

Orientierung und Nutzersteuerung in der Virtuellen Realität am Beispiel 'Hamburg: Neue Burg VR'

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der

HafenCity Universität Hamburg

im Fachbereich

Geodäsie & Geoinformatik

vorgelegt von

Simon Deggim

Hamburg, 2024

Impressum

Simon Deggim

Orientierung und Nutzersteuerung in der Virtuellen Realität am Beispiel
'Hamburg: Neue Burg VR'

Dissertation an der HafenCity Universität Hamburg, Fachbereich Geodäsie & Geoinformatik

Abgabe der Dissertation 25.04.2024

Verteidigung 07.10.2024

Publikation 05.11.2024

DOI: 10.34712/142.63

Lizenz

Dieses Werk ist unter der Creative Commons Lizenz "CC BY 4.0 – Namensnennung 4.0 International" veröffentlicht. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Gutachter

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten (HafenCity Universität Hamburg)

Zweitgutachter: PD Dr. rer. nat. Dennis Edler (Ruhr-Universität Bochum)

Zusätzliche Professur: Prof. Dr.-Ing. Youness Dehbi (HafenCity Universität Hamburg)

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe (HafenCity Universität Hamburg)

Danksagung

Im Laufe dieser Promotion wurde ich von vielen Menschen auf vielen Ebenen unterstützt, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Dafür möchte ich mich herzlichst bedanken.

Mein Dank gilt zuallererst Thomas Kersten für die Möglichkeit, diese Arbeit durchzuführen, für das Vertrauen und den Freiraum für meine Ideen, für die langjährige Begleitung und Unterstützung bereits seit dem Studium, für die vielen gemeinsamen spannenden Projekte vor und parallel zu dieser Arbeit sowie für die Aufmunterung und den Glauben an mich während schwieriger Phasen.

Ich möchte außerdem Dennis Edler danken für viele weiterführende und lehrreiche Gespräche, insbesondere zu den Studien, und seinen Einsatz als Zweitbetreuer. Dank gilt auch den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Youness Dehbi und Jochen Schiewe.

Ich bedanke mich außerdem beim Archäologischen Museum Hamburg für die Zusammenarbeit, insbesondere Michael Merkel und Kay-Peter Suchowa. Kay lebt die Begeisterung für Archäologie und Geschichte mit jeder Faser und hat mir viele spannende und hilfreiche Einblicke verschafft, ohne die das VR-Projekt zur Neuen Burg nicht möglich gewesen wäre.

Bei Anna Wolf und Patrick Postert möchte ich mich für den intensiven Austausch zu allen Themen der Virtuellen Realität bedanken, für neue Denkanstöße und vor allem für das Testen und die konstruktiven Rückmeldungen zum Studiendesign.

Das VR-Projekt wurde außerdem von Julian Gebhard und Jasper Koch auf Herz und Nieren geprüft, vielen Dank dafür. Ich danke darüber hinaus Aaron Meyer für die Tests zu den Charakterzeichnungen.

Bei Jana Stüven und Marina Schünemann möchte ich mich für ungezählte Schreibsessions bedanken, die mir sehr bei der Motivation geholfen haben. Das Coworking mit euch hat mich aus so mancher Schreibblockade befreit.

Inga Schlegel, Laura Jensen, Nele Kroll und Henny Fleischmann möchte ich einen ganz großen Dank aussprechen für die häufigen Gespräche über die Ups und Downs des Promovierens und darüber hinaus sowie für das Lösen wissenschaftlicher, formaler, realer oder imaginärer Probleme.

Darüber hinaus durfte ich über die Jahre mit einigen weiteren tollen Kolleginnen und Kollegen zusammenarbeiten, die mich alle auf ihre Weise unterstützt, ausgebildet, motiviert, angespornt und inspiriert haben oder einfach für einen Plausch, eine heiße Schokolade oder ein Mittagessen da waren. Vielen Dank dafür an Felix Tschirschwitz, Hannes Kröger, Maren Lindstaedt, Alexander Walmsley, Annette Eicker, Kuei-Hua Hsu, Güren Dinga, Mona Lütjens, Tanja Dufek, Annette Scheider, Kay Zobel, Klaus Mechelke und Udo Freier.

Meinen Eltern Sabine und Dieter und meinem Bruder Philip gebührt ein ganz besonderer Dank! Für die Bestärkung, meinen Weg zu gehen und für die Begleitung durch alle Höhen und Tiefen.

Und schließlich möchte ich mich bei meiner Theaterfamilie bedanken, den University Players. Für das Teilen einer Leidenschaft, die mir die Welt bedeutet, für einige sehr tiefe Freundschaften, für die schönsten Momente, für's Hochleben und Erden und für die stetige Erinnerung daran, worauf es im Leben eigentlich ankommt. Danke!

Zusammenfassung

Die Technologie der Virtuellen Realität (VR) hat in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt und findet inzwischen Anwendung in einigen Marktsegmenten wie der Unterhaltungsbranche, für Trainingsimulationen oder für Planungsprozesse. Auch im Bereich der Wissenschaftskommunikation ist ein Zuwachs an Anwendungen zu beobachten, die auf VR als Medium setzen. Für Museen hat sich die Unterkategorie des Virtuellen Museums (VM) für die Digitalisierung des Ausstellungserlebnisses etabliert. Das Alleinstellungsmerkmal der VR ist die Immersion und das daraus entstehende Präsenzgefühl innerhalb einer virtuellen Umgebung. Diesem Effekt wird ein hohes Potential zugeschrieben, allerdings ist dieses Potential in der Regel hinter einer gewissen Lernkurve versteckt. Viele Anwendungen beschränken sich daher auf spezielle Lösungen, die umfangreiche Interaktionen der Nutzenden vermeiden oder die Anwesenheit von Begleitpersonal erforderlich machen. Auf der anderen Seite existieren im Unterhaltungs- und Trainingsbereich viele Anwendungen, die entweder Vorerfahrung oder Einarbeitung erfordern. Die Lücke dazwischen ist noch weitgehend unerschlossen.

In dieser Arbeit werden daher zwei Kernthemen zur Untersuchung identifiziert, die zur Schließung dieser Lücke besonders relevant sind: Orientierung und Nutzersteuerung. Die Orientierung in VR unterscheidet sich mitunter grundlegend von Bildschirmanwendungen und aufgrund technischer oder räumlicher Limitationen auch von der Realität. Die Wegfindung und die Bildung einer kognitiven Karte sind aber unerlässlich, um offene virtuelle Welten erforschen zu können. Damit zusammenhängend bedarf es einer intuitiven Bedienung, um die Lernkurve abzuflachen und VR für eine breite Zielgruppe ohne Vorerfahrung und in einem zeitlich begrenzten Kontext für Bildungsanwendungen zugänglich zu machen.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden im Rahmen zweier Studien mehrere Hilfsmittel zur Orientierung hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht, Erwartungen an VR ausgewertet und das Nutzenden- und Orientierungsverhalten analysiert. Die Ergebnisse legen die Notwendigkeit nahe, die Hilfsmittel je nach Kontext spezifisch anzupassen. Während zur Wegfindung vor allem eine Navigationsline hilfreich ist, wird die Wahrnehmung der Umgebung vor allem durch Hilfsmittel mit exozentrischer Weltsicht unterstützt. Die Beliebtheit der Hilfsmittel – ein wichtiger Faktor beim Design von VR-Anwendungen allgemein – korrespondiert dabei nur teilweise mit der Effizienz. Zudem konnten unterschiedliche Strategien zur Orientierung in VR beobachtet werden.

Im zweiten und anwendungsbasierten Teil wird die Entwicklung des VR-Programms 'Hamburg: Neue Burg VR' beschrieben, das auf Basis dieser Erkenntnisse konzipiert wurde. Dabei handelt es sich um eine interaktive, ca. halbstündige VR-Erkundungstour durch die Rekonstruktion der Neuen Burg in Hamburg vor 1000 Jahren. Mit einer vom Archäologischen Museum Hamburg (AMH) zur Verfügung gestellten Datengrundlage wurde ein Teil des historischen Hamburgs detailliert modelliert und texturiert. 22 Stationen bieten dem Prinzip der Gamification folgend spielerische Möglichkeiten, die Geschichte der Burg und die Stadtentwicklung Hamburgs nachzuvollziehen. Das Programm ist sowohl zum Einsatz im Museum als auch als eigenständige VR-Erfahrung gedacht und ist weltweit zum kostenlosen Download verfügbar.

Weitere, für die Entwicklung von musealen VR-Anwendungen relevante und in dieser Arbeit diskutierte Aspekte sind der Umgang mit ungesicherten historischen Daten, der Einfluss der Fortbewegung auf die Orientierung, besondere Anforderungen bestimmter Zielgruppen, mögliche Anwendungsszenarien und insbesondere die Eignung von 3D-Geodaten für (VR-)Echtzeit-Visualisierungen.

Abstract

Virtual reality (VR) technology has made great progress in recent years and is already in use in some market segments such as the entertainment industry, for training simulations or planning processes. An increase in applications that rely on VR as a medium can also be observed in the field of science communication. For museums, the sub-category of the virtual museum (VM) has established itself for the digitalisation of the exhibition experience.

The unique feature of VR is immersion and the resulting feeling of presence within a virtual environment. A high potential is attributed to this effect, but this potential is usually hidden behind a large learning curve. Many applications are therefore limited to special solutions that avoid extensive user interaction or require the presence of accompanying personnel. On the other hand, there are many applications in the entertainment and training sector that require either prior experience or training. The gap in between is still largely unexplored.

In this thesis, two core topics for further investigation are identified that are particularly relevant to closing this gap: orientation and usability. Orientation in VR differs fundamentally from screen applications and, due to technical or spatial limitations, also from reality. However, pathfinding and the creation of a cognitive map are essential in order to be able to explore open virtual worlds. Furthermore, intuitive usability is required in order to flatten the learning curve and make VR accessible to a broad target group without previous experience and in a time-limited context for educational applications.

In the first part of this thesis, several orientation tools are examined with regard to their efficiency, expectations of VR are evaluated and user and orientation behaviour are analysed. For this purpose, two studies were designed and conducted. The results suggest the need to specifically adapt the aid depending on the context. While a navigation line is particularly helpful for pathfinding, the perception of the environment is primarily supported by aids with an exocentric world view. The popularity of the aids - an important factor in the design of VR applications in general - only partially corresponds to their efficiency. In addition, different strategies for orientation in VR were observed.

The second and practical part describes the development of the VR program 'Hamburg: Neue Burg VR', which was designed on the basis of these findings. It is an interactive, approximately half-hour VR exploration tour through the virtually reconstructed Neue Burg (New Castle) in Hamburg 1000 years ago. Using data provided by the Archaeological Museum Hamburg (AMH), a part of historical Hamburg was modelled and textured in detail. Following the principle of gamification, 22 stations offer playful opportunities to understand the history of the castle and Hamburg's urban development. The program is intended both for use in the museum and as a stand-alone VR experience and is available for free download worldwide.

Other aspects relevant to the development of museum VR applications are discussed. Among them are the handling of vague historical source data, the influence of locomotion on orientation, special requirements of certain target groups, possible application scenarios and, in particular, the suitability of 3D geodata for (VR) real-time visualisations.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| DANKSAGUNG | V |
| ZUSAMMENFASSUNG..... | VII |
| ABSTRACT | IX |
| INHALTSVERZEICHNIS..... | XI |
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 Allgemein | 1 |
| 1.2 Motivation, Forschungslücken & Ziele | 2 |
| 1.3 Aufbau dieser Arbeit | 4 |
| 2 GESCHICHTLICHER HINTERGRUND DER 'NEUEN BURG' | 7 |
| 2.1 Geschichte & Stadtentwicklung | 7 |
| 2.2 Archäologische Ausgrabungen vom AMH | 10 |
| 3 GRUNDLAGEN DER VIRTUELLEN REALITÄT..... | 13 |
| 3.1 Definitionen | 13 |
| 3.2 Geschichte der VR | 14 |
| 3.3 Funktionsweise heutiger VR-Systeme | 17 |
| 3.4 Aktuelle Daten, Technik & Forschung | 21 |
| 4 GRUNDLAGEN ZUR WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION | 27 |
| 4.1 Virtuelle Museen..... | 27 |
| 4.2 Gamification & Serious Games..... | 29 |
| 4.3 Geoinformationswissenschaften in der 3D-Visualisierung und VR | 30 |
| 5 HINTERGRÜNDE ZUR ORIENTIERUNG UND NUTZERSTEUERUNG | 35 |
| 5.1 Kartographie & Raumkognition..... | 35 |
| 5.2 Orientierung in Bildschirmanwendungen..... | 37 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 5.3 | Orientierung in VR | 38 |
| 5.4 | Nutzersteuerung | 41 |
| 6 | GRUNDLAGEN DER 3D-VISUALISIERUNG | 43 |
| 6.1 | Computergrafik | 43 |
| 6.2 | Modellierung | 46 |
| 6.3 | Texturierung | 50 |
| 7 | HARD- & SOFTWARE | 55 |
| 7.1 | Hardware | 55 |
| 7.2 | Software | 56 |
| 8 | STUDIEN ZUR ORIENTIERUNG UND NUTZUNGSZUFRIEDENHEIT IN VR | 61 |
| 8.1 | Segeberg-Studie | 61 |
| 8.1.1 | Das Projekt 'Segeberg 1644' | 61 |
| 8.1.2 | Ziel der Segeberg-Studie | 62 |
| 8.1.3 | Teilnehmende | 62 |
| 8.1.4 | Aufbau des Fragebogens | 62 |
| 8.1.5 | Durchführung der Segeberg-Studie..... | 63 |
| 8.1.6 | Auswertungsmethodik..... | 64 |
| 8.2 | Orientierungsstudie | 65 |
| 8.2.1 | Ziel der Orientierungsstudie | 65 |
| 8.2.2 | Teilnehmende | 65 |
| 8.2.3 | Konzept & Aufbau | 65 |
| 8.2.4 | Programmierung & Parameter..... | 68 |
| 8.2.5 | Durchführung der Orientierungsstudie | 76 |
| 8.2.6 | Auswertungsmethodik..... | 78 |
| 9 | SEGERBERG-STUDIE: ERGEBNISSE & DISKUSSION | 81 |
| 9.1 | Ergebnisse | 81 |
| 9.1.1 | Allgemeine Ergebnisse..... | 81 |
| 9.1.2 | SUS..... | 82 |
| 9.1.3 | Hilfestellung & Wegfindung..... | 83 |
| 9.1.4 | Erwartungen & Akzeptanz | 84 |
| 9.2 | Diskussion | 85 |
| 9.3 | Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten | 87 |
| 10 | ORIENTIERUNGSSTUDIE: ERGEBNISSE & DISKUSSION | 89 |
| 10.1 | Ergebnisse | 89 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 10.1.1 | Allgemeine Ergebnisse..... | 89 |
| 10.1.2 | Wegfindung..... | 90 |
| 10.1.3 | Kognitive Karte..... | 91 |
| 10.1.4 | Weitere Parametertests..... | 93 |
| 10.1.5 | Ranking..... | 94 |
| 10.1.6 | Zufallstests & Gewöhnungseffekte..... | 95 |
| 10.2 | Diskussion..... | 96 |
| 10.3 | Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten..... | 102 |
| 11 | DAS VR-PROJEKT 'HAMBURG: NEUE BURG VR'..... | 105 |
| 11.1 | Ableitungen aus den Studien..... | 105 |
| 11.2 | Konzept..... | 106 |
| 11.3 | Datengrundlage..... | 109 |
| 11.4 | Arbeitsablauf..... | 110 |
| 11.5 | Erstellung der 3D-Welt..... | 112 |
| 11.5.1 | Modellierung..... | 112 |
| 11.5.2 | Texturierung..... | 117 |
| 11.5.3 | Platzierung in der 3D-Welt..... | 120 |
| 11.5.4 | Landschaft & Umgebung..... | 121 |
| 11.5.5 | Menschen & Tiere..... | 124 |
| 11.5.6 | Beleuchtung & Visuelle Effekte..... | 126 |
| 11.5.7 | Sound & Sprache..... | 130 |
| 11.6 | Programmierung..... | 132 |
| 11.6.1 | Fortbewegung (Teleportation)..... | 132 |
| 11.6.2 | User Interface (UI)..... | 134 |
| 11.6.3 | Interaktionen..... | 136 |
| 11.6.4 | Geführte Tour..... | 140 |
| 11.6.5 | Lokalisierung..... | 142 |
| 12 | VR-PROJEKT: ERGEBNISSE & DISKUSSION..... | 145 |
| 12.1 | Ergebnisse..... | 145 |
| 12.2 | Veröffentlichung..... | 146 |
| 12.3 | Diskussion..... | 150 |
| 12.3.1 | Orientierung & Nutzersteuerung..... | 150 |
| 12.3.2 | Anwendungsszenarien & Zielgruppen..... | 152 |
| 12.3.3 | Fortbewegung & Interaktion..... | 153 |
| 12.3.4 | Historische Genauigkeit..... | 154 |
| 12.3.5 | Eignung von Geodaten für VR..... | 156 |
| 12.3.6 | Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten..... | 158 |
| 13 | FAZIT & AUSBLICK..... | 161 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 13.1 | Fazit..... | 161 |
| 13.2 | Ausblick..... | 163 |
| | VERZEICHNISSE..... | 165 |
| | Literatur | 165 |
| | Abkürzungen..... | 185 |
| | Abbildungen | 186 |
| | Tabellen | 189 |
| | ANHANG | 191 |
| A) | <i>Fragebogen zur Segeberg-Studie.....</i> | 191 |
| B) | <i>Sprachskript zur Orientierungsstudie</i> | 193 |
| C) | <i>Sprachskript zu 'Hamburg: Neue Burg VR'</i> | 196 |

1 Einleitung

1.1 Allgemein

In der heutigen digitalen Ära erleben wir eine tiefgreifende Veränderung in der Art und Weise, wie Informationen kommuniziert werden. Die Digitalisierung hat nicht nur unsere Gesellschaft und unser tägliches Leben revolutioniert, sondern auch die Art, wie wir Geschichten erzählen und Wissen teilen. Diese Veränderung geht einher mit neuen Erwartungen darüber, wie Informationen präsentiert und vermittelt werden sollten. Das ist unter anderem auch am immer stärkeren Aufkommen virtueller Museen zu beobachten und zeigt die Notwendigkeit, in der Kommunikation von Wissen und Wissenschaft flexibler zu werden und sich auf Bedürfnisse und Gewohnheiten verschiedener Zielgruppen einlassen zu müssen, um die Neugierde der Menschen zu wecken, Wissen erfolgreich zu vermitteln und den Zugang zur Bildung zu fördern.

Die 'Virtuelle Realität' (VR) ist eine Visualisierungstechnologie, dessen Entwicklung und zunehmende Verbreitung neue, spannende und effiziente Möglichkeiten bietet, um wissenschaftliche Erkenntnisse zu präsentieren und unterhaltsam vermitteln zu können. Die visuelle Wissenschaftskommunikation nimmt dabei eine zentrale Rolle ein und zeigt sich in einer Fülle von kreativen Formaten (Metag, 2019). Insbesondere zeichnet sich VR durch die Möglichkeit aus, eine räumliche Präsenz in einer realistisch anmutenden Umgebung zu schaffen, die ansonsten nicht zugänglich ist oder nicht mehr existiert (Hruby et al., 2019). Dieses 'Immersion' genannte Präsenzgefühl eröffnet die Möglichkeit, die Umwelt im wahrsten Sinne des Wortes begreifbar zu machen. Dies hebt VR als einzigartiges Instrument in der digitalen Wissenschaftskommunikation hervor, insbesondere im Vergleich zu anderen Formen des digitalen Wissenstransfers wie Bildschirm-basierten Anwendungen (Cummings & Bailenson, 2016).

Obwohl das Konzept von VR schon seit einiger Zeit besteht, ist es erst in den letzten Jahren durch die Weiterentwicklung der Hardware gelungen, eine ausreichend hohe visuelle Qualität und Nutzungsfreundlichkeit bei gleichzeitig niedrigen Produktionskosten zu erreichen, um VR-Anwendungen für ein breiteres Publikum zugänglich zu machen. Dies hat zu einer erheblichen Ausweitung der Anwendungsbereiche geführt. Der Aufwärtstrend zeigt sich zudem in ständig neuer und immer leistungsstärkerer Hardware und Software (vgl. VRcompare, 2023), dem Zuwachs an neuen Themenfeldern, die VR für ihre Zwecke nutzen wollen (Slater & Sanchez-Vives, 2016) und nicht zuletzt an der gesellschaftlichen Präsenz der Thematik, z. B. in politischen Agenden oder künstlerischer Auseinandersetzung (Dörner et al., 2019).

Eine Kernaufgabe der Geodäsie ist die möglichst genaue Erfassung und Darstellung räumlicher Daten. Verfahren wie Laserscanning oder photogrammetrische Aufnahmen erlauben es, digitale Abbilder bestehender Objekte oder Gebäude anzufertigen. Die Aufnahme und Visualisierung von Objekten mit besonderem geschichtlichen bzw. kulturellen Wert hat dank dieser Möglichkeiten in den letzten Jahren stark zugenommen (Champion, 2021). Neben gerenderten Darstellungen direkt aus Punktwolken oder bearbeiteten Datensätzen wie Nachmodellierungen oder Filmsequenzen erfreut sich die Nutzung von VR als Visualisierungsmethode in diesem Bereich wachsender Beliebtheit, beispielsweise als zusätzliche Visualisierung eines Ausstellungsstücks / einer Thematik vor Ort oder aber als digitaler Rundgang (Polycarpou, 2018; Pujol & Lorente, 2014; Schweibenz, 2001). Auch die allgemeine Digitalisierung einer Ausstellung ist eine häufige Form (Reussner, 2007) und wird unter dem Begriff 'Virtuelles Museum' zusammengefasst (Pujol &

Lorente, 2014; Styliani et al., 2009).

1.2 Motivation, Forschungslücken & Ziele

Im Allgemeinen kann man zwei Hauptarten von VR-Anwendungen unterscheiden: passive und (inter-)aktive (Korkut & Surer, 2022). Bei passiven Anwendungen ermöglicht eine VR-Brille (oder kostengünstige Lösungen wie Karton-VR-Halterungen für Smartphones) den Nutzenden zwar das Erkunden einer virtuellen Welt, jedoch sind die Interaktionsmöglichkeiten stark eingeschränkt oder fehlen vollständig. Diese Kategorie schließt 360°-Panoramen und -Videos ein, bei denen die Standpunkte oder Bewegungspfade bereits vorgegeben sind. Solche Erlebnisse erfordern keine besonderen Vorkenntnisse von den Nutzenden. Aktive Anwendungen hingegen bieten eine intensivere Immersion und eröffnen verschiedene Ebenen der Interaktion mit der virtuellen Umgebung. Hierzu gehört die Möglichkeit zur selbstbestimmten Fortbewegung in der Welt und das Hantieren mit Objekten mithilfe zusätzlicher Eingabegeräte. Diese Kategorie erfreut sich besonders großer Beliebtheit in Trainings- und Simulationsszenarien (Freina & Ott, 2015), wie sie beispielsweise in der Medizin für Operationen und Therapie, der Bauwerksplanung, dem Training von Rettungskräften sowie in der Videospielindustrie verwendet werden. Letztere hat die Entwicklung der VR-Technologie maßgeblich vorangetrieben (Fuchs, 2017).

In virtuellen Museen beschränken sich VR-Anwendungen allerdings größtenteils auf passive 360°-Videos. Dies ist hauptsächlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass weiterführende Interaktionen in der Regel eine gewisse Einarbeitungszeit in die Steuerungskonzepte erfordern. Das immense Lernpotential, das aktive Trainingssimulationen bieten, bleibt somit bisher ungenutzt und erfordert eine neue Herangehensweise, die eine Kombination aus passiven und aktiven VR-Ansätzen einschließt.

Wege aufzuzeigen, wie das oben beschriebene Potential der VR für alle nutzbar gemacht werden kann, ist die Hauptmotivation dieser Arbeit. Geschichte soll erlebbar sein – unabhängig von Vorerfahrung, Standort, Alter, körperlichen Einschränkungen oder finanziellen Möglichkeiten. VR-Anwendungen, die einen Großteil des Potentials ausnutzen, finden sich vorrangig im Unterhaltungsbereich (siehe Kapitel 3.4). Über die hauptsächlich (audio-)visuelle Immersion hinaus bieten diese Anwendungen vielfältige Interaktionen. Diese reichen von verschiedenen Arten der Fortbewegung wie Fahren und Fliegen über komplexe und sehr realitätsnahe Möglichkeiten, Gegenstände in der Umgebung zu bewegen oder zu bedienen bis hin zur Einblendung von Benutzungsoberflächen (UI, engl.: User Interface) im 3D-Raum zur Visualisierung von Informationen oder zur Manipulation der Umgebung. Die Bedienung solcher VR-Anwendungen schließt also eine gewisse Einarbeitungszeit und die Notwendigkeit von (manchmal umfangreichen) Tutorials mit ein (Fussell et al., 2019). Das Zielpublikum solcher Applikationen besteht aber in der Regel aus Menschen, die sich bewusst zur Anschaffung und Konfiguration einer VR-Brille und darüber hinaus zum Kauf/Download des entsprechenden VR-Programms entschieden haben. Für diese Zielgruppe kann von der Akzeptanz einer gewissen Lernkurve ausgegangen werden.

Darin besteht ein fundamentaler Unterschied zu VR-Anwendungen für den musealen Bereich bzw. für die Wissensvermittlung in VR allgemein: Dessen Zielgruppe ist in der Regel die interessierte Öffentlichkeit mit keinen oder wenigen Vorkenntnissen zur Technik und zum Inhalt. Sie benutzen die VR-Anwendung nicht vorrangig der Anwendung selbst wegen, sondern um etwas über die zugrundeliegende Thematik, z. B. die Geschichte eines bestimmten Ortes, zu lernen. Die

Bereitschaft oder Fähigkeit, sich schnell in eine komplexe Steuerung einzuarbeiten, ist somit eher selten vorhanden und sofern diese Einarbeitung nicht intuitiv innerhalb kurzer Zeit gelingt, besteht die Gefahr, dass die Anwendung entweder falsch, nur zu geringen Teilen oder gar nicht benutzt wird.

Es besteht also Bedarf nach Konzepten zur einfachen Benutzung und Integration von VR-Anwendungen im Kontext von Bildungsanwendungen (Loumos et al., 2018). Zur Nutzersteuerung ergeben sich somit zwei Forschungsfragen:

- Welche Unterstützung benötigen VR-Laien, um interaktive VR erleben zu können?
- Wie komplex darf die Simulation sein, um sowohl das Immersions-Potential von VR auszunutzen, aber gleichzeitig noch eine niedrige Einstiegshürde zu bieten?

Eine weitere Besonderheit bei der Nachbildung realer historischer Orte ist die Tatsache, dass sie in einer frei begehbaren, oft weitläufigen Umgebung existieren. VR-Anwendungen für den Spielbereich können die Umgebungsgestaltung dem Spielfluss und der Nutzerführung anpassen. Beispielsweise können sie den Handlungsraum auf einen klar vorgegebenen Bereich beschränken – etwa auf einen Straßenzug, einen künstlich vordefinierten Weg durch ein Gebiet ohne Abbiegemöglichkeiten (auch 'Schlauchlevel' genannt) oder oft auch nur ein Zimmer ('Room-Scale'). Bei der freien Erkundung weitläufiger Areale ergeben sich dagegen Probleme mit der Orientierung.

Bei traditionellen analogen oder digitalen Karten behalten die Nutzenden dank der Draufsicht eine klare Übersicht. In der VR befinden sie sich jedoch 'mittendrin'. Es ist schwer, die eigene Position in der virtuellen Welt sowie die Beziehungen zwischen verschiedenen Objekten oder Gebäuden zu erfassen. Die immersive Erfahrung in VR kann also auf Kosten der räumlichen Orientierung gehen. Diese Orientierung ist jedoch entscheidend, um das Gesehene in einen räumlichen (und möglicherweise zeitlichen) Kontext zu setzen und beispielsweise Entfernungen einzuschätzen. Dieses Problem wird komplexer und schwieriger zu lösen, je größer und komplexer die virtuelle Welt ist, und bisher gibt es keine endgültige Lösung dafür (Edler, 2019). Neben der Beschränkung auf rein passive VR oder Anwendungen ohne freie Bewegungsmöglichkeit besteht die Möglichkeit, die Einführung und Steuerung von einer fachkundigen Begleitperson durchführen zu lassen, was jedoch der Immersion zuwiderläuft, durch Personalkosten eine ökonomische Belastung darstellt und für Anwendungen, die nicht primär ortsgebunden konzipiert sind, unmöglich ist. Eine offene Forschungslücke bildet somit die Frage, wie die Wegfindung in VR konkret unterstützt werden kann und welche Maßnahmen zur effizienten Bildung einer kognitiven Karte beitragen können (Dong et al., 2022; Halik & Kent, 2021). Für diese Arbeit werden die folgenden Fragen abgeleitet:

- Wie kann ich mich in VR orientieren?
- Welche Hilfsmittel eignen sich zum Auffinden eines bestimmten Zieles?
- Welche Hilfsmittel eignen sich zur Bildung einer kognitiven Karte?
- Wie effizient sind diese Hilfsmittel im Vergleich untereinander?
- Wie lassen sich diese Hilfsmittel in der Praxis kombinieren und einsetzen?

Eine weitere Motivation ergibt sich aus der zunehmenden Verwendung von 2D/3D-Geodaten für VR-Visualisierungen zur digitalen Planung, Konservierung oder Wissensvermittlung. Geodaten sind üblicherweise nicht primär zur direkten Verwendung für VR erhoben und bearbeitet worden. Die zur Verfügung gestellten Daten bedürfen somit in der Regel umfangreicher Nachbearbeitung. Wenn diese ausbleibt, entstehen bei großen Datensätzen (zu) hohe Anforderungen an die Hardware. Auch Inkompatibilitäten bezüglich der verschiedenen Dateiformate für 3D-Modelle stellen ein Problem dar (Keil et al., 2021b). Es soll daher diskutiert werden, unter welchen

Voraussetzungen sich Geodaten zur VR-Visualisierung eignen und wie sich der Arbeitsablauf zu dessen Implementierung optimieren lässt.

Aus der Kombination all dieser Punkte ergeben sich bei der Umsetzung für einen Anwendungsfall folgende Fragen:

- Wie kann eine konkrete Umsetzung eines VR-Programms aussehen, welches sowohl die Erkenntnisse zur Orientierung als auch zur Nutzersteuerung berücksichtigt?
- Für welche Anwendungsszenarien und Zielgruppen eignet es sich?
- Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich bei der Verwendung von 3D-Geodaten?

Aus diesen offenen Fragen ergeben sich die Ziele dieser Arbeit. Im ersten Teil soll mithilfe zweier Studien das Verhalten der Testpersonen, die Orientierungsfähigkeit und allgemein die Akzeptanz von und Erwartungen an VR-Anwendungen analysiert werden. Insbesondere die Orientierungsstudie soll die zentrale Forschungsfrage beantworten und Erkenntnisse darüber bringen, welche Konzepte zur Erkundung von VR-Welten besonders hilfreich sind und welche Werkzeuge sich am besten eignen, um auch unerfahrenen Nutzenden eine schnelle Einführung in die aktive Nutzung von VR zu ermöglichen. Die Erkenntnisse aus diesen Studien leiten zudem in den zweiten, anwendungsbasierten Teil dieser Arbeit über. Dieser Teil hat die Entwicklung eines VR-Programms zum Ziel, das den oben genannten Kriterien genügt und die Ergebnisse der Studien beispielhaft in die Praxis umsetzt. Diese Anwendung entsteht in Zusammenarbeit mit dem Archäologischen Museum Hamburg (AMH) und hat die 'Neue Burg' in Hamburg zum Thema. Sie stellt somit als museale geschichtsbezogene Wissensvermittlung ein Beispiel für die erwähnte Hauptzielgruppe der interessierten Öffentlichkeit dar. Schließlich sollen die Ergebnisse der Studien und die entwickelte VR-Anwendung im Hinblick darauf untersucht und bewertet werden, inwiefern sich die Konzepte bezüglich Zielgruppe, Orientierung und Geodaten zur Nutzung von interaktiver VR im musealen Bereich sowie ganz generell zur aktiven Partizipation in VR-Bildungsangeboten eignen.

1.3 Aufbau dieser Arbeit

In diesem Einleitungskapitel wird zunächst auf die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit eingegangen. Das zweite Kapitel stellt das Objekt vor, das im Zentrum des praktischen Teils dieser Arbeit steht: die 'Neue Burg' in Hamburg. Hier werden die Geschichte der Burg, der Stadt sowie des Ausgrabungsverlaufs und somit auch der Datengrundlage vorgestellt. In den Kapiteln 3 bis 7 werden die Grundlagen zu den für diese Arbeit relevanten Technologien und Forschungen erläutert. Zunächst wird in Kapitel 3 die Geschichte, Definitionen und Funktionsweise der Virtuellen Realität erklärt. Außerdem werden der aktuelle Stand der Technologie und die derzeitigen Forschungsthemen aufgezeigt. Hier erfolgt auch die Einreihung der Forschung dieser Arbeit und die Abgrenzung zu anderen Themenbereichen der Virtuellen Realität. Das vierte Kapitel geht näher auf die Grundlagen zur Wissenschaftskommunikation ein und klärt zunächst, warum sie so eine hohe Relevanz besitzt und welche Formen es gibt. Die Unterkapitel beleuchten einige für diese Arbeit besonders wesentliche Teilaspekte, wie das Potential der Wissenschaftskommunikation für Cultural Heritage, Wesen, Aufbau und Beispiele für Virtuelle Museen und den Aspekt des 'Spielerischen Lernens'. Zusätzlich wird insbesondere auf Beispiele und Forschungsschwerpunkte aus den Geoinformationswissenschaften eingegangen. Kapitel 5

beschäftigt sich mit Hintergründen zur Raumkognition, Orientierung und Nutzersteuerung. Diese Themen spielen eine zentrale Rolle für die Studien und werden daher in diesem Kapitel detailliert vorgestellt. Dabei wird ein Bogen von der Realität über digitale Visualisierungen bis zu VR geschlagen. Das sechste Kapitel erläutert einige technische Hintergründe der 3D-Visualisierung, die insbesondere für die Erstellung der VR-Anwendung, aber auch für die Programmierung der Studie wichtig sind. Dazu gehören neben der Computergrafik allgemein auch die Grundlagen zur 3D-Modellierung und Texturierung. Auf die verwendete Hard- und Software zur Programmerstellung und zur Auswertung wird im siebten Kapitel eingegangen.

Nach diesen Grundlagen beschäftigt sich der erste Hauptteil dieser Arbeit in den Kapiteln 8, 9 und 10 mit zwei Studien. Zum einen ist das die Segeberg-Studie, welche in einer bereits existierenden und für museale Zwecke geschaffenen virtuellen Umgebung durchgeführt wurde, zum anderen die Hauptstudie mit Fragestellungen insbesondere zur Orientierung in einer offenen VR-Welt. Kapitel 8 beschreibt dabei die Ziele, Methodik und Durchführung der Studien. Die Ergebnisse dieser Studien werden im neunten Kapitel (Segeberg-Studie) und zehnten Kapitel (Orientierungsstudie) vorgestellt und diskutiert. Dabei wird vor allem auf generelles Verhalten der Testpersonen und die Orientierungsfähigkeit für VR-Anwendungen mit entsprechenden Rahmenbedingungen eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse in die bestehenden Forschungen eingeordnet. Daraus werden Empfehlungen als Grundlage für die Nutzung von interaktiver VR im musealen Bereich abgeleitet, insbesondere für die als Praxisbeispiel entwickelte VR-Anwendung 'Hamburg: Neue Burg VR'. Diese Programmentwicklung bildet den zweiten Hauptteil dieser Arbeit und wird in Kapitel 11 ausführlich dargestellt. Das Konzept und die Arbeitsschritte werden vorgestellt, wobei ein besonderer Fokus auf die Beschreibung der Erstellung der virtuellen Welt sowie die Programmierung der Interaktionen in der Entwicklungsumgebung 'Unreal Engine' gelegt wird. Kapitel 12 stellt die vollendete Anwendung detailliert vor und diskutiert im Hinblick auf die eingangs definierten Kriterien, inwiefern einige der Kernaspekte wie Orientierung und Nutzersteuerung und die Erkenntnisse aus den Studien umgesetzt wurden. Es erfolgt außerdem eine Auseinandersetzung mit einigen für diese Art von VR-Anwendungen kritische Themen wie Fortbewegung, historische Genauigkeit, Anwendungsszenarien, Zielgruppen und die Verwendung von Geodaten. In Kapitel 13 wird schließlich ein Fazit gezogen und ein Ausblick gegeben.

2 Geschichtlicher Hintergrund der 'Neuen Burg'

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit sollen die Studienerkenntnisse nicht nur für sich stehen, sondern in einem angewandten, praxisnahen Projekt umgesetzt werden. Aus der Motivation und den Zielen ergeben sich folgende Rahmenbedingungen:

- a) historische Wissensvermittlung
- b) Orientierung in einer offenen VR-Welt
- c) autonome Benutzbarkeit als museale Anwendung (öffentlicher Raum) oder zu Hause (privater Raum)
- d) intuitive Bedienung / Eignung für Laien

Als Fallbeispiel wurde somit ein historisches Objekt gewählt, das für eine museale VR-Anwendung rekonstruiert werden soll. In Zusammenarbeit mit dem Archäologischen Museum Hamburg (AMH) wurde die 'Neue Burg' in ihrem Zustand kurz nach der Vollendung ihres Baus (ca. 1024) ausgewählt. Aufgrund aktueller Grabungen des AMH und einer Sonderausstellung sowie verschiedener Veröffentlichungen zum 1000-jährigen Jubiläum des Baus der Burg war somit eine ausreichende Datengrundlage gegeben. Überdies erfordert eine den historischen Fakten getreue Rekonstruktion eine enge Zusammenarbeit mit Fachleuten, die über das nötige historische und archäologische Wissen verfügen. Viele Design-Entscheidungen der VR-Anwendung zur Neuen Burg leiten sich direkt oder indirekt aus diesem historischen Wissen ab, daher wird in diesem Kapitel die Geschichte der Neuen Burg im Kontext der Stadtgeschichte Hamburgs vorgestellt und auf die Grabungskampagnen des AMH eingegangen.

2.1 Geschichte & Stadtentwicklung

Bis 1020: Hammaburg I – III

Die erste schriftliche Nennung Hamburgs erfolgte 834, als der Priester Ansgar vom fränkischen Kaiser Ludwig dem Frommen zur christlichen Missionierung nach Hamburg entsandt wurde. Zu dem Zeitpunkt war Hamburg bereits seit einiger Zeit besiedelt. Nachweisen lässt sich die namensgebende Hammaburg, deren erste von drei Ausbaustufen vermutlich bereits im achten Jahrhundert entstand. Diese 'Hammaburg I' lag auf einem Geestsporn zwischen der Elbe und der Alster. Die Lage war aufgrund der beiden Flüsse und der Nähe zur Alsterfurt und zu wichtigen Handelswegen nicht nur verkehrsgünstig, sondern bot auch guten Schutz, da Burg und Siedlung somit von drei Seiten von Wasser umgeben waren. Das angelsächsische Wort 'ham' bedeutet 'feuchte Niederung' oder 'Bucht'. In späteren Jahrhunderten etablierte sich daraus der heutige Name 'Hamburg' (Kummereincke, 2022; Weiss, 2016).

Ausgrabungen belegen, dass die Hammaburg I zwischen 817 und 822 auf fast doppelte Größe zur Hammaburg II ausgebaut wurde und den Status einer wichtige Grenzfestung am Nordrand des Fränkischen Reichs einnahm. Mit dem Beginn der Missionierung durch Ansgar erfolgte in diesem Zeitraum auch der Bau der ersten Holzkirche, dessen Standort unter der heutigen St. Petri-Kirche vermutet wird. 845 kam es zu einem großen Wikingerüberfall, bei dem große Teile der Siedlung, inklusive Burg und Kirche, zerstört wurden. Dennoch blieb Hamburg weiterhin Handelszentrum in der Region. Eine großer Bau-Boom setzte ein, als Hamburg zum Erzbistum erklärt wurde – basierend auf einer nachweislich gefälschten Urkunde, die den 865 verstorbenen Ansgar

rückwirkend als Erzbischof betitelt. Trotz des Einspruchs des Erzbistums Köln, das ebenfalls Anspruch auf Hamburg erhob, entschied der Papst Formosus 893 zugunsten eines fortan eigenständigen Erzbistums, das auch Bremen miteinschloss. Unter diesen Voraussetzungen wurde um 900 die Hammaburg III, die größte der Hammaburgen, errichtet. Die Siedlung wuchs und der erste Hamburger Hafen nahm Gestalt an (Kummereincke, 2022; Weiss, 2016). Abbildung 1 zeigt eine Rekonstruktion der damaligen Hammaburg und ihrer unmittelbaren Umgebung.



