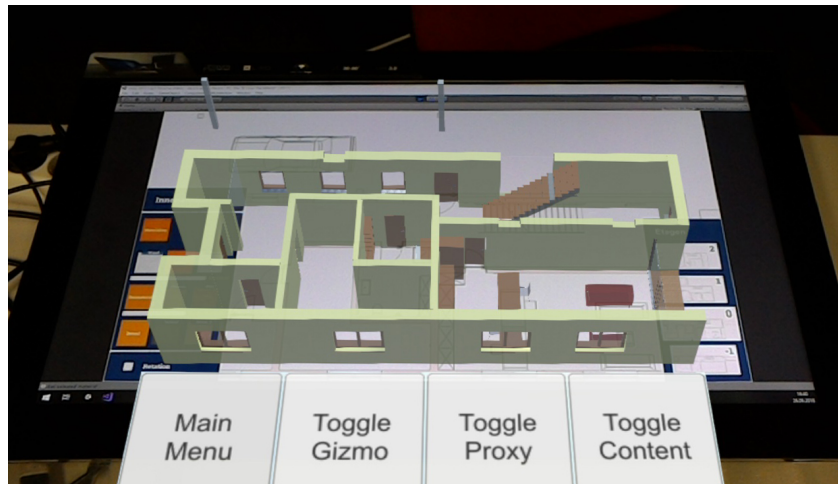


Abb. 4.8: Durch Auswahl einer Etage wird deren Grundriss und 3D-Darstellung angezeigt. Daraufhin können Materialien zugewiesen oder ein Standort für die Innenansicht gewählt werden.

Abb. 4.8). Außerdem wird sie auf die Displayebene verschoben. Diese Verschiebung erfolgt gleichmäßig von der Original- zur Nullhöhe. Das Modell liegt dabei genau über dem Grundriss, sodass zweidimensionale Darstellungen von Wänden oder Einrichtungsgegenständen eine passende Präsentation im Dreidimensionalen haben. Mit einem Finger auf dem Grundriss kann dieser entlang der Displayebene verschoben werden. Das Modell verschiebt sich entsprechend mit und wird an den Kanten des Displays abgeschnitten. Dabei ist die Translation begrenzt, sodass maximal eine Hälfte des Grundrisses außerhalb des Displaybereiches liegen kann. Legt der Benutzer zwei Finger auf das Display, kann er gleichzeitig eine Translation, Rotation und Skalierung ausführen. Die Berührungspunkte zwischen Fingern und Grundriss bleiben fixiert und je nach Bewegung wird die Darstellung entsprechend angefasst. Damit ist die Interaktion, abgesehen von der Skalierung, der Interaktion mit einem gedruckten Grundriss nachempfunden. Die Skalierung ist entsprechend der Konzepte auf einen Minimal- und einen Maximalwert beschränkt. Die Rotation muss über das linke Menü aktiviert werden und ist auf 45°-Winkel beschränkt. Kommt der Nutzer beim Verschieben des Fingers auf dem Display über eine andere Schaltfläche oder ein Menü, wird die Transformation an dieser Stelle abgebrochen. Damit wird eine parallele Auslösung mehrerer Funktionen verhindert.

Neben der Transformation des Grundrisses ist der Nutzer in der Lage Materialien zuzuweisen. Das Menü ist hierarchisch aufgebaut. Dadurch muss pro Ebene eine zutreffende Gruppe ausgewählt werden. Durch ein Tippen auf ein Bild für eine Materialgruppe wird diese selektiert, etwas größer und farblich hervorgehoben. Außerdem erscheint darunter eine neue Ebene mit Unterelementen. Diesem Schema folgend gelangt der Nutzer in den untersten Stufen zu den richtigen Materialien. Wird eines davon selektiert, dann kann es im Grundriss zugewiesen werden. Durch eine Tap-Geste auf den Boden eines Raumes wird das Material entsprechend der

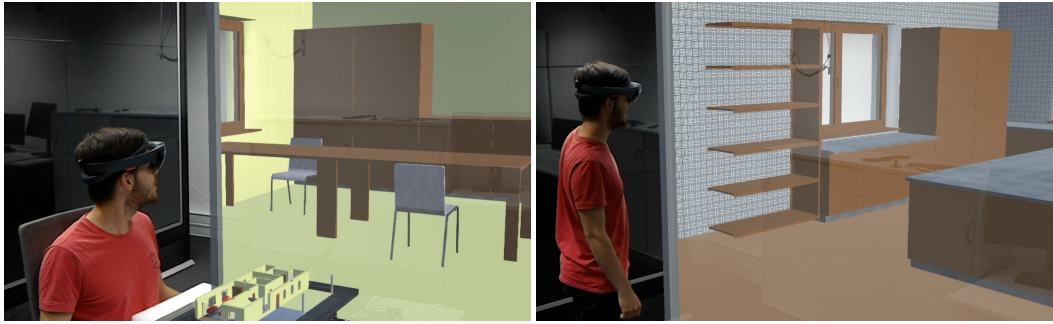


Abb. 4.9: Nach Wahl eines Standortes erscheint eine lebensgroße Darstellung der Innenansicht. Diese kann durch das "Portal" betrachtet und betreten werden. Materialien für Böden, Wände und Einrichtungsgegenstände sind sichtbar.

Eigenschaften angewendet. Die Bodenmaterialien werden als zweidimensionale Textur im Grundriss dargestellt, alle anderen an den Wänden im Modell. Durch das Antippen mehrerer Räume hintereinander kann ein und dasselbe Material schnell im gesamten Haus angewendet werden. Zum Wechsel des Materials kann eine beliebige andere Vorschau im Materialmenü angetippt werden. Dadurch werden alle bisher dargestellten Unterpunkte der aktuellen Gruppe deaktiviert sowie ausgeblendet und stattdessen die Unterpunkte der neu gewählten Materialgruppe dargestellt. Entsprechend kann auch zwischen den Materialien in ein und derselben Gruppe gewechselt werden.

Zur Wahl des Standortes für eine Innenansicht steht dem Nutzer eine separate Schaltfläche bereit. Tippt er diese an, werden eventuell ausgewählte Materialien deselektiert, um eine Unterscheidung zwischen Materialzuweisung und Standortwahl zu ermöglichen. Außerdem erscheint neben dem Text eine animierte Grafik, welche auf den Modus der Positionswahl aufmerksam macht. Der Nutzer kann nun einen beliebigen Punkt in einem Raum im Grundriss antippen. Dadurch wird in AR an dieser Stelle eine große Pinnnadel dargestellt und auf dem Grundriss erscheint ein Sichtkegel. Dieser Kegel kann durch Berührung um den Standort rotiert werden. Bei Veränderung der Position oder der Blickrichtung wird in AR eine entsprechende Innenansicht dargestellt. Hinter dem anfangs beschriebenen Portal erscheint der Blick ins Innere. Dabei entspricht im Raum das Display dem Standort und das Portal dem Ende des eingezeichneten Sichtkegels.

Klickt der Nutzer im rechten Menü auf einen hervorgehobenen Grundriss, dann wird die aktuelle Etage deselektiert. Dadurch erhält die Vorschau dieselbe Größe wie alle anderen Miniaturansichten. In AR wird daraufhin das Haus in der Gesamtansicht dargestellt. Auf dem Display erscheinen oberhalb der Etagenauswahl außerdem zwei neue Schaltflächen. Diese aktivieren oder deaktivieren die Ansichten der Heizungsanlage bzw. der verlegten Kabeltrassen. Da diese Elemente nicht etagenspezifisch, sondern im gesamten Gebäude verlegt sind, ist eine Darstellung nur in der Gesamtansicht des Modells möglich. Entsprechend sind die Schaltflächen nur anwählbar, wenn keine Etage selektiert ist.



Abb. 4.10: Der Standort für die Innenansicht wird durch eine orangene Pinnadel und einen Sichtkegel für die Blickrichtung markiert. Materialien sind auf den Fußböden und an den Wänden sichtbar.

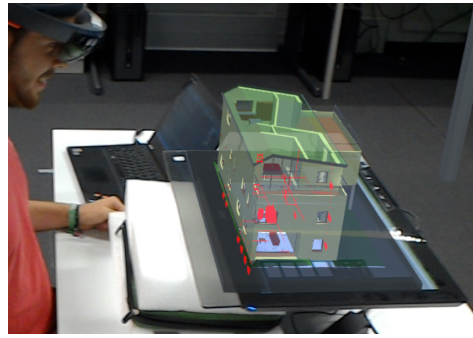


Abb. 4.11: Nach Aktivierung der Ansicht ist die Heizungsanlage des Hauses in Rot und im Vordergrund dargestellt.

Um die beschriebenen Darstellungen und Interaktionen zu ermöglichen, sind einige spezielle Datenrepräsentation nötig. Das importierte 3D-Modell des Gebäudes ist nach Import in eine Vielzahl einzelner Objekte aufgeteilt. Jede Wand, jede Tür, jedes Fenster und jeder Einrichtungsgegenstand ist ein separates *GameObject*. Außerdem entspricht die Größe der Realität. Für die Verwendung mit dem verhältnismäßig kleinen Tabletop muss das Modell vorbereitet werden. Ein Skript gruppiert Objekte je nach Etage und baut daraus eine kleine, etagensortierte Darstellung für das Display. Für die Zuweisung von Materialien zu den Wänden eines Raumes ist ein weiterer Verarbeitungsschritt notwendig. Dafür werden pro Etage alle Wände zu einem Netz zusammengebaut und auf einen *Collider* (Objekt zur Kollisionsberechnung in Unity) angewendet. Danach wird eine große Zahl räumlicher Punkte in der Etage verteilt. Die Punkte werden so gruppiert, dass zwischen jedem Punkt und dem Zentrum der Gruppe kein *Collider* liegt. Anschließend dienen die Zentren der gefundenen Punktgruppen als Zentrum für jeweils einen Raum. Danach wird jede Fläche des zuvor kreierte Wandnetzes jeweils einem Raum zugeordnet, je nach dem, zu welchem Zentrum die Fläche zeigt. Abschließend bilden alle Flächen desselben Raumes ein neues Netz, welches diesen repräsentiert. Bei der Zuweisung eines Materials kann diesem Netz im Ganzen das neue Material zugewiesen werden.

Ebenso müssen die Räume im Grundriss gefunden werden. Dafür verwendet ein weiteres Skript die zuvor berechneten Zentren der Räume und nutzt sie mit dem entsprechenden Grundrissplan für eine FloodFill-Algorithmus. Dieser findet von einem Startpunkt (Saatpunkt) aus eine zusammenhängende, weiße Fläche. Daraus entsteht eine Textur, welche durch die Wände begrenzt ist und keine Einrichtungsgegenstände überschneidet. Diese Textur wird als Maske verwendet, um eine darunterliegende Textur zu begrenzen. Bei der Anwendung eines Bodenmaterials dienen die Masken außerdem der Identifizierung eines angeklickten Raumes. Das Material wird dann dem entsprechenden, darunterliegenden Objekt zugewiesen und durch die Maske begrenzt. Durch die verhinderte Überdeckung von Schränken u. a. sieht es für den

Nutzer aus, als würde er das Material direkt dem Boden zuweisen.

Zur Erstellung des Materialmenüs ist im Hintergrund eine Baumstruktur implementiert. Diese besteht aus Gruppen und Materialdeskriptoren, welche beide Knoten des Baumes darstellen. Jeder Knoten speichert eine Textur und einen Namen, welche später für die Darstellung verwendet werden können. Jeder Deskriptor besitzt einen Verweis auf ein *ProceduralMaterial* sowie eine Zuweisungsart aus Wand, Decke oder Boden. Aus dem Baum wird zur Laufzeit ein Menü erstellt. Dabei wird jede Vorschau kreiert und positioniert sowie das Verhalten bei Selektion bzw. Deselektion festgelegt. Bei Selektion eines Materialdeskriptors wird dessen Material global zugänglich gespeichert. Die Raum-Skripte schauen diese globale Variable bei Berührung nach und wenden das Material entsprechend des Zuweisungstyps an.

Für die Kommunikation zwischen Display und HoloLens wird die Netzwerk-Komponente des Augmented Display Frameworks verwendet. Diese ermöglicht es, Nachrichten gemäß des OSC-Netzwerkprotokolls (Open Sound Control) über UDP (User Datagram Protocol) nach dem Client-Server-Prinzip zu verschicken. Diese Nachrichten besitzen eine Zeichenkette als Kennung und eine beliebige Anzahl an Argumenten aus Ganzzahlen, Fließkommazahlen oder anderen Zeichenketten. Für die Anwendung werden über 15 verschiedene Nachrichten genutzt. Beim Start des Prototyps werden einige Daten zwischen Display und HoloLens ausgetauscht, um sicherzugehen, dass beide über dieselben Ressourcen verfügen. Darunter fällt ein Abgleich der hinterlegten Materialien, der Displaygröße sowie der Raumzentrumskoordinaten. Diese Nachrichten werden periodisch wiederholt, um auf Probleme beim Verbindungsaufbau reagieren zu können. Nach erfolgreichem Austausch beginnen beide Teile mit den, für den Start benötigten, Funktionsaufrufen. Im Display wird dies durch die Fortschrittsleiste angezeigt. Anschließend bekommen beide Seiten einen "Bereit"-Status, wodurch die Interaktion mit der Anwendung freigegeben wird. Weitere Nachrichten werden verwendet, um Transformationen des Grundrisses, selektierte Etagen und Ansichten sowie Standort und Blickrichtung für die Innenansicht zu übermitteln. Wegen der Beschränkung der OSC-Nachrichten auf bestimmte Datentypen ist es nicht möglich Materialien direkt zu übermitteln. Aus diesem Grund sind Materialien in beiden Anwendungsteilen hinterlegt und werden anfangs anhand ihrer Bezeichner abgeglichen. Ist dies erfolgreich, werden zur Materialzuweisung nur die Bezeichner ausgetauscht und der Partner kann das gewünschte Material entsprechend der Zeichenkette identifizieren.

4.5 Performanz

Die verwendete Technik muss als begrenzender Faktor in die Entwicklung eines derartigen Prototyps einfließen. Besonders die Ressourcen der HoloLens sind beschränkt. Während der Implementierungsphase wurden einige auftretende Probleme erkannt und teilweise behoben, die sich aus der genutzten Hard- und Software ergaben.