Abbildung 1. Oben: Rekonstruktion der Hammaburg III um 900, Blick von Südwesten, ungefähr vom Standpunkt der späteren Neuen Burg (Tim-John Müller für das AMH in Weiss (2021)). Unten: Schematischer Aufbau Hamburgs nach Fertigstellung der Neuen Burg um 1023. Die besiedelte Fläche ist rot markiert. Die drei Hammaburgen befanden sich unter dem Dom. (Kay-Peter Suchowa für das AMH in Weiss (2021)).

Das Adelsgeschlecht der Billunger war nachweislich seit 936 vom Kaiser Otto dem Großen, vermutlich aber bereits ein Jahrhundert zuvor, mit dem Schutz der nördlichen Reichsgrenze und somit auch der Hammaburg betraut. Mit der Ernennung Hamburgs zum Erzbistum gewann der Klerus aber stark an Einfluss und es kam immer wieder zu Konflikten zwischen Klerus und Adel um Hamburg (Weiss, 2016, 2021).

1020 – 1188: Bau und Niedergang der Neuen Burg

Eine Ausnahme dieser Feindseligkeiten bildete die Zusammenarbeit zwischen Erzbischof Unwan und Herzog Bernhard II. von den Billungern nach einem großen Slawenüberfall zu Beginn des 11. Jahrhunderts. Die Slawen, die sich der Missionierung zu widersetzen versuchten, beschädigten oder zerstörten die Hammaburg III dabei so stark, dass sie nicht wieder aufgebaut wurde. Bernhard II. überließ das Burgareal der Kirche, die auf dem Gelände einen Holzdom errichtete, der – später durch einen Steinbau ersetzt – bis ins 19. Jahrhundert Bestand hatte (Weiss, 2016, 2021).

Herzog Bernhard II. ließ auf der anderen Seite der Alster – ca. 500 Meter vom alten Burgstandort entfernt – die Neue Burg als neuen Herrschaftssitz errichten. Es handelte sich somit bereits um die vierte Burg in dem Gebiet. Als Standort wurde eine Halbinsel in einer Alsterschleife gewählt, direkt neben der Alsterfurt auf der einen Seite und der Mündung in die Elbe auf der anderen. Dieser Standort hatte gleich mehrere Vorteile: Durch die Lage in der Flussschleife war man auch hier von drei Seiten durch Wasser geschützt. Überdies kontrollierte man mit der Alsterfurt sowohl den wichtigsten Handelsweg als auch den westlichen Zugang nach Hamburg. Auf der Ostseite wurde zur ungefähr selben Zeit mit dem 'Heidenwall' ebenfalls ein Verteidigungswerk errichtet. Ein großer Nachteil war dagegen die niedrige Lage. Das Gebiet wurde bei starkem Hochwasser regelmäßig überschwemmt und die Wälle hatten vor allem die Funktion eines Deiches zu erfüllen. Die Bauarbeiten begannen 1020 und wurden auf einer bis dato vermutlich ungenutzten Fläche ausgeführt. Als Unterlage wurde gegen das Einsinken zunächst eine Reisigschicht ausgelegt. Darauf folgten eine Wallbasis aus Holzrosten sowie Kastenkonstruktionen und Kleisoden. Der finale Wall hatte eine Breite von 36 Metern, eine Höhe von 5,50 Metern und wurde von einem Bohlenweg mit einer Holzpalisade gekrönt. Der Gesamtdurchmesser der Anlage lag bei ca. 165 Metern und umschloss eine Fläche von 0,78 ha. Zwei Tore gewährten Zugang: Ein Nordtor mit direktem Anschluss an die Handelsstraße über die Alsterfurt sowie ein Osttor mit Zugang zum Hafbereich. Die Bauarbeiten zur Ringwallburg wurden 1023 abgeschlossen (Weiss, 2021). Abbildung 1 zeigt schematisch das Aussehen Hamburgs nach der Fertigstellung.

Der Bau der Neuen Burg fiel zeitlich in eine kurze, aber starke Blütezeit. Die Neue Burg festigte den Machtanspruch Hamburgs über die Umgebung, der jedoch mit den Toden Unwans (1029) und Bernhard II. (1059) bereits wieder zu bröckeln begann. Spätestens mit dem Tod von Magnus (der Enkel von Bernhard II.) im Jahre 1106 entstand ein Machtvakuum, da mit Magnus das billungische Herzoghaus ausstarb und es in der Folge zu großen Territorial- und Erbstreitigkeiten kam. Im Zuge einer Reihe politischer Umstürze erfolgte die Belagerung Hamburgs im Jahre 1139 durch Heinrich von Badewide und es wird vermutet, dass mit dieser Belagerung der Niedergang der Neuen Burg einherging. Nachgewiesen ist, dass sie bereits einige Jahrzehnte brach lag, bevor sie mit dem nächsten großen Kapitel der Hamburger Stadtgeschichte 1188 aus dem Stadtbild verschwand (Weiss, 2021).

Ab 1188: Gründung der Neustadt und weitere Stadtgeschichte

Mit der Gründung der Neustadt 1188 durch Graf Adolf III. von Schauenburg setzte ein Wiedererstarben Hamburgs ein. Der Innenraum der Neuen Burg wurde bis zur Wallkrone aufgefüllt und es entstand eine große Fläche mit stabilem Baugrund, der aufgrund der nun erhöhten Lage zudem hochwassergeschützt war. Mit ca. 50 ausgewiesenen Grundstücken bedeutete die Besiedlung dieses Areals einen bedeutenden Einwohnerzuwachs für Hamburg. Unter den Zugezogenen waren außerdem viele Kaufleute, die mit zahlreichen Handels- und Bürgerschaftsprivilegien angelockt wurden. Besondere Auswirkungen hatte zudem ein angeblich von Kaiser Friedrich I. Barbarossa ausgestellter Freibrief, der Hamburg Stadtrechte verlieh. Dieser Freibrief war eine nachträglich angefertigte Fälschung, die ihre Wirkung aber nicht verfehlte. Die Hamburger Bürger gründeten 1195 die erste Nikolaikirche und errichteten das erste Rathaus und die erste Börse in unmittelbarer Nachbarschaft. Ein großer Marktplatz – damals 'Neuer Markt', heute 'Hopfenmarkt' – komplettierte diese Serie an Entwicklungen, die für ein Erstarben Hamburgs und ihre Manifestation als Stadt des Handels und der Kaufleute sorgen sollte (Weiss, 2021).

Diese Bedeutung als Handels- und Hafenstadt zieht sich bis heute durch die weitere Geschichte Hamburgs. In das 13. Jahrhundert fielen die Aufstauung der Alster, der Bau der ersten

Stadtbesetzung und die Anfänge der Hanse, die sich aus einer engen Handelsbeziehung mit Lübeck entwickelte. Hamburg erlebte eine wechselvolle Geschichte und war zwischenzeitlich Teil einer dänischen Besetzung, des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation und des französischen Kaiserreichs. Neben der Pest ab 1350 musste sich Hamburg mehreren Überfällen von Dänen, Schweden, Franzosen oder Rebellengruppierungen und Piraten erwehren. Erst ab 1819 nennt sich Hamburg 'Freie- und Hansestadt' (Kummereincke, 2022). Abbildung 2 zeigt den Zeitstrahl der Hamburger Stadtentwicklung.

Der Bereich über der und um die ehemalige Neue Burg war seit der Gründung der Neustadt stets von der Nikolaikirche geprägt. Der erste Kirchenbau von 1195, gelegen über dem nordwestlichen Wall der Neuen Burg, wurde über die Jahrhunderte ständig erweitert, bis er beim Großen Brand von 1842 zerstört wurde. Der neugotische Nachfolgebau wurde um ca. 50 Meter nach Südwesten versetzt, 1874 fertiggestellt und lag nun inmitten des (ehemaligen) Walls der Neuen Burg. Bis zu diesem Zeitpunkt ließen aber die Straßenführungen noch den Verlauf der früheren Burgwälle erahnen. 1943 wurden im Zweiten Weltkrieg im Zuge der 'Operation Gomorrha' weite Teile Hamburgs zerstört, so auch die Nikolaikirche und die meisten der umliegenden Gebäude. Der Kirchturm blieb als Mahnmal stehen, der Wiederaufbau veränderte aber das Stadtbild grundlegend. Heute erinnert lediglich ein kleiner Straßenabschnitt namens 'Neue Burg' östlich vom Mahnmal an die Existenz der Burg (Gretzschel et al., 2013; Kummereincke, 2022; Weiss, 2021).

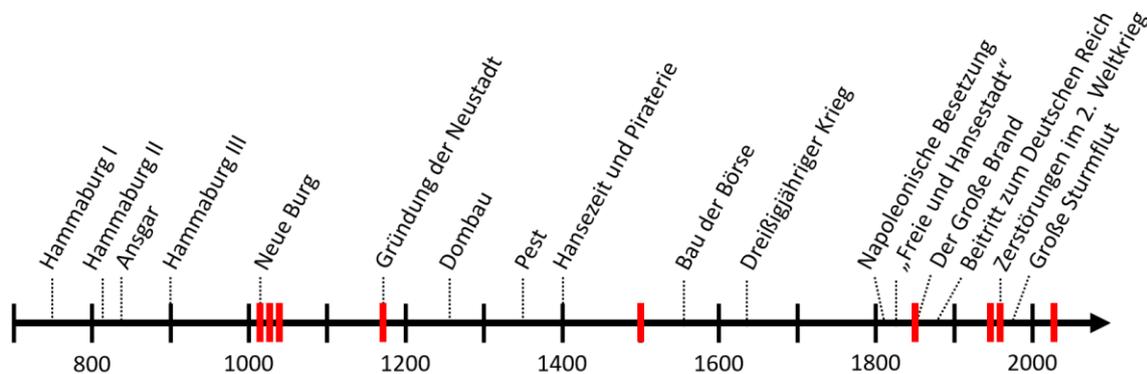


Abbildung 2. Zeitliche Einordnung der Neuen Burg in die Geschichte Hamburgs. Die roten Striche markieren die in den Zeitscheiben abgebildeten Stadtbilder (Kapitel 11.5.1).

2.2 Archäologische Ausgrabungen vom AMH

Ausgrabungschronik

Seit den 1950ern wurden im Bereich der Neuen Burg insgesamt elf Ausgrabungen durchgeführt. Die erste Ausgrabung, die 1953/54 im Bereich des Südwalls erfolgte, konnte erstmals die Lage der Neuen Burg archäologisch nachweisen. Bei einer zweiten Grabungskampagne im nördlichen Bereich konnte auf Höhe der heutigen Straße 'Hahntrapp' das Nordtor entdeckt werden. Bis auf eine kleinere Grabung im Jahre 1983 im südwestlichen Wallbereich blieben dies die einzigen Grabungen im 20. Jahrhundert. Neben der sowieso schon umfangreichen und wiederholten Überbauung des Gebiets trugen Tiefbauarbeiten zu einigen größeren Gebäuden rund um das Mahnmal St. Nikolai dazu bei, dass immer mehr potentielle Überreste der Neuen Burg zerstört wurden. Hinzu kommen die Kirchengebäude selbst, die große Teile der Neuen Burg überlagern.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf des Burgwalls unter der heutigen Bebauung. Im Gegensatz zu den verschiedenen Iterationen der Hammaburg wurde die Neue Burg aber nach Aufgabe nicht einplaniert, sondern aufgefüllt und das neue Bodenniveau auf die Höhe der Wallkrone angepasst, was an einigen ungestörten Stellen noch Überreste im Erdreich vermuten lässt (Kummereincke, 2020; Weiss, 2021).

Ab 2006 wurden mehrere Ausgrabungen, insbesondere im Wallbereich, durchgeführt. Dazu gehörten vor allem die Ausgrabungskampagnen 2013/14 beim Hopfenmarkt und im Bereich der ersten Nikolaikirche, 2016/17 bei den Straßen 'Hahntrapp' und 'Großer Burstah' sowie im Bereich des Nordostwalls und schließlich 2019/20 im Bereich der heutigen Straße 'Neue Burg'. Bei diesen Ausgrabungen konnte erstmals der Wall über seine gesamte Höhe ausgegraben und somit die Wallhöhe festgestellt werden. Außerdem wurde bei der letzten Grabung eine Treppe entdeckt, die als Teil eines zweiten Tores ('Osttor') interpretiert wurde, das den Bewohnern der Neuen Burg vermutlich direkten Zugang zu den Hafenanlagen gewährte. Auch das Alter und die Bauzeit der Burg konnten bestimmt werden: Dendrochronologische Analysen, die mithilfe der Jahresringe der gefundenen Baumhölzer eine mitunter jahrgenaue zeitliche Einordnung erlauben, deuten auf eine kurze Bauzeit von 1021 bis 1023 sowie auf einige Ausbesserungen in den 1030ern hin. Mit den über die Jahrzehnte gesammelten Daten konnten die Lage, der Wallaufbau und die Ausmaße der Erdwallburg sehr detailreich rekonstruiert werden (Kummereincke, 2020, 2022; Weiss, 2021).

Die Erkenntnisse wurden im Rahmen einer Sonderausstellung 2021/22 im Archäologischen Museum Hamburg (AMH, bis 2009 'Helms-Museum') präsentiert. Das AMH leitete federführend die Ausgrabungen und Untersuchungen. Es fungiert gleichzeitig als archäologisches Landesmuseum sowie als Behörde für Bodendenkmalpflege in Hamburg.

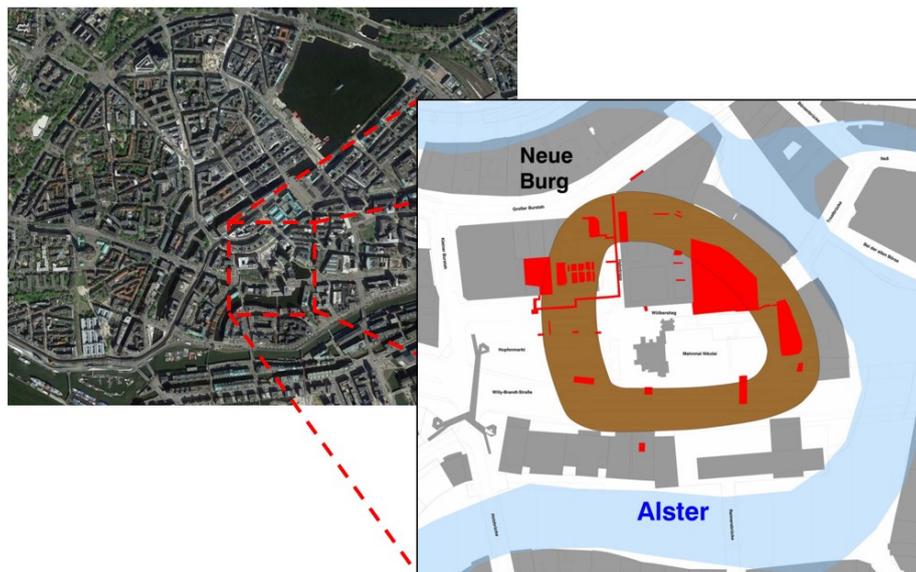


Abbildung 3. Links: Ausschnitt der Hamburger Innenstadt (Google Maps). Rechts: Überlagerung des Wallverlaufs der Neuen Burg (braun) mit der heutigen Bebauung (grau) und den Ausgrabungsbereichen (rot) (nach Kay-Peter Suchowa für das AMH in Weiss (2021) und AMH Webstory (<https://amh.de/mythos-hammaburg>)).

(Un-)Gesicherte Datenlage

Historische Quellen sind generell mit großer Vorsicht zu behandeln und zu interpretieren. Oftmals lag die Motivation hinter Niederschriften und Urkunden weniger in der Dokumentation von Fakten, sondern war von politischen Bestrebungen getrieben. Diese Zurückhaltung ist

insbesondere für historische Zeitepochen geboten, für die ansonsten wenige oder keine Quellen zur Verifikation existieren und die außerdem von Unruhen oder sich ständig wechselnden politischen Verhältnissen geprägt waren. Auch die (nachträgliche) Legitimation eines Sachverhalts oder die Hervorhebung der bedeutsamen Leistung einer Person können Gründe gewesen sein. Punktuelle Gewissheit bezüglich Bauvorhaben können dendrochronologische oder Radiokohlenstoffanalysen ('C14-Datierung') bieten. Wo diese jedoch fehlen, kann es jedoch vorkommen, dass die Quellenlage so ungenau ist, dass sie mehrere, teils gegensätzliche Interpretationen zulässt oder schlicht gar keine nähere Aussage ermöglicht. Weiss & Klammt (2014), Weiss (2016), Weiss (2021) und Kummereincke (2020) haben für Hamburg und speziell für die Neue Burg einige im Folgenden aufgeführte Beispiele herausgestellt.

Als Baudatum galt bis zu den dendrochronologischen Analysen das Jahr 1061, als Bauherr somit Ordulf (der Sohn von Bernhard II.). Entnommen wurde diese Information aus der 'Hamburgischen Kirchengeschichte' von Adam von Bremen, die dieser 1075 verfasst hatte. Die Ausgrabungen legen also nahe, dass die Behauptung Adams von Bremen eher auf der Absicht beruhte, die Hamburgisch-Bremische Kirche in einer Zeit des Bedeutungsverlusts zu stärken. Bereits der Gründungsmythos Hamburgs basierte lange Zeit auf einer angeblichen Urkunde des damaligen Kaisers Ludwigs des Frommen von 834. Auch diese stellte sich als Fälschung heraus, die eine starke Legitimation (Ludwig der Fromme war der Sohn Karls des Großen) suggerieren sollte. Die Erhebung Hamburgs zum Erzbistum auf Basis einer Fälschung wurde bereits in Kapitel 2.1 beschrieben. Bis in die junge Forschungsgeschichte hielten sich außerdem weitere Mythen, die aufgrund neuer Erkenntnisse als höchstwahrscheinlich widerlegt gelten. Ebenfalls von Adam von Bremen stammt die flüchtige Beschreibung eines 'Steinernen Hauses', das als zusätzliche Burg (die sogenannte 'Bischofsburg') interpretiert wurde. Dessen Überreste wurden an vielen Stellen unter der modernen Hamburger Innenstadt vermutet, so beispielsweise unter dem Hamburger Rathaus. Die Freilegung eines Turmfundaments in der Nähe des ehemaligen Standorts der Hammaburg galt zunächst als Beweis, dieses Fundament stellte sich jedoch als der vermutete Nordturm eines Tores des zeitgleich mit der Neuen Burg errichteten Heidenwalls heraus. Viele Geschichtsbücher und Zeichnungen haben einige dieser inzwischen überholten Erkenntnisse noch als Grundlage genommen, beispielsweise Gretzschel et al. (2013).

Zusätzlich zur Frage der Belastbarkeit des vorhandenen Quellenmaterials stellt sich bei historischen Rekonstruktionen die Frage nach einer angemessenen Darstellung, wenn kaum oder gar keine Quellen vorhanden sind. In Bezug auf die Neue Burg ist über den Innenraum der Burg – im Gegensatz zum gut untersuchten Außenwall – so gut wie gar nichts bekannt. Die Historiker:innen und Archäolog:innen haben einige Vermutungen angestellt, die sich aber durch Ausgrabungen nicht sicher belegen lassen (Weiss, 2021). So wird der Standort einer kleinen hölzernen Burgkapelle dort vermutet, wo nach Aufschüttung des Burginneren ab 1195 die erste Nikolaikirche gebaut wurde. Außerdem lassen sich ein paar generelle Aussagen zum Aufbau treffen, die sich konsequenterweise aus den damaligen Bautraditionen ableiten lassen oder die an anderer Stelle bei Burgen mit zeitlichem, örtlichen und kulturellen Zusammenhang genauer beobachtet werden können, so beispielsweise in der gut dokumentierten Siedlung Haithabu in Schleswig-Holstein (Schietzel et al., 2014). Die Konsequenzen der unsicheren Datenlage auf historische Visualisierungen allgemein und auf die Entwicklung von 'Hamburg: Neue Burg VR' im Speziellen werden in Kapitel 12.3.4 diskutiert.

Um den Nutzen der VR für die Darstellung und Vermittlung solcher historischen Sachverhalte deutlich zu machen, werden im folgenden Kapitel einige Grundlagen dieser Technologie erläutert.

3 Grundlagen der Virtuellen Realität

3.1 Definitionen

Allgemeine Definitionen

Es existiert keine einheitliche, allgemein akzeptierte Definition der VR. Stattdessen wurde über die Jahrzehnte eine Vielzahl an Definitionen aufgestellt, die unterschiedliche Aspekte der VR in den Vordergrund rücken. Bereits 1965 beschrieb Ivan Sutherland die Wirkung, die eine solche künstliche Realität auf die Nutzenden haben würde: „A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal.“ (Sutherland, 1965). Der Immersionsaspekt stand also schon früh im Vordergrund, wenngleich die technologischen Möglichkeiten weder damals noch heute an diese Realitätsnachbildung in allen Sinnen heranreichen. Der Begriff 'Virtuelle Realität' (engl.: 'Virtual Reality') fand starke Verbreitung durch seine Verwendung in Damien Brodericks 1982 erschienenen Science-Fiction-Roman 'The Judas Mandala' (Broderick, 2009) und setzte sich anschließend zur Beschreibung durch. Weitere frühe Charakterisierungen sind in Dörner et al. (2019) zusammengefasst und befassen sich zum einen mit technologischen Eigenschaften, wie die Verwendung von 3D-Displays und Interaktionsmöglichkeiten für die Nutzenden zur Bewegung innerhalb einer computergenerierten Echtzeitumgebung (Bryson, 1993; Gigante, 1993) oder die Eignung als Mensch-Maschine-Schnittstelle (Mine et al., 1997). Zum anderen liegt der Fokus aber auch oft wie bei Sutherland auf der Wirkung, wie beispielsweise das Präsenzgefühl der Immersion und die Anforderung, mehrere Sinne gleichzeitig anzusprechen (Cruz-Neira, 1993; Slater & Wilbur, 1997).

Abgrenzung zu AR

Alle diese Definitionen schließen im- oder explizit mit ein, dass es sich bei der VR um eine rein künstliche Welt handelt, die sich klar von der realen Welt abgrenzt und diese ersetzt. Somit gibt es einen klaren Unterschied zur 'Erweiterten Realität' (engl.: 'Augmented Reality', AR). AR nimmt die reale Umgebung als Basis und erweitert diese mit virtuellen Inhalten, beispielsweise über 3D-Objekte, die über einem realen Hintergrund eingeblendet werden und sich in ihrer Transformation an den Betrachtungswinkel der Nutzenden anpassen. Auch für AR gibt es eine Vielzahl an Definitionen, nach Dörner et al. (2019) hat sich aber diejenige von Azuma (1997) stark etabliert, die AR mit den drei charakteristischen Merkmalen 'Kombination aus Realität und Virtualität', 'Interaktivität und Echtzeit', sowie '3D-Registrierung der virtuellen Inhalte' definiert.

Mixed Reality

Die unterschiedlichen Grade von Realität und Virtualität lassen sich auf dem 'Virtuality Continuum' einordnen. Die Gesamtheit der Skala wird auch als 'Mixed Reality' (MR) bezeichnet (Milgram & Kishino, 1994). Abbildung 4 zeigt das Kontinuum, beginnend mit der Realität, über 'Erweiterte Realität' und 'Erweiterte Virtualität', zu reiner VR. Bereits die Bezeichnung 'Kontinuum' stellt heraus, dass sich verschiedene Anwendungen mit variierenden Zusammensetzungen aus realen und virtuellen Elementen nicht eindeutig kategorisieren lassen, sondern je nach Gewichtung zwischen den Endpunkten einzuordnen sind. In der medialen Berichterstattung taucht außerdem vermehrt der Begriff 'Extended Reality' (XR) als Zusammenfassung der Bereiche AR, VR und MR auf.



Abbildung 4. *Virtuality Continuum (nach Milgram & Kishino (1994)).*

Enzyklopädien

Jüngere Veröffentlichungen, die eine Übersicht über die Fortschritte von VR im Ganzen oder in Unterkategorien geben, verzichten oft auf eine eigene Definition und leiten sich die Beschreibung über eine Auseinandersetzung mit Beispielanwendungen her (Freina & Ott, 2015; Portman et al., 2015; Verma & Paul, 2022). Schließlich gibt es noch Definitionen diverser Enzyklopädien (Merriam-Webster Dictionary, 2023; Oxford English Dictionary, 2023; Wikipedia, 2023). Die sehr breit gefassten Beschreibungen beinhalten in der Regel die Kernaspekte 'computergenerierte virtuelle Umgebung', 'Interaktion', 'sensorische Stimulation' und 'Echtzeit' und beziehen auch die Charakterisierung der Wirkung als 'lebensnah' oder 'scheinbare Wirklichkeit' mit ein. Außerdem werden als Möglichkeit der technischen Umsetzung VR-Brillen und Handcontroller als Eingabegeräte genannt. Mit diesen Beschreibungen wird ein Bereich abgedeckt, in den sich die meisten der aktuellen VR-Anwendungen – so auch die in dieser Arbeit entwickelte – einordnen lassen.

3.2 Geschichte der VR

Anfänge bis 1960er

Vorgängerversionen der VR reichen bis an die Anfänge der Photographie im 19. Jahrhundert zurück. Stereoskopisches Sehen ist die Grundlage für räumliche Wahrnehmung und die Fähigkeit des Menschen und vieler Tiere, die Umwelt in drei Dimensionen wahrzunehmen. Jedes Auge betrachtet die Umgebung aus einer leicht unterschiedlichen Perspektive und diese Einzelbilder werden anschließend vom Gehirn zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Es entsteht eine Tiefenwirkung und wir lernen, aus diesen Informationen Größe und Abstand von Objekten zu uns und zueinander einzuschätzen. Diese Hintergründe beschrieb Charles Wheatstone bereits in den 1830ern und präsentierte eine Apparatur, die mithilfe von Spiegeln den Blick beider Augen auf zwei unterschiedliche Bilder lenkte, die dasselbe Objekt aus einer leicht unterschiedlichen Perspektive zeigten (Wheatstone, 1838). Er erfand somit das erste Stereoskop.

Die weitere Entwicklung der Photographie beschäftigte sich in den folgenden Jahrzehnten hauptsächlich mit der zweidimensionalen (Bewegt-)Darstellung und es dauerte über ein Jahrhundert, bis Morton Heilig 1962 mit dem 'Sensorama' den ersten Simulator präsentierte, der nach heutigem Verständnis als VR-System gilt. Das 'Sensorama' erlaubte die virtuelle Fahrt auf einem Motorrad durch New York und lieferte nicht nur ein audiovisuelles Erlebnis, sondern war auch darüber hinaus multi-sensorisch: Man konnte den Geruch der Umgebung wahrnehmen, die Vibrationen des Stuhls simulierten den Motor und eine Windmaschine pustete den Spielenden Fahrtwind entgegen (Gigante, 1993). Das System war sehr groß und nahm die Dimensionen eines Tisches ein. Bereits 1957 reichte Heilig ein Patent für ein System ein, das auf dem Kopf getragen werden konnte und den heutigen VR-Brillen (engl.: 'Head-Mounted Display', HMD) sehr nahekommt (Heilig, 1960). Eine funktionierende Realisierung eines solchen Systems gelang aber

erst Ivan Sutherland mit 'The Ultimate Display' (Sutherland, 1965). Er beschrieb auch die Notwendigkeit, die Bewegungen des Kopfes zu registrieren, um das angezeigte Bild aus dem entsprechend richtigen Blickwinkel rendern zu können (Sutherland, 1968). Aufgrund der transparenten Displays wird Sutherlands HMD auch als erstes AR-System angesehen (Dörner et al., 2019). Diese Meilensteine sind auf Abbildung 5 dargestellt.

1970er bis 2000er

In den folgenden Jahrzehnten blieb aufgrund der hohen Kosten der benötigten Hardware die Entwicklung und Nutzung von VR-Systemen Instituten oder Unternehmen mit entsprechender finanzieller Ausstattung vorbehalten. Vor allem das (US-)Militär war eine treibende Entwicklungskraft für VR-Systeme und stellte 1986 das VCASS (Visually Coupled Airborne Systems Simulator) vor, ein Flugsimulator für das Training der Piloten (Furness, 1986). Dabei wurde auch die Wichtigkeit kurzer Signallaufzeiten, schneller Bildwiederholrate und unmittelbarer Aktualisierung der Bildausgabe herausgestellt. Die NASA (National Aeronautics and Space Administration) initiierte 1984 erste VR-Projekte, aus denen später das VIEW-Project (Virtual Environment Interface Workstations) entstand. Dabei handelte es sich um eine multi-sensorische Simulation einer Weltraumstation für das Astronautentraining (Gigante, 1993; Dörner et al., 2019).

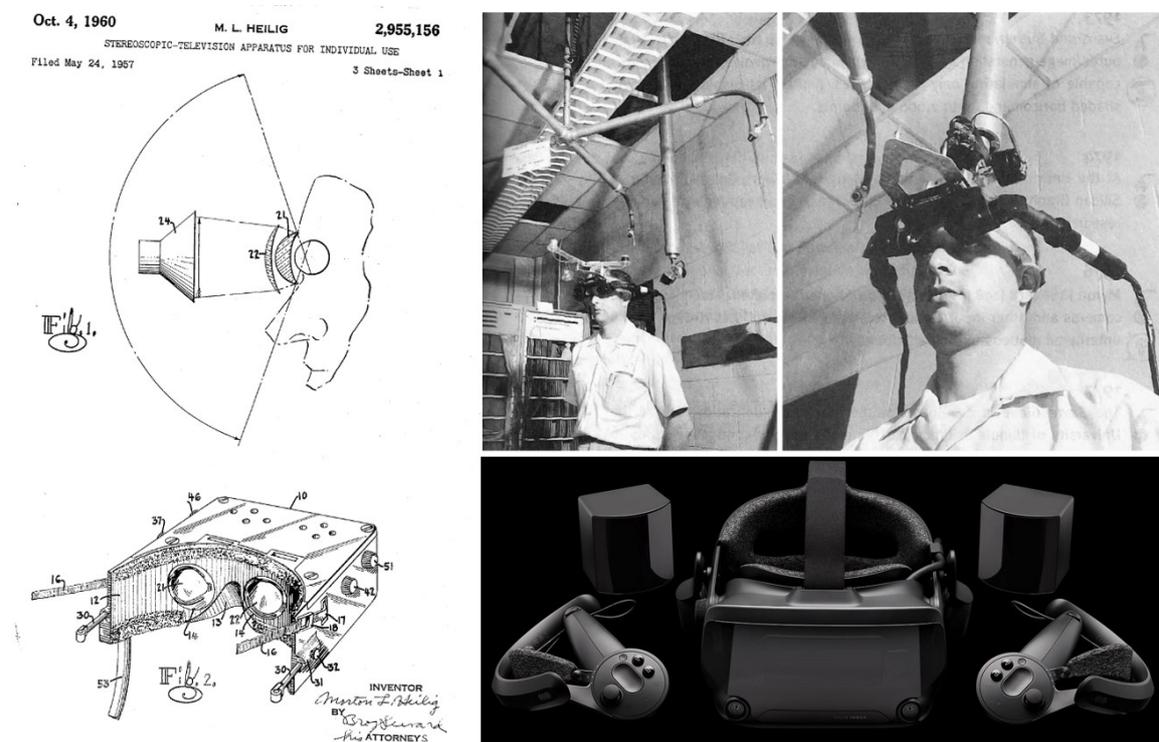


Abbildung 5. Links: Patentzeichnung von Morton Heilig (Heilig, 1960). Rechts oben: *The Ultimate Display* von Ivan Sutherland (Sutherland (1968), nachbearbeitet von Basu (2019)). Rechts unten: modernes VR-System von Valve (<https://www.valvesoftware.com/de/index>).

Die Grundlagen der VR – insbesondere das Tracking der Kopfbewegungen, die stereoskopischen Displays und entsprechende Hard- und Software zur Echtzeit-Berechnung der 3D-Bilder – waren somit gegeben. Die Tendenz zu immer leistungsfähigerer Hardware war bereits seit den 60ern als 'Moore'sches Gesetz' bekannt (Moore, 1998) und das daraus resultierende Potential für VR mit möglichen weiteren Entwicklungen und steigendem Einfluss auf Alltag und Gesellschaft ließ sich absehen (Lanier, 1992). Die 90er und 2000er waren geprägt von einer zunehmenden Vernetzung

von Forschenden zum Thema VR, was sich an der Etablierung verschiedener Konferenzen zur Thematik zeigt. Auch kamen immer mehr Produzenten von optimierter Hard- und Software sowie einige Innovationen im Bereich des Tracking hinzu, was die Anwenderpreise um ein mehrfaches reduzierte (Dörner et al., 2019). In diesen Zeitraum fallen auch einige Versuche unterschiedlichster Hersteller, ein für den Massenmarkt taugliches VR-System zu entwickeln. All diese Versuche scheiterten jedoch an den weiterhin hohen Kosten und technischen Limitationen, vor allem im Bereich des Trackings und der Prozessoren, was zu 'Motion Sickness' (siehe Kapitel 3.4) und niedrigem Bedienkomfort führte (Erl, 2022).

Ab 2016: VR-Boom

Schlussendlich dauerte es bis 2016, als beginnend mit der Einführung der Oculus Rift des damaligen Unternehmens 'Oculus VR' sich sehr schnell ein Markt für VR-Systeme für die breite Öffentlichkeit etablierte. In kurzer Abfolge veröffentlichten große Unternehmen – u.a. HTC und Valve mit der 'HTC Vive' 2016 (HTC Corporation, 2023), Sony mit der 'PlayStation VR' 2016 (Sony Interactive Entertainment, 2023), Meta (damals 'Facebook') mit der 'Oculus Quest' 2019 (Meta Platforms, 2023) und Valve mit der 'Valve Index' 2019 (Valve, 2023) – erfolgreiche VR-Brillen für den Massenmarkt und sorgten insbesondere in der Unterhaltungsbranche für einen großen Zulauf an Kundschaft. Somit lohnte es sich nun auch für Software-Studios, mehr Budget in die Entwicklung von VR-Anwendungen zu investieren und diese den fortschreitenden Möglichkeiten der jeweils aktuellen Generation an VR-Brillen entsprechend anzupassen.

Kulturelle Einflüsse

Neben diesen technologischen Entwicklungen lässt sich ein beträchtlicher Einfluss aus dem Bereich der Science-Fiction- (SF-) Literatur und von SF-Filmen feststellen. Einige dieser Medien haben die Entwicklung von Kernaspekten der VR vorweggenommen und prophezeien auch weiterhin bislang unerreichte Grade der Immersion. Zu nennen wären 'Neuromancer' von William Gibson (Gibson, 1984), der auch den Begriff 'Cyberspace' prägte, ein gerade in SF-Medien häufig genutztes Synonym für VR-ähnliche Welten. Die 'Matrix'-Tetralogie (Wachowski & Wachowski, 1999), eine Filmreihe über eine die gesamte Menschheit einbeziehende simulierte Realität, wurde ab 1999 zu einem weltweiten Kinoerfolg. 'Ready Player One', die Geschichte über eine Schatzsuche, die zwischen einer dystopischen Realität und einer VR-Welt hin- und herspringt, wurde sowohl als Buch (Cline, 2011) als auch als Film (Spielberg, 2018) erfolgreich. Seit 2020 wird außerdem die SF-Serie 'Upload' produziert (Daniels et al., 2020). In dieser nahen Zukunft können Verstorbene ihr Bewusstsein in eine virtuelle Nachwelt hochladen ('uploaden'), die ebenfalls von den Lebenden mittels VR-Systemen besucht werden kann. Und schließlich ist noch die Serie '3 Body Problem' (Tsang et al., 2024) zu erwähnen, die auf einer populären Buchtrilogie basiert (C. Liu, 2023) und in der das Lösen eines Rätsels in einer VR-Welt ein zentrales Handlungselement beim Erstkontakt der Menschheit mit einer außerirdischen Zivilisation bildet.

Vielen dieser fiktionalen Darstellungen ist gemein, dass die Immersion in der virtuellen Welt nahezu total und von der Realität nicht mehr zu unterscheiden ist – ganz entsprechend Morton Heiligs früher Definition von VR (Heilig, 1960) (Kapitel 3.1). Es werden alle Sinne angesprochen, jede Bewegung mit jedem Körperteil ist möglich, wird unmittelbar in die virtuelle Welt übertragen und dort als Bewegung des eigenen Körpers wahrgenommen. Für einige Fälle wird eine neuronale Schnittstelle postuliert (z. B. 'Neuromancer', 'Matrix'). Es wird aber auch suggeriert, dass diese Wirkung mit (weiterentwickelten) VR-Systemen zu erreichen ist, die äußerlich den in der Realität verfügbaren ähneln (z. B. 'Ready Player One', 'Upload', '3 Body Problem'). Aufgrund der anhaltenden hohen Popularität des Genres allgemein und einiger besonders erfolgreicher Werke im Speziellen haben diese Darstellungen der VR über die Jahrzehnte sehr viele Menschen beeinflusst. Demgegenüber steht die erst seit einigen Jahren bestehende Möglichkeit für die

breite Öffentlichkeit, mit tatsächlichen VR-Anwendungen in Kontakt zu kommen. Obwohl der heutige Stand der Technik von einer vollständigen Immersion noch weit entfernt ist (siehe Kapitel 3.3), muss dennoch berücksichtigt werden, dass diese SF-Medien die Erwartungshaltung der Gesellschaft darüber, was VR ist und können soll, entscheidend geprägt haben und sie auch weiterhin beeinflusst.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Thematik inzwischen auch in der Politik angekommen ist und die Technologie explizit in Agenden für (digitale) Forschung und Entwicklung sowie in Kulturprogrammen genannt wird, beispielsweise in der Digitalstrategie der deutschen Bundesregierung (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2023).

3.3 Funktionsweise heutiger VR-Systeme

Nach Gigante (1993) basiert VR auf den folgenden sieben Technologien:

- 1) Echtzeit 3D-Computergrafik
- 2) Weitwinklige stereoskopische Bildschirme
- 3) Registrierung der Kopfbewegungen ('Head Tracking')
- 4) Registrierung der Handbewegungen und Gesten ('Hand Tracking')
- 5) Stereo-Ton
- 6) Haptisches Feedback
- 7) In- und Output für Sprache

Die ersten drei dieser Technologien sind für VR notwendig, die übrigen vier werden je nach Anwendung in unterschiedlichen Ausprägungen genutzt. Im Folgenden werden diese Kerntechnologien sowie Varianten, Erweiterungsmöglichkeiten und Abgrenzungen zu ähnlichen Systemen kurz vorgestellt.

1) Echtzeit 3D-Computergrafik

Um in eine immersive, virtuelle 3D-Welt einzutauchen, muss diese zunächst erschaffen und angezeigt werden. Die virtuelle Welt basiert in der Regel aus einer Vielzahl an Objekten, die wiederum aus einer Vielzahl an Polygonen bestehen. Diese Polygone werden von einer 3D-Grafik-Engine dazu genutzt, um aus einer vorgegebenen Perspektive ein möglichst real erscheinendes Bild zu berechnen, welches Kernaspekte wie Verdeckung oder Licht- und Schattenwurf berücksichtigt. Der Vorgang dieser Berechnung wird 'rendern' genannt. Damit die Szenerie als Bewegtbild wahrgenommen wird, muss das Bild in kurzer Abfolge vielfach pro Sekunde gerendert werden. Um sich auch den veränderten Perspektiven der Nutzenden anpassen zu können, ist außerdem der Echtzeit-Aspekt wichtig. Im Gegensatz zu klassischen Video-Produktionen kann das Bild nicht im Voraus gerendert und bei Bedarf abgespielt werden, sondern die Berechnung muss als Input-Parameter den aktuellen Betrachtungswinkel der Szenerie berücksichtigen (Gigante, 1993; Nischwitz et al., 2011). Näheres zur Computergrafik findet sich in Kapitel 6.1.

2) Stereoskopische Bildschirme

Unsere dreidimensionale Sicht basiert auf der Wahrnehmung der Umgebung durch unsere Augen aus zwei leicht unterschiedlichen Perspektiven ('Stereoskopisches Sehen') (Wheatstone, 1838). Die oben aufgeführten Berechnungen zur Darstellung der virtuellen Umgebung müssen also doppelt ausgeführt werden. Die 3D-Grafik-Engine nimmt dazu die Position und Ausrichtung des Kopfes in der virtuellen Welt als Basis, addiert bzw. subtrahiert davon Werte, die sich aus dem

Augenabstand ergeben und rendert die zwei resultierenden Perspektiven zu Bildern, die anschließend auf das entsprechende Display der VR-Brille weitergeleitet werden (Dörner et al., 2019; Gigante, 1993).