Ein wichtiger Faktor für eine eindrucksvolle Anwendung ist die durchschnittliche Bildwiederholfrequenz. Microsoft empfiehlt für die HoloLens 60 Bilder pro Sekunde (FPS). Um diese zu erreichen wird eine Vielzahl an Optimierungen vorgeschlagen. Bei den ersten Tests mit dem vollständigen Modell, dargestellt in der HoloLens, wurden rund drei FPS erreicht. Aus diesem Grund musste das Modell vereinfacht werden. Unity bietet die Möglichkeit, importierte Objekte zu komprimieren. Dadurch sehen besonders dünne Objekte wie Gitter oder Handläufe eigenartig aus. Allerdings vereinfacht dies komplexe Objekte, was notwendig ist. Eine Beschränkung des gesamten Gebäudes auf nur eine selektierte Etage verringert die Anzahl der gleichzeitig anzuzeigenden Geometrien auf ein Viertel. Deshalb wurde für den Prototyp die in den Konzepten beschriebene Darstellung einer isolierten Etage gewählt. Andere Darstellungen, bei welchen ganze Etagen halbtransparent dargestellt werden, scheiden aufgrund des hohen Rechenaufwands für transparente Pixel aus. Außerdem wurden komplexe Objekte, wie ein Billardtisch oder ein Fahrstuhl, aus dem Modell entfernt, um es weiter zu vereinfachen. Ein weiterer Schwachpunkt des Modells waren die vielen nötigen Drawcalls. Drawcalls zählen die Wiederholungen des Rendering-Schrittes, bis ein Bild zustande kommt. Diese Wiederholungen sind für jedes Material auf jedem Objekt für jede Lichtquelle nötig. Da schon jedes Fenster im Gebäude vier Materialien für Scheibe, Rahmen, Fensterbrett und Griff besitzt, waren beim ersten Test entsprechend viele Drawcalls nötig. Um dies zu verbessern, werden im Schritt der Vorverarbeitung des Modells alle Objekte einer Etage, welche dasselbe Material zugewiesen bekommen haben, vereinigt. Dadurch sind entsprechend Abb. 4.3 neben den Räumen einer Etage noch jeweils ein Verbund pro Material vertreten. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Drawcalls um mehr als das Zehnfache verringert werden. Auch die Auslagerung des Clippings des Modells an der Kante des Displays auf die GPU (Grafikkarte) mit Hilfe eines eigenen Shaders beschleunigt das Rendering. Insgesamt läuft die Anwendung durch die genannten Optimierungen mit rund 20 FPS. Das liegt zwar deutlich unterhalb der Empfehlung, doch fällt in der Realität weniger auf, als vermutet. Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen stehen dargestellte Inhalte den Großteil der Zeit fest im Raum und der Nutzer betrachtet sie in Ruhe. Dadurch fällt die geringe Wiederholfrequenz wenig auf. Zum anderen hilft die HoloLens eigenständig, die Darstellung zu verbessern. Selbst wenn das Hologramm selten neu gezeichnet wird, gleicht die HoloLens dessen Position im Raum durchgängig anhand der aufgenommenen Tracking-Informationen an. Bei statischen Szenen können dadurch geringe Bildwiederholfrequenzen effektiv

ausgeglichen werden.

Auf dem Display führte vor allem der FloodFill-Algorithmus zu langen Wartezeiten. Er ist zwar der einfachste Algorithmus für das Finden von Räumen in den Grundrissen, allerdings nicht der schnellste. Bei den ersten Tests dauerte das Füllen eines Raumes rund 200 Sekunden. Durch veränderte Implementierung mit Hilfe von *Arrays* anstatt *Queues* und *Lists* konnte diese Zeit auf rund eine Sekunde reduziert werden. Da im verwendeten Modell 18 Räume gleichzeitig gefüllt werden müssen, wurde die Ausführung des Algorithmus zusätzlich parallelisiert. Unity bietet hierfür *Coroutines*, welche eine gleichzeitige Abarbeitung verschiedener Aufgaben ermöglicht. Die gefundenen Raumtexturen werden anschließend als Maske verwendet, um die Textur für das Bodenmaterial zu begrenzen. Dadurch kann das Material zur Laufzeit schnell ausgetauscht werden, ohne dass eine erneute Berechnung der Grenzen des Raumes notwendig ist.

Um den Speicherbedarf der Anwendung zu begrenzen, sind die verwendeten *ProceduralMaterials* hilfreich. Sie ermöglichen es, die für die Materialien notwendigen Texturen zur Laufzeit zu erstellen. Die in Unity importierte Substance Designer Datei benötigt dadurch nur rund 90 KB und beinhaltet alle notwendigen Informationen für 25 verschiedene Materialien. Ohne Verwendung von *ProceduralMaterials* wären für vergleichbare Materialien rund 400 MB Speicher notwendig. Die prozedurale Erstellung von Materialien verringert somit den Speicherbedarf deutlich und ermöglicht ein schnelles Übertragen der Anwendung auf die HoloLens. Allerdings ist die Berechnung der Texturen zu Laufzeit sehr rechenintensiv. Auf der HoloLens führt dies zu einer Verzögerung des Startes der Anwendung um etwa 20 Sekunden. Um dem vorzubeugen bietet Unity eine weitere Option. *ProceduralMaterials* können zur Laufzeit Texturen erstellen und im System hinterlegen. Bei erneutem Start der Anwendung kann auf diese gespeicherten Dateien zurückgegriffen werden. Somit ist die aufwändige Berechnung nur beim ersten Start der Anwendung nötig, danach nicht mehr.

Bei der Kommunikation zwischen Display und HoloLens kann es teilweise zur Überlastung des Servers oder eines Clienten kommen, wenn zu viele Nachrichten auf einmal versendet werden. Aus diesem Grund werden in der Anwendung gleichzeitige Nachrichten gesammelt und gestaffelt verschickt. Nach gleichem Prinzip werden eingehende Nachrichten aufgereiht und der Reihe nach abgearbeitet. Die dadurch entstehende Verzögerung der Datenübertragung fällt nicht auf, da die Szenen statisch und somit nicht zeitkritisch sind. Bei der Transformation des Grundrisses müssen entsprechende Informationen an die HoloLens gesendet werden. Anstatt in jeden Frame alle Werte zu senden, werden nur veränderte Werte verschickt und der Abgleich auf fünf Hertz beschränkt. Dies entlastet das Netzwerk. Um eine auffällige, ruckartige Verschiebung des Modells in AR zu verhindern, wird die anschließende Transformation des Modells gleichmäßig ausgeführt. Damit gleitet es dem Grund-

riss hinterher, bis beide wieder aufeinander abgebildet sind. Diese gleichmäßige Bewegung dauert entsprechend der Frequenz rund 0,2 Sekunden.

4.6 Zusammenfassung

Die entwickelte Anwendung setzt prototypisch eine Auswahl der beschriebenen Konzepte um. Es ist möglich, dreidimensionale Inhalte im AR-HMD und dazu passende zweidimensionale Inhalte auf einem Tabletop darzustellen. Weiterhin gestattet die Materialzuweisung in den Räumen die Anpassung des Modells an die Wünsche des Kunden. Diese Änderungen werden entsprechend am Modell sowie in der immersiven Innenansicht dargestellt.

Damit ist es möglich, die Vorteile der Verbindung aus AR-HMD und Tabletop für die Präsentation von architektonischen Projekten sowie die Wirkung der umgesetzten Konzepte zu überprüfen.

Evaluation und Ausblick

Im folgenden Kapitel wird der beschriebene Prototyp detailliert ausgewertet. Dabei werden sowohl die umgesetzten Konzepte als auch die aufgetretenen Probleme erläutert. Darauf aufbauend wird ein Ausblick für die Zukunft gegeben, welcher Erweiterungen am Prototyp ebenso wie weiterführende Ideen für den Anwendungsfall im Allgemeinen beschreibt.

5.1 Evaluation

Der beschriebene Prototyp ist ausreichend umfangreich, um Aussagen über die Anwendbarkeit des "Augmented Display"-Konzeptes von Reipschläger und Dachsel [RD18] für den architektonischen Kontext machen zu können. Die Kombination aus traditionellen zweidimensionalen Inhalten mit modernen dreidimensionalen Darstellungen bietet unerfahrenen Außenstehenden einen besseren Einblick in die Details eines Entwurfes. Ein Architekt kann seine Visionen dem Kunden besser näher bringen, um ihn dadurch von seiner Idee zu überzeugen. Allerdings wurde dieser Eindruck, welcher in der Entwicklungsphase entstand, noch nicht durch einen Architekten in einem echten Szenario bestätigt. Dies ist unter anderem im Prototyp selbst begründet, da er nur auf einem speziell dafür entworfenen, stark vereinfachten Gebäudemodell arbeitet. In einer realen Umgebung müsste das Modell von einem Architekten entworfen werden und deutlich mehr Details beinhalten. Dadurch kann an dieser Stelle nur auf den Eindruck auf Außenstehende zurückgegriffen werden. Die Kombination von Display und AR-Inhalten scheint das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Grundriss und Modell sowie das räumliche Verständnis zu fördern. Dies geht einher mit den Erkenntnissen aus den verwandten, in Kapitel 2 beschriebenen, Forschungen.

Im dritten Kapitel wurden zahlreiche Konzepte für eine Anwendung im Bereich der Architektur aufgezählt und erläutert. Einige davon wurden im Prototyp umgesetzt. Die Transformation des Grundrisses und die damit verbundene Veränderung der dreidimensionalen Darstellung wirkt intuitiv und ist somit neuen Nutzern schnell zugänglich. Dies ist durch die Nähe zu bekannten Interaktionsmustern wie der Pinch-Geste begründet. Weitere Elemente wie beispielsweise zur Wahl einer Etage oder eines Materials scheinen ebenfalls einfach verständlich zu sein, da sie an die

bekannten Symbole (Icons) und Menüs der WIMP-GUIs anknüpfen. Nur die internen Abhängigkeiten der Menüelemente sind für einen Nutzer schwieriger zu erkennen. Beispielweise werden die Schaltflächen für die Heizungsanlage und die Kabelkanäle nur angezeigt, wenn das gesamte Haus sichtbar bzw. keine Etage gewählt ist. Auch wenn diese Bedingungen während der Benutzung erlernt werden, wären Hinweise für den Anfang sinnvoll.

Die Möglichkeit einer Innensicht fördert die Immersion, da sich der Nutzer in einen Raum hineinversetzt fühlt. Dieses Gefühl wird allerdings durch die Wahl der Darstellung als Portal beschränkt, da der Blick ins Innere nur durch einen bestimmten Bereich möglich ist. Problematisch ist außerdem die Fixierung des Portals. Eine Anpassung an die Umgebung mit Hilfe der Raumanalyse (*Spatial Mapping*) des MixedRealityToolkits wäre an dieser Stelle angemessener.

Einige der beschriebenen Konzepte wurden im Prototyp nicht umgesetzt. Dies ist teilweise durch technische Beschränkungen begründet. Beispielweise ist Transparenz, angewendet auf viele Objekte, zu rechenintensiv für die HoloLens, sodass halbtransparente Darstellungen einzelner Etagen, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, aktuell nicht umsetzbar sind.

Die Darstellung von Grundriss und Modell scheint grundlegend angemessen zu sein. Allerdings wurden einige Schwachpunkte erkannt. Der Grundriss auf dem Display ist teilweise schlecht zu erkennen. In der Umsetzung werden Grundrisse als Rastergrafiken mit hoher Auflösung importiert. Um die Performanz zu verbessern, werden diese jedoch verkleinert. Wird durch Skalierung, zur Laufzeit, der Grundriss nun vergrößert, werden verschwommene Linien u. ä. sehr deutlich. Eine Verwendung von Vektorgrafiken wäre hier angemessener. Diese werden jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht nativ in Unity unterstützt. Weiterhin ist die Darstellung des Modells weniger eindrucksvoll als erhofft. Dies ist zum einen in der nötigen Einfachheit, zum anderen in den internen Optimierungen begründet. Außerdem ist das gewählte Display klein, sodass das dreidimensionale Modell sehr klein dargestellt wird. Ein weiteres Problem ist die Überdeckung von Menüs auf dem Display durch das AR-Modell. Wände und Einrichtungsgegenstände überlagern bei entsprechender Transformation die Schaltflächen, was eine Interaktion mit diesen erschwert. Um dies zu verhindern, wurde versucht, das Modell an den Kanten der Menüs anstatt den Kanten des Displays zu beschränken. Allerdings wird dadurch die Darstellung des Modells abermals kleiner, was zu vermeiden ist. Die programmierte Beschneidung des Modells an den jeweiligen Begrenzungen verhindert effektiv visuelle Artefakte, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben wurden. Außerdem ermöglicht es neue Einblicke in die Räume von den Seiten, sobald Wände abgeschnitten werden. Durch die Umsetzung dieser Funktionalität auf Seiten der Grafikkarte wird außerdem die Ausführung auf der HoloLens beschleunigt.

Insgesamt ist die Anwendung aber noch zu komplex für die HoloLens. Sie startet stark verzögert und die Darstellung ist trotz Verbesserungen nicht ausreichend flüs-

sig. Entsprechend müssen die Inhalte, die Logik und die Netzwerkkommunikation optimiert werden.

Das markanteste Problem des Prototyps ist die Registrierung zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Inhalten. Für das Konzept der "Augmented Displays" ist es essentiell, dass beide Teile perfekt aufeinander abgestimmt sind. Im Fall dieses Prototyps müssen quaderförmige Wände exakt über der dazugehörigen, zweidimensionalen Darstellung im Grundriss platziert werden. Dies ist zum heutigen Zeitpunkt nahezu unmöglich. Der erste Grund dafür ist die Darstellung von AR-Inhalten über die HoloLens selbst. Dreidimensionale Objekte werden für das linke und rechte Auge entsprechend aufbereitet, um Tiefenwirkung zu erreichen. Allerdings reichen kleinste Abweichungen wie beispielsweise Augenabstände oder Sitz der Brille auf dem Kopf aus, um das Bild leicht abweichen zu lassen. Ein weiterer Grund ist die analysierte Blickrichtungsabhängigkeit der Darstellungen. Während beispielsweise das Modell, von der Seite aus betrachtet, sehr gut auf dem Display sitzt, scheint es, von vorne betrachtet, in die Tiefe des Displays verschoben zu sein. Diese visuellen Fehler sind bei großen Darstellungen entsprechend weniger auffällig, als bei den verwendeten kleinen Präsentationen von Wänden und Einrichtungsgegenständen. Ein letzter wichtiger Grund ist die Umsetzung von Maßeinheiten im MixedRealityToolkit-Unity. Dabei hat ein Würfel mit einer Einheit Kantenlänge in Unity *rund* einen Meter Kantenlänge in AR auf der HoloLens. Diese Rundung macht Umrechnungen zwischen Maßeinheiten der AR- und der Display-Teilanzwendung ungenau.

All diese Probleme führen dazu, dass Grundriss und 3D-Modell schlecht aufeinander abgestimmt sind. Im Test traten Verschiebungen von bis zu fünf Zentimeter auf. Dies verwirrt den Nutzer stark und verfehlt den Sinn und Zweck der kombinierten Darstellung. Zukünftige technische Fortschritte könnten eine weniger fehleranfällige Darstellung von AR-Inhalten bieten, sodass die Registrierung verbessert werden kann.