Es gibt auch stereoskopische Displays für statische VR-Systeme wie die CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), bei denen die Bildschirme um die Nutzenden herum einen würfelartigen Projektionsraum aufspannen (Cruz-Neira et al., 1992). Wie bei einem 3D-Kino sind hier Brillen mit Polarisationsfiltern notwendig, um ein als dreidimensional wahrgenommenes Bild zu erzeugen. Die größte Verbreitung finden aber Systeme, welche die Displays direkt am Kopf vor den Augen der Nutzenden positionieren und daher auch Head-Mounted-Displays (HMD) genannt werden. Als solche VR-Brillen kommen inzwischen eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen mit einem breiten Spektrum an Funktionen und Funktionsweisen, Leistungsfähigkeit und Bedienkomfort in Betracht (Anthes et al., 2016). Allen gemein ist die Abschottung des Sehfelds von der realen Welt, sodass visuell nur noch die virtuelle Darstellung auf den Displays existiert.

3) Head Tracking

Der dritte Grundpfeiler für immersive VR besteht in der Fähigkeit des Systems, die Position und Blickrichtung der Nutzenden erkennen zu können. Wie oben beschrieben wird diese Information benötigt, um die virtuellen Bilder aus der korrekten Perspektive rendern zu können. Es gibt verschiedene Methoden und entsprechende Sensorik, die Kopfbewegungen zu registrieren. Generell wird zwischen sogenanntem 'Outside-In-Tracking' und 'Inside-Out-Tracking' unterschieden. Diese Begriffe bezeichnen die Position der Sensorik. Wenn die Sensoren am Kopf selbst befestigt sind und Informationen aus der Umgebung verarbeiten, handelt es sich um Inside-Out (z. B. die HTC Vive-Serie (HTC Corporation, 2023) & die Valve Index (Valve, 2023)). Wenn die Sensoren unabhängig von der VR-Brille existieren, statisch im Raum aufgebaut sind und die Bewegung des Kopfes der Nutzenden registrieren, handelt es sich um Outside-In (z. B. PlayStation VR (Sony Interactive Entertainment, 2023)). Es gibt auch Inside-Out-Tracking mit statischen externen Systemen, sogenannten Tracking-Stationen. Es handelt sich dabei aber nicht um Sensoren, sondern um Infrarot-Sender, dessen Positionen vorher eingemessen wird und dem System bekannt sind. Durch permanente Abstandsberechnung zwischen diesen Stationen und den Sensoren auf der VR-Brille lässt sich dessen Position und Ausrichtung sehr genau bestimmen. Da diese klassische Methode des Trackings aber den ständigen Auf- und Abbau dieser Stationen erfordert, gehen die meisten Hersteller inzwischen zu einem auf Kameras basierendem Inside-Out-Tracking über (z. B. Oculus Quest 2 (Meta Platforms, 2023) & Pico 4 (Pico Technology, 2023), siehe Abbildung 6). Über die Beobachtung der Umgebung durch diese in das HMD integrierten Kameras lassen sich durch die Differenzen der aufgenommenen Bilder die Verschiebung und Rotation des HMDs berechnen.

Außerdem gibt es noch die Möglichkeit, die Brille über eingebaute Bewegungssensoren zu tracken. Oftmals sind diese zusätzlich zu einer der oben genannten Tracking-Methoden verbaut und liefern zusätzliche Daten für eine robustere Positionsbestimmung.

Eine weitere Unterscheidung gibt es in den Freiheitsgraden ('Degrees of Freedom', DoF), die durch das Tracking erfasst werden können. Die erste Oculus Rift oder einfache VR-Simulationen, die lediglich aus einer in eine Halterung eingeführtem Smartphone mit entsprechender App bestehen, können lediglich auf die drei Rotationssensoren des Smartphones zurückgreifen (3 DoF). Die Nutzenden können sich also in der VR-Welt umsehen, können sich dort aber nicht lateral bewegen. Alle neuartigen VR-Brillen setzen allerdings auf eine der weiter oben genannten Tracking-Methoden und registrieren neben den drei Rotationsparametern auch die drei Translationsparameter entlang der Raumachsen (6 DoF) (Anthes et al., 2016; Gigante, 1993; Gourlay & Held, 2017).

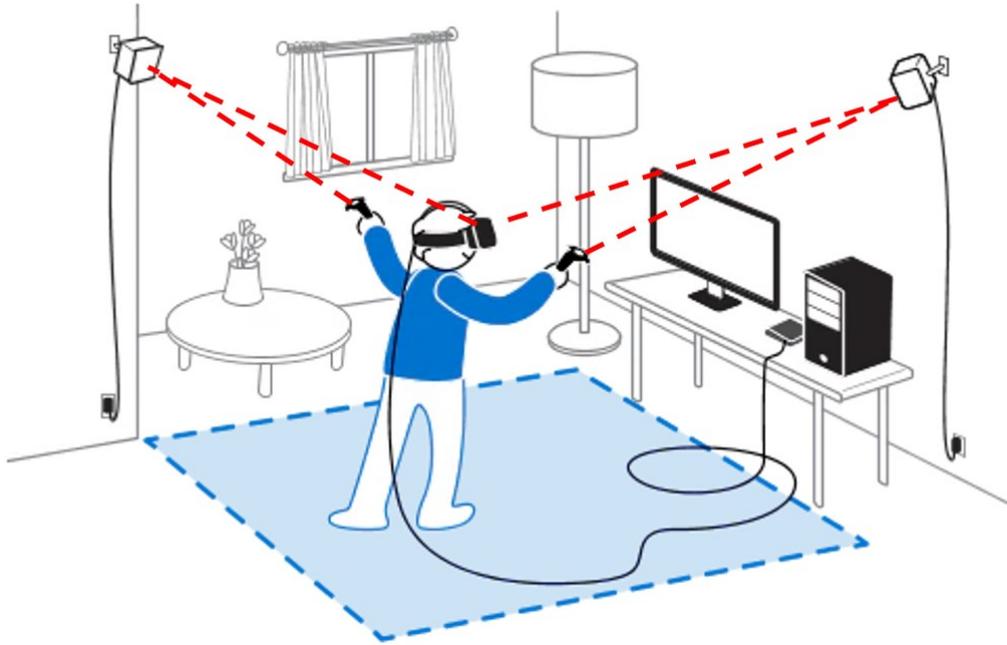


Abbildung 6. Funktionsprinzip des Inside-Out-Trackings von stationsbasierten VR-Systemen (nach Vive (https://www.vive.com/us/support/vive-pro-hmd/category_howto/verifying-your-setup.html)). Sensoren an der VR-Brille registrieren die von den Tracking-Stationen ausgesandten Signale.

4-7) Hand Tracking, Stereo-Ton, Haptisches Feedback, Sprache

Die weiteren Technologien sind nicht zwangsweise für VR notwendig, können aber den Nutzen und die immersive Erfahrung deutlich erweitern bzw. ergänzen. Das Hand Tracking funktioniert letztlich wie das Head Tracking: Entweder registrieren direkt auf den Controllern angebrachte Sensoren deren Position, oder aber sie werden von den Kameras des HMD (oder externen Kameras) erfasst. Letztere Methode erlaubt bei einigen Systemen auch das Weglassen eines Controllers und das direkte Erfassen und Interpretieren von Handgesten ('Gesture Tracking'). Da ohne eine Form des Hand Trackings nur sehr eingeschränkte Formen der VR-Interaktion möglich sind, gehören Handcontroller inzwischen zur Standardausrüstung eines VR-Systems.

Mit der Stereo-Tonausgabe wird der Hörsinn in die Immersion miteingeschlossen. Je nach Position einer Tonquelle in der virtuellen Welt und der Ausrichtung des HMDs zu dieser virtuellen Quelle kann die Audioausgabe auf den Kopfhörern des HMDs entsprechend angepasst werden. Die Nutzenden erhalten einen akustischen Raumeindruck, der sich idealerweise mit der visuellen Darstellung deckt. Lokalisierte Tonquellen sind mit gängigen Programmen zur Erstellung von VR-Welten wie Game-Engines (siehe Kapitel 7.2) sehr einfach umzusetzen und bieten einen hohen Mehrwert in VR-Anwendungen (Brinkman et al., 2015).

Haptisches Feedback ist in aktuellen VR-Systemen nur rudimentär ausgeprägt und wird meist über Vibrationsfunktionen der Handcontroller umgesetzt. Es gibt zwar experimentelle Systeme für fortgeschrittenes haptisches Feedback (siehe unten), es ist jedoch mit den gängigen, am Markt verfügbaren Systemen noch nicht möglich, einen Widerstand beim Greifen eines Objekts zu erzeugen und somit die Form des berührten Objekts zu simulieren. Stattdessen wird ggf. mittels eines kleinen Vibrationssignals lediglich die Tatsache, dass gerade mit einem virtuellen Objekt interagiert wird, mitgeteilt. Die erhöhte Immersion beim Vorhandensein von haptischem Feedback und positive Auswirkungen auf das Lernen bestimmter Aufgaben ist immer wieder Gegenstand von Untersuchungen (Kreimeier et al., 2019; Van Der Meijden & Schijven, 2009).

Das Steuern von VR-Systemen über Spracherkennung, wie Gigante (1993) sie beschrieben hat, ist auch heute noch nicht Teil handelsüblicher VR-Systeme. Stattdessen wird die oben beschriebene Stereo-Tonausgabe auch für die Sprachausgabe eingesetzt, um virtuelle Nachbildungen von Personen zu verorten und realer wirken zu lassen. Außerdem können Input-Systeme wie ein in das HMD integriertes Mikrofon dazu genutzt werden, in Multiplayer-Umgebungen miteinander zu kommunizieren (Kersten et al., 2017a) (siehe auch Kapitel 12.3.6).

Motion Sickness

Ein besonders wichtiger Aspekt sowohl bei der Entwicklung von VR-Hardware als auch -Software ist der Komfort der Nutzenden und die Vermeidung der Bewegungskrankheit, die auch oft mit dem englischen Begriff 'Motion Sickness' bezeichnet wird. Motion Sickness betrifft viele Nutzende von VR-Anwendungen und entsteht aufgrund eines oder mehrerer Faktoren: niedrige Auflösung, niedrige Bildwiederholrate, Verzögerungen in der Nachführung des Bildes ('Lag'), fehlerhafte Kalibrierung der VR-Umwelt in Bezug auf die reale Umgebung (bspw. Neigung des Bodens) oder schnelle Bewegungen/Drehungen. Diese Probleme sind entweder auf technische Limitationen in der Datenaufnahme oder -prozessierung zurückzuführen (beispielsweise unzureichende Performance der Prozessoren oder zu niedrige Abtast- und Datenverarbeitungsrate der Sensoren) oder auf die Unmöglichkeit, Beschleunigungen zu simulieren und neben der visuellen Simulation auch vestibulären Bewegungsinput zu erzeugen. Diese Faktoren sind seit langem bekannt und waren – neben den damals hohen Kosten – die Hauptgründe für die lange Zeit ausbleibende massenhafte Verbreitung von VR-Systemen (Erl, 2022). Motion Sickness zeichnet sich durch der Seekrankheit ähnliche Symptome wie Übelkeit und Gleichgewichtstörungen aus (Chattha et al., 2020). Entsprechend ablehnend stehen (neue) Nutzende der Technologie gegenüber, wenn diese Symptome auftreten.

Die fortschreitende Entwicklung, gerade in den Bereichen der Auflösung der Displays, verbessertem Echtzeit-Rendering und präziserem Tracking, erlaubt inzwischen immer mehr Menschen eine beschwerdefreie oder –arme VR-Erfahrung. Dennoch ist es nach wie vor von der Performance der benutzten Hardware sowie bestimmten Design-Entscheidungen bei der Entwicklung der VR-Anwendung abhängig, ob Symptome vermehrt auftreten oder nicht. Beispielsweise hat die gewählte Methode der Fortbewegung in VR einen erheblichen Einfluss auf das Auftreten oder Ausbleiben von Motion Sickness (Al Zayer et al., 2020; Berger & Wolf, 2018). Da die Akzeptanz einer Anwendung somit stark von der Effizienz der Maßnahmen, die Motion Sickness verhindern sollen, abhängig ist, soll in dieser Arbeit besonderes Augenmerk auf diesen Aspekt gelegt werden.

Spezielle VR-Brillen / AR

Neben den Modellen vieler Hersteller, die sich um eine möglichst breite Zielgruppe bemühen, gibt es auch einige spezialisierte Modelle, die besonderen Wert auf einen bestimmten Aspekt legen, der dann mit Nachteilen in anderen Bereichen einhergeht. Beispielhaft sei hier die 'Pimax 5K Super' des Herstellers Pimax (2023) genannt, die mit einem besonders breiten horizontalen Sichtbereich (engl.: 'Field of View', FoV) beworben wird. Die VR-Brillen von Pimax besitzen bis zu 200° horizontales FoV, gegenüber anderen gängigen (z. B. oben genannten) Modellen, deren horizontales FoV zwischen 95° und 115° liegt. Diese Erweiterung des Sichtbereichs und somit zusätzliche Immersion kommt auf Kosten höherer Hardware-Anforderungen zustande.

Es gibt außerdem eine wachsende Palette an AR/MR-Brillen und entsprechender Herstellerfirmen. Eine der ersten AR-Brillen für den Massenmarkt war die 'HoloLens' von Microsoft aus dem Jahr 2016 (Microsoft Corporation, 2023). Einige Bereiche, wie z. B. das Tracking, sind bei VR- und AR-

HMDs identisch. Die Funktionalität der AR-Displays unterscheidet sich aber mitunter grundlegend von VR-HMDs und wird beispielsweise in Dörner et al. (2019) näher erklärt.

3.4 Aktuelle Daten, Technik & Forschung

Daten

Die ungenauen Definitionen und Abgrenzungen der XR-Bereiche untereinander sowie gegenüber anderen immersiven Medien machen es schwer, eine Marktübersicht zu generieren, die lediglich VR betrachtet. Entsprechende Statistiken decken somit einen größeren Bereich ab. Für das Jahr 2022 werden für VR Marktgrößen im Bereich von knapp 5 Milliarden Euro (Esler, 2023) über 12 Milliarden Euro (Alsop, 2023) bis zu 60 Milliarden Euro Umsatz genannt (Grand View Research, 2023). Den größten Marktanteil hat dabei mit Abstand die Spieleindustrie (ca. 23%), gefolgt von der Automobilindustrie, dem Gesundheitswesen und dem Einzelhandel (jeweils ca. 11 - 15%) und schließlich dem Bildungswesen, der Flug- und Militärindustrie, dem Verarbeitenden Gewerbe und der Gruppe der restlichen Bereiche (jeweils ca. 6 – 10%) (Fortune Business Insights, 2023). Alle genannten Quellen prognostizieren zudem ein weiter anhaltendes starkes jährliches Wachstum (zwischen 27% und 50%) für die kommenden Jahre.

Hardware

Laut der VR-Datenbank VRcompare (2023) gibt es zurzeit (Stand: April 2024) 249 VR- und AR-HMDs von 115 Herstellern. Darüber hinaus gibt es mehrere Technologien, die – zusätzlich zu den HMDs – der Erweiterung der Immersion dienen und zusätzliche Sinne ansprechen oder aber realistischere Bewegungen wie uneingeschränktes Laufen ermöglichen sollen. Zusätzliche Sensoren am Körper, beispielsweise an den Fuß-, Knie- und Ellenbogengelenken, erlauben die Verortung dieser Körperteile im virtuellen Raum und somit die Wahrnehmung des eigenen (virtuellen) Körpers während der VR-Nutzung, was insbesondere für bewegungsintensive VR-Anwendungen interessant ist (Pastel et al., 2020). Großer Entwicklungsaufwand wird außerdem für VR-Laufbänder betrieben. Ein VR-Laufband ist ein uni- oder omnidirektionales Laufband, welches die Problematik des begrenzten Raumes angehen soll. Üblicherweise steht für VR nur ein begrenzter physischer Raum zur Verfügung und VR-Anwendungen werden oft dahingehend entwickelt, dass die Nutzenden zum Ausführen des Programms auch nur diesen Raum benötigen. Sofern die virtuelle Welt die Ausmaße des realen Raumes übersteigt, sind andere künstliche oder kaschierte Fortbewegungsmaßnahmen (z. B. virtuelle Teleportation; Fahrt in einem virtuellen Transportmittel) nötig, um die gesamte virtuelle Welt erkunden zu können und die Illusion einer unbegrenzten Welt zu erschaffen. Es gibt inzwischen eine große Anzahl an Ideen zur künstlichen Fortbewegung in VR (Al Zayer et al., 2020; Di Luca et al., 2021). VR-Laufbänder zielen darauf ab, eine realere und somit immersivere Möglichkeit der Fortbewegung zu bieten. Es handelt sich bei solchen Laufbändern aber nach wie vor entweder um experimentelle Forschung oder um Produkte für eine bestimmte, eng gefasste Zielgruppe, da der Platzbedarf und die zusätzlichen Kosten hoch sind (Avila & Bailey, 2014). Auch speziellere Formen der 'realen' Fortbewegung werden untersucht: so hat 'Birdly VR' einen 'Vogelsimulator' vorgestellt, mit dem Nutzende liegend und mittels physischen Armbewegungen (Flügelschlag) durch eine virtuelle Stadt fliegen können (Rüfenacht et al., 2018). In speziellen Anwendungsgebieten ist diese Art der Simulatoren, die reale Bewegungen ermöglichen oder vice versa virtuelle Bewegungsimpulse in die Realität übertragen, bereits verbreitet im Einsatz, beispielsweise für die medizinische Rehabilitation (S. Yang et al., 2011).

Software

Neben diesen Entwicklungen in der Hardware gibt es viele Beispiele an VR-Software, die für die unterschiedlichsten Einsatzzwecke entwickelt wurde (Slater & Sanchez-Vives, 2016). Die Spieleindustrie entwickelt zumeist noch kleinere 'Spiele für zwischendurch' und berücksichtigt dabei die Tatsache, dass aufgrund noch vorhandener Unzulänglichkeiten in der Technologie und den daraus entstehenden Problemen wie Motion Sickness die Spieldauer für VR-Spiele deutlich geringer ist als bei klassischen, Desktop-basierten Spielen. Ein sehr erfolgreiches und populäres Beispiel für diese Kategorie ist 'Beatsaber' (Ilavský & Hrinčár, 2018). Aufwendige (und somit teurer zu produzierende) Spiele mit längerer Spieldauer, wie das parallel zur 'Valve Index' entwickelte Spiel 'Half-Life Alyx' (Valve, 2020) bilden aufgrund des noch begrenzten Publikums (v. a. im Vergleich zum non-VR-Markt) nach wie vor die Ausnahme (Coomer & Mitchell, 2020).

Neben diesen Spielen für den Heimgebrauch gibt es auch immer mehr öffentliche Orte, an denen VR-Spiele – teilweise speziell für den jeweiligen Ort oder dessen zugrunde liegende Thematik entwickelt – gespielt werden können. Von diesen VR-Spielhallen gibt es Ende 2021 im deutschsprachigen Raum bereits mindestens 58 Stück (Bezmalinovic, 2021). Beispiele aus dem Hamburger Raum sind zwei ins 'Miniatur Wunderland' integrierte VR-Anwendungen (Miniatur Wunderland, 2023) sowie die 'Virtual Reality Headquarters Hamburg' (VRHQ) in der Hamburger Speicherstadt (VRHQ, 2023).

Einen weiteren eigenen Bereich in der VR-Unterhaltungsbranche bilden Programme, bei denen nicht das Spielen selbst, sondern der soziale Aspekt ('Social VR') im Vordergrund steht. Diese Anwendungen bieten verschiedene virtuelle Orte, an denen sich Nutzende treffen und austauschen können, beispielsweise 'VRChat' (Gaylor & Joudrey, 2017) und 'RecRoom' (Rec Room Inc., 2016). Mit zusätzlichen, virtuellen Möglichkeiten an Interaktionen, Kommunikation und Konsum wird Social VR auch als Grundbaustein des Konzepts 'Metaversum' betrachtet (Mystakidis, 2022), für das es aber schon verschiedene Beispiele aus der Zeit vor der massenhaften Verbreitung von VR gibt, wie etwa 'Second Life' aus dem Jahre 2003 (Rymaszewski, 2007).

Im Gesundheitswesen existieren VR-Anwendungen sowohl für das Training und zur Unterstützung des medizinischen Personals bei Operationen, zur Unterstützung bei Rehabilitationsmaßnahmen sowie zur Behandlung psychischer Krankheiten (Li et al., 2017; Yates et al., 2016). VR-Simulationen für Training und Sicherheit finden sich auch in industriellen Anwendungen (Almeida et al., 2023), insbesondere der Bauindustrie (P. Wang et al., 2018; Zhao & Lucas, 2015). Weitere Einsatzbereiche sind die Sportbranche (Neumann et al., 2018), die Werbebranche (Sadamali Jayawardena et al., 2023), sowie Designunterstützung und Visualisierungen des Endprodukts in der Automobilbranche (Lawson et al., 2016), der Architektur (Portman et al., 2015) und der Stadtplanung (Jamei et al., 2017; Lu et al., 2021; Sunesson et al., 2008). In der Stadtplanung gibt es in letzter Zeit zudem vermehrt Angebote für Bürgerbeteiligungsverfahren, um die Meinungen der Zielgruppe, von Anwohnenden, Interessenvertretenden und anderen Beteiligten in die Planungen mit einfließen lassen zu können (Keil et al., 2023; Postert et al., 2022).

VR-Anwendungen im Bildungswesen treten in vielfältiger Form in Erscheinung. Angefangen beim Schulunterricht (Alalwan et al., 2020) über die Lehre mit oder über VR in weiterführenden Bildungseinrichtungen wie Universitäten (Tschirschwitz et al., 2018) bis zur Visualisierung von Daten und Forschungsergebnissen (Kolb et al., 2019; Lütjens et al., 2019) haben inzwischen viele Institutionen das Potential der VR zur Wissenschaftskommunikation und für den Kultursektor erkannt und entsprechende Angebote geschaffen (Loumos et al., 2018). Museen setzen VR schon seit einiger Zeit zur Unterstützung von Ausstellungsthematiken ein. Manchmal wird auch die gesamte Ausstellung um die Präsentation mittels VR herum konzipiert. Beispiele dafür sind und waren ein VR-Tiefsee-Tauchgang im Philadelphia Franklin Institute, 'Mona Lisa: Beyond the Glass'

im Louvre in Paris, 'No Spectators: The Art of Burning Man' im Smithsonian in Washington DC, oder die Möglichkeit im finnischen Nationalmuseum, in ein virtuell zum Leben erwachtes Gemälde einzutauchen (J. Richardson, 2023). Insbesondere die historische Wissenschaftskommunikation profitiert durch die Möglichkeit, verfallene oder nicht mehr existente Gebäude oder Städte rekonstruieren und in VR erlebbar zu machen und findet vor allem in der Archäologie schon seit Jahrzehnten Zuspruch und Anwendung (Barceló et al., 2000). So gibt es digitale VR-Rekonstruktionen der historischen Zustände von Rom (Fleury & Madeleine, 2012), Jerusalem und London (Matchar, 2017), Duisburg (Tschirschwitz et al., 2019), Bad Segeberg (Deggim et al., 2017b) und Stade (Walmsley & Kersten, 2019). Rekonstruktionen einzelner Gebäude oder Gebäudeensembles existieren beispielsweise für ein antikes römisches Wohnhaus (Boffi et al., 2023), die Zeche Holland in Bochum (Edler et al., 2019), ein frühneuzeitliches Fachwerkhaus in Bad Segeberg (Kersten et al., 2018a), die historische Hammaburg in Hamburg (Haesler et al., 2016), das Fort Al Zubarah in Katar (Kersten et al., 2021) oder eine Bergbausiedlung auf Spitzbergen (Lang et al., 2022).

Einige Angebote sind auch online abrufbar und bieten den Vorteil, dass sie überall und von jeder Person mit Zugang zu VR-Hardware benutzt werden können. So lässt sich beispielsweise die Sixtinische Kapelle mit ihren Wand- und Deckengemälden in VR erkunden. Die Nutzenden können interaktiv die Hintergründe zu Michelangelo und den anderen Künstlern in Erfahrung bringen (Evans, 2019). Näheres zu VR-Anwendungen für die Wissenschaftskommunikation findet sich in Kapitel 4.

Forschung

Die aktuelle Forschung zur VR beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Verhalten von Nutzenden innerhalb von VR-Welten und daraus ableitbaren Problemen und Potentialen sowie mit der Erschließung neuer Anwendungsfelder. Bei vielen der oben genannten Anwendungsbeispiele handelt es sich entweder um experimentelle VR-Projekte zur Erforschung, wie die zugrundeliegende Thematik in VR dargestellt werden kann und welchen Nutzen das jeweilige Fachgebiet daraus ziehen könnte, oder aber um Reviews, die Erfahrungen solcher Anwendungsfälle bündeln und allgemeine Rückschlüsse daraus ableiten.

Ein Teil der allgemeineren Forschung zu VR beschäftigt sich mit dem Präsenzgefühl (Hruby et al., 2020; Schwind et al., 2019) und dem daraus resultierenden Verhalten der Nutzenden. Der Frage, inwiefern virtuelle Welten immer noch anders wahrgenommen werden als reale, wird beispielsweise in der Untersuchung der Distanzschätzung und Tiefenwahrnehmung nachgegangen (El Jamiy & Marsh, 2019; Keil et al., 2021a). Weitere Forschungsschwerpunkte sind Fortbewegungsmöglichkeiten in VR (Al Zayer et al., 2020; Di Luca et al., 2021), Einflussfaktoren auf die Entstehung von Motion Sickness (Berger & Wolf, 2018; Patrão et al., 2020) und Verhaltensmuster in Multiplayer-VR-Anwendungen, wie z. B. die Möglichkeit, durch andere Nutzende hindurchzugehen (Reinhardt & Wolf, 2020) und Phänomene der virtuellen Belästigung (Freeman et al., 2022).

Speziellere Forschung zur Orientierung und Raumwahrnehmung in VR wurde und wird von einer Reihe an Arbeitsgruppen durchgeführt. Langbehn et al. (2017; 2019) haben gezeigt, wie die Raumwahrnehmung in VR so manipuliert werden kann, dass Nutzende virtuell geradeaus, real aber in einem Kreis laufen. Es gibt außerdem einige Studien, die sich mit Unterschieden in der Wegfindung zwischen 2D, 3D und VR (Dong et al., 2020; Halik & Kent, 2021), beziehungsweise zwischen der Realität und VR (Clemenson et al., 2020; Dong et al., 2022) auseinandersetzen und Präferenzen der Nutzenden ermitteln. Die Ergebnisse dieser Studien legen nahe, dass es keine pauschale Antwort auf eine 'bessere' Methode der räumlichen Wahrnehmung gibt, sondern je

nach Metrik unterschiedliche Ergebnisse auftreten und auch die Strategien der Testpersonen für die Wegfindung stark variieren. Die Autor:innen empfehlen daher zum Teil eine Kombination verschiedener Herangehensweisen aus 2D und 3D sowie die Durchführung zusätzlicher Studien. Weitere Untersuchungen wurden zu Unterschieden zwischen 2D und VR beim Mental Rotation Test durchgeführt (Lochhead et al., 2022), zur Auswirkung verschiedener virtueller Fortbewegungsmöglichkeiten auf die Raumwahrnehmung (Berger & Wolf, 2018; Keil et al., 2021a), zum Einfluss von prägnanten Landmarken (Keil et al., 2022) und schließlich zu möglichen Navigationshilfen in VR (Edler et al., 2019; Zagata & Medyńska-Gulij, 2023). Lokka & Çöltekin (2019) weisen darauf hin, dass es nach wie vor sehr wenige Studien zu letztgenanntem Aspekt gibt. Detailliertere Hintergründe zur Orientierung finden sich in Kapitel 5.

Auch das Thema 'Virtuelle Museen' (VM) wird mit besonderem Fokus auf VR-Einsatzmöglichkeiten und Nutzersteuerung des (virtuellen) Publikums untersucht. Berger & Wolf (2018) haben sich mit Vor- und Nachteilen der Übertragung einer Ausstellung in den virtuellen Raum auseinandergesetzt und finden viele Vorteile, insbesondere aufgrund der Zeit- und Ortsunabhängigkeit. Gleichwohl benennen sie einige Probleme aktueller VMs und bemängeln insbesondere die mangelhafte Nutzerführung bzw. User Experience (UX). Lacet et al. (2022) hat in einem Review verschiedene VMs mit 360°- und/oder VR-Anteil untersucht und hebt die Wichtigkeit der Einbettung der gezeigten Informationen in eine Art Storytelling hervor. Storytelling in VR wurde von Dooley (2017) näher untersucht und es wurde festgestellt, dass sich noch keine konsistente Herangehensweise etabliert hat. Jüngere Untersuchungen haben außerdem aufgezeigt, dass die Lerneffizienz in VR stark vom Vorwissen und der Persönlichkeit der Nutzenden abhängt. (J. Liu et al., 2022; Paulauskas et al., 2023). Das Konzept der VMs wird in Kapitel 4.1 näher erläutert.

Einordnung dieser Arbeit in die Forschung

Das in Kapitel 1.2 beschriebene Forschungsziel dieser Arbeit ergibt sich aus den Forschungslücken, die sich aus den oben zitierten Untersuchungen resultieren. In Bezug auf die Orientierung beschreiben die zitierten Studien eine deutliche Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zum Verhalten der Nutzenden in VR. Die Orientierungsstudie dieser Arbeit geht dabei auf konkrete Navigationshilfen ein. Diese wurden zwar schon im Einzelnen untersucht oder vorgeschlagen, allerdings wurde noch keine vergleichende Studie der Effizienz der Hilfsmittel untereinander im VR-Setting in einer empirischen Untersuchung durchgeführt. Viele Anwendungen aus der VR-Wissenschaftskommunikation – insbesondere aus dem Geobereich (siehe Kapitel 4.3) – beschränken sich auf die Darstellung der Ergebnisse und bieten keine oder nur rudimentäre Orientierungshilfen oder Maßnahmen zur Nutzersteuerung. Gleichzeitig stellen viele dieser Veröffentlichungen das Potential der VR in der (Geo-)Datensvisualisierung heraus. Diese Arbeit versteht sich somit als Bindeglied zwischen diesen Bereichen, die bislang hauptsächlich separat betrachtet wurden: Der empirischen Grundlagenforschung zur VR-Nutzung und insbesondere -Orientierung auf der einen, und der praktischen Umsetzung der Erkenntnisse in einer für die breite Öffentlichkeit bestimmten VR-Anwendung auf der anderen Seite.

In Bezug auf den Einsatz der VR-Anwendung als VM wird in dieser Arbeit die Entwicklung einer VR-Anwendung angestrebt, die in der Kombination aus ihrer Zielgruppe (interessierte Laien ohne Vorkenntnisse) und der den Nutzenden überlassenen Autonomie (weitreichende Interaktion, selbstständige Navigation in einer offenen Welt) bislang sowohl von der Forschung als auch von VR-Entwicklungsteams stark vernachlässigt wurde. Oben genannte VR-Beispiele beschränken sich stattdessen auf

- a) vorgeordnete 360°-Videos,
- b) rein passive VR-Erlebnisse,

- c) Anwendungen, die sich auf einen kleinen, vordefinierten Raum oder in eine vorgegebene, linear zu durchlaufende Umgebung beschränken ('Schlauchleveldesign', siehe auch Kapitel 5.2) oder aber auf
- d) Anwendungen, für welche die Einweisung und Führung durch eine externe Person nötig ist.

Die Gruppe der Menschen ohne VR-Vorkenntnisse macht nach wie vor den Großteil der Bevölkerung aus, daher ist es umso relevanter, praktikable Lösungen zu finden, um auch für diese Gruppe das volle Potential der VR ausschöpfen zu können.

Zum besseren Verständnis der Relevanz, die Wissenschaftskommunikation allgemein und die Nutzung von immersiven Technologien wie VR im Speziellen besitzt, geht das folgende Kapitel auf diese Grundlagen ein und zeigt die Verknüpfungspunkte zwischen VR, Wissenschaftskommunikation, historischen Darstellungen und die Verwendung von Daten aus den Geoinformationswissenschaften auf.

4 Grundlagen zur Wissenschaftskommunikation

Die Wissenschaftskommunikation vermittelt die aus wissenschaftlicher Arbeit gewonnenen Erkenntnisse an Zielgruppen. Das können andere Forschende oder verwandte Fachgebiete sein ('Interne Wissenschaftskommunikation'), Entscheidungsträger in der Politik oder die breite Bevölkerung ('Externe Wissenschaftskommunikation') (Schäfer et al., 2015). Als Medien kommen dabei neben Fachbüchern, Fachjournals und Konferenzen für die interne Kommunikation (Davies & Greenwood, 2004) auch eine ganze Reihe an Präsentationsformen für die externe Kommunikation in Frage: Filme, populärwissenschaftliche Bücher, öffentliche Vorträge, Museen, Spiele, Radio oder Zeitschriften (Bonfadelli et al., 2017). Gesellschaft, Politik und Institutionen basieren viele Entscheidungen auf ihrem Verständnis der ihnen verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse, daher ist eine angemessene Aufbereitung und Verbreitung wissenschaftlicher Inhalte von enormer Wichtigkeit. Zudem gibt es Themenbereiche, die aufgrund ihrer Abstraktheit besonderer Aufarbeitung bedürfen oder aber aufgrund ihrer gesellschaftlichen Relevanz auf eine gewisse Akzeptanz in der Bevölkerung angewiesen sind (Metag, 2017). Illingworth (2020) leitet daraus eine besondere soziale Verantwortung aller Forschenden ab und betont außerdem die Notwendigkeit, sich über die wissenschaftliche Gesellschaft hinaus der sehr divers aufgestellten Öffentlichkeit bewusst zu werden und dementsprechend auf ihre unterschiedlichen Bedürfnisse in der Aufnahme von Wissen und Wissenschaft einzugehen, anstatt die Öffentlichkeit als ein homogenes Publikum anzusehen.

Die Präsentation von Wissenschaft in Bildern hat sich als besonders wirkungsvoll herausgestellt, da sie nicht nur in der Lage sind, Aufmerksamkeit zu erregen, sondern bei sinnvoller Präsentation auch zu einem besseren Verständnis der gezeigten Inhalte führen können (Metag, 2019). Dies wird zusätzlich verstärkt, wenn Elemente der Immersion und der Interaktivität enthalten sind (Hruby et al., 2019). VR ist bereits (experimentell) in vielen Bereichen des Bildungswesens vertreten (siehe Kapitel 3.4). So gibt es beispielsweise mehrere Studien, welche die Wirksamkeit von VR im Schulunterricht belegen (Santos Garduño et al., 2021) sowie Vorschläge zur besseren Implementierung geben (Rienow et al., 2020). Das Alleinstellungsmerkmal der Immersion gegenüber anderen Methoden der visuellen Wissenschaftskommunikation (Cummings & Bailenson, 2016) prädestiniert den Einsatz von VR für Themen, die in besonderem Ausmaß davon profitieren. Dazu gehören Darstellungen von Orten, Zeiten oder Zuständen, die nicht mehr existieren (Kersten et al., 2018c).

Dieses Kapitel geht auf die Hintergründe der (historischen) Wissenschaftskommunikation ein und erläutert die zugehörigen Konzepte 'Virtuelles Museum' und 'Serious Games'. Ein besonderer Fokus wird dabei auf Beispiele aus den Geoinformationswissenschaften bzw. unter Verwendung von Geodaten sowie auf (immersive) Visualisierungen kulturell bedeutender Stätten ('Cultural Heritage Objects') gelegt.

4.1 Virtuelle Museen

Aufgaben eines Museums

Museen stellen eine Form der Wissenschaftskommunikation dar. Sie dienen nicht nur zur Archivierung, also der Sammlung und Aufbewahrung von natur- oder kulturhistorischen Exponaten, sondern auch zur Ausstellung und Aufbereitung in einer Weise, die auch fachfremden

Personen das Verständnis des gezeigten Inhalts erlaubt. Idealerweise sollten Museen auch das Interesse des Publikums an den präsentierten Themen vertiefen und zum Nachdenken anregen. Im Einklang mit ihrem Bildungsauftrag müssen Museen komplexe Themen kontinuierlich auf informative und unterhaltsame Weise präsentieren und neu aufbereiten, um so einen breiten Zielgruppenzugang zu gewährleisten (Kersten et al., 2018c). Dem Museumspublikum wird also eine aktive Rolle beim Museumsbesuch zugeordnet. Diese Rolle wird stark von vorhandener Vorerfahrung oder persönlichem Interesse an der gezeigten Thematik beeinflusst (Reussner, 2007). Der Deutsche Museumsbund fasst die fünf spezifischen Kernaufgaben mit Sammeln, Bewahren, Erforschen, Ausstellen und Vermitteln zusammen (Walz, 2016).

Definitionen

Mit zunehmender Verbreitung der Informationstechnologie und den daraus erwachsenden Möglichkeiten wurde in den 1990er Jahren die Grenze des traditionellen Museumskonzepts erweitert und es hat sich eine digitale Museumsform etabliert, die 'Digitales Museum' oder 'Virtuelles Museum' (VM) genannt wird (Schweibenz, 2001). Dabei ist die Definition eines VMs flexibel und entwickelt sich kontinuierlich im Einklang mit den Fortschritten in der Informations- und Kommunikationstechnologie. Kerncharakteristika der meisten VMs sind die digitale Präsentationsplattform, die Verwendung entweder als Ersatz oder als Erweiterung des traditionellen Museumserlebnisses sowie ein gewisses Maß an Interaktion (Jones & Christal, 2002; Kersten et al., 2018c; Pujol & Lorente, 2014). Polycarpou (2018) fügt hinzu, dass die Zusammenführung von sonst unzugänglichen Inhalten (z. B. Aufgrund Zerstörung, Lagerung oder Verbleib in privaten Sammlungen) und die virtuelle Kombination von örtlich weit entfernten oder unzugänglichen Objekten ein Alleinstellungsmerkmal von VMs sein können.

Entwicklung

VMs haben somit eine große Vielfalt an Erscheinungsformen, angefangen bei simplen Internetauftritten über virtuelle Panorama-Touren und interaktive Smartphone-Anwendungen bis hin zu eigenständigen, komplexen Programmen unter Ausnutzung von VR und AR (Kersten et al., 2018c). Letztere haben seit 2016 zwar einen großen Zuwachs und Zuspruch erlebt, dennoch sind sich Museumsbetreibende den Herausforderungen bei der Entwicklung von VR-Anwendungen für den Einsatz als VM bewusst und nennen unter anderem Entwicklungs- und Betriebskosten und Motion Sickness als aktuelle Probleme (J. Richardson, 2023). Wolf et al. (2018) haben in einer Studie gezeigt, dass Nutzende von VR-VMs zwar gegenüber realen Museen die geringe Authentizität und geringeres Präsenzgefühl bemängeln, jedoch sehr positiv auf Interaktionsmöglichkeiten, die Nutzung zusätzlicher Präsentationsmedien und spielerische Ansätze reagieren.

Letztlich können alle Anwendungen, die sich mit der Rekonstruktion und Visualisierung historischer Orte beschäftigen, durch Anreicherung mit Interaktivität und Information zu VMs aufgewertet werden. Bereits die Visualisierung an sich kann als Teil eines VMs gelten, wenn sie in Bild- oder Videoformat als zusätzliches digitales Exponat verfügbar gemacht wird. Je nach Quantität und Qualität der Interaktionsmöglichkeiten kann das Selbstverständnis eines solchen VMs von reiner Betrachtung des digitalen Exponats über die Verwendung als bebilderte Datenbank bis hin zu Anreicherung mit Spielelementen reichen. Aufgrund fehlender eindeutiger Definitionen verlaufen die Grenzen fließend. Sobald diese Spielelemente jedoch deutlich in den Vordergrund treten, spricht man auch von 'Serious Games', die im folgenden Kapitel behandelt werden.

4.2 Gamification & Serious Games

Gamification bezeichnet den Einsatz von Spiele-Mechanismen in nicht spielebezogenen Kontexten. Das Ziel ist ein erleichtertes Verständnis der dargestellten Inhalte durch eine erhöhte Motivation, sich diese Inhalte anzueignen (Deterding et al., 2013). Nach Stieglitz (2017) wirken diese Mechanismen, weil sie bei den Nutzenden einige Bedürfnisse und Begehrlichkeiten grundsätzlicher Natur ansprechen. Diese können intrinsisch sein, wie beispielsweise das Meistern von Herausforderungen oder die Perfektionierung von erworbenen Fähigkeiten (Wiegand & Stieglitz, 2014) oder aber extrinsisch durch soziale Anerkennung bei der erfolgreichen Erledigung einer Aufgabe, das Siegen in Wettbewerben oder Belohnungen (Dale, 2014). In Anwendungen wird das oftmals durch das Bereitstellen von Ranglisten, das Erhalten von Auszeichnungen beim Erreichen bestimmter Meilensteine, durch das Durchlaufen verschiedener Level, Storytelling-Ansätze oder durch ein Punktesystem umgesetzt (Hamari et al., 2014).