Insgesamt eignet sich der Prototyp aber, um die Vorteile des "Augmented Display"-Konzeptes für die Präsentation von architektonischen Projekten zu belegen. Allerdings sind noch einige technische Beschränkungen sowie anwendungsspezifische Probleme zu beheben.

5.2 Ausblick

Da der Prototyp nur einen Teil der Konzepte umsetzt, gibt es noch viel Raum für Verbesserungen und Erweiterungen. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten vorgestellt.

Die technischen Limitationen und die Umsetzung der Anwendung als Prototyp machen eine Vielzahl an Verbesserungen notwendig. Zunächst sollte die Performanz entscheidend verbessert werden. Es müssen Optimierungen an den 3D-Inhalten, als auch an den Skripten vorgenommen werden, sodass die Anwendung mit mindestens 40 FPS läuft. Besser wäre es, wenn sogar die empfohlenen 60 Bildwiederholungen pro Sekunde erreicht werden könnten. Außerdem sollte die Ladezeit beim Start der Anwendung auf dem Display verringert werden, um Verzögerungen vermieden und den Arbeitsstart zu beschleunigen.

Wird die Wiederholfrequenz erreicht, kann an der Verbesserung der dargestellten Inhalte gearbeitet werden. Für die Immersion und den realitätsnahen Eindruck sollte das Modell verbessert und darstellungsverschlechternde Optimierungen deaktiviert werden. Ebenso sollten Materialien angepasst werden, sodass die auffällige Kachelung durch die Wiederholung ein und derselben Textur vermieden wird. Für die Gestaltung muss sehr viel Zeit verwendet werden, um alle kleinen Details anzupassen, bis ein Material realistisch aussieht.

Um die prototypische Anwendung universell nutzbar zu machen, sollte ein dynamisches Laden von Inhalten möglich sein. Idealerweise müsste ein Architekt zur Laufzeit ein exportiertes 3D-Modell auswählen können. Das Modell müsste importiert und allen Objekten die entsprechenden Materialien zugewiesen werden. Dabei müssen Optimierungen sowie die Aufteilung in Etagen durchgeführt werden. Anschließend müssen die 3D-Inhalte für das AR-HMD sowie die Grundrisse für das Display extrahiert werden. Nach gleichem Prinzip müsste es möglich sein, Materialien in die Anwendung zu laden. Aus der importierten Datei muss automatisch ein Menü erstellt und alle Vorschauen der Elemente generiert werden. Intern müssen zusätzlich alle Parameter, wie beispielsweise des Shaders, für die Anwendung passend eingestellt werden. Alternativ wäre auch eine direkte Verbindung mit einem bekannten Architekturprogramm wie Autodesk Revit denkbar. Ein dafür entwickeltes Plug-In würde den mühsamen Ex- und Import der Modelle umgehen. Außerdem wäre der Zugriff auf eine viel größere Menge an akkumulierten Daten möglich, als bei einem exportierten 3D-Modell. Eine entsprechende Anwendung könnte auch direkt in die CAD-Programme namhafter Hersteller inkludiert werden. Dadurch könnte die Darstellung auf AR-HMD und Display direkt aus dem Programm heraus gesteuert werden. Änderungen am Modell würden direkt im Projekt hinterlegt werden.

Als erste Erweiterung des Prototyps sollten die beschriebenen Konzepte zur Manipulation von Wänden eingebaut werden. Damit wäre es möglich, grundlegende CAD-Funktionalitäten direkt in der Anwendung zu bieten. Um ein Vorgehen ähnlich dem in bekannten Architekturprogrammen zu ermöglichen, muss zusätzlich noch die Wahl verschiedener Wandarten bzw. -stärken umgesetzt werden. Außerdem muss es möglich sein, Türen, Fenster und Ähnliches zu platzieren. Damit könnte die Anwendung nicht nur der Präsentation eines fertigen Projektes dienen, sondern auch

als Entwurfstool. Architekt und Kunde können zusammenkommen und der Experte kann, basierend auf Erklärungen des Kunden, eine Skizze von dessen Traumhaus entwerfen. Der Auftraggeber würde einen sofortigen Eindruck durch das 3D-Modell bekommen und erkennen, ob es seinen Wünschen entspricht. Die dabei entstehenden zweidimensionalen Skizzen könnten dann als Basis für die Arbeit des Architekten im richtigen Architekturprogramm dienen.

Ein weiterer Schritt wäre der Einbau der Konzepte für eine freie Inneneinrichtung in die Anwendung. Dafür müsste eine angemessen große Auswahl an Einrichtungsgegenständen als 2D- und 3D-Repräsentation zur Verfügung stehen. Zusammen mit manipulierbarer Wandgeometrie wären somit deutlich mehr Manipulationen als im beschriebenen Prototyp möglich. Dadurch wäre eine genauere Anpassung des Gebäudes an die Wünsche des Kunden möglich. AR- bzw. auch VR-Visualisierungen ermöglichen dann das realitätsgetreue Erleben des Gebäudes noch vor dem Baustart.

Während der Entwicklung der Anwendung sind auch einige wichtige Punkte für die Forschung in der Zukunft aufgetaucht. Beispielsweise sollte die Wirkung von AR in der architektonischen Visualisierung erforscht werden. In einer Studie könnten Testpersonen beispielsweise gebeten werden, Probleme in einem bestehenden Projekt zu finden. Dabei erhält ein Personenkreis kommentarlos den Grundriss, ein weiterer Hinweise von einem Architekten und die letzte Gruppe zusätzlich ein 3D-Modell. Nun wäre zu untersuchen, welche Gruppe diverse Probleme, wie zu schmale Räume oder zu geringe Brüstungshöhen, am ehesten bemerkt. Anschließend könnten Vor- und Nachteile der Darstellung in Augmented Reality für den Bereich der Architektur erörtert werden.

Eine weitere Studie sollte sich mit den Vor- und Nachteilen von AR und VR im Bereich der Architektur beschäftigen. Wie im Kapitel 2.2 festgestellt, entstanden in der Forschung oft architektonische AR-Prototypen, während in der Wirtschaft vermehrt VR-Technologien zum Einsatz kommen. Somit sollte die Studie untersuchen, wie sich die Immersion von virtuellen Gebäuden in AR und VR unterscheidet. Dabei sollten Aussagen der Nutzer zum Eindruck der Szenen oder zum empfundenen Raumgefühl ausgewertet werden.

Eine wichtige Forschungsrichtung für die Zukunft ist vor allem die Optimierung der heutigen AR-Technologien. Für hochrealistische Darstellungen wird deutlich mehr Rechenleistung benötigt. Außerdem sollte das Sichtfeld der AR-HMDs erweitert werden, um die Immersion für den Träger zu verbessern. Zusätzlich sind Funktionalitäten wie bei dem von Santos et al. entworfenen AR-HMD vorteilhaft [San+10]. Dieses erlaubt es, gezielt einfallendes Umgebungslicht auszublenden. Damit wäre ein dynamischer Wechsel zwischen AR und VR möglich. Dies könnte Vorteile beider Bereiche vereinen. Insgesamt sollte das AR-HMD der Zukunft kabellos sein bzw. bleiben und an Umfang bzw. Gewicht verlieren. Das könnte die Nutzung vereinfachen und die allgemeine Verbreitung ähnlicher Technologien voranbringen.