Studien belegen die vielfach positiven Auswirkungen von Gamification-Elementen auf das gewünschte Verhalten der Nutzenden, was sich auch in einem starken Einsatz des Prinzips für Werbemaßnahmen von Unternehmen äußert (Hamari et al., 2014). Aber auch unternehmensintern werden Gamification-Ansätze erfolgreich zur Weiterbildung von Mitarbeitern in Softwareanwendungen oder zur Ausnutzung von Lern- und Übungseffekten bei spielerischen Simulationen eingesetzt (Stieglitz, 2017). Der Übergang zu sogenannten 'Serious Games' ('Ernsthafte Spiele') ist dabei fließend. Serious Games stellen den Spielecharakter stärker in den Vordergrund. Im Prinzip handelt es sich dabei um Spiele im herkömmlichen Sinne, jedoch mit einem starken Fokus auf ein bestimmtes Bildungsziel. Neben der reinen Unterhaltung besitzt also das Verständnis der zugrundeliegenden Thematik eine hohe Priorität (Mortara et al., 2014). Insbesondere für das Bildungswesen haben Hamari et al. (2014) in ihrem Literatur-Review positive Ergebnisse in Studien gefunden und unterstreichen die erhöhte Motivation, sich dem Lernprozess hinzugeben. Sie betonen aber auch die Abhängigkeit des Erfolgs davon, dass die spielerischen Aufgaben tatsächlich lösbar und nicht zu schwer sein dürfen. Es muss also eine Anpassung an das beabsichtigte Zielpublikum erfolgen, beispielsweise durch die Unterscheidung, ob sich das Spiel an Kinder, Jugendliche oder Erwachsene richtet. Die Wissensaufnahme ist dabei nach Kerres et al. (2009) am erfolgreichsten, wenn das Spiel nicht in einen Spiel- und einen Lernmodus getrennt ist, sondern der Lernmodus didaktisch-immersiv, also möglichst nahtlos ins Spiel eingebettet ist. Auch für die Durchführung von Studien werden Gamification-Elemente empfohlen (De Leeuw et al., 2020).

Unter dem Aspekt der Wissenschaftskommunikation bieten sich Spiele in besonderer Weise an, um der breiten Bevölkerung einen Zugang zu aktueller Forschung zu bieten und den Menschen die Relevanz dieser Forschung für die Gesellschaft näherzubringen (Illingworth, 2020). Analoge Spiele bieten den Vorteil, dass sie zumeist für mehrere Spielende konzipiert sind und somit bereits im Spieleprozess eine Diskussion über die Inhalte ermöglichen. Illingworth & Wake (2019) haben beispielsweise eine Erweiterung für das Familienspiel 'Die Siedler von Catan' vorgestellt, die sich mit der Gefahr und den Auswirkungen der globalen Erwärmung auseinandersetzt. Die meisten Spiele mit Serious Games-Ansätzen finden sich allerdings im digitalen Raum. Die Stiftung Digitale Spielekultur (2020) beschreibt mehrere Leitlinien zur Konzeption, Aufbau und Zielpublikum und stellt einige Beispielanwendungen aus der Erinnerungskultur, insbesondere aus der NS-Zeit, vor. Mortara et al. (2014) betonen die besondere Eignung von Serious Games für die Kommunikation von Inhalten aus dem Bereich Cultural Heritage (Kulturerbe) und stellen nach Analyse einiger Beispiele heraus, dass historische Ereignisse, unterschiedliche (für die Nutzenden fremde)

Kulturen und (historische) Architektur Thematiken sind, die von dieser Art der Wissenschaftskommunikation in herausragendem Maße profitieren.

4.3 Geoinformationswissenschaften in der 3D-Visualisierung und VR

Digitalisierungsverfahren

Die Methoden der Geoinformationswissenschaften sind eng mit den Forschungs- und Anwendungsbereichen der 3D-Visualisierung und VR verknüpft. Dies beginnt bei den Verfahren zur Digitalisierung. Bereits seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts werden Photographie und Photogrammetrie zur Dokumentation von Bauwerken eingesetzt (Meydenbauer, 1867). Die Photogrammetrie basiert auf der Anfertigung von Bildern eines Objekts aus vielen verschiedenen Blickwinkeln. Aus gemeinsamen Bildpunkten lässt sich die räumliche Lage der Bilder untereinander und zum Objekt ableiten. Das Ziel ist die möglichst exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objekts (Luhmann, 2010). Eine weitere Methode ist das Laserscanning. Dabei tastet ein Sensor (Laserscanner) seine Umgebung systematisch ab und erfasst somit die Geometrie der Umgebung relativ zur Position des Scanners. Durch Verknüpfung mehrere Scanning-Standorte lässt sich somit ebenfalls eine dreidimensionale Rekonstruktion ableiten (Vosselman & Maas, 2010).

Diese Aufnahmeverfahren werden seit vielen Jahrzehnten (Airborne Laserscanning seit den frühen 1990ern, terrestrisches Laserscanning seit den frühen 2000ern) zur Aufnahme von Objekten im industriellen Kontext eingesetzt (Sternberg et al., 2004). Daneben eignen sich die auf diese Weise gewonnenen 3D-Daten aber auch als Quelle für digitale Visualisierungen aller Art. So wird insbesondere die Photogrammetrie immer beliebter, um hochdetaillierte und sehr realitätsnahe digitale Objekte für den Einsatz in verschiedenen (Unterhaltungs-)Medien zu erstellen, beispielsweise für die Szenengestaltung in der Spieleindustrie oder in Filmproduktionen (Statham, 2020). Diese Methoden sind aber erst möglich, seitdem die Prozessorleistung ausreichend ist, diese Datenmenge in akzeptabler Zeit zu bearbeiten. Die klassische Alternative besteht aus der manuellen Modellierung der Gebäude/Objekte auf Basis von Fotos, Zeichnungen oder Karten. Diese Herangehensweise ist auch immer dann nötig, wenn die zu modellierenden Objekte nicht mehr existieren oder nicht mit vertretbarem Aufwand für eine Aufnahme zu erreichen sind (Kersten et al., 2018b; Medyńska-Gulij & Zagata, 2020). Eine Hybridlösung aus beiden Verfahren ist zudem erforderlich, wenn zwar der hohe Detailgrad einer Aufnahme aus Photogrammetrie oder Laserscanning gewünscht wird, die Objekte jedoch aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen der Zielplattformen nachbearbeitet werden müssen. Das ist beispielsweise bei Echtzeit-kritischen Anwendungen der Fall, da hier ggf. die Datenmenge möglichst ohne deutlich sichtbare Einschränkungen der visuellen Qualität reduziert werden muss (Obradović et al., 2020).

Cultural Heritage

Eine bedeutende Rolle spielen diese geodätischen Aufnahmeverfahren bei der Dokumentation und Restauration von historischen, kulturell bedeutsamen Objekten, Gebäuden, Monumenten oder ganzen Stadtteilen (sogenannte 'Cultural Heritage Objects', CHO). Neben weiteren Formen des materiellen und immateriellen Kulturerbes stehen CHOs aus dem Bereich 'Historische Bauwerke' weithin sichtbar als Zeugen einer vergangenen oder gefährdeten (Bau-)Kultur oder eines künstlerischen und architektonischen Zeitgeists und werden als besonders identitätsstiftend und erhaltenswürdig angesehen (Mortara et al., 2014; Sesana et al., 2021). Aufgrund ihres Alters,

ihrer Bauweise oder ihrer Bedeutung sind CHOs heutzutage vielfältigen Gefahren ausgesetzt. Neben fortschreitender Instabilität, Anfälligkeit für Brände oder mangelhaften Reparatur- oder Umbaumaßnahmen in der Vergangenheit (Soto-Martin et al., 2020) stellen auch Verwitterungserscheinungen, insbesondere durch erhöhte Luftverschmutzung und den fortschreitenden Klimawandel, eine Gefahr dar (Kersten et al., 2009; Sesana et al., 2021; Varotsos et al., 2009). Hinzu kommen mutwillige Zerstörungen, die von Vandalismus bis zur Zerstörung in Kriegs- und Krisengebieten reichen, sei es durch gezielte Zerstörung des CHOs aufgrund dessen Symbolik oder als Kollateralschaden. (Digitale) Rekonstruktionen oder Restaurationen als Folge solcher Beschädigungen wurden beispielsweise von Bitelli et al. (2017) für einen im Zweiten Weltkrieg zerstörten Turm bei Ravenna (Italien), von Grün et al. (2002) für eine Buddha-Statue in Bamiyan (Afghanistan), von Fangi & Wahbeh (2013) für die Umayyad Moschee in Aleppo (Syrien) oder von Wahbeh et al. (2016) für den Bel Temple in Palmyra (Syrien) durchgeführt. Dieses Vorgehen der digitalen Konservierung und dessen Ermöglichung durch die Technologien der Geoinformationswissenschaften werden als ein essentieller Bestandteil der Bewahrung des Kulturerbes angesehen (Bekele et al., 2018).

Es gibt viele Beispiele für derartige 3D-Rekonstruktionen, die aufgrund ihrer kombinierten Funktion aus Dokumentation und digitaler Wissenschaftskommunikation auch als 'Virtual Heritage' bezeichnet werden (Champion, 2021). So wurden die İnceğiz-Höhlen bei Istanbul (Büyüksalih et al., 2020), Magma-Landschaften in Island (Pasquaré Mariotto & Bonali, 2021) oder die im 17. Jahrhundert zerstörte Siegesburg in Bad Segeberg (Deggim et al., 2017a) virtuell dokumentiert oder rekonstruiert und per Video oder Renderings der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Auch in einem GIS (Geographisches Informationssystem) hinterlegte (2D-)Datensätze lassen sich als Grundlage verwenden: Arnold & Lafreniere (2018) benutzten die City Engine von Esri – ein 3D-Modellierungsprogramm zur prozeduralen Generierung urbaner Landschaften – zur automatisierten Rekonstruktion einer postindustriellen Minenregion in Michigan (USA) basierend auf einem historisch gewachsenem GIS-Datensatz, in dem die Grundflächen der historischen Gebäude zu früheren Zeitpunkten und andere Parameter zu deren Beschaffenheit hinterlegt sind. Aus den gewonnenen 3D-Daten lassen sich außerdem wiederum physische Modelle zur Veranschaulichung erzeugen, etwa mithilfe des 3D-Drucks (Ballarin et al., 2018). Champion (2021) und Basheer et al. (2023) listen weitere aktuelle Beispiele der Geodatensvisualisierung auf, insbesondere im Kulturerbe-Bereich, und unterstreichen die Wichtigkeit der öffentlichen Verfügbarkeit und das Potential für den Tourismus. Neben der Kommunikation für ein externes Publikum bieten solche Visualisierungen auch neue Ansätze für Forschende der Geschichte und Archäologie, ihre Hypothesen zu verifizieren, da die Betrachtung im dreidimensionalen Raum Einsichten bietet, die mit 2D-Daten nicht möglich sind (Deggim et al., 2017c; Lulof et al., 2013).

Geodaten für VR

Aus der Kombination aus 3D-Geodatensvisualisierung, der Wissenschaftskommunikation (nicht nur im Kontext von CHOs) und dem Trend zu virtuellen Museen unter Ausnutzung neuer Technologien ergibt sich als sinnvoller nächster Schritt die Implementierung dieser 3D-Daten in den virtuellen, immersiven Raum in Form von VR oder AR. Die Sammlung solcher (georeferenzierten) Informationen im Rahmen einer 'Digitalen Erde' für Forschung und Bildung wurde mehrfach als Konzept vorgeschlagen und überarbeitet (Hruby et al., 2019). Besondere Bekanntheit erlangte 1998 die Rede des damaligen Vizepräsidenten der USA, Al Gore, zu diesem Konzept (Gore, 1998). Als erste und weithin bekannteste Anwendung, die dieses Konzept umzusetzen versucht, kann Google Earth gelten. Das Programm basiert auf Fernerkundungsdaten und bildet den gesamten Globus sowohl als Bildschirmversion und inzwischen auch in VR ab (Grossner et al., 2008). Inzwischen hat sich eine Vielzahl an spezialisierten aber auch interdisziplinären Anwendungen

herausgebildet, in denen Geodaten aller Art die Grundlage für VR-Programme mit den unterschiedlichsten Zielsetzungen bilden. Einsatzmöglichkeiten in der allgemeinen Stadtplanung wurden bereits in Kapitel 3.4 angerissen und behandeln vor allem Smart-City-Konzepte (Buyukdemircioglu & Kocaman, 2022; Jamei et al., 2017), beschäftigen sich mit Planungskommunikation und Beteiligungsverfahren (Keil et al., 2023; Postert et al., 2022) oder stellen allgemeine Arbeitsabläufe zur Digitalisierung und (VR-)Visualisierung der urbanen Umwelt vor (Keil et al., 2021b; Schmohl et al., 2020). Für die Darstellung hydrographischer Messdaten haben Lütjens et al. (2019) eine VR-Anwendung über das Arctic Clyde Inlet vorgestellt mit Fokus auf die Visualisierung großer Datenmengen. Auch für das Management der Wälder und die Kommunikation über ihren Zustand, ihre Gefährdung und ihre Bedeutung als Lebensraum existieren VR-Anwendungen, so zum Beispiel auf Basis amtlicher, offener Geodaten (Edler, 2022) und zur Kommunikation notwendiger Maßnahmen zur Erhaltung (Boissonneault et al., 2019). Auch der Prozess der Datengewinnung selbst kann Gegenstand von (VR-) Bildungsanwendungen sein, beispielsweise die Simulation eines Terrestrischen Laserscanners (Chizhova et al., 2020) oder von hydrographischen Messungen (Deggim & Kersten, 2023). Innerhalb des Erstellungsprozesses können Multiplayer-VR-Anwendungen zur besseren Kommunikation bei mehreren Beteiligten und zur Fehleridentifikation beitragen (Kersten et al., 2017a).

Schließlich sind einige Anwendungen für den eingangs erwähnten Schritt zu VR für die auf Geodaten basierte Visualisierung von Landschaften, CHOs, historischen Gebäuden oder Städten zu nennen: Duisburg im Jahre 1566 (Tschirschwitz et al., 2019), Santorini (Griechenland), isländische Vulkanlandschaften oder der Ätna (Italien) (Bonali et al., 2021), die Zeche Holland in Bochum (Edler et al., 2019), die St. Augustinen-Kirche in La Laguna, Teneriffa (Soto-Martin et al., 2020), das Segelschiff 'Peking' (Trau et al., 2019), das Alt-Segeberger Bürgerhaus in Bad Segeberg (Kersten et al., 2018a) sowie die historische Stadt selbst (Deggim et al., 2017b), das Fort Al Zubarah in Katar (Kersten et al., 2021), Stade im Zustand von 1620 (Walmsley & Kersten, 2019), das historische Lawang Sewu-Gebäude in Semarang, Indonesien (Fanani & Syarif, 2023), eine über 2700 Jahre alte Stätte in Yeha, Äthiopien (Walmsley et al., 2023) oder die serbisch-orthodoxe Kathedrale in Sremski Karlovci, Serbien (Obradović et al., 2020). Bekele et al. (2018) bieten ein umfassendes Literatur-Review vieler weiterer bis dahin veröffentlichter VR-Anwendungen im Bereich CHOs.

Diese Beispiele verdeutlichen die Allgegenwärtigkeit von Geodaten in Anwendungen zu Forschung und Bildung und ihre Nutzbarmachung für die (Wissenschafts-)Kommunikation.

Limitationen und Potential

Geodaten können sehr umfangreich sein. Punktwolken, die auf Basis der oben genannten Aufnahmeverfahren entstehen, können je nach Größe des vermessenen Objekts und Einstellungen zur Auflösung während der Messung und der Prozessierung dutzende bis hunderte Millionen Datenpunkte enthalten. Diese hohe Auflösung ist für die Weiterverarbeitung ein zweischneidiges Schwert. Auf die Notwendigkeit zur Datenreduzierung für Echtzeit-Anwendungen wurde weiter oben im Kapitel schon kurz eingegangen. Detaillierte Untersuchungen der negativen Auswirkungen immer größer werdender Datenmengen auf die Echtzeit-Visualisierung insbesondere für VR-Anwendungen wurden u.a von Kersten et al. (2021) durchgeführt. Als Konsequenz erfordern diese Daten – je nach gewünschtem Anwendungszweck – eine teilweise umfangreiche Nachbearbeitung. Anbieter von Prozessierungssoftware haben bereits Möglichkeiten zur automatisierten Reduzierung von Punktwolken oder vermaschten Modellen implementiert. Dessen Effizienz ist allerdings immer abhängig davon, wie gut der Algorithmus Datenreduzierung und Geometrietreue im Sinne der Anwendenden gegeneinander abwägen kann. Zusätzlich stellt sich die Kosten-Nutzen-Frage zwischen dem Aufwand, der für eine

umfangreiche Nachbearbeitung aufgewandt werden muss und dem Aufwand, der für eine manuelle Neumodellierung mit derselben visuellen Qualität und demselben Datenvolumen geleistet werden müsste. Dafür gibt es keine pauschale Herangehensweise. Der Ansatz ist immer vom individuellen Fall abhängig, beispielsweise ob ein bestimmtes einzelnes Gebäude im Fokus steht und dessen architektonische Details für die Anwendung relevant sind oder aber ob ein ganzes 3D-Stadtmodell für den visuellen Kontext oder dessen hinterlegte Informationen für Analysen benötigt werden.

Gleichzeitig ergeben sich aus dieser umfangreichen Datengrundlage vielfältige Möglichkeiten zur Nutzung. Dies gilt insbesondere, wenn die Fähigkeit zur Echtzeitvisualisierung der Daten keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt. Hinzu kommt die inzwischen offene Verfügbarkeit vieler Geodaten in einigen Bundesländern. In Hamburg sorgt dafür seit 2012 das Transparenzgesetz und der sukzessive Aufbau eines Transparenzportals mit frei verfügbaren, amtlichen Geodaten (Murjahn & Tegtmeyer, 2016). Teilweise sind zwar noch proprietäre Datenformate eine Limitation, es lässt sich aber ein Trend zu offenen Standards und Open Source-Software zur Datenverarbeitung und zum vereinfachten, freien Datenaustausch erkennen (Schiewe, 2022a).

Ob mit oder ohne Geodaten – Wissenschaftskommunikation erfordert eine starke Nutzerzentrierung. Nur wenn die Nutzenden die Art der Wissenschaftskommunikation verstehen und annehmen, können die Inhalte transportiert werden. Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit wurde ein starker Fokus auf die Erlangung von Erkenntnissen zur Orientierung und Nutzersteuerung gelegt, um Wissenschaftskommunikation für VMs zu verbessern. Das folgende Kapitel stellt Hintergründe zu diesem Themenbereich vor.

5 Hintergründe zur Orientierung und Nutzersteuerung

5.1 Kartographie & Raumkognition

Kartographie

Die Frage nach dem 'Wo?' ist alt und wird schon seit vielen Jahrtausenden mit Karten oder kartenähnlichen Darstellungen gelöst. Aus dem alten Ägypten wird ein ausgeprägtes Katasterwesen berichtet, aus der französischen Jungsteinzeit sind Darstellungen von Feldeinteilungen überliefert und insbesondere die Griechen taten sich im Zusammenspiel mit astronomischen Beobachtungen sehr in der Herstellung von Navigationshilfen für die Seeschifffahrt hervor und befassten sich auch mit der Bestimmung der Gestalt der Erde. Die Kartographie des Mittelalters wurde vor allem durch kirchliche Darstellungen – angefertigt in Klöstern (daher auch 'Mönchs-' oder 'Klosterkarten' genannt) – geprägt. Dabei ging es weniger um eine geographisch korrekte Darstellung des Erdabbilds, sondern um die Verbreitung des Weltbildes der Ersteller. Das bekannteste Beispiel dieser Epoche ist die Ebstorfer Weltkarte (ca. 1300), auf der Europa, Nordafrika und Teile Asiens abgebildet sind. In der Neuzeit wurde wieder eine Wendung hin zur realitätsgetreuen Darstellung vollzogen, soweit es die Geodäsie der jeweiligen Epoche zuließ. Fortschritte in der Erfassung und Abbildung sowie Druckverfahren, die das aufwendige Kopieren per Hand ersetzten, trugen ihren Teil zu präziseren Kartendarstellungen sowie zur immer stärkeren Verbreitung und Verfügbarkeit bei (Grosjean & Egli, 1996; Schiewe, 2022b).

Als einer der ersten und bekanntesten Anwendungsfälle für räumliche Analysen gilt die Cholera-Karte von John Snow aus dem Jahr 1854, auf der er aus der räumlichen Verteilung von Todesfällen Rückschlüsse auf einen Brunnen als Ursprungsort schließen konnte (Scharlach & Crom, 2013). Karten wurden seitdem immer mehr Teil des Alltags und wurden grundsätzlich zur Wegfindung, aber auch zunehmend für konkrete Fragestellungen in Form thematischer Karten eingesetzt. Zwar kann man noch klassische Faltkarten kaufen, aber im Alltag lassen sich inzwischen vor allem digitale Hilfsmittel beobachten: Google Maps zeigt uns den Weg und wann wir welche Straße nehmen müssen, Apps von Verkehrsunternehmen sagen uns genau, wann wir wo ein-, aus- und umsteigen müssen, Navigationssysteme fürs Auto geben uns vor, welche Straße wir benutzen und wann wir abzubiegen haben. Diese Hilfsmittel sind inzwischen dynamisch: statt einfach nur einen digitalen, statischen Stadtplan bereitzustellen, werden wir in Echtzeit um gerade entstandene Staus herumgeleitet, weichen Baustellen aus oder bekommen Alternativverbindungen, wenn der geplante Zug Verspätung hat oder ausfällt.

Die Kartographie hat mit der Digitalisierung einen starken Wandel erlebt. Auch aktuelle Entwicklungen in der Datenverarbeitung und insbesondere der Automatisierung führten bis zur (rhetorischen) Frage, ob klassischen Karten und Kartographie in Zukunft überhaupt noch gebraucht werden. Letztlich bedeutet der Umschwung vor allem eine Anpassung und Verschiebung des Aufgabenbereichs für Kartograph:innen und der Art, wie räumliche Informationen dargestellt und konsumiert werden (Schiewe, 2023).

Raumkognition

Daraus ergibt sich die Frage, wie wir uns in der heutigen Welt eigentlich orientieren. Die Leistung des Gehirns, den Raum als solchen wahrzunehmen, die eigene Position darin zu bestimmen und Aufgaben wie das Finden eines Zieles zu meistern, wird als Raumkognition bezeichnet. Nach Mallot (2012) lassen sich die Leistungen des Gehirns für die Wegfindung in drei Kategorien

einteilen: Von grundlegender Natur zur Wegfindung ist der 'optische Fluss', der ganz ohne Gedächtnisleistung auskommt und nur auf den optischen Input bzw. den Bewegungen am rechten und linken Bildrand basiert. Die Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen optischen Flusses im Blickfeld erlaubt es einem, Hindernissen auszuweichen oder in der Mitte einer Straße zu bleiben, ohne eine mentale Repräsentation der Umgebung erstellen zu müssen. Für die zweite Kategorie kommt das Kurzzeitgedächtnis ins Spiel. Besondere Wichtigkeit wird hierbei der Leistung der Positionsfortschreibung zugeschrieben. Die Positionsinformationen der Objekte in der Umgebung werden vom räumlichen Arbeitsgedächtnis laufend aktualisiert und somit die eigene Position relativ zu diesen Objekten bestimmt. Schließlich wird für die Abspeicherung des anzupeilenden Zieles das Langzeitgedächtnis benötigt. Je nach Komplexität des Weges kann auch eine Unterteilung in Zwischenziele erfolgen und es können zusätzlich Landmarken im Langzeitgedächtnis abgespeichert werden. Die Route zum Ziel ist somit eine Aneinanderreihung von Landmarken und/oder Zwischenzielen. Lokka & Çöltekin (2019) fügen hinzu, dass diese Fähigkeiten stark von der Aufmerksamkeit abhängen, die man der Umgebung widmet. So sind die beiden Fragen entscheidend, welche Informationen überhaupt wahrgenommen werden und welche dieser Informationen anschließend im Gedächtnis gespeichert werden.

Wie diese Prozesse auf neuronaler Ebene ablaufen, ist aktueller Forschungsgegenstand der Neurowissenschaften (Taube et al., 2013). Die Entdeckung sogenannter Ortszellen im Hippocampus zeigte, dass es ein Äquivalent zu Navigationssystemen im Gehirn gibt, das uns zur Erstellung mentaler Karten befähigt (O'Keefe & Dostrovsky, 1971). Mit der Zeit wurden weitere Zellen entdeckt, die scheinbar eng mit unserer Navigation verknüpft sind und bei räumlichen Entscheidungen mit den Ortszellen kommunizieren. Sie wurden nach ihrer vermuteten Funktion benannt, so gibt es etwa Gitterzellen, Randzellen und Richtungszellen. Gemeinsam sorgen sie für unsere Fähigkeit, aus vielschichtigen Erinnerungen – u.a. an Orte, Richtungen, Distanzen und damit verknüpfte Erlebnisse – eine kognitive Karte zu erstellen und uns anhand dieser zu orientieren. Das genaue Zusammenspiel dieser Zellen ist noch nicht verstanden und bleibt weiterhin Gegenstand der Forschung. Es werden außerdem weitere beteiligte Zellen mit spezialisierten Funktionen vermutet (Moser & Moser, 2014).

Experimentell lässt sich dennoch das Verhalten von Menschen in räumlichen Fragestellungen erforschen. So wurde in vielen Studien nachgewiesen, dass die Wahrnehmung des eigenen Körpers (Propriozeption) und seiner Lage im Raum über das Gleichgewichtssystem (Vestibularapparat) eine entscheidende Rolle bei der Erstellung einer kognitiven Karte und der Wegfindung spielt. Der propriozeptive Input wird somit parallel bzw. in enger Verknüpfung zum visuellen Input abgespeichert und verarbeitet (Dong et al., 2022; Grant & Magee, 1998; Keil et al., 2021a; Taube et al., 2013; Waller et al., 2004). Die Betrachtung einer Umgebung von einem festen Standpunkt führt zudem häufig zu einer verzerrten Wahrnehmung der Umgebung, stattdessen ist die Betrachtung aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Perspektiven (und die Bewegung zwischen diesen Standpunkten) sehr wichtig zur Erstellung einer korrekten mentalen Karte (Ishikawa & Montello, 2006). Im Zusammenspiel mit der Kartografie gibt es einige Studien, die sich mit der mitunter starken Wirkung von Kartentypen, Symbolen, Farben, Gitterlinien, Annotationen und sonstigen Kartenelementen auf die Interpretation des dargestellten Gebiets auseinandersetzen (Bestgen et al., 2017; Korte et al., 2023; Schiewe, 2019). Daneben haben auch Unsicherheiten oder Fehler in der Darstellung von Orientierungspunkten wie Landmarken einen starken Einfluss auf die Fähigkeit, dennoch die wahrgenommene reale Umgebung und dessen Abstraktion auf einer Karte in Einklang zu bringen zu können (Keil et al., 2022). Ein Überangebot an Informationen kann allerdings zu einer kognitiven Überlastung führen und unsere

Informationsaufnahme von Karten ebenfalls negativ beeinträchtigen (Harrower, 2007; Liao et al., 2019).

5.2 Orientierung in Bildschirmanwendungen

Karten auf Bildschirmen

Bei der Darstellung räumlicher Informationen in digitaler Form auf einem 2D-Bildschirm ist zunächst zu bestimmen, ob es sich dabei um eine Digitalisierung der analogen Kartenform handelt und der Nutzungszweck generell derselbe ist, also beispielsweise die Lokalisierung eines Ortes oder des eigenen Standpunktes in der realen Welt sowie das Finden eines Weges zu diesem Ort. Bei der Benutzung muss also eine Transferleistung von den in abstrakter Form präsentierten Karteninformationen zur korrekten Einschätzung von Richtungen und Entfernungen in der realen Welt stattfinden. Interaktive Elemente wie Zoomen, Perspektivwechsel, das Auswählen und Anzeigenlassen hinterlegter Informationen oder die Visualisierung von Routen unterstützen oder erweitern dabei die klassische Kartenfunktionalität. GoogleMaps und –Earth oder OpenStreetMap sind beliebte Beispiele für solche digitalen Abbildungen der realen Welt, die auf PC- oder Smartphone-Bildschirmen Anwendung finden. Neben dem direkten Aufruf dieser Kartendienste sind deren Funktionen auch oft in andere Websites eingebunden, beispielsweise wenn es um die Lokalisierung von und Anfahrtsbeschreibung zu Restaurants, Firmensitzen, Einkaufsmöglichkeiten, Freizeiteinrichtungen, etc. geht.

Desktop Virtual Environments

Demgegenüber stehen Anwendungen, die sich auf virtuelle Umgebungen beziehen (DVEs, 'Desktop Virtual Environment') (Dong et al., 2022). Diese virtuellen Umgebungen können wiederum realen Umgebungen nachempfunden sein, es geht aber vorrangig um die Beantwortung ortsbezogener Fragen innerhalb dieser virtuellen Welt. Die Benutzenden müssen also die erlangten räumlichen Informationen wiederum in abstrahierter Form auf die DVE anwenden und ggf. einen Perspektivwechsel vollziehen, um ausgehend von der eigenen, egozentrischen Repräsentation innerhalb der DVE den richtigen Weg zu finden, während in der Realität mitunter gar keine Bewegung stattfindet. Die Selbst-Repräsentation innerhalb einer DVE wird auch als Avatar bezeichnet und findet am häufigsten und prominentesten in Programmen aus der Videospieleindustrie Anwendung.

Frühe Studien zur vergleichenden Wegfindung zwischen DVEs und der realen Welt legen zunächst nahe, dass die Performance sich nicht stark voneinander unterscheidet, wenngleich in DVEs Desorientierung in Bezug auf die Richtung öfter zu beobachten ist (Conroy, 2001; A. E. Richardson et al., 1999). Kartographie im Zusammenhang mit Videospiele wird und wurde u.a. von Edler et al. (2018), Edler & Dickmann (2016), Horbiński & Zagata (2022), und von Zagata & Medyńska-Gulij (2023) untersucht. Dabei wird zunächst auf die Verwendung von Karten als Orientierungshilfe in Form von Übersichtskarten eingegangen, bei denen die Spielwelt aus einer Top-Down-Perspektive betrachtet wird und entweder die Spiel Landschaft selbst repräsentieren oder die Spielenden in ihrer Wegfindung durch diese Landschaft unterstützen (Edler et al., 2018; Edler & Dickmann, 2016). Als besondere Form der Orientierungshilfe hat sich die sogenannte Mini-Map etabliert. Dabei handelt es sich um einen Kartenausschnitt aus einer Übersichtsperspektive, der am Bildschirmrand eines ansonsten aus der Egoperspektive wahrgenommenen Spiels eingeblendet wird. Diese Mini-Map kommt in den verschiedensten Projektionen, Detailstufen und Variationen vor (Horbiński & Zagata, 2022). Nach Zagata & Medyńska-Gulij (2023) hat die populärste Variante

die Eigenschaften, in ihrem Ausschnitt immer auf den Spielenden zentriert zu sein, in ihrer Orientierung der Blickrichtung des Spielenden in der virtuellen Umgebung zu folgen und einen Nordpfeil zu besitzen.

Daneben gibt es aber auch viele Spiele, die durch andere Mechanismen die Spielenden zum gewünschten Ziel führen wollen. Die direkteste Lösung des Problems ist seine Vermeidung. Lineares Design von Spielwelten ('Schlauchlevel') geben den Spielenden gar nicht erst die Möglichkeit, in eine (falsche) Richtung abzubiegen und vermeiden somit von vornherein Desorientierung bzw. erschaffen eine Umgebung, in der die Erstellung einer kognitiven Karte zum Erreichen des Zieles nachrangig ist. Durch geschicktes Design der Umgebung und/oder nacheinander freischaltbare Bereiche lässt sich somit dennoch die Illusion einer frei erkundbaren virtuellen Welt erschaffen. Orientierungshilfen wie die oben erwähnte Mini-Map werden dann relevant, wenn die zu erkundende virtuelle Welt tatsächlich frei begehbar ist. In Videospiele ist ein Trend zu solchen Spielwelten zu beobachten ('Open-World') und auch bei der Nachbildung der Realität in virtuellen Welten für andere Anwendungen in VR, VMs, Planungsbeispielen, etc. (siehe Kapitel 4) muss den realen, offenen Umgebungen Rechnung getragen werden. Es gibt daher mehrere Ansätze, wie zusätzlich zu Übersichtskarten innerhalb der virtuellen Welt das Ziel deutlich gemacht werden kann. Dazu gehören Markierungen, welche das Ziel in der virtuellen Welt deutlich kennzeichnen und somit selbst eine Landmarke bilden, beispielsweise indem sie gut sichtbar über dem Zielort schweben, zusätzlich in der Mini-Map als Hinweis auftauchen oder sonst wie einen (audio-)visuellen Hinweis auf die Verortung des Ziels und die einzuschlagende Richtung aus der Perspektive des eigenen Standpunktes bieten (Horbiński & Zagata, 2022). Weitere Hilfsmittel können Audio-Hinweise sein, die Unterteilung der Umgebung in Zonen, die Bereitstellung von Koordinaten (Darken & Sibert, 1993) oder – analog zu physischen Bewegungseinschränkung beim Schlauchlevel-Design – die Beschränkung von Interaktionsmöglichkeiten, um Ablenkung zu vermeiden und den Fokus auf das zu erreichende Ziel zu lenken.

5.3 Orientierung in VR

Abgrenzung zu DVEs

VR besitzt sehr spezielle Eigenschaften, welche unterschiedliche Elemente der realen Welt und aus DVEs vereint. Zunächst befindet man sich immer noch in einer virtuellen Welt, nur ist diese nicht mehr auf einen statischen 2D-Bildschirm vor den Nutzenden zu sehen, sondern durch die visuelle Immersion der VR-Technologie (siehe Kapitel 3.3) entsteht der Eindruck, sich durch diese virtuelle Welt wie in der Realität bewegen zu können. Dadurch fallen zunächst einige für DVEs nötige Abstraktionen wieder weg. Anstatt über Eingabegeräte die Blickrichtung zu bestimmen, lässt sie sich durch Drehung des Kopfes anpassen. Außerdem können (bei 6 DoF) durch Strecken, Bücken, etc. – also durch Körperbewegungen, die auch in der Realität möglich sind – unterschiedliche Perspektiven eingenommen werden, ohne den eigenen Standpunkt bedeutend zu ändern. Clemenson et al. (2020) haben gezeigt, dass die Raumwahrnehmung in virtuellen Welten unter diesen Voraussetzungen sehr ähnlich zu realen Umgebungen ist. Propriozeptive und vestibuläre Empfindungen entsprechen also in gewisser Weise der Realität, eine wichtige Voraussetzung zur Orientierung im Raum (Dong et al., 2022; Grant & Magee, 1998; Keil et al., 2021a; Taube et al., 2013; Waller et al., 2004). Doch auch wenn Bewegungen des Körpers wahrgenommen werden, so fehlt bei den meisten VR-Anwendungen bereits die (korrekte) visuelle

Rückmeldung der Lage der Körperteile. Um den Körper des VR-Avatars den realen Bewegungen entsprechend zu animieren, müssen einige der Hauptgelenke und Extremitäten (z. B. Ellenbogen, Knie, Füße, Hüfte) ebenfalls getrackt werden, um deren Position in der virtuellen Welt laufend aktualisieren zu können. Oftmals wird auf die Visualisierung des eigenen Körpers komplett verzichtet, einige Anwendungen experimentierten mit einer approximierten Visualisierung zumindest der Arme und Hände auf Basis der Positionsdaten der Handcontroller und lediglich bei speziellen Anwendungen wie beispielsweise der medizinischen Therapie werden tatsächlich gesonderte Trackingelemente am Körper der Nutzenden befestigt, um diesen realitätsgetreu zu visualisieren (Sveistrup, 2004).

Kontinuierliche und sprunghafte Fortbewegung

Eine weitere große Herausforderung für die Orientierung in VR ist die notwendige Abstraktion bei Fortbewegungen über größere Distanzen (mehr als wenige Meter) in der virtuellen Welt. Der Bewegungsradius für VR-Anwendungen ist durch den zur Verfügung stehenden, realen Raum begrenzt und beträgt üblicherweise nicht mehr als ein paar Quadratmeter. Dementsprechend beschränken sich viele Anwendungen in ihren Interaktionen und Fortbewegungsmöglichkeiten auf den real zur Verfügung stehenden Raum ('Room-Scale'). Zwar gibt es Ansätze wie 'Redirected Walking' zur Manipulation der virtuellen Umgebung, um eine rein physische Fortbewegung über größere virtuelle Distanzen zu ermöglichen (Langbehn et al., 2017), dennoch sind selbst bei solchen Lösungen immer noch relativ große Räume notwendig oder aber die Anwendungen erfordern ein spezielles Design der virtuellen Umgebung und sind nicht universell einsetzbar. Sobald also die Fortbewegung abstrahiert werden muss, treten einige Konsequenzen auf. Di Luca et al. (2021) haben eine Vielzahl der bekannten Möglichkeiten der Lokomotion in VR beschrieben. Zur Kategorie der kontinuierlichen, simulierten Fortbewegungen gehören beispielsweise das Fliegen, das simulierte Gehen auf Knopfdruck oder der Aufenthalt in einem virtuellen Gefährt, welches sich selbstständig oder per Input der Nutzenden durch die virtuelle Welt bewegt, ohne dass sich die Nutzenden innerhalb des Gefährts fortbewegen. Diese Methoden ermöglichen den für die Orientierung wichtigen Aspekt der Positionsfortschreibung, da die Objekte um die Betrachtenden herum sich in einem stetigen optischen Fluss befinden und die eigene Lage im Raum relativ zur Umgebung fortlaufend registriert wird (Mallot, 2012). Ein großer Nachteil besteht aber in der Tatsache, dass die Auswirkung dieser visuell wahrgenommenen Bewegungen auf den Gleichgewichtssinn fehlt und somit eine Diskrepanz zwischen Sehen und Fühlen entsteht – ein Auslöser für Motion Sickness. Zur Vermeidung müssen diese Bewegungen also sehr behutsam simuliert werden. Trotz dieses Nachteils ermöglicht diese Methode eine Fortbewegung durch die virtuelle Welt ohne ein aktives Eingreifen der Nutzenden, was wiederum die Nutzersteuerung stark vereinfacht (siehe Kapitel 5.4) und die Notwendigkeit der Orientierung hinfällig macht. Daher wird sie oft für Anwendungen eingesetzt, die sich hauptsächlich an VR-Laien richtet, wie beispielsweise VMs (siehe Kapitel 4.1). Alternativ wird die Gefahr der Motion Sickness in Kauf genommen und Anwendungen auf entsprechend bewegungsintensive, aber eher kurze Erlebnisse optimiert, beispielsweise eine virtuelle Achterbahnfahrt.

Demgegenüber stehen Lösungsansätze, die auf eine kontinuierliche Fortbewegung verzichten und diskrete Sprünge von einer Position in der virtuellen Welt zur anderen erlauben. Diese Methode wird als Teleportation bezeichnet und vermeidet zumindest im Hinblick auf die Fortbewegungsmethode das Motion-Sickness-Problem, da keine physische Bewegung visuell simuliert wird, die nicht von den Nutzenden auch real ausgeführt wird. Der große Nachteil besteht in der nun nicht mehr kontinuierlichen Wahrnehmung der Umgebung (Korkut & Surer, 2022). Bei zunehmender Teleportationsdistanz entsteht ein immer größerer Unterschied in der wahrgenommenen Umwelt zwischen dem Start- und dem Zielpunkt. Der optische Fluss ist

abgerissen. Hinzu kommt ggf. ein für die Teleportation nötiger Fokus auf die Eingabegeräte, sodass der Umgebung weniger Aufmerksamkeit geschenkt wird. Nach erfolgter Teleportation muss also eine bewusste und erneute Orientierung erfolgen und die eigene, neue Lage im Raum in Relation zur Lage vor der Teleportation gesetzt werden.

Aufgrund der Minimierung von Motion Sickness ist diese Fortbewegungsart trotz der Nachteile häufig in VR-Anwendungen anzutreffen. Die einfache Implementierung macht sie außerdem besonders beliebt für Projekte, die nicht von einem erfahrenen Studio entwickelt wurden und dessen Fokus weniger in der Programmierung, als in der einfachen Visualisierung von Forschungsergebnissen liegt, so zum Beispiel in der (historischen) Wissenschaftskommunikation (siehe Projekte in Kapitel 4).