5.3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnten einige Vorteile des "Augmented Display"-Konzeptes für einen architektonischen Anwendungsfall belegt werden. So bieten dreidimensionale Modelle einen einfach verständlichen Zugang für Laien zu den Entwürfen eines Architekten. Dieser muss durch die Kombination eines AR-HMD mit einem Display für die Präsentation nicht auf die traditionellen, detaillierten Grundrisse verzichten. Das Display ermöglicht außerdem eine intuitive Interaktion.

Für diesen Anwendungsfall wurden gezielt Konzepte entwickelt, welche die Darstellung und die Interaktion mit Inhalten aus einem architektonischen CAD-Programm ermöglichen. Ausgewählte Konzepte wurden anschließend in einer prototypischen Anwendung umgesetzt. Diese Implementierung belegt die Vorteile der Darstellung von architektonischen Entwürfen in AR sowie der "Augmented Displays" für den genannten Anwendungsfall. Weiterhin wurden einige Beschränkungen des Prototyps sowie der heutigen Technik erkannt. Darauf aufbauend wurden verschiedene Ansätze für zukünftige Entwicklungen und Forschungen beschrieben.

Literatur

- [Aka+10] Eric Akaoka, Tim Ginn und Roel Vertegaal. „DisplayObjects: Prototyping Functional Physical Interfaces on 3D Styrofoam, Paper or Cardboard Models“. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. TEI '10. Cambridge, Massachusetts, USA: ACM, 2010, S. 49–56 (zitiert auf Seite 10).
- [Ari+12] Ryan Arisandi, Yusuke Takami, Mai Otsuki et al. „Enjoying Virtual Handcrafting with ToolDevice“. In: *Adjunct Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST Adjunct Proceedings '12. Cambridge, Massachusetts, USA: ACM, 2012, S. 17–18 (zitiert auf Seite 14).
- [Azu+01] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer et al. „Recent advances in augmented reality“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 21.6 (2001), S. 34–47 (zitiert auf Seite 11).
- [Beh+15] Amir H. Behzadan, Suyang Dong und Vineet R. Kamat. „Augmented reality visualization: A review of civil infrastructure system applications“. In: *Advanced Engineering Informatics* 29.2 (2015). Infrastructure Computer Vision, S. 252–267 (zitiert auf Seite 11).
- [Bil13] Mark Billinghurst. „Hands and Speech in Space: Multimodal Interaction with Augmented Reality Interfaces“. In: *Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction*. ICMI '13. Sydney, Australia: ACM, 2013, S. 379–380 (zitiert auf Seite 14).
- [BK05] Amir H. Behzadan und Vineet R. Kamat. „Visualization of Construction Graphics in Outdoor Augmented Reality“. In: *Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation*. WSC '05. Orlando, Florida: Winter Simulation Conference, 2005, S. 1914–1920 (zitiert auf Seite 10).
- [Buc+04] Volkert Buchmann, Stephen Violich, Mark Billinghurst und Andy Cockburn. „FingARtips: Gesture Based Direct Manipulation in Augmented Reality“. In: *Proceedings of the 2Nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*. GRAPHITE '04. Singapore: ACM, 2004, S. 212–221 (zitiert auf Seite 14).
- [Chu+17] Hui-Chun Chu, Jun-Ming Chen, Gwo-Jen Hwang und Tsung-Wen Chen. „Effects of formative assessment in an augmented reality approach to conducting ubiquitous learning activities for architecture courses“. In: *Universal Access in the Information Society* (2017) (zitiert auf Seite 11).

- [CN+93] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin und Thomas A. DeFanti. „Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE“. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '93. Anaheim, CA: ACM, 1993, S. 135–142 (zitiert auf Seite 8).
- [Cou+03] Nathan Cournia, John D. Smith und Andrew T. Duchowski. „Gaze- vs. Hand-based Pointing in Virtual Environments“. In: *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '03. Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM, 2003, S. 772–773 (zitiert auf Seite 15).
- [FR13] Márcia Regina de Freitas und Regina Coeli Ruschel. „What is Happening to Virtual and Augmented Reality Applied to Architecture?“ In: *Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013) / Singapore 15-18 May 2013*, pp. 407-416. 2013 (zitiert auf Seite 10).
- [Fun+17] Markus Funk, Mareike Kritzler und Florian Michahelles. „HoloLens is More Than Air Tap: Natural and Intuitive Interaction with Holograms“. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things. IoT '17*. Linz, Austria: ACM, 2017, 31:1–31:2 (zitiert auf Seite 14).
- [FW00] P. Frost und P. Warren. „Virtual reality used in a collaborative architectural design process“. In: *2000 IEEE Conference on Information Visualization. An International Conference on Computer Visualization and Graphics*. 2000, S. 568–573 (zitiert auf Seite 8).
- [Gor+14] Ishan Goradia, Jheel Doshi und Lakshmi Kurup. „A Review Paper on Oculus Rift & Project Morpheus“. In: *International Journal of Current Engineering and Technology* (2014) (zitiert auf Seite 14).
- [Hin+10] Ken Hinckley, Koji Yatani, Michel Pahud et al. „Pen + Touch = New Tools“. In: *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, New York, USA: ACM, 2010, S. 27–36 (zitiert auf Seite 37).
- [Hsi+17] Jen-Hsuan Hsiao, Yu-Heng Deng, Tsung-Ying Pao, Hsin-Rung Chou und Jen-Yuan (James) Chang. „Design of a Wireless 3D Hand Motion Tracking and Gesture Recognition Glove for Virtual Reality Applications“. In: *Proceedings of the ASME 2017 Conference on Information Storage and Processing Systems*. 29. Aug. 2017 (zitiert auf Seite 14).
- [Ich+09] Ryosuke Ichikari, Ryohei Hatano, Toshikazu Ohshima, Fumihisa Shibata und Hideyuki Tamura. „Designing Cinematic Lighting by Relighting in MR-based Pre-visualization“. In: *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Posters*. SIGGRAPH ASIA '09. Yokohama, Japan: ACM, 2009, 35:1–35:1 (zitiert auf Seite 16).
- [Ish+02] Hiroshi Ishii, Eran Ben-Joseph, John Underkoffler et al. „Augmented Urban Planning Workbench: Overlaying Drawings, Physical Models and Digital Simulation“. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. ISMAR '02. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2002, S. 203– (zitiert auf Seite 13).