Darüber hinaus ist die VR-Technologie noch nicht weit genug entwickelt, um visuell tatsächlich an die Realität heranzureichen. Die Auflösungen der VR-Displays ermöglichen noch nicht die Informationsdichte, die menschliche Augen beim Betrachten der Realität erreichen und insbesondere das eingeschränkte FoV führt zu einem Scheuklappeneffekt, der die Wahrnehmung der Umgebung erheblich einschränkt und stärkere Kopfdrehungen erfordert, um Objekte seitlich des Blickfelds wahrzunehmen (siehe auch Kapitel 3.3 bzw. Tabelle 2 in Kapitel 7.1). Auch die aktuell in VR-Brillen verbauten Linsen führen zu einer zunehmenden Unschärfe am Rand des Blickfelds. All diese Aspekte erschweren die Orientierung.

Wegfindung

Um die genannten Probleme bei der Orientierung zu vermeiden, können hier, wie auch bei DVEs, Maßnahmen ergriffen werden, um die Erstellung einer Kognitiven Karte gar nicht erst notwendig zu machen. Als Lösungen ergeben sich passive VR-Anwendungen, 360°-Videos, kleine 'Room-Scale'-Umgebungen oder Schlauchlevel-Designs. Auch die Nutzersteuerung vereinfacht sich durch passive VR-Anwendungen (siehe Kapitel 5.4). Dementsprechend ist die Wegfindung und Nutzersteuerung in weitläufigen, interaktiven VR-Umgebungen noch wenig erforscht (Lokka & Çöltekin, 2019) und es existieren noch keine vergleichenden Studien für die Auswirkung unterschiedlicher Hilfsmittel. Bisherige Untersuchungen kommen vor allem aus dem kartographischen Bereich und beschäftigen sich mit Kartendarstellungen in VR. So haben Zagata et al. (2021) festgestellt, dass Mini-Maps in VR denselben Regeln folgen sollten wie Kartendarstellungen in der Realität und in Kombination mit sprunghafter Fortbewegung effizienter sind als mit kontinuierlicher Fortbewegung. Horbiński & Zagata (2022) beobachten außerdem, dass bei VR-Portierungen von ursprünglich für DVEs entwickelten virtuellen Welten zusätzliche Kartenfunktionalitäten, die eine exozentrische Weltsicht oder eine Vogelperspektive erlauben, beliebt sind. Diese Beobachtung konnte für ein VM in Bad Segeberg bestätigt werden, bei dem insbesondere die Übersicht über ein Miniaturmodell der virtuellen Welt von den Nutzenden herausgestellt wurde (Kersten et al., 2017b). Diese Funktionen erlauben außerdem eine bessere Distanzschätzung als in der Egoperspektive (Y. Yang et al., 2018). Distanzschätzung in VR ist generell zunächst schwieriger und ungenauer als in der Realität, mit Training stellt sich aber ein Gewöhnungseffekt ein. Auch zeigt diesbezüglich die Teleportation als Fortbewegung Vorteile gegenüber einer kontinuierlichen Bewegung (Keil et al., 2021a). Edler et al. (2019) diskutieren mögliche weitere Lösungen wie beispielsweise statische Wegmarkierungen in Form von Fußabdrücken, die den Weg zum Ziel visualisieren, sowie mögliche Vorteile, die durch eine Art Schnellreisesystem entstehen können, mit dem sich die Benutzenden über große virtuelle Distanzen direkt zum Zielpunkt teleportieren können. Diese Methode wurde auch für das VM in Stade diskutiert (Walmsley & Kersten, 2019) und im VM in Bad Segeberg umgesetzt (Deggim et al., 2017b).

Um VR-Nutzende vor Zusammenstößen mit realen Objekten in der Umgebung zu schützen, haben viele VR-Hersteller einen visuellen Hinweis in Form eines virtuellen Gitterrahmens in ihre VR-Headsets implementiert, der immer dann erscheint, wenn ein zuvor festgelegter Spielbereich verlassen wird. Dieser Gitterrahmen kann außerdem die Orientierung unterstützen, sofern er permanent eingeblendet wird (Nguyen-Vo et al., 2017), allerdings zu Lasten der Immersion. Ein weiterer Lösungsansatz besteht in der geführten Tour. Dabei steht eine Führungsperson (Tourguide) neben der spielenden Person und kann über einen weiteren Bildschirm nachvollziehen, wo sich diese Person gerade in der virtuellen Welt befindet und ggf. lenkend eingreifen. Weissker & Fröhlich (2021) haben eine Methode vorgestellt, bei der auch die Führungsperson einen Avatar in der virtuellen Welt besitzt und mehrere Nutzende durch eine Multiplayer-VR-Anwendung führt. Die Autor:innen stellen auch eine für die Nutzende passive Lösung vor, bei welcher die Führungsperson auf spezielle Funktionalitäten zurückgreifen kann und somit Kontrolle über die Position und Blickrichtung der Avatare der Nutzenden besitzt.

5.4 Nutzersteuerung

Relevanz

Um eine Anwendung überhaupt benutzen zu können, muss ihre Handhabung zunächst gelernt und verstanden werden. Eine erfolgreiche Orientierung in einer 3D-Umgebung ist also allgemein betrachtet ein Teil einer gelungenen Nutzersteuerung. Darüber hinaus stellen sich neben dem 'Wo?' aber noch weitere, grundlegendere Fragen zur Bedienung. Das erste Ziel eines jeden Systems muss es daher sein, eine Zugänglichkeit für die gewünschte Zielgruppe zu schaffen, um als nutzbares System akzeptiert zu werden (Brooke, 1996). Dies gilt insbesondere für Systeme, die in ihrer Benutzung komplex sind oder abseits von sonstigen Gewohnheiten der Zielgruppe liegen. Dieser Fall trifft also auch auf die in dieser Arbeit behandelte VR-Thematik zu, da sowohl die Benutzung der Hardware an sich neu ist (unbekannte Ausgabegeräte (HMDs) und Eingabegeräte (Handcontroller)) als auch die Verhaltens- und Interaktionsmöglichkeiten in VR von üblichen, bildschirmbasierten Informationssystemen und virtuellen Welten abweichen. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben liegt jedoch gerade in diesen erweiterten Interaktionsmöglichkeiten und dem hohen Grad an Immersion viel Potential, das in den meisten Anwendungen bislang nicht ausgeschöpft und vernachlässigt wurde. Der Konflikt besteht im Anspruch, eine schnelle Zugänglichkeit für die Zielgruppe (hier: VR-Laien für kleine Anwendungen z. B. in Museen) zu schaffen. Diese Zielgruppe unterscheidet sich stark von den Anwendenden, die sich VR-Equipment für den Heimgebrauch anschaffen und neben der finanziellen Investition auch dazu bereit sind, sich intensiv mit der Steuerung auseinanderzusetzen, um entsprechend komplexe VR-Programme zu benutzen. Bei der Konzeption muss also davon ausgegangen werden, dass sich die Zielgruppe nicht primär aufgrund des VR-Erlebnisses mit der dargestellten Thematik beschäftigt und die Anwendung somit als Ergänzung zu verstehen ist, dessen Akzeptanz stark von der intuitiven Bedienung des Programms abhängig ist.

Anforderungen

Die Fragestellungen, die sich daraus ergeben, lauten:

- 1) Wie groß darf die Einstiegshürde sein?
- 2) Wieviel Einarbeitungszeit kann der Zielgruppe zugemutet werden?
- 3) Welche Arten an Interaktionen sind essentiell für das Programm?

- 4) Welches Programmkonzept ergibt sich daraus auf einer Skala zwischen reiner Passivität (keine Einarbeitung erforderlich) und vielen, komplexen Interaktionen (umfangreiche Einarbeitung erforderlich)?
- 5) Wie muss letztlich die Programmeinführung gestaltet sein, um die vorhandenen Interaktionen hinreichend genau, nicht abschreckend, kurz genug und in einem angemessenen Verhältnis zur wahrscheinlichen Nutzungsdauer des Programms zu erklären?

Die Herausforderung besteht in der Balance zwischen 'VR-Potential ausschöpfen' und 'Anwendende nicht überfordern'. Hinzu kommt die Anforderung, dass VR-Anwendungen für museale Zwecke – im Gegensatz zu komplexeren VR-Spielen – nur eine sehr begrenzte Zeit in Anspruch nehmen dürfen und bei der Zielgruppe nicht von einer Bereitschaft zur stundenlangen Beschäftigung ausgegangen werden kann. Somit verkürzt sich auch die potentielle Einarbeitungszeit. Das übergeordnete Ziel muss es letztlich sein, sich auf den eigentlichen Inhalt konzentrieren zu können und somit die VR-Technologie – so spannend sie für viele Anwendende sein mag und auch inszeniert werden kann – als Mittel zum Zweck anzusehen, welche nicht mehr Probleme und Fragezeichen aufwerfen darf, als sie Vorteile bringt.

Tutorials

Neben Handbüchern oder sonstigen Anleitungen haben sich für den Videospielemarkt vor allem Tutorials bewährt, bei denen das Lernen der Anwendung bereits Teil der Spielerfahrung ist (White, 2014). Diese Variante bietet den Vorteil, dass die Einarbeitung in das System weniger als solche gesehen wird und stattdessen der Eindruck entsteht, von Anfang an unterhalten zu werden. Tutorials sind ein essentieller Bestandteil von VR-Anwendungen, die über den rein passiven Konsum von 360°-Videos hinausgehen. Je nach Art der Anwendung gibt es verschiedene Medien und Arten (Text, Audio, visuelle Hinweise oder Aufforderung zur einer Lern-Interaktion). Aufgrund der sehr unterschiedlichen Grade an Interaktion, Komplexität und Konzept lassen sich für VR-Anwendungen keinen generellen Arten zum Erlernen der Benutzung herausstellen, stattdessen verweisen Studien auf die Notwendigkeit einer hochgradig kontextsensitiven Herangehensweise (Frommel et al., 2017), stellen aber die generellen positiven Effekte und Wichtigkeit von Tutorials für VR-Anwendungen heraus (Kao et al., 2021). Zusätzlich zu einem initialen Tutorial ist außerdem eine die ganze Anwendung über bestehende Nutzersteuerung und Hilfestellung nötig, um immer wieder auf interaktive Elemente hinzuweisen, Gelerntes zu vertiefen, oder das Tutorial zu entzerren. Außerdem kann dadurch der Bedienkomfort erhöht werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, nach Durchlaufen eines Tutorials alle notwendigen Informationen zur Bedienung direkt verinnerlicht zu haben. Diese fortlaufenden Hilfen können beispielsweise aus audiovisuellen Hinweisen für interaktive Elemente bestehen, regelmäßig an Kernfunktionalitäten erinnern oder ungewolltes Verhalten abfangen und auf die korrekte Benutzung eines Systems hinweisen. Auch eine leicht erreichbares Hilfe-Menü mit Erklärungen zur Bedienung ist denkbar.

Nutzersteuerung kann als Überbegriff für die erwähnten Aspekte gelten, zu denen auch die in den vorigen Kapiteln erwähnten Maßnahmen zur erleichterten Orientierung wie Mini-Maps oder Routing-Systeme zählen. Die Orientierung, um die sich die Studie dieser Arbeit vorrangig dreht, ist also eine essentielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Nutzersteuerung und somit für die Akzeptanz und das Erschließen weiteren Potentials für VR-Anwendungen.

6 Grundlagen der 3D-Visualisierung

Nach Gigante (1993) ist die Echtzeit-3D-Computergrafik die erste und wichtigste Voraussetzung, um VR zu ermöglichen. Alle Arten von 3D-Visualisierungen und virtuellen Räumen basieren auf der Fähigkeit, ein digitales Abbild dieses virtuellen Objektes zu erzeugen und einen Raum berechnen zu lassen, der sich scheinbar an unsere physischen Gesetze hält, unsere Sehgewohnheiten befolgt und beispielsweise für eine räumliche Tiefenwirkung oder eine nachvollziehbare Licht- und Schattenberechnung sorgt. Neben diesen Grundsätzen spielt die Art der Modellierung und Texturierung des darzustellenden Objekts eine große Rolle, wie visuell realistisch das Objekt erscheint und wie sehr das Objekt und sein Datenvolumen für Echtzeitanwendungen wie VR geeignet sind. Diese Grundprinzipien besitzen für die Erstellung der VR-Anwendung eine große Relevanz (Kapitel 11), daher sollen in diesem Kapitel, basierend auf Nischwitz et al. (2011), die für diese Arbeit relevanten Hintergründe zur 3D-Visualisierung erläutert werden.

6.1 Computergrafik

Grundsätzliches

Die rasante Entwicklung in der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) der letzten Jahrzehnte hat die Voraussetzungen für die heutigen umfangreichen Möglichkeiten der 3D-Visualisierung geschaffen. Neben der Miniaturisierung der Bauteile, Erhöhung der Rechengeschwindigkeiten und Speicherkapazitäten und der Parallelisierung von Arbeitsabläufen waren auch auf die Konsumierenden bezogene Entwicklungen wie sinkende Komponentenkosten und einfachere Bedienoberflächen durch grafische UIs ausschlaggebend, die letztlich in leistungsfähige, kombinierte Programmiersysteme mündeten (siehe Kapitel 7.2). Zudem wurde mit der dezidierten Grafikkarte eine Komponente geschaffen, die speziell für den Arbeitsablauf zur Berechnung von Bildern zugeschnitten ist und essentiell zum Betrieb grafiklastiger, moderner Software wie Spiele, visuelle Simulationen sowie Bild- und Filmbearbeitungsprogrammen ist.

Die Computergrafik hängt dabei eng mit der Bildverarbeitung zusammen und bildet letztlich einen Kreislauf (Abbildung 7). Aus einer abstrakten Objektbeschreibung werden Bilder synthetisiert, die wiederum analysiert werden und zur Objektbeschreibung dienen. Die Computergrafik kann je nach ihrer Anwendungsform zudem in Unterkategorien eingeteilt werden. So wird zwischen Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Grafik unterschieden. Die interaktive Computergrafik bestimmt zudem, ob Input der Nutzenden Einfluss auf das dargestellte System hat, beispielsweise durch die Änderung der Objektbeschaffenheit oder der Einnahme einer neuen Perspektive und somit der Neuberechnung des Bildes.

Geometrie

In der Computergrafik werden Objekte durch Polygone innerhalb eines virtuellen Raumes repräsentiert. Die Menge der Polygone ist von der Komplexität der Geometrie des Objekts und dem angestrebtem Detailgrad abhängig. Als einfachster dreidimensionaler Volumenkörper lässt sich somit bereits aus vier Dreiecken ein Tetraeder abbilden. Im Gegensatz zu zweidimensionalen Abbildungen, bei denen die Betrachtung auf eine Perspektive fixiert ist, erlaubt diese Herangehensweise die Betrachtung des Objekts aus jedem Blickwinkel ohne Änderung der Objektstruktur und somit komplexere Interaktionen wie die interaktive Bewegung durch die

Szene. Der große Nachteil ist die schnell anwachsende Anzahl nötiger Polygone, um detailreichere Objekte hinreichend realistisch nachzubilden.

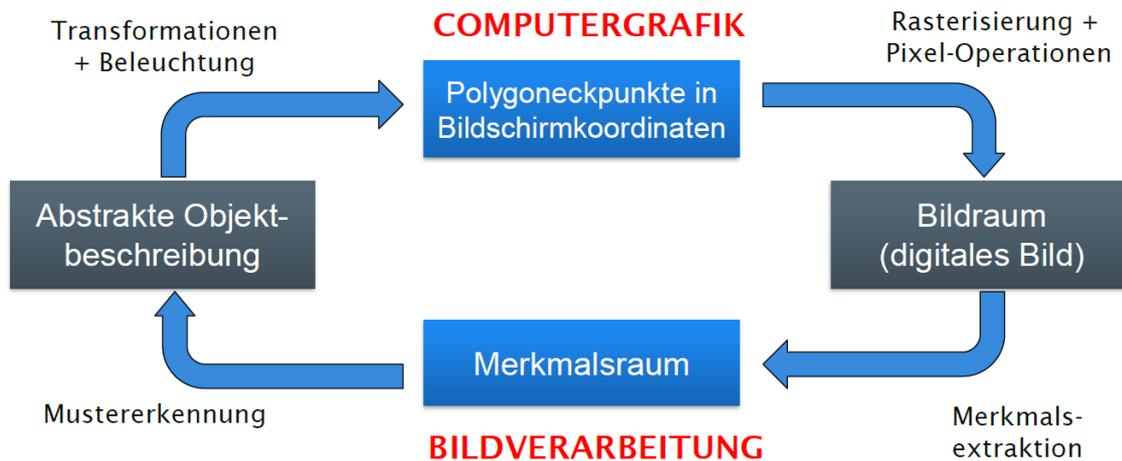


Abbildung 7. Zusammenhang zwischen Computergrafik und Bildverarbeitung (nach Nischwitz et al. (2011)).

Koordinaten und Projektion

Zur Speicherung der Position der virtuellen Objekte und ihrer Polygone wird ein Objektkoordinatensystem verwendet, das jedem Punkt eines Polygons eine Koordinate innerhalb des Objektraumes zuweist. Dem überlagert ist ein Weltkoordinatensystem, das mehrere Objekte enthalten kann und dessen Transformationsparameter speichert. Um nun ein Abbild dieser dreidimensionalen, virtuellen Szene auf einem zweidimensionalen, realen Bildschirm zu erzeugen, muss eine virtuelle Kamera eingeführt werden, die auch Augenpunkt genannt wird. Diese virtuelle Kamera spannt je nach Blickrichtung eine Pyramide auf (mit der Spitze im Augenpunkt), welche zunächst die vier Ränder des Bildausschnitts definiert (Abbildung 8). Außerdem wird eine nahe und eine ferne Begrenzung definiert (auch 'clipping planes' genannt). Diese sechs Ebenen definieren das sichtbare Volumen und somit die im Folgenden zu bearbeitenden Bildinformationen. Der Rest der Objekte innerhalb der virtuellen Welt wird ab diesem Punkt als irrelevant verworfen.

Alle im sichtbaren Volumen enthaltenen Bildelemente werden nun auf die dem Augenpunkt nahe clipping plane projiziert. Anschließend erfolgt eine Transformation von den Koordinaten auf der clipping plane zu den Koordinaten des Ausgabe-Bildschirms. Dieser Schritt schließt eine Rasterisierung der Bildinformationen basierend auf der Auflösung des Ausgabebildschirms (horizontale und vertikale Pixelanzahl) mit ein.

Verdeckung

Ein Kernaspekt unserer räumlichen Wahrnehmung sind die Konsequenzen, die sich aus der gegenseitigen Verdeckung mehrerer Objekte im Raum ergeben. Aus der Grundregel, dass Objekte im Vordergrund Objekte im Hintergrund verdecken, lassen sich bei der Betrachtung Informationen über die Entfernung von Objekten untereinander und zum Augenpunkt ableiten. Diese banal anmutende Alltagsbeobachtung ist auf der Ebene der Computergrafik nur durch Anwendung aufwendiger Algorithmen möglich. Die einfachste Variante wird durch den sogenannten Maler-Algorithmus abgebildet. Objekte werden vor ihrer Zeichnung nach Abstand zum Augenpunkt sortiert und nacheinander, beginnend mit dem entferntesten Objekt, auf den Bildschirm gezeichnet. Dieser Algorithmus versagt allerdings bei gegenseitiger Durchdringung von Objekten. Stattdessen wird in gängigen 3D-Entwicklungsumgebungen der Z-Buffer-Algorithmus angewandt,

der für jedes einzelne Pixel einen Tiefentest durchführt und ihm einen normierten Abstandswert zum Augenpunkt zuweist. Somit ist eine pixelgenaue Verdeckungsrechnung gewährleistet und die Anordnung der Objekte einer Szene und die Notwendigkeit zur vorherigen Objektsortierung entfällt.

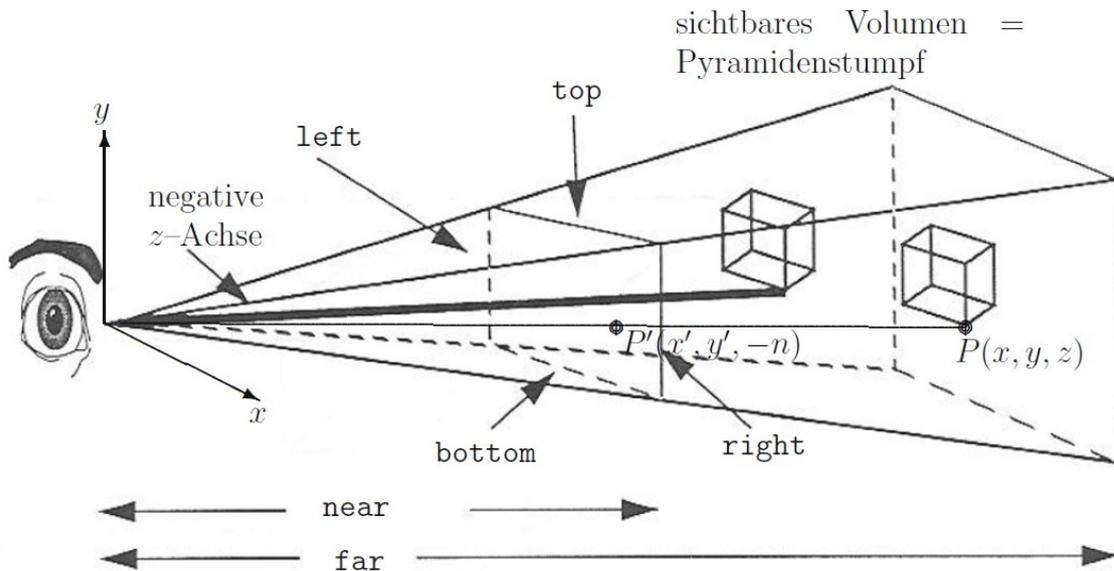


Abbildung 8. Definition des sichtbaren Volumens und Projektion auf die dem Augenpunkt nahe Clipping plane (Nischwitz et al., 2011).

Farben und Transparenz

Jedem resultierenden Pixel muss eine Farbe zugewiesen werden, um es anzeigen zu können. Das RGB-Farbmodell besteht aus den drei Farbkanälen Rot, Grün und Blau. Die Werte für jeden Kanal können zwischen 0 (kein Farbanteil) und 255 (voller Farbanteil) betragen. Aus der Mischung der Kanäle ergeben sich die gewünschten Farben, wobei (0, 0, 0) schwarz und (255, 255, 255) weiß ergibt. Daneben gibt es noch weitere populäre Farbmodelle (z. B. HSV/HSI oder CMYK), von denen inzwischen einige parallel zum RGB-Modell von Entwicklungsumgebungen zur Farbbestimmung von Objekten angeboten werden.

Um teiltransparente Objekte darstellen zu können, wird ein vierter Kanal benötigt, der sogenannte Alpha-Kanal (RGBA-Modell). Auf diesem Kanal wird – normiert auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 – für jedes Pixel die Opazität des Objekts definiert, wobei ein Wert von 1 vollständige Opazität und ein Wert von 0 vollständige Transparenz bedeutet. Transparenz macht zusätzliche Berechnungen zur Objektverdeckung nötig, da das Problem nun nicht mehr rein binär (ein Pixel ist entweder vollständig verdeckt oder vollständig sichtbar) ist.

Licht und Schatten

Mit den oben beschriebenen Methoden lässt sich bereits ein einfaches, zweidimensionales Ausgabebild erzeugen. Um beim Betrachtenden einen 3D-Eindruck hervorzurufen, ist es allerdings nötig, die gesamte Geometrie eines Objekts sichtbar zu machen und nicht nur die Silhouette. Erst durch die Beleuchtung des Objekts durch eine Lichtquelle und entsprechendem Schattenwurf auf oder unter/hinter dem Objekt lässt sich die dreidimensionale Form beim Betrachten begreifen. Lichtausbreitung und Schattenwurf sind allerdings sehr komplex. Neben unterschiedlichen Lichtquellen sind vor allem Materialeigenschaften, Ausrichtung und der Abstand zur Lichtquelle die Parameter, die Farbe und Helligkeit an einem Punkt in einer Szene bestimmen. Selbst wenn nur eine Lichtquelle vorhanden ist, in der Realität beispielsweise die Sonne, so wird das Licht

dennoch von vielen Objekten mehrfach (teil-)reflektiert und beleuchtet die Szene somit von vielen Seiten. Um dieses Beleuchtungsverhalten in der (Echtzeit-)Computergrafik abbilden zu können, wurden Beleuchtungsmodelle entwickelt, die den Licht- und Schattenwurf realitätsnah approximieren. Zu unterscheiden ist zunächst zwischen lokalen und globalen Beleuchtungsmodellen. Lokale Modelle berücksichtigen nur das Licht von punktförmigen Lichtquellen. Somit ist für jeden Punkt der Szene nur eine Gleichung zu lösen, die lediglich das Licht aus der Richtung der Lichtquelle berücksichtigt. Somit lässt sich bereits die Form eines Objekts und seine Ausrichtung zum Licht nachvollziehen. Bereiche im Kernschatten erhalten allerdings gar kein Licht und bleiben mit diesem Modell komplett schwarz. Globale Beleuchtungsmodelle berechnen dagegen die Ausbreitung des reflektierten Lichts in der Szene, also das aus allen Raumrichtungen einfallende Licht. Aufwendige Verfahren (wie das sogenannte 'Ray-Tracing') berechnen viele einzelne Lichtstrahlen, die aus unterschiedlichen Winkeln ein Objekt treffen. Einfachere globale Beleuchtungsmodelle beschränken sich auf eine Grundhelligkeit für die gesamte Szene, um aufwendige Gleichungen zu vermeiden.

Der Schattenwurf der Objekte ergibt sich aus diesen Lichtberechnungen. Abbildung 9 verdeutlicht die Wichtigkeit eines korrekt dargestellten Schattenwurfs auf die räumliche Wirkung der Szene. Auch hier lassen sich performancesparende Maßnahmen treffen, z. B. die Nutzung von unveränderlichen 'falschen Schatten' anstatt einer Echtzeitberechnung des Schattenwurfs.

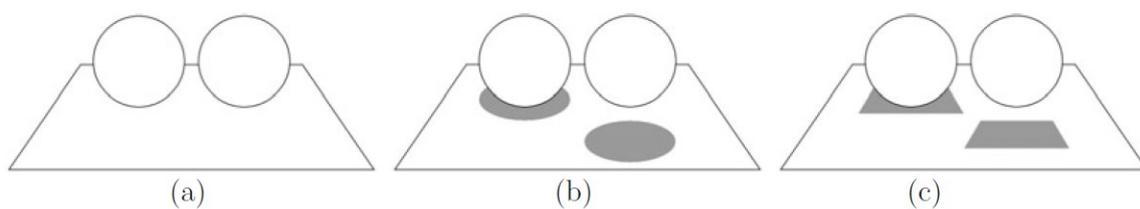


Abbildung 9. Ein Szene a) ohne, b) mit korrektem und c) mit 'falschem' Schatten. Bei unveränderlichen Lichtverhältnissen kann der falsche Schatten durch geschickte Platzierung annähernd dem realen Schattenwurf (b) entsprechen (siehe auch Abbildung 47 in Kapitel 11.5.6) (Nischwitz et al., 2011).

6.2 Modellierung

Grundsätzliches

Nach Nischwitz et al. (2011) gibt es vier grundsätzliche Arten zur abstrakten Beschreibung einer dreidimensionalen Geometrie. Die Arten überschneiden sich teilweise.

Das einfachste und weitverbreitetste Vorgehen ist die Verwendung von planaren Polygonen, in der Regel Netze aus Dreiecken. Die Polygone beschreiben die Oberfläche eines Objekts. Gespeichert werden die Koordinaten der Punkte, die das Dreieck aufspannen. Diese Methode erlaubt vereinfachte Berechnungen zur Darstellung, z. B. zur Verdeckungsbestimmung (s.o.), allerdings erfordern detaillierte und vor allem gekrümmte Flächen eine hohe Anzahl an Polygonen, um das gewünschte Objekt in hinreichender Genauigkeit abzubilden.

Gekrümmte Polygone (sogenannte NURBS, Non-Uniform Rational B-Splines) bieten demgegenüber den Vorteil, dass sie über wenige Kontrollpunkte exakt definiert werden können, indem die Oberflächengeometrie durch Funktionen bestimmt wird. Der Speicherplatzbedarf zur Beschreibung der Geometrie verringert sich also. Diese Funktionalität wird aber nur von einem Teil der gängigen 3D-Modellierungssoftware angeboten, zumal zur Weiterverarbeitung in

externen Programmen in der Regel wieder eine Umrechnung in diskrete Polygonnetze erfolgen muss.

Zudem gibt es die Volumendarstellung mithilfe sogenannter Voxel. Voxel lassen sich als dreidimensionale Pixel eines Bildes auffassen. Das 3D-Objekt wird also durch gerasterte, äquidistante Voxel-Elemente dargestellt und besteht somit nicht nur aus einer Oberfläche, sondern hat auch einen definierten Innenraum. Dieses Vorgehen erfordert eine sehr hohe Datenmenge zur Speicherung, stellt aber entsprechend mehr Informationen bereit und ermöglicht Anwendungen wie die Darstellung von Schnittebenen.

Schließlich gibt es noch die konstruktive Körpergeometrie (CSG, Constructive Solid Geometry), die Objekte bei der Erstellung ebenfalls als Volumenkörper auffasst und somit Bearbeitungsschritte wie die Anwendung sogenannter 'Boolescher Operatoren' ermöglicht. Die Grund-Operatoren wie Vereinigung, Differenz und Schnittmenge zweier (oder mehrerer) Objekte erlauben somit das Zerschneiden oder Durchbohren dieser Objekte und generieren an den Schnittflächen oder -kanten neue Geometrie, sodass die resultierenden Objekte ebenfalls wieder Volumenkörper sind. Die Darstellung der Geometrie erfolgt bei CSG allerdings ebenfalls durch Polygone.

Methoden

Um zu einer dreidimensionalen Geometrie zu gelangen, gibt es unterschiedliche Methoden. In Kapitel 4.3 wurde bereits die Vermaschung von Punktwolken zur Erstellung von Polygonnetzen beschrieben (Luhmann, 2010; Vosselman & Maas, 2010). Bei dieser Methode wird aus den zur Verfügung stehenden Punkten der Verlauf der aufgenommenen Oberfläche unter Berücksichtigung der angestrebten Auflösung des 3D-Modells rekonstruiert. Auch die generierten Punktwolken selbst werden öfters zur zeitsparenden (provisorischen) Darstellung von 3D-Objekten verwendet, wenn eine Vermaschung oder Nachmodellierung zu einer geschlossenen Geometrie nicht nötig, zu aufwendig oder aus sonstigen Gründen nicht angebracht ist.

Die manuelle Modellierung nutzt die im obigen Absatz genannten Arten zur Geometrieerstellung und kann ganz oder teilweise auf gemessenen Rohdaten basieren oder aber andere Informationsquellen wie technische Zeichnungen, Fotografien, Karten, sonstige Abbildungen oder schriftliche Beschreibungen als Grundlage haben (Kersten et al., 2018b).

Bei der dritten Methode der parametrischen Modellierung wird die Geometrie durch codierte Beschreibungen der gewünschten Objekte erzeugt. Detailreiche Gebäude erfordern zwar ein umfangreiches Setup, jedoch lassen sich mit dieser Methode mit einem einmal angelegten Katalog an benötigten Beschreibungen in sehr kurzer Zeit ganze Städte erzeugen. Beliebte Anwendungen zur parametrischen Modellierung wie die City Engine von Esri sind auf moderne Stadtplanung optimiert, es lassen sich damit aber auch Städte in historischen Settings erzeugen (Arnold & Lafreniere, 2018).

Je nach Bedarf können die genannten Methoden auch kombiniert werden, beispielsweise, wenn für bestimmte Bereiche Scanning-Daten vorliegen, diese aber mit Rekonstruktionen auf Basis von Einzelbildern kombiniert werden sollen. Eine beliebte Herangehensweise ist auch die Erzeugung einer sogenannten 'Height Map' aus Fernerkundungsdaten oder photogrammetrisch erfassten Geländeprofilen, die als virtuelle Geländebasis für die weitere Modellierung dienen (Walmsley & Kersten, 2019).

Level of Detail (LoD)

Eine der gängigsten Methoden zur Performance-Optimierung bei Echtzeit-Anwendungen hat bereits auf den Modellierungsprozess starke Auswirkungen. Um eine Balance zwischen den zwei skalierenden 'Datensparsamkeit' und 'Hochdetailliertes 3D-Modell' zu finden, werden auf dieser Skala mehrere Zwischenschritte in Form von 3D-Modellen desselben Objekts mit kontinuierlich

zunehmender Detailstufe eingeführt (Abbildung 10). Diese Zwischenschritte werden auch 'Level of Detail' (LoD) genannt. Die Methodik macht sich die Tatsache zunutze, dass die Details von weit entfernten Objekten nicht mehr so gut wahrgenommen werden wie bei der Betrachtung aus dem Nahbereich. Hinzu kommt die durch die Displayauflösung bedingte Unschärfe in der Entfernung, sodass auf eine hohe Modellauflösung mit ohnehin nicht mehr darstellbaren Details verzichtet werden kann. Je nach Entfernung des virtuellen Standpunktes einer betrachtenden Person vom Objekt (oder alternativ: je nach Anteil des Objekts am gesamten Bildschirmausschnitt) wird also dasjenige LoD angezeigt, dessen Detailgrad gerade noch ausreichend ist, um aus der Betrachtungsentfernung noch als visuell vollständig detailliertes Modell wahrgenommen zu werden. Es gibt mehrere Kategorien von LoDs, angefangen bei diskreten LoDs (oben beschrieben) über kontinuierliche LoDs (Datenreduzierung erfolgt nach einer definierten Datenstruktur entlang der Detailskala für fließende Übergänge zwischen den LoDs), betrachterabhängige LoDs (unterschiedliche LoD-Stufen eines einzigen, großen Objekts je nach Entfernung des Teilobjekts), bis hin zu hierarchischen LoDs, eine Kombination aus betrachterabhängigen LoDs und der Zusammenfassung aller Einzelobjekte der Szene zu einem einzigen LoD. Diese Methodik erfordert in der klassischen Variante die mehrfache Modellierung desselben Objekts, bietet aber bei richtiger Implementierung die Stärken beider Skalenenden (Heok & Daman, 2004).

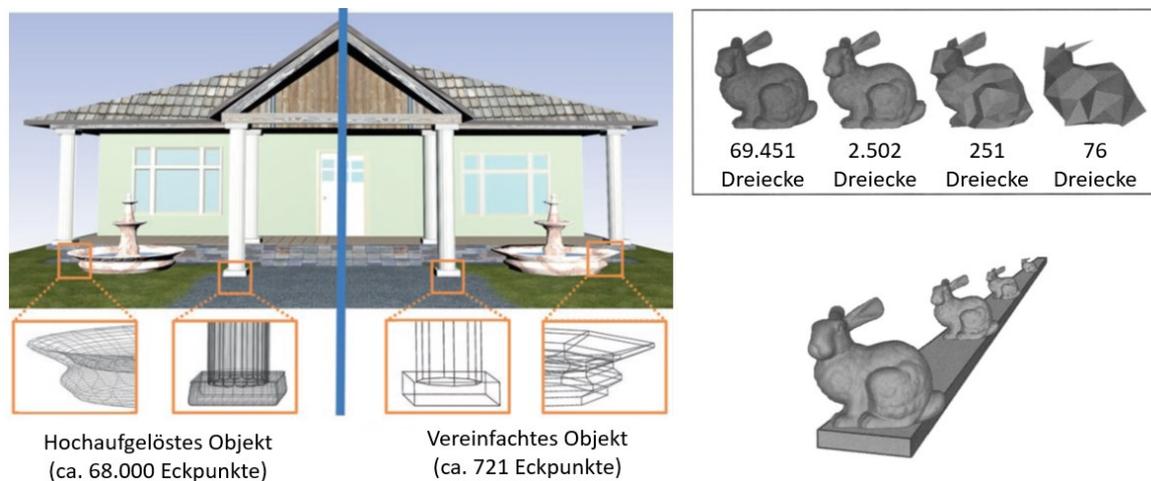


Abbildung 10. Links: Gegenüberstellung verschiedener LoDs (nach Dörner et al. (2019)). Rechts: Prinzip der abnehmenden Detailstufe bei zunehmender Entfernung (nach Luebke (2003)).

Diese in der Computergrafik verbreitete Definition von LoDs, bei der 'LoD 0' für die höchste Auflösung steht und der Detailgrad mit zunehmender LoD-Nummer abnimmt, ist nicht zu verwechseln mit der in den Geoinformationwissenschaften gebräuchlichen Definition von LoDs, die insbesondere für die Repräsentation von Stadtmodellen eingesetzt wird. Hier sind den LoDs – entsprechend dem CityGML 3.0 Standard – Nummern mit genau definierten Detailgraden zugeordnet, beginnend mit 'LoD 0', welches lediglich die auf die Grundfläche des Gebäudes projizierten Elemente abbildet, bis hin zu LoD 3, welches das Gebäude in allen Details inklusive Dachflächen und Innenräumen darstellt (Kutzner & Kolbe, 2018; Löwner et al., 2016).

Modularität und Animationen

Die Erstellung eines Stadtbildes mit wiederkehrenden Gebäudeelementen lässt sich durch modulares Modellieren mit einem Baukastensystem optimieren. Auf parametrischer Ebene funktioniert dieses System über die Programmierung und gezielte Wiederverwendung der beschriebenen Objekte (Arnold & Lafreniere, 2018), aber auch in der manuellen Modellierung kann dieses System zur Arbeitersparnis genutzt werden und gleichzeitig ein diverses Stadtbild

sicherstellen. Anstatt ganze Häuser zu modellieren, werden einzelne, definierte Wand- oder Dachabschnitte angefertigt, die sich später nach Bedarf zu Gebäuden mit unterschiedlichsten Ausmaßen und Erscheinungsbildern zusammensetzen lassen (Deggim & Kersten, 2022; Walmsley & Kersten, 2019). Unter Berücksichtigung einer ausgewogenen Belastung zwischen Grafikkarte (GPU, typischerweise hohe Belastung bei vielen zu zeichnenden Polygonen pro Objekt) und dem Hauptprozessor (CPU, typischerweise hohe Belastung bei der Zeichnung vieler einzelner Objekte) bietet dieses Verfahren dank der Instanziierung der sich wiederholenden Objekte auch einen Performance-Vorteil.

Neben den genannten Punkten spielen auch weitere Aspekte der Weiterverwendung eine Rolle. Hier sei noch die Animationstauglichkeit eines Objekts genannt. Insbesondere für interaktive Anwendungen, in denen Objekte auf den Input der Nutzenden reagieren müssen, sind Anpassungen in der Modellierung erforderlich. Soll beispielsweise ein Haus durch eine Tür begehbar und diese Tür animiert sein, so muss diese Tür unabhängig vom restlichen Hausmodell importiert werden, um separat ihre Transformationsparameter adressieren zu können. Dies macht die Notwendigkeit in der 3D-Visualisierung deutlich, den genauen Verwendungszweck eines Modells bereits vor der Modellierung zu definieren.

Menschen & The Uncanny Valley

In diesem Projekt geht es hauptsächlich um die Modellierung von Architektur und 'leblosen' Objekten. Für die Immersion ist aber eine gewisse Lebendigkeit nötig und gewünscht (siehe Kapitel 9.1 & 10.4.5). Menschen & Tiere lassen sich in der Regel nur mit weit größerem Aufwand modellieren, da ihre Form eine weitaus höhere Anzahl von Polygonen benötigt. Zusätzlich muss bei 3D-Modellen, die lebendige Objekte repräsentieren sollen, das 'Uncanny Valley' (dt. etwa: 'unheimliches Tal') berücksichtigt werden. Mori et al. (2012) beschreiben das Phänomen, das ursprünglich aus der Robotik kommt und beobachtet wurde, als dem menschlichen Aussehen nachempfundene humanoide Roboter getestet wurden. Im Kern beschreibt das Uncanny Valley eine Akzeptanzlücke, die Menschen bei der Interaktion mit Objekten haben, die 'menschlich' wirken sollen. Man erkennt zwar die gewollte Ähnlichkeit, aber verschiedene Abweichungen der Nachahmung von den Erwartungen, die man an das Aussehen oder Verhalten eines realen Lebewesens stellt, sorgen dafür, dass dieses Objekt nicht als Repräsentation akzeptiert wird und als falsch oder unheimlich wahrgenommen wird. Abbildung 11 zeigt grafisch die Akzeptanzkurve in Abhängigkeit vom angestrebten Grad an Realismus. Mori et al. (2012) erklären, dass Stilisierungen wie z. B. Comiczeichnungen somit viel eher als menschlich oder lebhaft wahrgenommen werden, als eine angestrebte aber nicht vollständig gelungene Nachbildung der Realität. Dieses Phänomen findet sich auch in der Computergrafik wieder und sorgt den Autor:innen nach für die Entscheidung vieler Personen aus den Bereichen Entwicklung und Design, menschliche Charaktere bewusst stilisiert/unrealistisch zu kreieren, um auf der Akzeptanzkurve den ersten Hügel vor dem Uncanny Valley zu erreichen und somit den sehr hohen Mehraufwand zur Erstellung eines lebensecht wirkenden Charakters zu vermeiden.

(Roughness Map), Unebenheiten (Normal, Bump und Displacement Map), Lichtverteilung (Occlusion Map), Selbstleuchtfähigkeit (Glow Map) und weitere Eigenschaften enthalten. Diese Maps sorgen im Zusammenspiel mit der Berechnung der Lichtausbreitung (Kapitel 6.1) für ein realistischeres Erscheinungsbild, als dies bei einer einfachen Farbtextur der Fall wäre. Im Gegensatz zur Textur mit den Farbinformationen, die sich nach den Werten eines Farbmodells richtet (z. B. die Werte 0 – 255 des RGB-Modells, siehe Kapitel 6.1), sind die Maps mit den Zusatzinformationen in der Regel normiert auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 und geben für jedes Pixel auf einer linearen Skala an, inwiefern eine Eigenschaft auf dieses Pixel zutrifft. Ein Wert von 0 bedeutet beispielsweise bei einer Roughness Map, dass die Oberfläche sehr glatt ist und jeder ankommende Lichtstrahl zu 100% reflektiert wird. Ein Wert nahe 0 wird sich also bei einem Spiegelobjekt, bei reflektierendem Glas oder aber bei (blanken) metallischen Objekten finden. Umgekehrt bedeutet ein Wert von 1 eine hohe Oberflächenrauigkeit und dementsprechend keine Reflektionen. Diese Maps benötigen also nur einen Kanal und mehrere dieser Maps lassen sich zur Einsparung des Speicherplatzes in eine mehrkanalige Textur zusammenfassen. Eine Ausnahme dieses Prinzips bildet die Normal Map, welche farbkodierte Informationen auf drei Kanälen bereitstellt und Unebenheiten in der Oberflächenstruktur (und somit stärker und weniger beleuchtete Bereiche) definiert. Abbildung 12 zeigt beispielhaft dieselbe Textur in diesen unterschiedlichen Kodierungen.



Abbildung 12. Maps einer Backstein-Textur (Datenbank: textures.com). Von links nach rechts: Base Colour, Normal, Roughness, Ambient Occlusion, Displacement.

Materialien

Die auf diese Weise erstellten Texturen werden nicht direkt auf das 3D-Objekt angewandt, sondern zunächst sogenannten Materialien zugewiesen. 3D-Objekte bestehen also aus Materialien, die wiederum aus einer oder mehreren Texturen bestehen. Bei einfach gehaltenen Materialien kann auch auf zusätzliche Texturen für Reflektionseigenschaften usw. verzichtet werden und diesen Parametern stattdessen über die gesamte Textur hinweg ein statischer Wert zugewiesen werden. Dieses Vorgehen ergibt v. a. bei relativ homogenen Texturen Sinn, bei denen zusätzliche Texturen wenig bis keinen visuellen Vorteil bieten. Zusätzlich können in den Materialien weitere Informationen hinterlegt werden, die sich auf das gesamte Material (und somit auch auf alle enthaltenen Texturen) beziehen. Die wichtigste dieser Informationen sind die Transformationsparameter, also die Skalierung, Rotation und ggf. Verzerrung der Textur. Diese Parameter bestimmen zum einen die Ausrichtung der Textur auf dem Objekt, sie geben aber auch an, ob und wie oft sich die Textur auf dem Objekt wiederholt. Dieses Prinzip wird 'Kachelung' genannt und erfordert die Bearbeitung der Texturen(-ränder), um sichtbare Kanten bei der Nebeneinanderreihung der Texturen zu vermeiden. Zusammen mit weiteren, die originalen Texturen überlagernden Effekten wie beispielsweise zufallsbasierte Helligkeitsunterschiede bei Texturwiederholungen ('Noise') lässt sich mit einer einzigen Textur trotz begrenzter Texturauflösung auch auf sehr großen Flächen ein abwechslungsreiches Oberflächenbild erzeugen, ohne die Wiederholungen zu bemerken. Weitere Einstellungen erlauben komplexere Materialien, wie zum Beispiel Video-Texturen und dynamische Materialien, die ihre Eigenschaften

in Abhängigkeit ihrer Position in der Welt oder durch Interaktionen der Nutzenden in Echtzeit verändern lassen.

Projektion

Für die Zuweisung eines Materials zu einem 3D-Objekt wird die Information benötigt, auf welche Art das Material auf die Objektoberflächen projiziert werden soll. Als einfachste Variante gilt die planare Projektion. Dazu wird eine Projektionsebene durch das Objekt gelegt und alle Objektflächen entsprechend ihrer Ausrichtung zur Projektionsebene texturiert. Für Objekte, die aus großer Entfernung und nur von einer Seite aus betrachtet werden, mag dieses Vorgehen ausreichen, zumeist sind aber andere Projektionsmethoden nötig, um Texturverzerrungen an den Flächen zu vermeiden, die einen großen Winkel zur Projektionsebene aufweisen. Modellierungs- und Visualisierungsprogramme bieten zumeist eine Auswahl an Projektionsmethoden an, um der Geometrie des 3D-Objekts einigermaßen gerecht zu werden. Dabei handelt es sich zunächst um geometrische Grundformen wie Würfel, Zylinder oder Kugeln. Ein Material, das in Würfelform auf ein Objekt projiziert wird, hat somit die höchste Texturtreue auf den Objektflächen, dessen Ausrichtung identisch zu einer der sechs Projektionsflächen ist und die höchste Verzerrung auf Flächen, die in einem 45°-Winkel zu diesen Flächen stehen. Dennoch erlaubt diese Projektionsmethode, allgemein als 'prozedurales Texturieren' bezeichnet, für anorganische Objekte wie Architektur in den meisten Fällen eine hinreichend genaue Texturierung. Falls diese Methode nicht ausreicht oder falls das Objekt eine Geometrie hat, die sich nicht zufriedenstellend durch diese approximierten Projektionskörper texturieren lässt, gibt es eine exaktere, allerdings auch aufwendigere Methode, die 'UV-Mapping' genannt wird. Hierfür ist zunächst ein (zumeist) manuelles virtuelles Auseinanderfalten aller Polygone des 3D-Objekts und ihre Anordnung auf einer flachen Ebene nötig ('UV-Unwrap'). Die Buchstaben 'U' und 'V' stehen hierbei für die Texturkoordinaten, die einem bestimmten Pixel auf der Textur und somit einem bestimmten Polygon des auseinandergefalteten Objekts zugeordnet sind. Abbildung 13 visualisiert die Texturzuweisung. Die Beziehung zwischen einem Texturausschnitt und jedem Polygon des Objekts ist nun exakt definiert. Jedes Polygon erhält gewissermaßen seine eigene Projektionsebene. Somit ist eine genaue und verzerrungsfreie Texturierung möglich (Flavell, 2010).

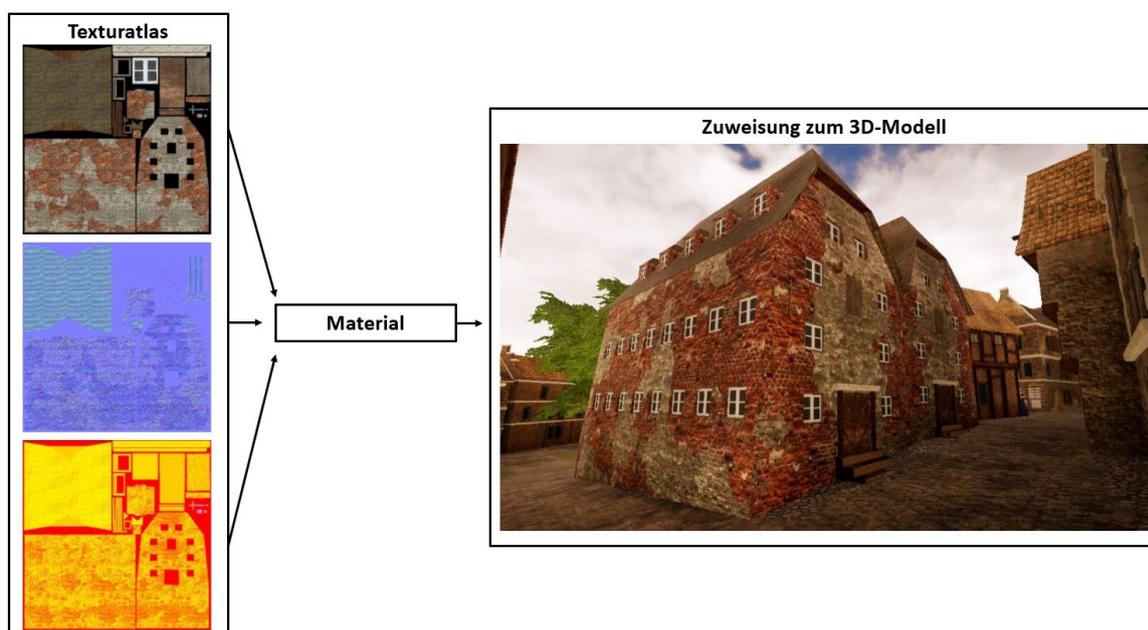


Abbildung 13. Kombination einzelner Maps aus einem Texturatlas zu einem Material. Anschließend Zuweisung zum 3D-Objekt (nach Walmsley und Kersten (2019)).

Eine andere Form der Projektion kann als Kombination des Modellierungs- und Texturierungsschritts zur Polygonreduzierung angewandt werden. Dabei wird zunächst ein hochdetailliertes Objekt und anschließend eine reduzierte Version mit weniger Details modelliert. Das hochdetaillierte Objekt dient hierbei nicht als LoD, sondern lediglich als Quelle zur Projektion der hochaufgelösten Geometrie auf die Flächen der reduzierten Modellversion. Als Ergebnis entsteht eine Normal Map mit den Detailinformationen der hochaufgelösten Oberfläche. Mit den richtigen Einstellungen zur Auswirkung der Normal Map auf die Licht- und Schattenberechnung auf dem reduzierten Modell lässt sich mit diesem Verfahren eine gute Datensparsamkeit erreichen, ohne visuelle Abstriche in der Detaillierung in Kauf nehmen zu müssen (Kersten et al., 2019; Webster, 2017).

7 Hard- & Software

7.1 Hardware

Für die Entwicklung und Durchführung des VR-Programms und der Orientierungsstudie wurde die in Tabelle 1 spezifizierte Hardware verwendet. Die Leistung der verwendeten Komponenten übersteigt in hohem Maße die gängigen Mindestanforderungen der Hersteller von VR-Soft- und Hardware. Damit wurde sichergestellt, dass die Systeme optimale Voraussetzungen für eine reibungsfreie Durchführung der Studie bieten und keine Performance-Probleme und damit einhergehende Effekte wie Motion Sickness (siehe auch Kapitel 3.3 & Kapitel 12.3.3) die Ergebnisse beeinflussen.

Tabelle 1. Komponenten-Übersicht für die Rechner, die zur Entwicklung und Studiendurchführung verwendet wurden.

| | PC 1 | PC 2 | PC 3 | PC 4 |
|----------------|---|---|---|---|
| Verwendung | VR-Entwicklung; Orientierungs- studie | Orientierungs- studie | Segeberg-Studie | VR-Entwicklung |
| Prozessor | Intel Core i7- 9750H, 2.6 GHz, 12 Kerne | Intel Core i9- 10900X, 3.7GHz, 10 Kerne | Intel Core i7 8700, 3.2GHz, 6 Kerne | Intel Core i7 11800H, 2, 3 GHz, 8 Kerne |
| Grafikkarte | Nvidia GeForce RTX 2080 MaxQ | Nvidia GeForce RTX 2080 Ti | Nvidia GeForce GTX 1080 | Nvidia Geforce RTX 3070 |
| Grafikspeicher | 8 GB | 11 GB | 8 GB | 8 GB |
| RAM | 64 GB | 64 GB | 16 GB | 32 GB |
| Betriebssystem | Windows 10 | Windows 10 | Windows 10 | Windows 11 |

Die Notwendigkeit leistungsstarker Hardware für VR-Anwendungen erschließt sich aus der hohen Anzahl der Pixel, die im Vergleich zu Desktop-Anwendungen pro Sekunde berechnet und gerendert werden müssen.

$$\frac{\text{Pixel}}{\text{Sekunde}} = \text{Auflösung} * \text{Anzahl}_{\text{Displays}} * \text{Wiederholungsrate} \quad (1)$$

Für einfache Bildschirmwendungen reicht eine Wiederholungsrate (auch FPS, 'Frames Per Second') nahe der menschlichen Wahrnehmung von 30 Hz üblicherweise aus. Bei einer Full HD-Auflösung (1920 x 1080 Pixel) müssen für einen Bildschirm somit 62.208.000 Pixel pro Sekunde gerendert werden. Für VR-Brillen liegt die empfohlene Wiederholungsrate der meisten Hersteller bei 90 Hz. Am Beispiel der HTC Vive Pro mit zwei Displays und einer Auflösung von 1440 x 1600 Pixel pro Display (siehe Tabelle 2) ergibt sich somit eine optimale Renderrate von 414.720.000 Pixel pro Sekunde, also in diesem Fall ca. das 6,7-fache. Hinzu kommen Leistungsanforderungen zur Berechnung des Trackings.

Die VR-Entwicklung erfolgte hauptsächlich mit der Valve Index und der Oculus Quest 2. Für die Durchführung der Orientierungsstudie (Kapitel 8.2) kamen die Valve Index und die HTC Vive Pro zum Einsatz. Die Segeberg-Studie (Kapitel 8.1) fand unter Verwendung einer HTC Vive Pro statt.

Die Sprachaufnahmen (Kapitel 11.5.7) wurden auf einem Android-Smartphone (Sony Xperia 10 IV) mit einem externen AGPTEK Lavalier-Mikrofon durchgeführt.

Tabelle 2. Funktionsübersicht für die zur VR-Entwicklung und zur Durchführung der Studien verwendeten VR-Brillen. PPD = Durchschnittliche angulare Pixeldichte pro Grad des Sichtfelds.

| | HTC Vive Pro | Valve Index | Oculus Quest 2 |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Auflösung pro Auge | 1440 x 1600 Pixel | 1440 x 1600 Pixel | 1832 x 1920 Pixel |
| Horizontales FoV | 98° | 108° | 97° |
| Vertikales FoV | 98° | 104° | 93° |
| Tracking-Methode | Inside-Out, externe Basisstationen | Inside-Out, externe Basisstationen | Inside-Out, Standalone |
| DoF | 6 | 6 | 6 |
| Typ | PC-abhängig | PC-abhängig | Standalone |
| Wiederholungsrate | 90 Hz | 144 Hz | 120 Hz |
| Horizontale Pixeldichte | 14.58 PPD | 14.84 PPD | 18.88 PPD |
| Vertikale Pixeldichte | 13.36 PPD | 13.19 PPD | 18.69 PPD |
| Erscheinungsjahr | 2018 | 2019 | 2020 |
| Gewicht | 800 g | 809 g | 503 g |
| Hersteller | HTC | Valve | Oculus |

7.2 Software

Im Folgenden werden die zur Studiendurchführung und VR-Entwicklung verwendeten Softwarepakete vorgestellt.

SketchUp

SketchUp ist eine 3D-Modellierungssoftware, die ursprünglich von dem Unternehmen @Last Software entwickelt und im Jahr 2000 auf den Markt gebracht wurde. Zwischenzeitlich von Google zur Erstellung von GoogleEarth-Modellen übernommen, wird Sketchup inzwischen von Trimble weiterentwickelt und vertrieben. SketchUp bietet einen Grundstamm an Werkzeugen zur exakten Modellierung und Texturierung (Chopra et al., 2013). Der Programmphilosophie entsprechend sind komplexere Funktionalitäten in Plugins ausgelagert, die von einer aktiven Community entwickelt und gepflegt werden. Für diese Arbeit wurden Plugins von 'Fredo6' und 'Curic' verwendet.

SketchUp wurde zur 3D-Modellierung der meisten Objekte sowohl für der Studien-Umgebung (Kapitel 8.2.3) als auch für das VR-Programm 'Hamburg: Neue Burg VR' (Kapitel 11.5.1) eingesetzt. Außerdem wurden einige der Ikonographie-Zeichnungen für die UI im VR-Programm mit SketchUp erstellt (Kapitel 11.6.2). Das Programm fungierte überdies als Export-Schnittstelle für andere 3D-Modelle, da SketchUp direkt in das FBX-Format exportieren kann, welches als Input-Format für die Unreal Engine benötigt wird.

AutoCAD

Die CAD-Software AutoCAD ist ebenfalls ein 3D-Modellierungsprogramm (CAD: Computer-Aided Design; etwa: Rechnergestütztes Konstruieren) der Firma Autodesk. Die ersten Vorgänger wurden bereits Anfang der 1980er entwickelt und vertrieben. Inzwischen gibt es eine breite Produktpalette mit spezialisierten CAD-Programmen für verschiedene Bereiche, beispielsweise

für technische Zeichnungen, Architektur oder Tiefbauplanung (Autodesk, 2023).

AutoCAD wurde zur Überarbeitung einiger für Vorgängerprojekte in AutoCAD erstellten Objekte verwendet, die für das VR-Programm 'Hamburg: Neue Burg VR' übernommen wurden (Kapitel 11.5.1). Dabei handelt es sich vor allem um Detail- und Ausstattungsobjekte wie Bänke, Tische, Leitern, Kisten, Fässer usw.

GIMP

Das Bildbearbeitungsprogramm GIMP (GNU Image Manipulation Program) ist ein freies und somit kostenloses Programm zur Erstellung oder Weiterverarbeitung von Bild- und Fotodateien. Erste Versionen wurden ab 1996 entwickelt – zunächst für Linux – und später auf weiteren Plattformen verfügbar gemacht. Die umfangreiche Funktionalität lässt sich durch PlugIns erweitern und den Bedürfnissen anpassen (Burgess, 1998).

GIMP wurde vereinzelt zur Nachbearbeitung der Texturen (Kapitel 11.5.2) und der Charakteranimationen verwendet (Kapitel 11.5.5). Außerdem war dieses Programm Teil des Arbeitsablaufs für die UI (Kapitel 11.6.2) und für die Anpassung der Panoramen (Kapitel 11.6.3).

Character Creator 2D

Character Creator 2D (CC2D) ist ein Programm zur modularen Erstellung von 2D-Charakteren und deren Animationen. Es wurde vom Entwickler 'mochakingup' ursprünglich als Erweiterung der Spiele-Engine Unity entwickelt und 2019 veröffentlicht. Inzwischen existiert auch eine Standalone-Version, welche über die Plattform 'itch.io' vertrieben wird und den Export und somit die Verwendung der Animationen für andere Entwicklungsumgebungen verfügbar macht (mochakingup, 2021).

Alle im VR-Programm sichtbaren Menschen (auch 'Non-Player Character', kurz NPC) wurden mit CC2D erstellt und animiert (Kapitel 11.5.5).

Unreal Engine

Die Unreal Engine (UE) ist eine Spiele-Entwicklungsumgebung (Game Engine) des Softwareunternehmens Epic Games. Die Engine versteht sich als All-in-One-Lösung zur Erstellung interaktiver Software und bietet dementsprechende Werkzeuge: Rendering-Pipeline für 2D- und 3D-Grafik mit Licht- und Schattensimulation, Physik- und Partikel-Simulation, Texturierung, Weltenbau (Platzierung von Objekten und Manipulation dieser in einer virtuellen 2D-/3D-Umgebung) sowie Werkzeuge zur Erstellung und Verarbeitung von Animationen, Audioelementen und Interaktionen aller Art. Als Skriptsprache wird entweder C++ oder eine visuelle Skriptlösung – sogenannte 'Blueprints' – angeboten. Auch für diese Engine gibt es zudem weitere PlugIns sowohl vom Entwickler als auch von der Community zur Erweiterung der Funktionalität. Die erste Version der UE wurde ursprünglich 1998 entwickelt und wurde in ihrer Funktionalität über die Jahre stark erweitert (Sanders, 2017).

Die UE hat sich dabei als Entwicklungsumgebung für viele (insbesondere kleine und unabhängige) Studios etabliert, inzwischen auch außerhalb des ursprünglichen Kernbereichs der Spieleentwicklung. So wird die Engine mittlerweile für Filmproduktionen eingesetzt (Perkins & Echeverry, 2022). Die Möglichkeit der Entwicklung für verschiedene Plattformen und eine umfangreiche Unterstützung für die VR-Entwicklung macht die Engine auch für Anwendungen in den Bereichen der Geodaten-Visualisierung (Kapitel 4.3), für Virtuelle Museen (Kapitel 4.1) oder für Forschungs- und Studienzwecke (Kapitel 3.4) sehr beliebt. Als ebenfalls verbreitete und beliebte Alternative mit vergleichbarer Funktionalität und zahlreichen Anwendungen in der VR-(Geo-)Datensvisualisierung ist noch Unity des Entwicklers Unity Technologies zu nennen (Keil et al., 2021b). Aufgrund umfangreicher Vorerfahrung mit der UE in Vorgängerprojekten (Deggim et al., 2017c, 2017b; Kersten et al., 2018c) sowie der freien Verfügbarkeit des Programms bei nicht-

oder geringfügig kommerziellen Projekten wurde die UE als Entwicklungsumgebung ausgewählt.

Verwendet wurde die Version 4.26. Der Großteil der Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit wurde in der UE geleistet. Dazu gehört die Entwicklung und Programmierung der beiden Studienprojekte Segeberg 1644 (Kapitel 8.1) und der Orientierungsstudie (Kapitel 8.2) sowie die Entwicklung des VR-Programms 'Hamburg: Neue Burg VR' (Kapitel 11).

Quixel Bridge

Quixel Bridge ist ein Schnittstellenprogramm, das Zugang zu einer Datenbank mit hochaufgelösten Texturen und Materialien bietet (programmintern 'Megascans' genannt) und als Ergänzung zur UE benutzt werden kann, um den Arbeitsablauf der Texturierung innerhalb der Engine zu optimieren. Zusätzlich lassen sich detaillierte 3D-Modelle, insbesondere aus dem Landschaftsbereich, herunterladen und importieren (Waqar, 2020).

Quixel Bridge gehört ebenfalls zu Epic Games und wurde für die VR-Anwendung 'Hamburg: Neue Burg VR' als Hauptquelle, Datenbank und Importtool für Texturen und Materialien verwendet. Zusätzlich gab es aber auch noch andere Quellen, bei denen ein manueller Import nötig war und die in Kapitel 11.3 beschrieben werden.

Camtasia

Camtasia ist eine Anwendung zur Erstellung von Screencasts und einfachen Video- und Audioaufnahmen. Entwickelt wurde die Software von TechSmith. Camtasia wurde für die Aufnahme der eingesprochenen Anweisungen und Erklärungen für die Orientierungsstudie verwendet.

Steam, Steam VR & Steamworks

Die Plattform Steam, entwickelt und 2003 veröffentlicht von Valve, hat sich auf den Vertrieb zunächst von Spielen, seit 2012 auch von weiterer Software spezialisiert. Über Steam werden Kauf, Download und Updates der Software-Pakete als auch die Kommunikation der Nutzenden untereinander und die Datenspeicherung von Spielfortschritten abgewickelt. Die Plattform stellt nach eigenen Angaben über 30.000 Spiele und Software-Angebote zur Verfügung und wird aktuell (Oktober 2023) regelmäßig von über 100 Millionen Menschen genutzt (Steam, 2023).

Mit 'Steam VR' besitzt die Plattform eine eigene Schnittstelle für die Entwicklung und Nutzung von VR-Anwendungen. Steam VR erlaubt die Kommunikation der benutzten VR-Hardware mit der ausgeführten VR-Software sowohl für fertiggestellte Anwendungen als auch für solche, die innerhalb einer Entwicklungsumgebung wie der UE getestet werden. In dieser Funktion wurde Steam bzw. Steam VR für die Entwicklung jeglicher Software im Rahmen dieser Arbeit sowie für die Durchführung der Studien verwendet.

Aufgrund oben genannter Funktionalitäten und der Tatsache, dass die Plattform selbst und die VR-Schnittstelle kostenlos benutzt werden können, wurde Steam für die Veröffentlichung der finalen Version von 'Hamburg: Neue Burg VR' ausgewählt. Für den Veröffentlichungsprozess wurde 'Steamworks' genutzt. Steamworks bezeichnet die Entwicklerunterstützung zum Erstellen, Hochladen und Veröffentlichen von Inhalten auf Steam. Mit Steamworks lässt sich die Plattform zum Bewerben der erstellten Inhalte anpassen. Es können auch Analysen durchgeführt und die VR-Applikation für die optimale Funktionalität auf möglichst vielen Endgeräten konfiguriert werden (Kapitel 12.2).

OBS Studio

OBS Studio ist eine freies und von Nutzenden mitentwickeltes Open Source-Softwarepaket für Videoaufnahmen bzw. Bildschirmaufzeichnung und Live-Streaming. OBS Studio wurde für Mitschnitte des Gameplays der VR-App sowie zum Abfilmen von programmierten Kamerafahrten

innerhalb der VR-App eingesetzt. Das entstandene Material wurde vor allem zur Erstellung eines Trailers und weiterer Präsentationsmaterialien verwendet.

CapCut

CapCut ist ein Videoschnittprogramm des Unternehmens ByteDance. Das Programm wurde hauptsächlich zur Bearbeitung von Inhalten für die vom selben Unternehmen stammende Social Media-App TikTok entwickelt, ist aber auch darüber hinaus für viele Projekte in der allgemeinen Videobearbeitung beliebt (Huang, 2023). CapCut wurde zur Erstellung des Trailers sowie zur Aufnahme und Bearbeitung der Audioanweisungen für 'Hamburg: Neue Burg VR' verwendet.

SPSS

SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ist ein Software-Paket zur statistischen Datenanalyse und wurde ursprünglich 1968 entwickelt. 2009 erfolgte die Übernahme durch das Unternehmen IBM, das bis heute Vertrieb und Weiterentwicklung übernimmt. Es existieren mehrere Varianten von SPSS, hier wurde im Speziellen SPSS Statistics 29 verwendet. Die Software bietet Funktionalitäten zu Eingabe, Import und Verwaltung von Studien-Datenbanken sowie zur statistischen und grafischen Analyse (Morgan et al., 2020).

SPSS wurde zur Sammlung der Studiendaten (Kapitel 8) sowie zu deren Analyse und Auswertung verwendet (Kapitel 9 & 10).

8 Studien zur Orientierung und Nutzungszufriedenheit in VR

Es wurden zwei Studien durchgeführt: Zunächst beleuchtet die Segeberg-Studie (Kapitel 8.1 & 9) als Vorstudie die Herangehensweise an bisherige VR-Projekte. Sie wurde für eine Übersicht des Nutzungsverhaltens und der Bewertung der Teilnehmenden von offenen, historischen VR-Welten an einem bereits bestehenden VR-Projekt durchgeführt. Die Orientierungsstudie (Kapitel 8.2. & 10) testet als Hauptstudie verschiedene Orientierungshilfen und deren Einfluss auf Nutzungsverhalten, Wegfindung und Befähigung zur Erstellung einer kognitiven Karte.

8.1 Segeberg-Studie

8.1.1 Das Projekt 'Segeberg 1644'

Das Projekt 'Segeberg 1644' entstand ab 2016 als Nachfolgeprojekt zu einer frühen Visualisierung der Siegesburg (Deggim et al., 2017a) und zum virtuellen Museum Alt-Segeberger Bürgerhaus (Deggim et al., 2017c; Kersten et al., 2017b) und entwickelte sich aus einer langjährigen Zusammenarbeit des damaligen Fachbereichs Geomatik (inzwischen: Geodäsie & Geoinformatik) der HCU mit dem Betreiber des Museums Alt-Segeberger Bürgerhaus in Bad Segeberg in der Forschung und vor allem in der Lehre (Kersten et al., 2014).

Das Projekt hatte die digitale Rekonstruktion der Städte Segeberg und Gieschenhagen (später vereint zu Bad Segeberg) in ihrem neuzeitlichen Zustand im Jahre 1644 zum Ziel. Diese 3D-Rekonstruktion wurde in eine VR-Anwendung eingebettet, welche es den Nutzenden erlaubt, mittels VR-Brille und Handcontrollern die gesamte Stadt zu erkunden. Kernbestandteil dieser Anwendung ist die Rekonstruktion und digitale Begeharmachung der ab 1644 zerstörten Siegesburg, dessen reales Vorbild nicht mehr existiert. Auch der darunterliegende Kalkberg wurde größtenteils abgetragen, sodass die Siegesburg heute aus dem Stadtbild und dem Bewusstsein der Einwohnenden von Bad Segeberg verschwunden ist und durch zeitgenössischere Attraktionen ersetzt wurde (Hinrichsen, 2020). Das Projekt soll dementsprechend helfen, die Siegesburg und ihre Geschichte wieder aufleben zu lassen und einen Beitrag zur historischen Wissensvermittlung und Dokumentation zu leisten.

Die rekonstruierte Stadtfläche beträgt 1,8 x 1,6 Kilometer. Neben den Burggebäuden wurden über 300 Stadtgebäude modelliert und texturiert. Die umgebene Landschaft wurde mit Weiden, Äckern, Wiesen und Wäldern gestaltet und schließlich zur Auflockerung mit vielen Alltagsgegenständen wie Fässern, Truhen, etc. dekoriert (Deggim et al., 2017b). Abbildung 14 zeigt eine Übersicht über die Stadtfläche und die Burg. Seit 2018 wird die VR-Anwendung in unregelmäßigen Abständen sowohl in Bad Segeberg als auch auf verschiedenen Veranstaltungen in der Umgebung sowie nationalen und internationalen wissenschaftlichen Konferenzen der Öffentlichkeit vorgestellt und zugänglich gemacht.

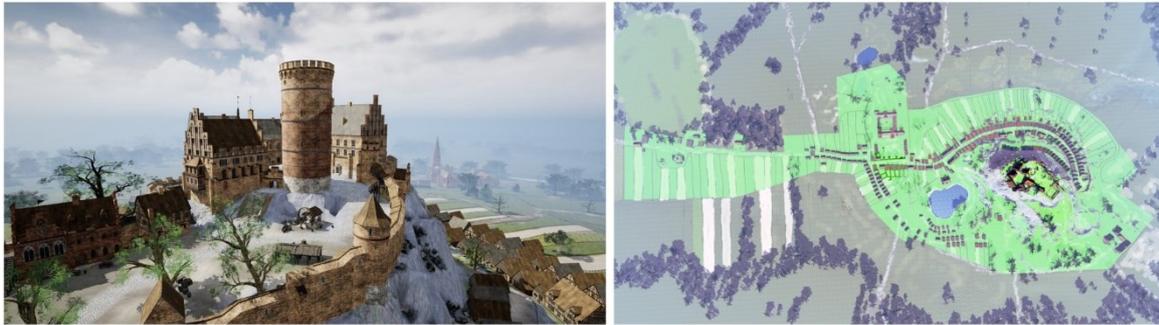


Abbildung 14. Links: Rekonstruktion der Siegesburg und der umliegenden Stadt. Rechts: Draufsicht auf das virtuelle Modell. Der für die Studie begehbare Bereich ist in grün markiert.

8.1.2 Ziel der Segeberg-Studie

'Segeberg 1644' war eines der ersten Projekte mit einer frei begehbaren, weitläufigen Stadtfläche. Das Projekt offenbarte und unterstrich in Testvorführungen viele der in Kapitel 1 genannten Fragestellungen. Ziel dieser Studie ist eine erste Übersicht über

- a) die generelle Akzeptanz der Technologie und die Erwartungshaltung an den Einsatz von VR im (musealen) Kontext der (historischen) Wissensvermittlung und
- b) die Einschätzung der Teilnehmenden über ihre Fähigkeit, sich in VR zurechtzufinden und die VR-Anwendung ohne und mit Hilfestellung zu bedienen.

Dieses VR-Projekt besitzt keinerlei Hilfen zur Orientierung, kein Tutorial und bis auf die Teleportation und drei 'Schnellreisepunkte' enthält es auch keine Interaktionen. Es stellt in diesen Punkten somit das Gegenteil zur Orientierungsstudie und zu 'Hamburg: Neue Burg VR' dar und eignet sich daher gut für einen Vergleich, um Erkenntnisse über das Nutzungsverhalten ohne und mit den entsprechenden Funktionen zu erhalten.

8.1.3 Teilnehmende

An der Segeberg-Studie haben insgesamt 102 Personen teilgenommen. Die Teilnehmenden sind gemäß den Angaben des Historikers, der die Studie vor Ort durchgeführt hat, hauptsächlich Einwohnende von Bad Segeberg und wurden aus den Besuchenden mehrerer stadthistorischer Nachmittagsveranstaltungen in Bad Segeberg rekrutiert, dessen Hauptzweck in der Präsentation des VR-Projekts 'Segeberg 1644' bestand.

8.1.4 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen ist zweiseitig und so konzipiert, dass er nach der Benutzung von 'Segeberg 1644' innerhalb einiger Minuten ausgefüllt werden kann. Er enthält 22 Fragen. Die ersten zehn Fragen dienen zur Bildung einer Einordnung auf der 'System Usability Scale' (SUS) (Brooke, 1996). Diese Skala dient einer schnellen Einschätzung, wie bedienungsfreundlich ein System ist und wird

ermittelt, indem Testpersonen nach der Benutzung des Systems Fragen zu dessen Komplexität, Lernkurve und ggf. Widersprüchen beantworten. Das Ergebnis ist ein Wert über die subjektive Einschätzung des objektiv nur schwer fassbaren Parameters 'Bedienungsfreundlichkeit' und lässt sich mit Werten anderer, ähnlicher Systeme vergleichen. Eine Einordnung nach der SUS wurde auch im VR-Kontext schon mehrfach vorgenommen (Korkut & Surer, 2023; Othman et al., 2022). Nach den Fragen zur SUS folgen sechs Fragen zum Orientierungssinn, zu Motion Sickness und zur eigenen Erfahrung mit VR und digitalen Medien im Allgemeinen. Weitere vier Fragen dienen dazu, Erwartungen und Wünsche der Testpersonen an die VR-Anwendung in Erfahrung zu bringen. Zuletzt werden Alter und Nutzungsdauer abgefragt.

Angelehnt an die Vorgaben für den SUS sind fast alle Fragen durch Ankreuzen einer ordinalen Skala mit einem Wertebereich von eins bis fünf zu beantworten. Davon weichen die Fragen zu Alter und Nutzungsdauer ab. Außerdem sind Antworten zu zwei Fragen der Kategorie 'Erwartungen und Wünsche' als Textantworten zu formulieren. Es wurde darüber hinaus bei der Formulierung der Fragen darauf geachtet, dass die höchste Bewertung auf der ordinalen Skala nicht immer der höchsten positiven Zustimmung der Frage entspricht. Stattdessen wurden einige Fragen im negativen Sinn formuliert (z. B. „Ich bin *nicht* der Meinung, dass...“), um zu vermeiden, dass die Testpersonen in einen Automatismus verfallen, wenn sie generell zufrieden oder unzufrieden sind, sondern sie zum sorgfältigen Durchlesen und Beantworten der Fragen zu bewegen. Diese Methodik wurde ebenfalls von der SUS übernommen (Brooke, 1996).

Der Fragebogen zur Segeberg-Studie ist im Anhang A zu finden.

8.1.5 Durchführung der Segeberg-Studie

Die Segeberg-Studie wurde im Zeitraum vom Juli 2021 bis zum November 2021 in Bad Segeberg durchgeführt. Sie fand im Rahmen von geführten Touren sowohl durch die VR-Anwendung als auch durch eine kleine begleitende Ausstellung mit Infotafeln und Roll-Ups im Gemeindesaal der dortigen Marienkirche statt. Die Testpersonen waren vorrangig für die Tour durch die VR-Anwendung anwesend und wurden erst vor Ort über die Möglichkeit der freiwilligen Studienteilnahme informiert. Die Besuchenden wurden nach Anmeldung in Kleingruppen zu einem ca. dreistündigen Nachmittag eingeladen, der neben der VR-Tour auch einige Vorträge eines Historikers beinhaltete. Nach einer Einführung in die Thematik wurde den Besuchenden angeboten, einzeln (mit Begleitung des Historikers) eine geführte Tour durch das digitale historische Segeberg zu unternehmen. Die Touren sollten durchschnittlich zwischen 15 und 30 Minuten dauern. Die anderen Anwesenden konnten die aktuelle VR-Tour entweder auf einem großen Bildschirm verfolgen oder aber sich die begleitende Ausstellung anschauen. Das Ausfüllen des Fragebogens geschah auf freiwilliger Basis nach der VR-Tour.

Der Historiker wurde vorher umfangreich in die Bedienung der VR-Ausrüstung eingewiesen. Bei der Durchführung der Touren wurde außerdem darauf geachtet, dass nur Teilnehmende der VR-Touren die Studie ausfüllen konnten und nicht Beobachtende, welche die Tour zwar auf dem Bildschirm verfolgt, aber selbst die VR-Brille nicht aufhatten. Auch mehrfach Teilnehmende der Touren wurden von einer zweiten Teilnahme der Studie ausgeschlossen.

Trotz dieser Maßnahmen ist darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei vorrangig um eine Kombination aus Informations- und Unterhaltungsveranstaltung unter museumsdidaktischen Gesichtspunkten handelte und weniger um ein wissenschaftlich-neutrales Setting. Dazu trug auch

der Interessenskonflikt des Historikers als Tourguide auf der einen und als Durchführer der Studie auf der anderen Seite bei, was zu (ungewollter) Beeinflussung der Teilnehmenden führen konnte. Zusätzlich kann mit einem Lerneffekt der Teilnehmenden gerechnet werden, welche die Tour bereits mehrfach von außen beobachtet haben, bevor sie selbst an der Reihe waren. Auch wenn die Bedingungen für die Durchführung der Studie somit nicht optimal waren, wurde dennoch eine Auswertung durchgeführt (Kapitel 9.1), um generelle Anhaltspunkte zur Einschätzung der Teilnehmenden zur VR entsprechend der Zielsetzung (Kapitel 8.1.2) zu gewinnen.

8.1.6 Auswertungsmethodik

Die Auswertung wurde in IBM SPSS vorgenommen (Kapitel 7.2). Alle abgegebenen Fragebögen konnten für die Auswertung berücksichtigt werden. Als abgeleitete Größe wurde zunächst der SUS_{Score} berechnet. Um einen Wert zwischen 0 (niedrigste Bedienungsfreundlichkeit) und 100 (höchste Bedienungsfreundlichkeit) zu erhalten, wurden die angegebenen Werte der SUS-Fragen nach Brooke (1996) zusammengerechnet.

$$SUS_{Score} = 2,5 * ((Q_1 - 1) + (5 - Q_2) + (Q_3 - 1) + (5 - Q_4) + (Q_5 - 1) + (5 - Q_6) + (Q_7 - 1) + (5 - Q_8) + (Q_9 - 1) + (5 - Q_{10})) \quad (2)$$

Diese Formel berücksichtigt die Tatsache, dass die Fragestellungen (Q_1 bis Q_{10}) die Zustimmung zur höchsten Bedienungsfreundlichkeit alternierend dem niedrigsten und dem höchsten Wert der Skala zuordnen.

Die Fragen Q_{12} und Q_{14} fragen dieselbe Einschätzung zu der Frage ab, ob man sich zutrauen würde, sich in der VR-Anwendung auch ohne fremde Hilfe zurechtzufinden. Jedoch ist die Frage für Q_{12} negativ und für Q_{14} positiv formuliert, sodass die überzeugte Einschätzung, selbstständig seine Ziele finden zu können, für Q_{12} zum Ankreuzen der '1' (niedrigste Zustimmung) und für Q_{14} zum Ankreuzen der '5' (höchste Zustimmung) führen sollte. Der Wert $\Delta HelpNeeded$ beschreibt, wie weit die Testpersonen in ihren Antworten voneinander abweichen und ist ein zusätzlicher Indikator dafür, wie aufmerksam der Fragebogen bearbeitet wurde.

$$\Delta HelpNeeded = Q_{12} - (6 - Q_{14}) \quad (3)$$

Die weiteren Resultate ergeben sich aus einem Vergleich der Häufigkeitsverteilungen und Mittelwerte der einzelnen Parameter untereinander.

Die Freitextantworten wurden Kategorien zugeteilt. Für Q15 („Um Ziele in der VR-Anwendung selbstständig finden zu können, würde ich mir folgende Orientierungshilfen wünschen:") ließen sich die Antworten in die Kategorien 'keine Angabe', 'Wegweiser', 'Beschriftung', 'Mini-Map/Karte' und 'Sonstiges' einteilen. Für Q19 („Ich würde mir folgende zusätzliche Funktionen (z. B. für Komfort, Information, Unterhaltung, ...) wünschen:") wurden die Kategorien 'keine Angabe', 'Menschen/Tiere', 'Audio', 'Fortbewegung', 'Umfang' und 'Interaktionen' verwendet.