- [IU97] Hiroshi Ishii und Brygg Ullmer. „Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms“. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '97. Atlanta, Georgia, USA: ACM, 1997, S. 234–241 (zitiert auf Seite 13).
- [Kat+03] Hirokazu Kato, Keihachiro Tachibana, Masaaki Tanabe, Takeaki Nakajima und Yumiko Fukuda. „A City-Planning System Based on Augmented Reality with a Tangible Interface“. In: *Proceedings of the 2Nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. ISMAR '03. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2003, S. 340– (zitiert auf den Seiten 13, 14).
- [Kli+01] Gudrun Klinker, Didier Stricker und Dirk Reiners. „Augmented Reality for Exterior Construction Applications“. In: *AUGMENTED REALITY AND WEARABLE COMPUTERS*. Lawrence Erlbaum Press, 2001, S. 397–427 (zitiert auf den Seiten 10–12).
- [Kot+06] Aaron Kotranza, John Quarles und Benjamin Lok. „Mixed Reality: Are Two Hands Better Than One?“ In: *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '06. Limassol, Cyprus: ACM, 2006, S. 31–34 (zitiert auf Seite 15).
- [Lee+12] G. A. Lee, A. Dünser, Seungwon Kim und M. Billinghurst. „CityViewAR: A mobile outdoor AR application for city visualization“. In: *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH)*. 2012, S. 57–64 (zitiert auf Seite 11).
- [Lin+17] Jia-Wei Lin, Ping-Hsuan Han, Jiun-Yu Lee et al. „Visualizing the Keyboard in Virtual Reality for Enhancing Immersive Experience“. In: *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*. SIGGRAPH '17. Los Angeles, California: ACM, 2017, 35:1–35:2 (zitiert auf Seite 15).
- [Lop+17] Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki und Patrick Baudisch. „Providing Haptics to Walls & Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation“. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA: ACM, 2017, S. 1471–1482 (zitiert auf Seite 14).
- [Lé+08] A. Lécuyer, F. Lotte, R. B. Reilly et al. „Brain-Computer Interfaces, Virtual Reality, and Videogames“. In: *Computer* 41.10 (2008), S. 66–72 (zitiert auf Seite 15).
- [Mir+12] Mohammad Reza Mirzaei, Seyed Ghorshi und Mohammad Mortazavi. „Using Augmented Reality and Automatic Speech Recognition Techniques to Help Deaf and Hard of Hearing People“. In: *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*. VRIC '12. Laval, France: ACM, 2012, 5:1–5:4 (zitiert auf den Seiten 14, 15).
- [MK94] Paul Milgram und Fumio Kishino. *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. Dez. 1994 (zitiert auf Seite 8).
- [ML14] Mehdi Mekni und André Lemieux. „Augmented Reality : Applications , Challenges and Future Trends“. In: 2014 (zitiert auf den Seiten 10, 11).
- [Nie+17] Diederick C. Niehorster, Li Li und Markus Lappe. „The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research“. In: *i-Perception* 8.3 (2017), S. 2041669517708205. eprint: <https://doi.org/10.1177/2041669517708205> (zitiert auf Seite 14).

- [Pfe07] Thies Pfeiffer. „Towards Gaze Interaction in Immersive Virtual Reality : Evaluation of a Monocular Eye Tracking Set-Up“. In: *Virtuelle und Erweiterte Realität - Fünfter Workshop*. Shaker Verlag, 2007, S. 81–92 (zitiert auf Seite 15).
- [Por+15] M.E. Portman, A. Natapov und D. Fisher-Gewirtzman. „To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning“. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 54 (2015), S. 376 –384 (zitiert auf Seite 9).
- [PR65] Vitruvius Pollio und Franz Reber. *Zehn Bücher über Architektur*. Bd. 110. 1865 (zitiert auf Seite 1).
- [RD18] Patrick Reipschläger und Raimund Dachzelt. „Augmented Displays: Using Augmented Reality to Extend Interactive Surfaces“. 2018 (zitiert auf den Seiten 2, 3, 15, 57).
- [Rza+18] Rufat Rzayev, Paweł W. Wozniak, Tilman Dingler und Niels Henze. „Reading on Smart Glasses: The Effect of Text Position, Presentation Type and Walking“. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada: ACM, 2018, 45:1–45:9 (zitiert auf Seite 16).
- [San+10] Pedro Santos, Dominik Acri, Thomas Gierlinger, Hendrik Schmedt und André Stork. „Supporting Outdoor Mixed Reality Applications for Architecture and Cultural Heritage“. In: *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*. SpringSim '10. Orlando, Florida: Society for Computer Simulation International, 2010, 190:1–190:8 (zitiert auf den Seiten 10, 16, 36, 61).
- [Sei15] Hartmut Seichter. *Benchworks - Augmented Reality Urban Design*. Juli 2015 (zitiert auf Seite 13).
- [SR+15] Albert Sánchez Riera, Ernest Redondo und David Fonseca. „Geo-located teaching using handheld augmented reality: good practices to improve the motivation and qualifications of architecture students“. In: *Universal Access in the Information Society* 14.3 (2015), S. 363–374 (zitiert auf Seite 11).
- [SS07] Markus Sareika und Dieter Schmalstieg. „Urban Sketcher: Mixed Reality on Site for Urban Planning and Architecture“. In: *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. ISMAR '07. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007, S. 1–4 (zitiert auf Seite 10).
- [SS10] Markus Sareika und Dieter Schmalstieg. „Bimanual Handheld Mixed Reality Interfaces for Urban Planning“. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '10. Roma, Italy: ACM, 2010, S. 189–196 (zitiert auf Seite 11).
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. „A Head-mounted Three Dimensional Display“. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*. AFIPS '68 (Fall, part I). San Francisco, California: ACM, 1968, S. 757–764 (zitiert auf Seite 9).
- [Tho+01] Bruce Thomas, Wayne Piekarski und Bernard Gunther. *Using Augmented Reality to Visualise Architecture Designs In An Outdoor Environment*. Okt. 2001 (zitiert auf Seite 10).

- [TJ00] Vildan Tanriverdi und Robert J. K. Jacob. „Interacting with Eye Movements in Virtual Environments“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '00. The Hague, The Netherlands: ACM, 2000, S. 265–272 (zitiert auf Seite 15).
- [UI99] John Underkoffler und Hiroshi Ishii. „Urp: A Luminous-tangible Workbench for Urban Planning and Design“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: ACM, 1999, S. 386–393 (zitiert auf den Seiten 13, 14, 37).
- [Wan09] Xiangyu Wang. „Augmented Reality in Architecture and Design: Potentials and Challenges for Application“. In: *International Journal of Architectural Computing* 7.2 (2009), S. 309–326 (zitiert auf den Seiten 11, 15).
- [Web+96] Anthony Webster, Steven Feiner, Blair Macintyre, William Massie und Theodore Krueger. *Augmented Reality in Architectural Construction, Inspection, and Renovation*. 1996 (zitiert auf Seite 10).
- [Why03] Jennifer Whyte. „Industrial applications of virtual reality in architecture and construction“. In: *4. Journal of Information Technology in Construction 2003* (2003) (zitiert auf Seite 9).
- [Wu+17] Chien-Min Wu, Chih-Wen Hsu, Tzu-Kuei Lee und Shana Smith. „A virtual reality keyboard with realistic haptic feedback in a fully immersive virtual environment“. In: *Virtual Reality* 21.1 (2017), S. 19–29 (zitiert auf Seite 14).
- [Yan+11] Wei Yan, Charles Culp und Robert Graf. „Integrating BIM and gaming for real-time interactive architectural visualization“. In: *Automation in Construction* 20.4 (2011), S. 446–458 (zitiert auf Seite 16).
- [Zha+14] Ming Zhang, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda und Yuichi Ohta. „A Projection-based Mixed-reality Display for Exterior and Interior of a Building Diorama“. In: *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '14. Edinburgh, Scotland: ACM, 2014, S. 211–212 (zitiert auf Seite 10).
- [Zha98] Shumin Zhai. „User Performance in Relation to 3D Input Device Design“. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 32.4 (Nov. 1998), S. 50–54 (zitiert auf Seite 12).