8.2 Orientierungsstudie

8.2.1 Ziel der Orientierungsstudie

Wie in den Kapiteln 3.4 und 5.3 beschrieben besteht eine große Problematik in der Verbreitung von Open-World-VR für ein unerfahrenes Zielpublikum in der Schwierigkeit, sich a) im virtuellen Raum zu orientieren und b) die für viele neuartige Bedienung in ausreichend kurzer Zeit zu verstehen. Im Rahmen dieser Orientierungs-Studie soll insbesondere der Nutzen verschiedener Hilfsmittel zur Orientierung in VR untersucht werden. Neben der reinen Zielfindung soll auch der Einfluss der Hilfsmittel zur Erstellung einer kognitiven Karte sowie Erkenntnisse über allgemeines Nutzungsverhalten in VR-Welten bei selbstbestimmter Fortbewegung beleuchtet werden.

8.2.2 Teilnehmende

An der Studie haben insgesamt 64 Personen teilgenommen (28 weiblich, 35 männlich, 1 divers). Der Kreis der Teilnehmenden bestand zu ca. 90% aus Mitarbeitenden oder Studierenden der HCU. Die Altersverteilung ist auf Abbildung 27a in Kapitel 10.1.1 dargestellt und zeigt die überwiegende Altersgruppe der 21- bis 35-jährigen, was auf den hohen Anteil der Studierenden bzw. der jüngeren wissenschaftlichen Mitarbeitenden zurückzuführen ist.

8.2.3 Konzept & Aufbau

Hilfsmittel und Landmarken

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wurde zunächst ein Studienkonzept erstellt, welches sich auf das Testen der Hilfsmittel und den Vergleich untereinander fokussiert. Es wurden sechs Hilfsmittel ausgewählt, basierend auf den in Kapitel 5 vorgestellten bisherigen Lösungsansätzen sowie auf den im Rahmen der Segeberg-Studie abgegebenen Vorschlägen (Kapitel 9.1). Diese sind auf Abbildung 15 dargestellt und bestehen aus

- a) einer statischen 2D-Karte am Start des Labyrinths,
- b) der Möglichkeit, die 2D-Karte am Handcontroller mit herumzutragen und sich die eigene Position auf der Karte anzeigen zu lassen (Mini-Map),
- c) einer statischen 3D-Karte am Start des Labyrinths,
- d) der Einblendung eines Richtungspfeils vor der Testperson, der sowohl die Richtung für den kürzesten Weg zum Ziel weist als auch die zu gehende Entfernung anzeigt,
- e) einer roten Linie auf dem Boden, welche dynamisch von der aktuellen Position der Testperson den kürzesten Weg zum Ziel weist und
- f) statischen Wegweisern, die an jeder Abbiegemöglichkeit den kürzesten Weg aufzeigen.

Um neben der Zielfindung auch den Einfluss der Hilfsmittel auf die Befähigung zur Erstellung einer kognitiven Karte der Umgebung zu testen, wurde eine Landmarke erstellt, repräsentiert durch einen 20 Meter hohen roten Turm, die in jedem Labyrinth platziert wurde. Die Hilfsmittel wurden auch entsprechend ihres unterschiedlichen Grades an Abhängigkeit von externen

Orientierungspunkten ausgewählt. So gibt es Hilfsmittel, die ein initiales Einprägen der Umgebung voraussetzen (2D-Karte, 3D-Karte) sowie eine zweite Kategorie, die aus Hilfsmitteln besteht, welche auch während des Durchlaufens der Labyrinth Informationen über den einzuschlagenden Weg preisgeben (2D-Karte am Controller, Richtungspfeil, Navigationslinie, Wegweiser). Als Referenz sollte zudem auch immer ein siebter Durchlauf ohne jegliche Hilfe durchgeführt werden. Um den Einfluss der Gewöhnung an die VR-Umgebung und der zu erwartenden schnelleren Handhabung der Steuerung mit fortschreitender Testzeit zu minimieren, wurde sowohl die Reihenfolge der Labyrinth als auch der Hilfsmittel über einen Zufallsgenerator bestimmt. Somit wurde auch sichergestellt, dass Kombinationen aus bestimmten Hilfsmitteln und Labyrinth nicht gehäuft auftreten, um trotz der Ähnlichkeit der Labyrinth Einflüsse der Schwierigkeit eines Labyrinths auf die Ergebnisse zu minimieren.

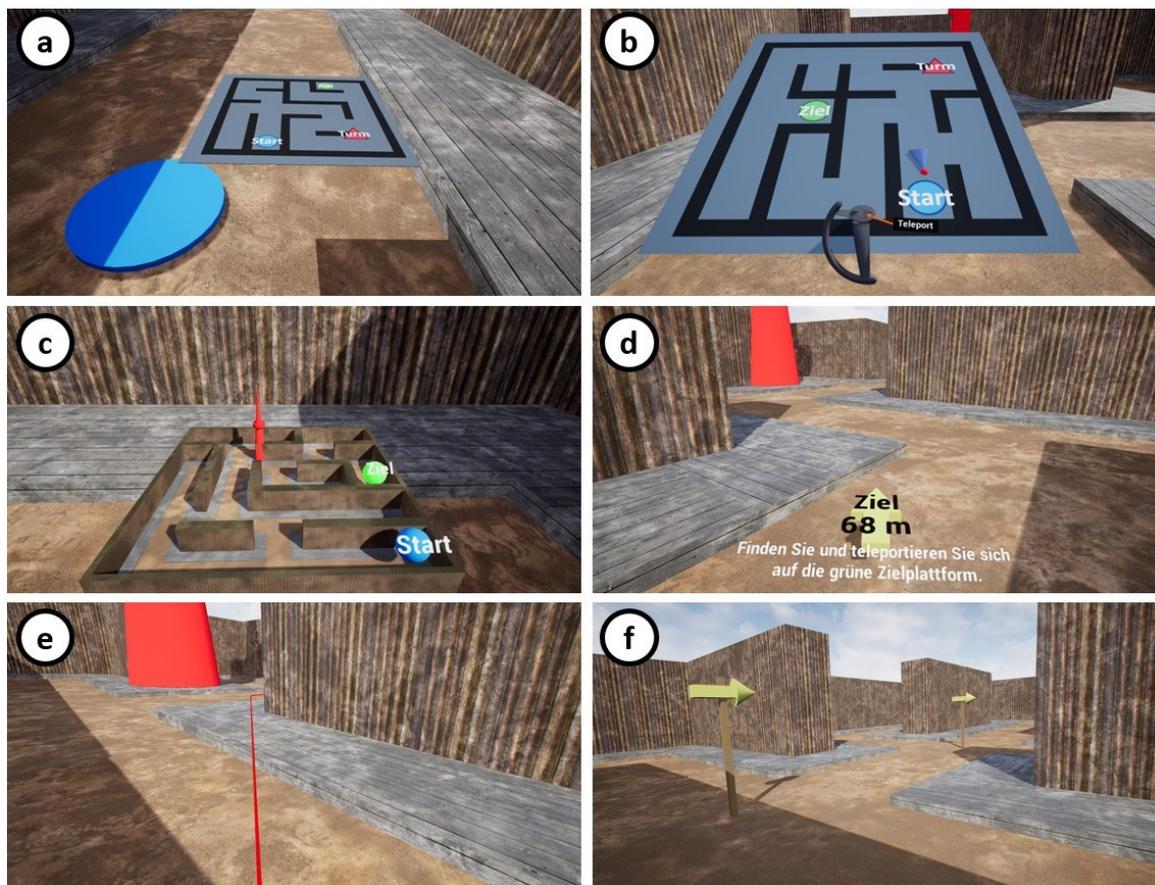


Abbildung 15. Übersicht über die sechs Hilfsmittel, wie sie den Testpersonen in der Studie erscheinen.

Virtuelle Testumgebung

Das Konzept machte die Abstrahierung der Umgebung und die Reduktion auf eine generische virtuelle Umwelt nötig, um schwer messbare Einflussfaktoren zu vermeiden. So wurde auf die Verwendung bereits vorhandener virtueller Welten als Testumgebung verzichtet, da diese unterschiedliche Arten von Landmarken enthalten und mitunter – sofern sie aus populären Anwendungen entnommen wurden oder aber einen Teil der realen Welt nachbilden – den Testpersonen bekannt sein könnten. Stattdessen wurden mit bewusst einfach gehaltenen Modulen mehrere Labyrinth erzeugt, aus denen die Testumgebungen bestanden. Diese Module sind quadratisch und besitzen eine (virtuelle) Kantenlänge von fünf Metern. Fünf Grundmodule waren nötig (Gerade, Kurve, Kreuzung, T-Kreuzung und Sackgasse) um durch Anordnung und

Wiederholung der Module jede beliebige Labyrinthform auf einem rechtwinkligen Grid zu erzeugen.

Das Erstellen mehrerer, unterschiedlich aufgebauter Labyrinth war nötig, um Gewöhnungseffekte zu minimieren, auf der anderen Seite sollten die Ergebnisse dennoch miteinander vergleichbar bleiben. Daher wurde bei der Erstellung der Module und der daraus zusammengesetzten Labyrinth auf die Einhaltung mehrerer Kriterien geachtet. Jedes Labyrinth besteht aus 25 Modulen, angeordnet in einem 5x5-Grid. Start- und Zielpunkt wurden immer in einer Sackgasse platziert, sodass die Startrichtung und die Ankunftsrichtung beim Ziel vorgegeben sind, was die Fokuslenkung bei der Programmierung der Erklärungen vereinfachte (siehe Kapitel 8.2.4). Darüber hinaus wurde auf eine Vergleichbarkeit der Lösungswege geachtet. So müssen bei jedem Labyrinth für den optimalen Weg elf Module durchlaufen werden (inklusive Start- und Zielmodul). Jedes Labyrinth besitzt eine Alternativroute, die jedoch länger als die optimale Route ist. Außerdem weichen die Anzahl der nötigen Drehungen (fünf bis sieben) und der Abzweigungsentscheidungen (vier bis sechs) für die optimale Route nur wenig voneinander ab. Schließlich wurde bei der Platzierung der Landmarke darauf geachtet, dass sie nicht in einer Sackgasse steht und die Testperson auf dem Weg zum Ziel zwangsweise an ihr vorbeikommt. Da jede Testperson sieben Labyrinth durchläuft (sechsmal mit und einmal ohne Hilfsmittel), wurden insgesamt sieben unterschiedliche Labyrinth (sowie ein Tutorial-Level) erstellt, die auf Abbildung 16 dargestellt werden.

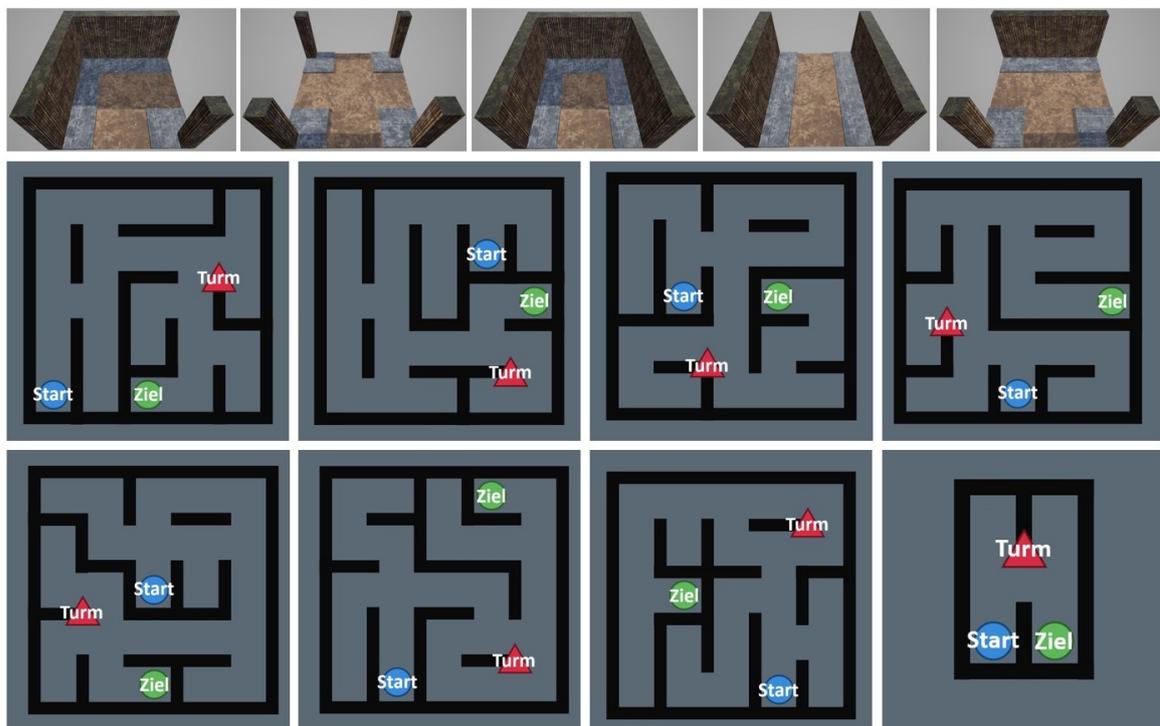


Abbildung 16. Obere Reihe: Fünf Grundmodule zum Aufbau der Labyrinth. Mittlere & untere Reihe: Karten der sieben Labyrinthwelten sowie des Tutorials.

Nutzersteuerung

Es wurde davon ausgegangen, dass der Großteil der Testpersonen wenig bis gar keine Erfahrung mit VR hat. Wie bereits in Kapitel 5.4 erläutert, stellt VR für Unerfahrene eine vollständig neue Visualisierungs- und Interaktionsform dar und es muss damit gerechnet werden, dass diese Personen einer Erklärung und Eingewöhnung bedürfen, um sich in der VR-Welt zurechtzufinden. Um die zu lernenden Elemente auf ein Minimum zu reduzieren und dieses Minimum möglichst

intuitiv zu gestalten, wurde für diese Studie ein vereinfachtes Interaktionskonzept gewählt, welches lediglich zwei Knöpfe am VR-Controller für den Input benötigt. Dieser Input besteht aus einem Knopf für die Fortbewegung (Teleportation) und einem Interaktionsknopf, mit dem alle Auswahlmöglichkeiten während der Studie aktiviert werden können. Außerdem wurde der Studie ein Tutorial vorangesetzt, damit sich die Testpersonen an die Steuerung gewöhnen und alle relevanten Interaktionen im Voraus ausprobieren können. Dieses Tutorial diente außerdem als Kontrolle für die Studienaufsicht, um festzustellen, ob die Teilnehmenden sowohl die Steuerung der Anwendung an sich als auch die gestellten Aufgaben hinreichend verstehen. Bei Unklarheiten sollte das Tutorial auch eine Möglichkeit für die Teilnehmenden bieten, um offene Fragen zur Steuerung zu stellen, da die anschließenden Labyrinth nach Möglichkeit vollständig autark durchlaufen werden sollten, um äußere Einflüsse auf die Ergebnisse zu vermeiden. Aus demselben Grund wurden auch alle Studienanweisungen und Tutorialeklärungen vorher eingesprochen und innerhalb der Applikation akustisch abgespielt, um dieselben Erklärungen der Hilfsmittel für alle Testpersonen zu garantieren. Die Textskripte für die Instruktionen finden sich im Anhang B. Zusätzlich wurde die aktuelle Aufgabe permanent als Hinweistext im unteren Blickfeld der Testperson eingeblendet, wie beispielsweise auf der Abbildung 15d sowie auf den Abbildungen 20b, 20c und 20d zu sehen ist.

8.2.4 Programmierung & Parameter

Das Studienkonzept erforderte die Programmierung der Testumgebung, der Orientierungshilfen, des Tutorials sowie der Fortbewegung und der Interaktionen. Als Entwicklungsumgebung kam die Unreal Engine 4.26 und deren visuelle Skriptsprache der 'Blueprints' zum Einsatz (siehe Kapitel 7.2). Neben der Erhebung der Parameter während der Studie wurde auch der Fragebogen zu allgemeinen Angaben, Einschätzungen und Erfahrungen der Testpersonen in die Applikation mit einprogrammiert, um die Datenerhebung zu einem hohen Grad zu vereinheitlichen und zu automatisieren, sowie die weiteren Auswertungsschritte zu vereinfachen. Eine schematische Übersicht des Programmablaufs ist auf Abbildung 18 zu sehen.

Orientierungshilfen

Als Hilfsmittel wurden zunächst diejenigen erstellt, welche individuell jedem Labyrinth angepasst werden mussten. Dazu gehören die 2D-Karte, die 3D-Karte und die Wegweiser.

Die 2D-Karten bestehen, wie auf Abbildung 15 zu sehen, aus einer stilisierten, minimalistischen Draufsicht auf das jeweilige Labyrinth. Lediglich die Wände sind als schwarze Striche auf einem grauen Hintergrund eingezeichnet. Außerdem sind der Startpunkt, der Zielpunkt und die Position der Landmarke eingezeichnet und beschriftet. Die Ausrichtung der Karten und der Schrift ist egozentrisch in Bezug auf die Startausrichtung der Testperson im jeweiligen Labyrinth. Die statischen 2D-Karten wurden am jeweiligen Startpunkt schräg rechts vor der Testperson platziert.

Die 3D-Karte besteht aus stark verkleinerten Versionen der Labyrinth-Module. Die Testpersonen blicken beim Betrachten der 3D-Karte somit auf eine exakte Miniaturabbildung des Labyrinths. Auch in der 3D-Karte wurden Startpunkt, Zielpunkt und Landmarke mit Symbolik und Schrift markiert, wie auf Abbildung 15 zu sehen ist. Die Platzierung erfolgte am selben Ort wie die 2D-Karte.

Die Wegweiser bestehen aus einem einfachen 3D-Modell eines Pfeils, welcher auf einem Stab platziert ist. Diese Modelle wurden entlang des kürzesten Lösungsweges an jeder Abzweigung

mittig im Abzweigungsmodul platziert. Jedes Labyrinth enthält also zwischen vier und sechs Wegweiser als mögliches Hilfsmittel. Beim Design der Labyrinth wurde darauf geachtet, dass der erste Wegweiser direkt vom Startpunkt aus sichtbar ist.

Die Hilfsmittel 'Navigationslinie' und 'Richtungspfeil' basieren auf einem Routingsystem, welches zunächst programmiert werden musste. Dazu wurde auf ein bereits in die Unreal Engine implementiertes Navigationssystem als Basis zurückgegriffen. Dieses System definiert zunächst unter Angabe von mehreren Parametern wie dem Gesamtbereich, minimaler Abstand von Wänden, maximaler Neigungswinkel des Bodens, Berücksichtigung oder Ignorierung bestimmter Objekte in der 3D-Welt bei der Wegberechnung etc. die Bereiche in den Labyrinthen, welche von den Avataren der Testpersonen angesteuert werden dürfen. Somit kann beispielsweise definiert werden, dass die Labyrinthwände als unpassierbar gelten, während andere 3D-Objekte wie die Visualisierung der Navigationslinie, des Richtungspfeils oder andere vor den Testpersonen schwebende Textanweisungen lediglich als visuelle Einblendung und nicht als blockierendes Objekt bei der Wegfindung interpretiert werden. Aus diesen Informationen wird das Engine-intern genannte 'Navigation Mesh' erstellt, welches alle gültigen, begehbaren Bereiche beinhaltet. Da die Labyrinth alle ebenerdig sind, stellt das Navigation Mesh in allen Labyrinthen eine zweidimensionale Fläche dar. Diese Fläche wird in einzelne Polygone unterteilt, dessen Zentren wiederum die Knotenpunkte für den Graphen zur Wegfindung bilden. Da es keine speziellen Wegkosten gibt und diese lediglich proportional zur Länge der Verbindungen zwischen den Knotenpunkten sind, lässt sich unter Angabe des Start- und Zielpunktes die kürzeste Verbindung berechnen. Diese Verbindung lässt sich über ein Array auslesen, welches die Positionen der abzugehenden Knotenpunkte in korrekter Reihenfolge beinhaltet. Schließlich wird über alle diese Punkte eine Schleife gelegt und jeder Knotenpunkt mit dem jeweils nächsten über eine visuelle Repräsentation (in diesem Fall eine rote Linie, die 'Navigationslinie') miteinander verbunden. Eine weitere Anpassung bestand in der Dynamisierung dieses Systems. Wenn Testpersonen vom optimalen Weg abkommen, verlieren sie auch die Navigationslinie, sofern diese Linie statisch unveränderbar ist. Stattdessen wird die Verbindung nach jeder Bewegung der Testperson neu berechnet. Die Position der Testperson wird dabei als neuer Startpunkt definiert und die Navigationslinie zeigt somit immer die aus Sicht der Testperson kürzeste Verbindung zum Ziel an, selbst wenn diese vom optimalen Weg abgekommen ist.

Der Richtungspfeil nimmt dieselbe Wegfindung zur Grundlage, visualisiert aber nicht die Verbindung zwischen den Knotenpunkten. Stattdessen wird lediglich der Standpunkt der Testperson und der Ort des ersten Knotenpunkts auf dem Weg zum Ziel ausgelesen, aus diesen beiden Punkten eine Richtung berechnet und ein dynamischer Pfeil in dieser Richtung eingeblendet, der sich nach jeder Bewegung der neuen Ausrichtung zum nächsten Knotenpunkt anpasst. Die Positionierung ist dabei so gewählt, dass sie in einem Abstand von ca. einem Meter am unteren Rand des Sichtfelds der Testperson liegt, sofern diese horizontal in Richtung des nächsten Knotenpunktes blickt. Somit wird das Sichtfeld nicht versperrt, die Information ist aber dennoch leicht zu finden. Zusätzlich zu dem Pfeil an sich wird eine Beschriftung auf dem Pfeil eingeblendet, welche die Entfernung zum Ziel in Metern angibt. Dazu werden alle Knotenverbindungen der Wegfindung zusammengerechnet und ausgegeben. Abbildung 17 verdeutlicht schematisch die Berechnung der Wegfindung für die Navigationslinie und den Richtungspfeil.

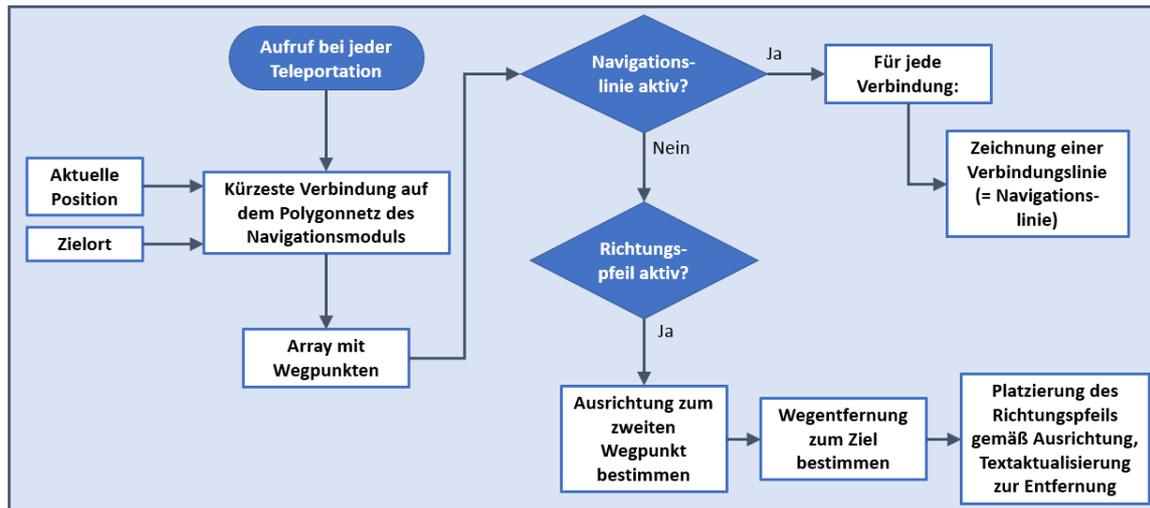


Abbildung 17. Schema der Programmierung der Navigationslinie und des Richtungspfeils.

Das Hilfsmittel '2D-Karte am Controller' ist ein Hybrid aus statischem und dynamischem Hilfsmittel. Die 2D-Karte wird hierbei zunächst in etwas verkleinerter Version an den linken Handcontroller angedockt und bewegt sich somit mit der Testperson mit – abhängig von deren Handhaltung. Außerdem wird die Position der Testperson und deren Sichtkegel auf dieser Karte visualisiert. Sie entspricht somit dem VR-Pendant einer klassischen Mini-Map (Kapitel 5.2). Zur Visualisierung der Position wurde die absolute Position der Testperson innerhalb des Labyrinths in das Koordinatensystem der 2D-Karte transformiert und auf dieser Karte mit einem roten Punkt angezeigt. Zusätzlich wurde die Blickrichtung der Testperson ausgelesen, die sich aus der Ausrichtung der VR-Brille im virtuellen Raum ergibt. Auch diese Information wurde auf das Koordinatensystem der 2D-Karte transformiert und dort durch einen blauen Kegel visualisiert. Bei Rotation des Kopfes dreht sich der Sichtkegel auf der Karte in Echtzeit mit und die Testperson erhält somit laufend Informationen über ihre Ausrichtung relativ zum umgebenden Labyrinth.

Der Programmierung der Hilfsmittel an sich folgte die Implementation der Logik, wann welches Hilfsmittel aktiviert und deaktiviert werden soll. Bei der Initialisierung werden beim Programmstart der Studie zunächst alle Hilfsmittel deaktiviert. Entsprechend des Konzepts der zufälligen Verteilung der Hilfsmittel und Labyrinth (Kapitel 8.2.3) wurde für die Labyrinth und die Hilfsmittel jeweils eine Liste erstellt, aus denen bei Aktivierung eines neuen Labyrinths per Zufall ein Eintrag ausgewählt (und anschließend aus der Liste der zur Verfügung stehenden Einträge gelöscht) wurde. Für das ausgewählte Hilfsmittel wurden anschließend alle erforderlichen Schritte zur Aktivierung vorgenommen. Für die statischen Hilfsmittel beinhaltet dieser Schritt somit das Einblenden der jeweiligen 3D-Objekte, bei den dynamischen Hilfsmitteln wurde zusätzlich die Berechnung der Position / die Wegfindung gestartet. Abbildung 18 zeigt schematisch die Programmierlogik des Studienablaufs.

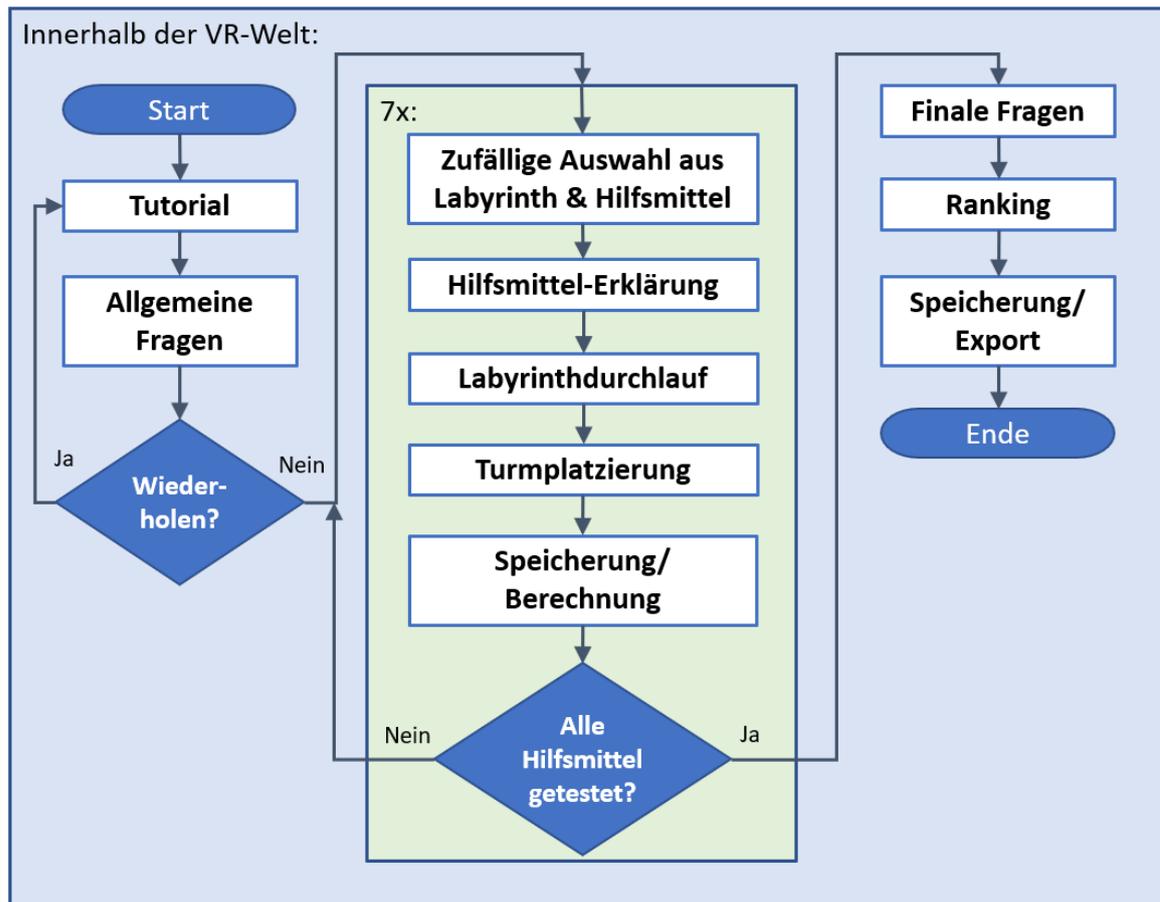


Abbildung 18. Schema des Studienablaufs innerhalb des VR-Programms. Abläufe vor dem Start und nach Beendigung des Programms werden in Kapitel 8.2.5 erläutert.

Steuerung & Interaktionen

Die Fortbewegung erfolgt diskontinuierlich mittels eines virtuellen Teleports über jeweils einige Meter Distanz. Das Auslösen der Teleportaktion wurde mit einer Taste auf den Handcontrollern verknüpft. Die Bedienung wird im Tutorial am Anfang des Studienablaufs erläutert. Umgesetzt wird diese Fortbewegung mit einer Reihe von Abfragen, die in Abbildung 19 schematisch dargestellt sind. Bei Betätigung der Taste für den Teleport wird zwischen zwei Zuständen unterschieden: 'Button Down' und 'Button Up'. Ersterer beschreibt den Zustand, wenn die Taste gedrückt, aber noch nicht losgelassen wurde. Wenn dieser Zustand ausgelöst wird, wird ausgehend von der Position und Ausrichtung des Controllers ein Strahl simuliert, der einer Wurfpavel folgt und somit nach kurzer Zeit auf den Boden trifft. Somit entsteht ein Bereich mit einem Radius von einigen Metern um die Testperson herum, in dem jeder Punkt abhängig von der Handhaltung beim Drücken der Teleport-Taste angesteuert werden kann. Der Strahl selbst wird durch farbige Zylinder visualisiert, der Auftreffpunkt auf dem Boden wird gesondert durch einen Kreis mit Anzeige der Blickrichtung visualisiert. Während die Taste gedrückt wird, werden Strahl und Auftreffpunkt laufend aktualisiert. Die Testperson kann die Teleportpavel also in Echtzeit anpassen, bevor sie sich für die Ausführung des Teleports entscheidet. Bei der Erstellung der Teleportpavel erfolgen außerdem Abfragen, ob die Pavel mit einem unpassierbaren Objekt kollidiert und ob der Auftreffpunkt innerhalb des gültigen Navigationsbereichs (siehe oben) liegt. Sind nicht alle Voraussetzungen erfüllt, wird der Auftreffpunkt entweder auf einen nahen gelegenen, gültigen Aufenthaltsort verschoben oder aber es wird kein gültiger Auftreffpunkt angezeigt.

Der zweite Zustand 'Button Up' beschreibt die eigentliche Ausführung der Teleportation. Sobald die Teleport-Taste losgelassen wird und eine gültige Lösung aus dem vorherigen Zustand 'Button Down' vorliegt, wird der Auftreffpunkt als neuer Standpunkt definiert und die Position der Testperson sprunghaft aktualisiert. Vor einem erneuten Teleport muss nun wieder zunächst der Zustand 'Button down' aktiviert werden.

Die Erlaubnis zur Teleportation wird vom Programm während der Studie mehrfach erteilt und wieder entzogen, um sicherzugehen, dass die Testpersonen sich nur dann fortbewegt, wenn es auch vorgesehen ist und nicht abgelenkt wird, wenn beispielsweise Hilfsmittel erklärt werden oder Fragen beantwortet werden sollen.

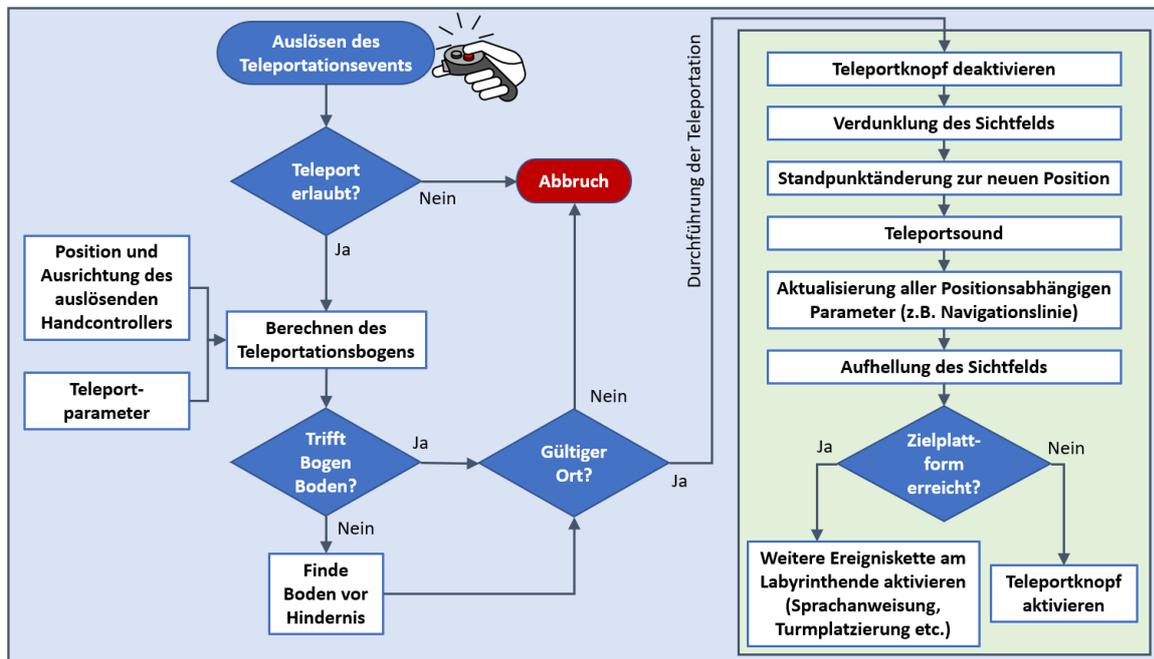


Abbildung 19. Schematische Darstellung der Teleportationsabläufe für die Studie und die VR-App.

Es gibt zwei Arten an Interaktionen in der Studie: Das Betätigen von virtuellen Antwortknöpfen und das Platzieren eines Turmes am Ende jedes Labyrinths. Da diese Interaktionsarten nie gleichzeitig vorkommen, werden sie der Einfachheit halber mit derselben Interaktionstaste ausgelöst. Für alle Fragen der Studie wurden Arrays aus auffälligen Knöpfen erstellt, die an Quiz-Buzzer erinnern. Die Testpersonen wurden dazu aufgefordert, beim Beantworten der Fragen den Handcontroller an den Knopf mit der zutreffenden Antwortmöglichkeit zu führen und die Interaktionstaste zu betätigen. Dieser Bewegungsablauf entspricht recht genau demjenigen, der auch in der Realität beim Drücken von Knöpfen ausgeführt werden würde und wurde dementsprechend zur möglichst einfachen Bedienung der Studie ausgewählt. Programmiert wurde die Auswahl der Knöpfe mithilfe einer unsichtbaren Aktivierungskugel, welche um jedes interaktive Element definiert wurde. Sobald der Handcontroller innerhalb einer Aktivierungskugel ist und gleichzeitig die Interaktionstaste gedrückt wird, wird der zugehörige Knopf aktiviert und die entsprechende Antwortmöglichkeit gespeichert. Auf dieselbe Weise wird am Anfang eines jeden Labyrinths der Start-Knopf programmiert, den die Testpersonen drücken müssen, um mit dem Durchlaufen des Labyrinths zu beginnen. Dieser selbstgewählte Startmoment wurde eingeführt, um den Testpersonen Zeit zu geben, sich das jeweils aktive Hilfsmittel genau anzuschauen.

Bei der zweiten Interaktionsart wird am Ende jedes Labyrinths abgefragt, ob sich die Testperson die Position der Landmarke (des roten Turms) merken konnte. Dazu wird ein kleines 3D-Modell

am Zielpunkt eingeblendet. Es handelt sich dabei um dasselbe Modell, dass auch für die Hilfsmittel-Variante '3D-Karte' verwendet wird. Während diese Frage aktiv ist, wird laufend die Position des rechten Handcontrollers der Testpersonen abgefragt. Wenn sich dieser Handcontroller in der Nähe des 3D-Modells befindet, wird ein Vorschau-Modell der Landmarke an der nächstgelegenen Position im Modell angezeigt. Die möglichen Positionen des Turmes folgen dabei einem Raster und sind nur an den Eckpunkten der Module möglich. Bei Bewegung des Handcontrollers über das Modell bewegt sich das Vorschau-Modell der Landmarke also sprunghaft zum jeweils nächstgelegenen Eckpunkt. Durch Betätigung der Interaktionstaste wird der Modellturm platziert, die Position gespeichert und anschließend zur Berechnung des Abstands zur wahren Position der Landmarke verwendet (Kapitel 8.2.6).

Auch hier soll das automatische Visualisieren und die laufende Anpassung der Position des Turmes dazu beitragen, dem realen Vorgang des Platzierens eines Objekts auf in einem vor der Testperson stehenden Modell möglichst nahe zu kommen.

Parameter & Speicherung

Während des Studienverlaufs wurden automatisch während der Labyrinthdurchläufe bzw. automatisiert nach Eingabe der Testpersonen insgesamt 85 Parameter erhoben bzw. als direkte Ableitung aus gemessenen Daten berechnet und abgespeichert. Diese Parameter setzen sich zusammen aus 15 allgemeinen Parametern, welche die Gesamtheit der Studie betreffen (Tabelle 3) sowie 10 Parametern, die für jeden der sieben Labyrinthdurchläufe (und somit für jedes Hilfsmittel) individuell neu erhoben wurden (Tabelle 4). Zu den allgemeinen Parametern zählen neben Fragen zur Testperson auch Parameter, die sich aus Aufsummierung oder Durchschnittswerten aller individuellen Parameter einer bestimmten Kategorie ergeben. Bei der Auswahl der individuellen Parameter wurden zunächst drei Stück für die Bestimmung der Effizienz des Hilfsmittels definiert (Zeit vom Start bis zum Ziel, Gesamt-Teleportdistanz und Anzahl der Teleportations-Vorgänge), sowie ein Parameter zur Abfrage der kognitiven Karte (Fehlerwert bei der Platzierung der Landmarke).

Die erhobenen Parameter wurden zunächst programmintern gespeichert. Am Ende der Studie wurden alle Werte nach Beantwortung der letzten Frage automatisch nach Hilfsmittel sortiert, in das csv-Format (comma separated value) transformiert anschließend exportiert.