Webseiten

- [All18] Allegorithmic. *Substance Designer - Material Authoring Software*. 24. Aug. 2018. URL: <https://www.allegorithmic.com/products/substance-designer> (zitiert auf Seite 44).
- [Aug18] Augment. *Augmented Reality for Architecture & Construction*. 1. Aug. 2018. URL: <http://www.augment.com/augmented-reality-architecture/> (zitiert auf den Seiten 3, 11).
- [Aut18a] Autodesk. *3ds Max | Software für Modellierung, Animation und Visualisierung in 3D | Autodesk*. Accessed: 30.07.2018. 24. Aug. 2018. URL: <https://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview> (zitiert auf Seite 43).
- [Aut18b] Autodesk. *Autodesk BIM*. Accessed: 30.07.2018. 30. Juli 2018. URL: <https://www.autodesk.de/solutions/bim> (zitiert auf Seite 6).
- [Aut18c] Autodesk. *Maya | Software für Computeranimation und Modellierung | Autodesk*. Accessed: 30.07.2018. 24. Aug. 2018. URL: <https://www.autodesk.de/products/maya/overview> (zitiert auf Seite 43).
- [Aut18d] Autodesk. *Revit | BIM-Software | Autodesk*. Accessed: 30.07.2018. 30. Juli 2018. URL: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview> (zitiert auf den Seiten 7, 43).
- [Beh18] Behance. *HoloLens Designed by Microsoft Device Design Team*. 23. Sep. 2018. URL: <https://www.behance.net/gallery/41699719/HoloLens-Designed-by-Microsoft-Device-Design-Team> (zitiert auf Seite 41).
- [BMV18] BMVI. *Stufenplan Digitales Planen und Bauen*. Accessed: 30.07.2018. 30. Juli 2018. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf> (zitiert auf Seite 6).
- [BP18] Lukas-Micha Binder und Jürgen Punz. *AntVR*. 9. Aug. 2018. URL: http://jupuvr.blogspot.com/2015/04/antvr_1.html (zitiert auf Seite 14).
- [Ger18] Fabian Gerold. *IFC++ - Open Source IFC Implementation*. 8. Aug. 2018. URL: <http://www.ifcquery.com/> (zitiert auf Seite 7).
- [Gre18] Damnik Gregor. *BIM@work*. 30. Juli 2018. URL: <https://tu-dresden.de/mn/psychologie/lehrlern/forschung/projekte/bim-work> (zitiert auf Seite 7).
- [Hur18] Andrea Hurschler. *Planungstools im Internet*. 9. Aug. 2018. URL: http://www.haus-und-wohnen.ch/de-wAssets/img/bauen_umbauen/architektur_trends/aktuell/raumplaner-im-internet/raumplaner_haus-bauen_09.jpg (zitiert auf Seite 12).
- [Mic18a] Microsoft. *GitHub - Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity*. 1. Sep. 2018. URL: <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity> (zitiert auf Seite 46).
- [Mic18b] Microsoft. *Microsoft HoloLens*. 1. Aug. 2018. URL: <https://www.microsoft.com/de-de/hololens> (zitiert auf Seite 41).
- [Pla18] Playstation. *PlayStation VR*. 1. Aug. 2018. URL: <https://www.playstation.com/de-de/explore/playstation-vr> (zitiert auf Seite 9).

- [Tek18] Tekla. *Tekla BIM*. Accessed: 30.07.2018. 30. Juli 2018. URL: <https://www.tekla.com/de/was-ist-bim> (zitiert auf Seite 6).
- [Ton18] Micke Tong. *4 Tipps für erste Anwendungen von Virtual Reality in der Architektur*. Hrsg. von Autodesk. 23. Sep. 2018. URL: <https://www.autodesk.de/redshift/virtual-reality-in-architecture/> (zitiert auf Seite 3).
- [Viv18] Vive. *VIVE*. 1. Aug. 2018. URL: <https://www.vive.com/de/> (zitiert auf Seite 9).
- [Act18] Act-3D B.V. *Lumion 3D-Architekturvisualisierungssoftware*. 8. Aug. 2018. URL: <https://www.lumion3d.de/> (zitiert auf Seite 8).
- [Aut18] Autodesk, Inc. *AutoCAD for Mac und Windows | CAD-Software | Autodesk*. 8. Aug. 2018. URL: <https://www.autodesk.de/products/autocad> (zitiert auf Seite 7).
- [Bau18] BauInfoConsult GmbH. *Verbreitung von BIM*. Accessed: 30.07.2018. 30. Juli 2018. URL: http://www.bauinfoconsult.de/presse/pressemitteilungen/2014/bekanntheit_und_verwendung_von_bim_wachst_bei_architekten_vor_alle_m_bei_briten_und_niederlandern/2167 (zitiert auf Seite 7).
- [Cha18] Chaos Software Ltd. *Chaos Group | Rendering & Simulation Software – V-Ray, VRscans & Phoenix FD*. 8. Aug. 2018. URL: <https://www.chaosgroup.com/> (zitiert auf Seite 8).
- [Dit18] Dittel Architekten GmbH. *Digitalisierung in der Architektur*. Accessed: 30.07.2018. 31. Juli 2018. URL: <https://di-a.de/artikel-news/die-digitalisierung-in-der-architektur/> (zitiert auf Seite 5).
- [GRA18] GRAPHISOFT SE. *ARCHICAD 22 — Rundum BIM*. 8. Aug. 2018. URL: <http://www.graphisoft.de/archicad/> (zitiert auf Seite 7).
- [NEM18] NEMETSCHKE Group. *NEMETSCHKE: Allplan*. 8. Aug. 2018. URL: <https://www.nemetschek.com/marken/allplan/> (zitiert auf Seite 7).
- [Ocu18] Oculus VR. *Oculus Rift*. 1. Aug. 2018. URL: <https://www.oculus.com/rift/> (zitiert auf Seite 9).
- [Uni18] Unity Technologies. *Products - Unity*. 1. Sep. 2018. URL: <https://unity3d.com/de/unity> (zitiert auf den Seiten 41, 46).
- [bui18] buildingSMART e.V. *IFC*. 30. Juli 2018. URL: <https://www.buildingsmart.de/bim-knowhow/standards> (zitiert auf Seite 7).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Komplexer Grundriss	2
1.2	Komplexes Gebäudemodell	2
1.3	AR in der Architektur	3
1.4	VR in der Architektur	3
2.1	Architektonischer Workflow: Traditionell	5
2.2	Architektonischer Workflow: Modern	6
2.3	Bim-fähige Programme	7
2.4	AR-Anwendung auf einem Tablet	12
2.5	Überlagerung eines Videos mit einer virtuellen Brücke	12
2.6	Urp	14
2.7	Luminous Table	14
3.1	Modell-Präsentationen	20
3.2	Bezug zwischen Grundriss und Modell	21
3.3	Grundriss-Darstellung	21
3.4	Clipping der Inhalte am Displayrand	22
3.5	Modell-Ansichten	22
3.6	Grundriss-Interaktion	24
3.7	Auswahl der Etage	25
3.8	Grundriss-Manipulation	26
3.9	Material-Darstellungen	27
3.10	Verschiedene Material-Menüs	29
3.11	Material-Eigenschaften	30
3.12	Material-Zuweisung	30
3.13	Inneneinrichtung	32
3.14	Standpunktwahl für Innenansicht	33
3.15	Innenansicht	34
3.16	Wahl des Sonnenstandes	35
4.1	Microsoft HoloLens	41
4.2	Das Hausmodell	43
4.3	Modell-Vorverarbeitung	43
4.4	Prozedurale Materialerstellung	44
4.5	Verschiedene Materialien	44

4.6	Benutzeroberfläche	47
4.7	Modell im Ganzen	48
4.8	Etage im Detail	49
4.9	Innenansicht	50
4.10	Pinnadel zur Standortmarkierung	51
4.11	Darstellung der Heizungsanlage	51

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

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

Dresden, 1. Oktober 2018

Severin Engert