Table 3. Erhobene allgemeine Parameter für jeden Studiendurchlauf.

| Name | Beschreibung | Werte | Erhebung/Berechnung |
|--|--|--|----------------------------------|
| ID Test Subject | ID | individuell | Vergabe beim Start der Studie |
| Age Range | Alter | <21 21-35 36-50 51-65 >65 | Abfrage nach dem Tutorial |
| Gender | Geschlecht | Männlich Weiblich Divers | Abfrage nach dem Tutorial |
| VR Experience | Vorerfahrung mit VR | keine kaum etwas viel sehr viel | Abfrage nach dem Tutorial |
| Spatial Knowledge | Selbsteinschätzung zum Orientierungssinn | sehr schlecht schlecht durchschnittlich gut sehr gut | Abfrage nach dem Tutorial |
| Motion Sickness | Selbsteinschätzung zur Motion Sickness | gar nicht kaum etwas viel sehr viel | Abfrage am Ende der Studie |
| Tutorial Runs | Anzahl der Tutorialdurchläufe | individueller Zahlenwert | Berechnung nach dem Tutorial |
| Worlds Completed | Anzahl der durchlaufenen Labyrinth | individueller Zahlenwert | Aufsummierung am Ende der Studie |
| Overall Number Of Teleports | Gesamtzahl der Teleports über alle Labyrinth | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende der Studie |
| Overall Teleport Distance | Gesamtdistanz aller Teleports über alle Labyrinth | individueller Zahlenwert | Aufsummierung am Ende der Studie |
| Overall Average Teleport Distance | Durchschnittliche Teleportdistanz | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende der Studie |
| Overall Time To Start | Gesamtzeit zwischen Beginn der Erklärung des jeweiligen Hilfsmittels und dem selbstgewähltem Startzeitpunkt des Labyrinths | individueller Zahlenwert | Aufsummierung am Ende der Studie |
| Overall Average Time To Start | Durchschnittliche Zeit bis zum selbstgewählten Startzeitpunkt des Labyrinths | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende der Studie |
| Overall Tower Placement Distance | Gesamtfehler der Turmplatzierung | individueller Zahlenwert | Aufsummierung am Ende der Studie |
| Overall Average Tower Placement Distance | Durchschnittlicher Fehler der Turmplatzierung | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende der Studie |

Tabelle 4. Erhobene individuelle Parameter für jeden einzelnen Labyrinthdurchlauf (sieben Mal pro Testperson).

| Name | Beschreibung | Werte | Erhebung/ Berechnung |
|---------------------------|--|--|--|
| World Number | Nummer des Labyrinths | 1 – 7 | Feste Labyrinth-ID |
| Order In Study | Zufällig zugewiesene Position in der Reihenfolge des Studienablaufs | 1 – 7 | Zufällige Zuordnung der Hilfsmittel zu Beginn jedes Labyrinths |
| Help Type | Art des Hilfsmittels | 2D-Karte 2D-Karte am Controller 3D-Karte Richtungspfeil Navigationslinie Wegweiser keine Hilfe | - |
| Time To Finish | Zeit vom Start bis zum Finden des Ziels | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende des Durchlaufs |
| Total Teleport Distance | Gesamtdistanz des Durchlaufs | individueller Zahlenwert | Aufsummierung während des Durchlaufs |
| Number Of Teleports | Teleportanzahl des Durchlaufs | individueller Zahlenwert | Aufsummierung während des Durchlaufs |
| Average Teleport Distance | Durchschnittliche Distanz pro Teleport | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende des Durchlaufs |
| Time To Start | Zeit zwischen Beginn der Erklärung des jeweiligen Hilfsmittels und dem selbstgewähltem Startzeitpunkt des Labyrinths | individueller Zahlenwert | Berechnung am Anfang des Durchlaufs |
| Tower Placement Distance | Fehler der Turmplatzierung | individueller Zahlenwert | Berechnung am Ende des Durchlaufs |
| Ranking | Positionierung in der subjektiven Rangliste der Hilfsmittel | 1 – 7 | Abfrage am Ende der Studie |

Tutorial

Den Feststellungen in Kapitel 5.4 entsprechend ist insbesondere für eine VR-Anwendung eine Einführung der Testpersonen in die (ungewohnte) Bedienung unerlässlich. Die Untersuchung der Wirkung des Tutorials war zwar nicht zentraler Bestandteil dieser Studie, dennoch wurden dem Studienkonzept folgend Beobachtungen angestellt, inwieweit die Testpersonen mit der Bedienung der VR-Studie zurechtkamen und an welchen Stellen Klärungsbedarf bestand. Diese Erkenntnisse sollten sowohl während der Studie durch Beobachtungen des Verhaltens der Testpersonen als auch nach dem Durchlaufen des VR-Programms in einem kurzen Gespräch gewonnen werden.

Für das Tutorial wurde eine sehr kleine Labyrinthversion gebaut, die lediglich aus sechs Modulen besteht. Bei Beginn der Studie wird die Testperson von einer Stimme begrüßt, die den Ablauf der

Studie erklärt. Anschließend werden alle sechs Hilfsmittel erklärt und kurz eingeblendet, um den Testpersonen alle notwendigen Informationen bereits einmal zu Beginn mitzuteilen. Gleichwohl wird im selben Schritt darauf hingewiesen, dass bei jedem Labyrinth das jeweilige Hilfsmittel nochmal erklärt wird, um zu vermeiden, dass die Testpersonen mit der Informationsflut überfordert sind und das Gefühl bekommen, sich alles auswendig merken zu müssen. Danach erfolgt die Erklärung der Interaktion und des Teleports. Beide Elemente werden nacheinander erklärt, visuell vorgeführt und das Tutorial läuft erst weiter, wenn sowohl eine Interaktion als auch ein Teleport von der Testperson erfolgreich durchgeführt wurde. Diesen Erklärungen folgt die Möglichkeit der Akklimatisierung an die Steuerung. Die Testperson wird dazu aufgefordert, den Teleport mehrmals auszuprobieren und sich zum Ziel des Tutorials zu begeben. Beim Erreichen des Zieles wird die Platzierung der Landmarke im 3D-Modell des Labyrinths erklärt. Auch diese Aktion muss die Testperson erfolgreich ausführen, um fortfahren zu können. Das Tutorial endet schließlich mit einer Reihe an Fragen, welche die Testperson durch Drücken von Antwortknöpfen (siehe oben) beantworten muss. Die Programmierung entspricht dabei weitgehend dem Ablauf eines normalen Labyrinthdurchlaufs, allerdings ohne Zufallselemente und ohne Messung der individuellen Labyrinth-Parameter. Die Programmierungsabläufe folgen im Tutorial einer linearen Anordnung an Ereignissen, die durch die Testpersonen nacheinander ausgelöst werden. Abschließend wird der Testperson die Möglichkeit gegeben, mit der Studie fortzufahren und die Labyrinthdurchläufe zu starten oder aber – sofern Unsicherheiten im Umgang mit der Steuerung bestanden – das Tutorial zu wiederholen.

Das Tutorial (wie auch die gesamte Studie) wurde mehrfach mit einer kleinen Zahl an Personen getestet, um missverständliche Anweisungen zu korrigieren, Programmierfehler zu finden und unerwartete Verhaltensmuster der Testpersonen zu erkennen, das nach Möglichkeit schon in der Programmierung abgefangen werden sollte. Das Tutorial innerhalb der VR-Anwendung wurde außerdem durch eine Kurzeinweisung durch die Studienaufsicht in die Bedienung der Controller vor dem Aufsetzen der VR-Brille ergänzt.

8.2.5 Durchführung der Orientierungsstudie

Die Studie wurde vom Juli bis November 2022 an der HCU durchgeführt. Mit jeder Testperson wurden Einzeltermine vereinbart, welche jeweils ca. 20 – 30 Minuten dauerten. Die größte Zeitvariabilität kam hierbei durch den Umfang der Rückmeldung der Testperson nach Durchlauf des VR-Programms zustande. Als Räumlichkeiten kamen sowohl ein Büroraum mit ausreichend Bewegungsfläche als auch das weitläufige Geolabor des Studiengangs Geodäsie & Geoinformatik zum Einsatz. Die Software-Version war stets dieselbe. Als Hardware wurden die VR-Brille Valve Index (Büro) und die HTC Vive Pro (Geolabor) sowie die in diesen Räumlichkeiten verfügbaren VR-fähigen PCs verwendet. Die einzelnen Studientermine wurden von einer Studienaufsicht angeleitet und von ihr nach einem festgelegten, im Folgenden beschriebenen Schema durchgeführt:

- 1) Die Testperson wird begrüßt.
- 2) Die groben Zwecke der Studie werden erklärt, dabei werden die Schlagwörter 'Orientierung' und 'Nutzersteuerung' genannt.
- 3) Im Rahmen eines kurzen Smalltalks zu VR soll ggf. Vorwissen der Testperson in Erfahrung gebracht werden, um einschätzen zu können, ob und wieviel Unterstützung beim Durchlaufen des Tutorials nötig sein wird.

- 4) Die Rahmendaten werden erklärt: Dauer der Studie (Nennung von 15 – 20 Minuten reiner VR-Zeit) und Erklärung der Aufgabe (Labyrinth durchlaufen, kleine Aufgaben lösen und Fragen beantworten).
- 5) Eine Kurzeinweisung in die Bedienung der Controller mit den Hauptfunktionen Teleport und Interaktion wird gegeben.
- 6) Die Testperson wird auf die Startposition in der Mitte der Bewegungsfläche platziert und zum Aufsetzen der VR-Brille aufgefordert, bei Bedarf mit Hilfe durch die Studienaufsicht.
- 7) Es folgen zwei Sicherheitshinweise: a) Die Möglichkeit der Kabeleinwicklung muss beachtet werden und es wird b) darauf hingewiesen, dass es zu Motion Sickness kommen kann. Die Testperson wird ermutigt, bei Auftreten von Symptomen oder sonstigen Gründen die Studie jederzeit abzubrechen und die VR-Brille sofort abzusetzen.
- 8) Es wird erklärt, dass die Studie möglichst autark durchgeführt werden und die Studienaufsicht nach Möglichkeit nicht eingreifen soll. Dies gilt explizit nicht für das Tutorial, welches ja zum Lernen und zu Klärung von Unklarheiten da ist.
- 9) Der Testperson wird die Möglichkeit für Rückfragen gegeben.
- 10) Das VR-Programm wird gestartet.

Der Ablauf innerhalb des VR-Programms ist auf Abbildung 18 in Kapitel 8.2.4 dargestellt. Abbildung 20 zeigt Ausschnitte der VR-Studie.



Abbildung 20. Impressionen der Studiendurchführung: a) Zielplattform, b) Informationen über die Testperson wurden über dieses Buzzer-System abgefragt, c) Turmplatzierung am Ende jedes Labyrinths, d) Ranking-Angabe am Ende der Studie.

Nach dem Durchlaufen der VR-Studie wurden folgende Schritte durchgeführt:

- 11) Absetzen der VR-Brille.
- 12) Zunächst wird nach Eindrücken/Kommentaren gefragt. Die Testperson soll so die Möglichkeit erhalten, von sich aus Rückmeldung zu geben und eigene Kernpunkte anzusprechen / Fragen zu stellen.
- 13) Je nach Entwicklung des Gesprächs folgen Fragen zu beobachtetem Verhalten, z. B. bei der Art der Orientierung oder Gründe für die Auswahl beim Ranking.

- 14) Die Testperson wird verabschiedet, ggf. werden wichtige Aspekte der Rückmeldung sowie Beobachtungen während der Studie notiert. Abschließend wird die VR-Brille für die nächste Testperson gereinigt.

8.2.6 Auswertungsmethodik

Die in Kapitel 8.2.4 beschriebenen erhobenen Parameter wurden auch in dieser Studie mit IBM SPSS ausgewertet (Kapitel 7.2). Von den insgesamt 67 Datensätzen wurden drei als ungültig aussortiert bzw. die Studiendurchführung vorzeitig abgebrochen: einmal aufgrund technischer Probleme bei der Konfiguration der VR-Umgebung, einmal aufgrund Überforderung mit der Bedienung der Handcontroller und einmal aufgrund einer Sprachbarriere und Verständnisschwierigkeiten bei den Studienanweisungen. Somit standen 64 Datensätze für die Auswertung zur Verfügung.

Hauptparameter

Bei der Studienkonzeption wurden zunächst drei Parameter definiert, mit denen sich potentiell direkte Aussagen über die Wirksamkeit der Hilfsmittel treffen lassen: Die Zeit, die gebraucht wird, um das Ziel zu erreichen (Parametername: 'Time To Finish'), die Anzahl der dafür notwendige Teleportationen ('Number Of Teleports') und die Gesamtdistanz, die zwischen Start und Ziel per Teleportation zurückgelegt wurde ('Total Teleport Distance'). Beobachtungen während der Studiendurchführung haben gezeigt, dass die ersten beiden Parameter nur sehr bedingt zur Analyse herangezogen werden können, da sie durch mehrere Faktoren beeinflusst werden, welche die Aussagekraft in Bezug auf die Hilfsmittel schmälern. Die Zeit zum Komplettieren eines Labyrinths war vor allem von der Handhabung der Controller und dem Verständnis der Steuerung abhängig. Das Suchen nach Knöpfen auf dem Controller bzw. die Gewöhnung an die VR-Umgebung an sich und die neue Art der Fortbewegung kostet Zeit und überlagert somit den Zeitverlust, der durch Orientierungslosigkeit entsteht. Selbst bei vergleichbarem Vorwissen würde der Zeitparameter in erster Linie die Fähigkeit zum schnellen Drücken von Knöpfen messen. Die Anzahl der Teleportationen ist wiederum von der Handhaltung der Testperson abhängig, welche die Teleportationsdistanz bestimmt (Kapitel 8.2.4), da dieselbe Distanz in wenigen großen oder mehreren kleinen Sprüngen überwunden werden kann. Aus diesen Gründen wurde auf eine Einbeziehung dieser Parameter für die Bestimmung der Effizienz der Hilfsmittel verzichtet und lediglich die zurückgelegte Gesamtdistanz pro Hilfsmittel in der Auswertung berücksichtigt. Zur Auswertung des Einflusses der Hilfsmittel auf die Befähigung zur Erstellung einer kognitiven Karte wurde der Turmfehler gewählt ('Tower Placement Distance'). Der Turmfehler beinhaltet die Distanz zwischen der tatsächlichen Position der Landmarke (Roter Turm) und der Verortung des Turms durch die Testperson am Ende jedes Labyrinths.

Um die Zufälligkeit bei der Reihenfolge der Labyrinthes sowie Gewöhnungseffekte zu testen, wurden Variablen berechnet, welche die beiden Hauptparameter (Gesamtdistanz und Turmfehler) einmal nach der Labyrinth-ID und einmal nach der Reihenfolge in der Studie sortiert.

T-Test

Die hauptsächliche Auswertung besteht im Vergleich der Hauptparameter für die verschiedenen Hilfsmittel untereinander und im Testen dieser Unterschiede auf Signifikanz. Für diesen Schritt wurde der einseitige T-Test (Student, 1908) in der Variante für abhängige Stichproben verwendet, da in dieser Studie alle Hilfsmittel von derselben Personengruppe getestet wurden. Die Einseitigkeit liegt in der Tatsache begründet, dass von einer Verbesserung der Werte gegenüber

den für die jeweilige Aufgabe (Wegfindung oder Turmplatzierung) weniger geeigneten Hilfsmitteln bzw. gegenüber gar keinem Hilfsmittel ausgegangen wird. Vor der Testung werden daher die Hilfsmittel entsprechend ihrer Mittelwerte sortiert und anschließend der T-Test durchgeführt. Der für den Test notwendige t-Wert ergibt sich aus dem Mittelwert der Unterschiede zwischen den Stichproben x_{diff} , der Standardabweichung dieser Differenzen s_{diff} und der Stichprobengröße n .

$$t = \frac{x_{diff} * \sqrt{n}}{s_{diff}} \quad (4)$$

Unter Angabe der Freiheitsgrade df und dem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ für einen einseitigen Test kann über die Tabellen der t-Verteilung der p-Wert ermittelt werden. Ein signifikanter Unterschied der Mittelwerte liegt vor, wenn $p < 0,05$. Die Effektstärke d der Signifikanz wurde ebenfalls berechnet (Cohen, 1992).

$$d = \frac{|t|}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Dabei gilt eine Effektstärke ab $d = 0,2$ als klein, ab $d = 0,5$ als mittel und ab $d = 0,8$ als stark. Dieselbe Auswertemethodik in der Variante für unabhängige Stichproben wurde auch auf den Test der Hilfsmittel gegen Eigenschaften unterschiedlicher Personengruppen wie beispielsweise das Alter angewandt. Darüber hinaus wurden auch zweiseitige T-Tests gegen einen Mittelwert durchgeführt, um die Zufälligkeit der Verteilung der Labyrinth und der Hilfsmittel zu testen.

9 Segeberg-Studie: Ergebnisse & Diskussion

9.1 Ergebnisse

Nicht alle Fragen wurden von allen Teilnehmenden der Studie beantwortet. Relative Angaben beziehen sich auf die Gesamtheit der für die jeweilige Frage abgegebenen Antworten.

9.1.1 Allgemeine Ergebnisse

Von den 102 Teilnehmenden der Studie heben die meisten Personen (32%, $n = 30$) sich der Altersspanne '51 – 65 Jahre' zugeordnet. Die überwiegende Mehrheit (79%, $n = 75$) hatte ein Alter von 36 oder älter und gehört somit zu Generationen, welche die Verbreitung der VR-Technologie frühestens im Erwachsenenalter erlebt haben (Abbildung 21a). Entsprechend geben 94% ($n = 91$) an, kaum oder gar keine Erfahrung mit VR zu haben (Abbildung 21b). Die meiste Erfahrung besteht bei der Gruppe der 21- bis 35-jährigen, gefolgt von den Teilnehmenden unter 20, wengleich mit recht großer Streuung (Abbildung 21c). Demgegenüber steht die Selbsteinschätzung zum generellen Wissen über digitale Medien, mit denen sich die überwiegende Mehrheit (80%, $n = 78$) gut auskennt (Abbildung 21d).

Eine knappe Mehrheit von 56% ($n = 54$) verbrachte zwischen 10 und 20 Minuten in der VR-Anwendung, weitere 40% ($n = 38$) über 20 Minuten. Nach Aussage der Studienaufsicht betrug die VR-Zeit in einigen Fällen bis zu 45 Minuten. Alle Teilnehmenden verbrachten mindestens fünf Minuten in der Anwendung.

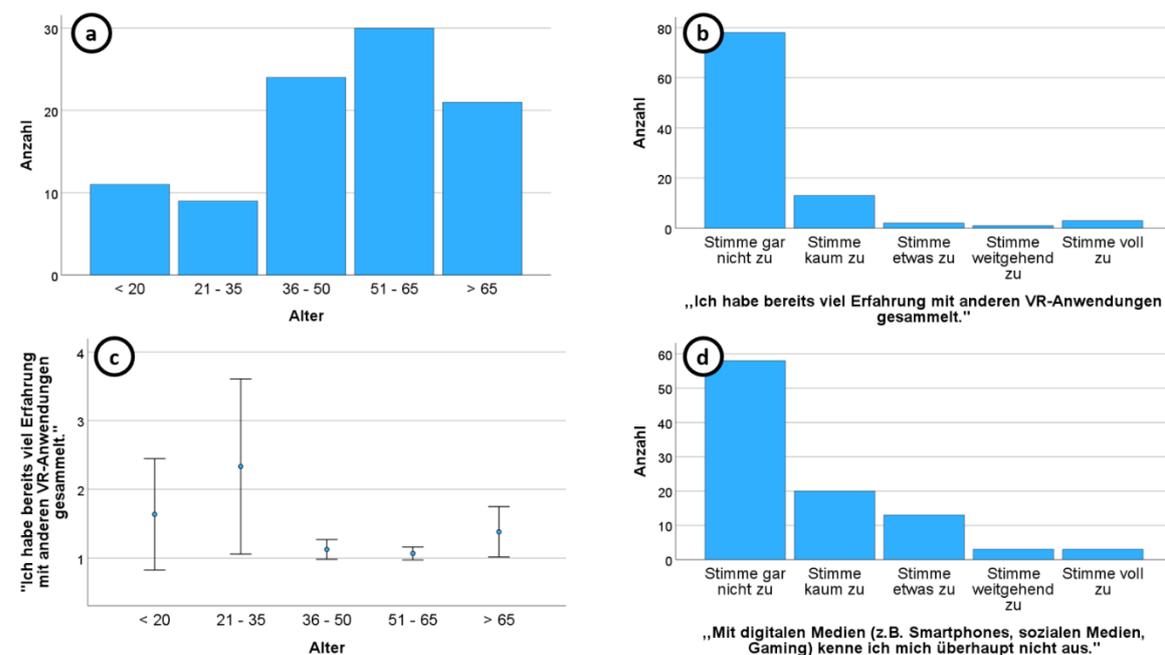


Abbildung 21. a) Altersverteilung, b) VR-Erfahrung, c) VR-Erfahrung in Abhängigkeit vom Alter (Zustimmungsskala von 1 bis 5), d) Vorerfahrung mit digitalen Medien.

Die meisten Teilnehmenden (75%, $n = 76$) verspürten keine oder kaum Symptome der Motion Sickness (Abbildung 22a). Verglichen mit dem Alter der Testpersonen lässt sich zwar eine starke

Schwankung und teils signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Altersgruppen, aber keine generelle zu- oder abnehmende Tendenz beim Auftreten der Symptome feststellen (Abbildung 22b).

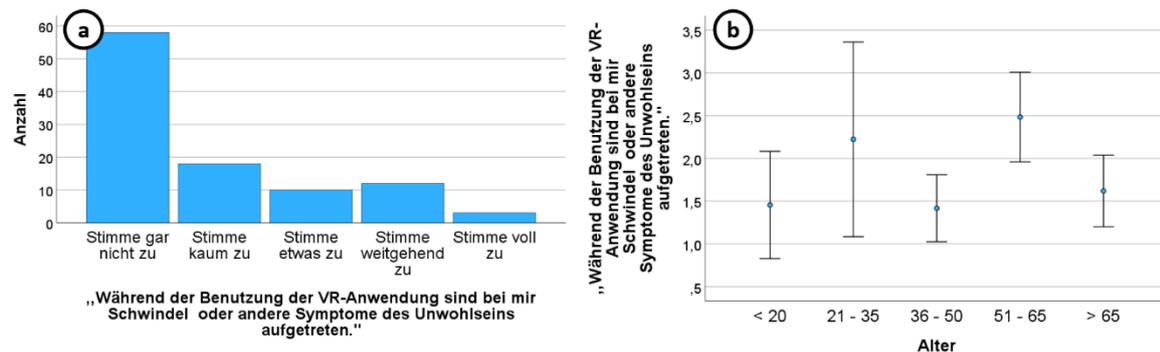


Abbildung 22. a) Verteilung Motion Sickness, b) Motion Sickness in Abhängigkeit vom Alter (Zustimmungsskala von 1 bis 5).

9.1.2 SUS

Der SUS_{Score} wurde gemäß der in Kapitel 8.1.6 beschriebenen Methodik berechnet. Über alle Teilnehmenden ergibt sich ein Score von 89,19 mit einer Standardabweichung (SD) von 12,29. Abbildung 23 offenbart leicht unterschiedliche Bewertungstendenzen abhängig vom Alter. Die unteren beiden Altersgruppen besitzen eine sehr hohe Streuung, wohingegen ab der mittleren Altersgruppe (36 bis 50 Jahre) eine leicht abnehmende Bewertung mit zunehmendem Alter zu erkennen ist. Während die 36- bis 50-jährigen noch einen Score von 93,44 vergeben (SD = 5,36), liegt er bei den 51- bis 65-jährigen bei 88,92 (SD = 11,02) und bei den über 65-jährigen bei 86,43 (SD = 9,80).

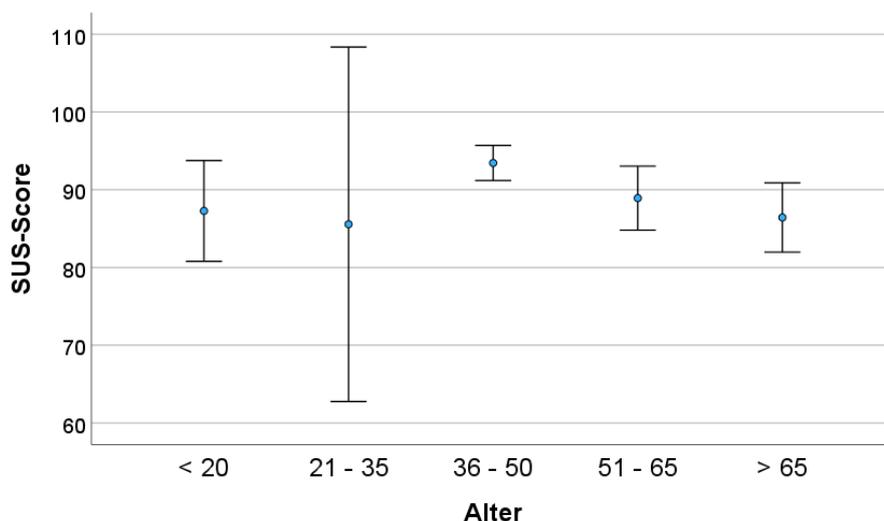


Abbildung 23. SUS-Score in Abhängigkeit vom Alter.

9.1.3 Hilfestellung & Wegfindung

Es gab mehrere Fragen im Fragebogen, die sich direkt oder indirekt auf Hilfestellungen bei der Benutzung und der Orientierung innerhalb der VR-App bezogen. Die abgeleitete Größe SUS_{Score} kommt ebenfalls in Teilen durch die Bewertung der (nicht-)selbstständigen Benutzung und Wegfindung zustande. Insbesondere zwei Fragen sprechen diese Thematik recht deutlich an: Q03 („Ich fand die VR-Anwendung einfach zu benutzen.“) und Q04 („Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um die VR-Anwendung benutzen zu können.“). Es handelt sich hierbei um eine positive und eine negative Formulierung eines sehr ähnlichen Frageinhalts. Die Abbildungen 24a und 24b zeigen die deutliche Tendenz, dass die Testpersonen die Benutzung als ganz oder teilweise einfach einschätzen (Q03: 92%, $n = 94$; Q04: 75%, $n = 77$). Dennoch zeigt die um 17 Prozentpunkte geringere Zustimmung bei der negativen Formulierung, dass trotz der generell einfachen Bedienung die Einschätzung zur zusätzlichen Hilfe einer technisch versierten Person nicht ganz so kategorisch ausgeschlossen wird, wenngleich auch hier die Einschätzung, selbstständig die Anwendung benutzen zu können, deutlich überwiegt.

Q12 („Ohne die Hilfe einer anderen Person würde ich mich in der VR-Anwendung hoffnungslos verlaufen.“) und Q14 („Ich denke, dass ich die meisten der auf den Plakaten vorgestellten Gebäude und Orte auch ohne fremde Hilfe in der VR-Anwendung finden würde.“) beziehen sich direkter auf die Fähigkeit zur Orientierung in VR. Auch hier überwiegt die Einschätzung, dass die Ziele auch ohne oder mit nur wenig Hilfestellung gefunden werden können (Abbildungen 24c & 24d), diese fällt mit 71% (Q12, $n = 77$) bzw. 54% (Q14, $n = 51$) aber deutlich geringer aus als bei den Fragestellungen zur allgemeinen Benutzung.

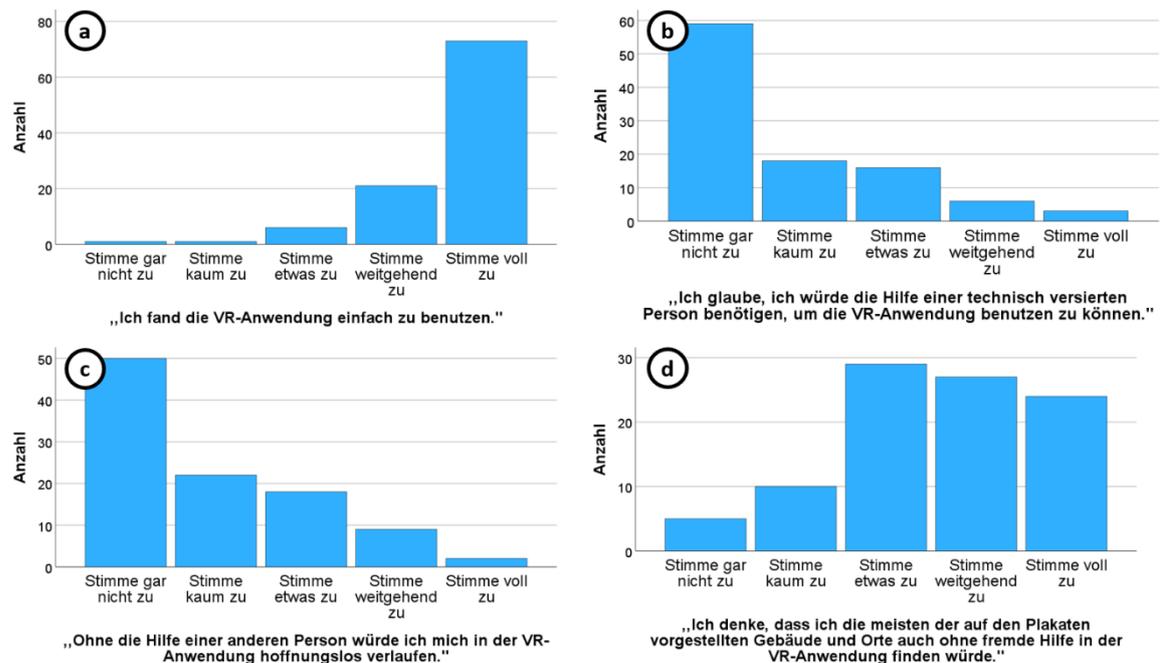


Abbildung 24. a & b) Einschätzung der Benutzbarkeit, c & d) Einschätzung der Orientierungsfähigkeit.

Die anhand von Q12 und Q14 abgeleitete Größe $\Delta HelpNeeded$ bestätigt, dass die Teilnehmenden den Fragebogen größtenteils aufmerksam gelesen haben und es nur wenige starke Abweichungen in der Beantwortung einer Person zwischen der positiven und negativen Formulierung einer Frage gab. Abbildung 25 zeigt die Verteilung. 75% ($n = 70$) stimmten trotz unterschiedlicher

Formulierungen in ihren Angaben überein oder lagen nur eine Kategorie daneben. Mögliche Gründe für einen hohen $\Delta HelpNeeded$ -Wert werden in Kapitel 9.2 diskutiert. Bei der Frage nach zusätzlichen Wünschen zur Erleichterung der Orientierung (Q15) gab es generell nur wenige Vorschläge (35%, n = 36). Von den abgegebenen Vorschlägen fielen die meisten zu gleichen Teilen in die Kategorien 'Wegweiser' und 'Mini-Map/Karte' (jeweils 39%, n = 14). Weitere fünf Vorschläge nannten Beschriftungen in der VR-Welt zur besseren Orientierung (14%).

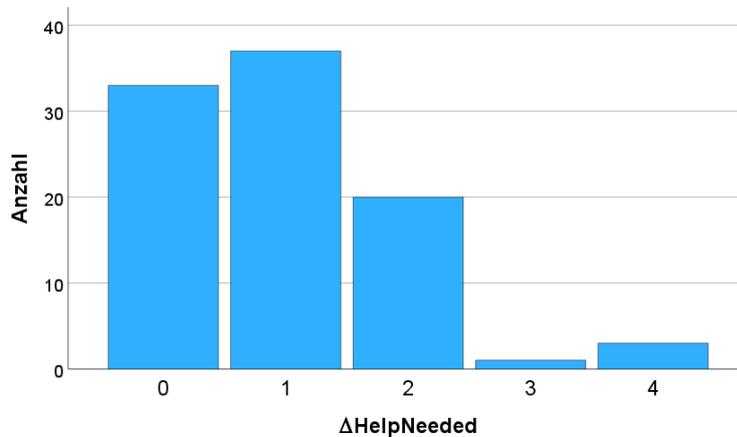


Abbildung 25. Verteilung von $\Delta HelpNeeded$. Ein Wert von 0 bedeutet eine exakte Übereinstimmung bei positiver oder negativer Formulierung. Die maximale Differenz von 4 tritt bei gleichzeitiger voller Zustimmung oder Ablehnung beider Fragen auf.

9.1.4 Erwartungen & Akzeptanz

Neben Vorschlägen zur besseren Orientierung konnten auch Textvorschläge für gewünschte Funktionalitäten/Inhalte abgegeben werden (Q19). Auch hier hat die Mehrheit (59%, n = 60) keine Angabe gemacht, obwohl knapp die Hälfte (48%, n = 46) zumindest teilweise der Meinung war, dass weitere Funktionen der VR-Anwendung gutgetan hätten (Q18). Von den abgegebenen Vorschlägen wünschten sich 45% (n = 19) eine lebendigere Ausgestaltung der VR-Welt mit Menschen und Tieren, 26% (n = 11) zusätzliche Interaktionen mit der Umwelt wie auswählbare Objekte und 17% (n = 7) einen größeren Umfang bzw. mehr Details, wie beispielsweise die Möglichkeit zum virtuellen Betreten der historischen Stadtgebäude. Vereinzelt wurde der Wunsch nach Audioausgabe und anderen virtuellen Fortbewegungsmöglichkeiten (z. B. Fliegen) geäußert.

Zwei Fragen beschäftigten sich mit der allgemeinen Akzeptanz der VR-App: bezogen auf einen selbst („Ich denke, dass ich die VR-Anwendung gerne häufiger benutzen würde.“, Q01) und als Empfehlung für andere („Ich würde diese VR-Anwendung weiterempfehlen.“, Q20). Beiden Fragen wird stark zugestimmt (Abbildung 26). Dabei fällt der Anteil derjenigen, die die VR-Anwendung mit weitgehender oder voller Zustimmung anderen empfehlen würden (97%, n = 94) etwas höher aus als dieselbe Zustimmung zur eigenen Wiederbenutzung (92%, n = 94).

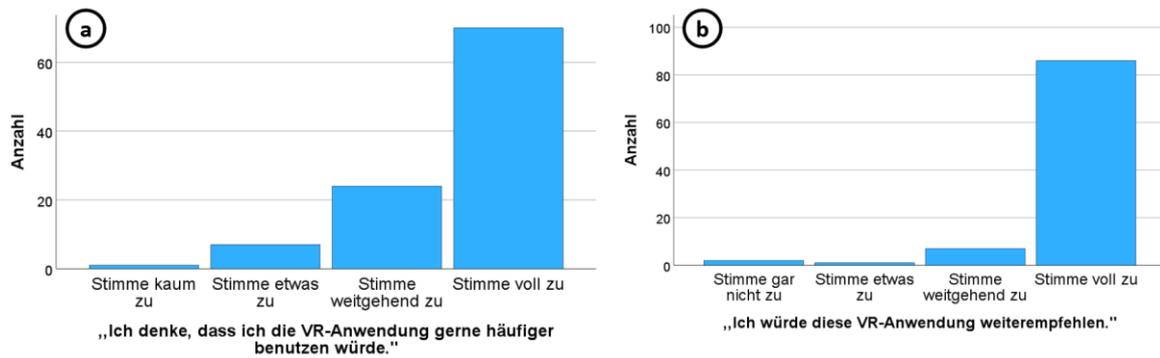


Abbildung 26. a) Einschätzung zur wiederholten Benutzung, b) Einschätzung zur Empfehlung an Dritte.

9.2 Diskussion

Demographie

Die Altersverteilung der Teilnehmenden ist unüblich für eine VR-Studie, da die meisten Laborstudien – so auch die in Kapitel 9.3 und 9.4 ausgewertete Orientierungsstudie – oft mit deutlich jüngeren Testpersonen arbeiten, die sich zudem oft aus Studierenden oder Mitarbeitenden derselben Forschungseinrichtung rekrutieren und somit ein gewisses Maß an Fachwissen mitbringen (Keil et al., 2021a; Y. Yang et al., 2018; Zagata et al., 2021). Die Diskrepanz zwischen den verfügbaren interessierten Testpersonen und einer ausgewogenen Alters- und Wissensverteilung kann durchaus signifikante Auswirkung auf die Ergebnisse haben, insbesondere wenn es um Themen oder Technologien geht, für die eine bestimmte Altersgruppe eine deutlich höhere Exposition erfahren hat (Abbildung 21c). Insofern entspricht sowohl der höhere Altersdurchschnitt als auch die durchschnittlich sehr geringe Vorerfahrung mit VR bei den Teilnehmenden dieser Studie viel eher den Werten, die man bei durchschnittlichen Nutzenden oder in einem musealen Kontext erwarten würde. Sehr geringes Vorwissen zur Thematik sorgt aber gleichzeitig für das Problem, dass die meisten Teilnehmenden keine Vergleichswerte besitzen. Für 80% war diese Studie nach eigener Angabe die allererste VR-Anwendung. Einschätzungen zur Bedienungsfreundlichkeit oder zur Qualität des Inhalts sind somit nur insofern aussagekräftig, dass sie vor allem die Erwartungshaltung widerspiegeln, die eine Person an diese Technologie und diese Anwendung hat.

SUS

Der sehr hohe SUS_{Score} von 89,19 zeigt zunächst eine generell hohe Akzeptanz der VR-Anwendung 'Segeberg 1644'. Das entspricht fast exakt dem Wert von Paulauskas et al. (2023) von 89,13, der ebenfalls für eine historische VR-Lernumgebung ermittelt wurde. Sie merken jedoch an, dass dieser Wert in erster Linie die Zufriedenheit der Testperson abbildet, die gestellten Aufgaben erfolgreich zu meistern. Dieser Effekt trifft auch auf diese Studie zu: Das Studiendesign sah keine Lösung einer bestimmten Aufgabe vor, sondern die Fragen bezogen sich auf den generellen Eindruck. Somit gab es zwar auch keinen Erfolgseffekt beim Abschließen einer Aufgabe, allerdings auch kein Gefühl des Versagens, wenn einer Testperson ersichtlich wird, dass sie eine Aufgabe nicht oder nur mangelhaft gelöst hat, was wiederum dazu führen kann, dass das gesamte VR-Erlebnis als negativ wahrgenommen und bewertet wird. Hinzu kommt, dass die Anwendung eine sehr geringe Komplexität hatte. Lediglich ein Knopf musste bedient werden, um alle Inhalte

und Orte erreichen zu können. Bei Bedienungsproblemen hat der Historiker im Rahmen der Führung geholfen und die Teilnehmenden wieder auf den richtigen Weg gebracht. Schließlich kann die fehlende Vorerfahrung dazu führen, dass 'Segeberg 1644' als erste Exposition mit dieser Technologie als Standard wahrgenommen wird und somit noch gar keine Erwartungen existieren, die übertroffen oder enttäuscht werden können.

Der SUS_{score} dieser Anwendung reiht sich auch in die Ergebnisse weiterer Studien ein: Korkut & Surer (2023) kommen für eine VR-Anwendung für ein virtuelles Museum auf einen SUS_{score} von 70,00 und Othman et al. (2022) auf einen Wert von 72,10, ebenfalls für eine Museumsanwendung. Beide Resultate sind zwar etwas niedriger, zeigen aber dennoch eine hohe Bedienungsfreundlichkeit. Der Unterschied wird auf die höhere Komplexität der Anwendungen in diesen Studien zurückgeführt. Bonali et al. (2021) nutzten eine eigene Skala zur Bestimmung der Nutzbarkeit ihrer Anwendung (eine Lernumgebung im Geo-Kontext), kommen aber auf ähnliche Zustimmungswerte zwischen 85% und 96%.

Wegfindung

Die Teilnehmenden schätzen sich selbst generell als sehr selbstständig ein. Trotz fehlender Vorerfahrung mit VR sind 75% der Meinung, dass sie keine Hilfe bei der Benutzung benötigt hätten. Und immerhin 54% - 71% (je nach Fragestellung) glauben, dass sie sich ohne oder mit nur wenig Unterstützung in der mehrere Quadratkilometer großen virtuellen Umgebung zurechtgefunden hätten. Dazu passt, dass nur 35% überhaupt Vorschläge zur Verbesserung der Wegfindung angegeben haben. Mangels einer Kontrollgruppe in dieser Studie lassen sich diese Selbsteinschätzungen für sich genommen nicht einordnen. Sie werden daher im Kontext der Orientierungsstudie ausgewertet, da dort Vergleichsdaten für die Leistung mit und ohne Hilfe vorliegen (Kapitel 10.2). Von den Vorschlägen zur Wegfindung wurden die Optionen 'Wegweiser' und 'Mini-Map/Karte' am häufigsten genannt. Beide Optionen wurden nachfolgend als zu testendes Hilfsmittel in die Orientierungsstudie integriert.

Immersion

Die tiefe visuelle Immersion von VR ist eine Erfahrung für sich, die den eigentlichen Inhalt einer Anwendung vor allem dann überlagern kann, wenn man noch nie eine VR-Brille aufgesetzt hat. Die räumliche Präsenz in einer virtuellen Umgebung ist also zunächst ein Zustand, welcher der Gewöhnung bedarf. Es gibt jedoch keine Studien, die diesen Effekt genauer untersucht haben. Eine Differenzierung, inwieweit sich die Beurteilung von Erstanwendenden auf die VR-Technologie und das Immersionsgefühl an sich oder aber konkret auf den gezeigten Inhalt bezieht, wird somit stark erschwert. Es wird daher vermutet, dass auch in dieser Studie aufgrund der hohen Zahl an Erstanwendenden ein nicht erfasster Gewöhnungseffekt bestand und die Ergebnisse beeinflusst hat.

Konsistenz der Antworten

Die abgeleitete Größe $\Delta HelpNeeded$ als Maß für die Konsistenz in der Beantwortung der Fragen ist zwar bei 75% der Antworten bei oder nahe dem Idealwert von 0, ein Viertel der Teilnehmenden zeigt aber Abweichungen. Zwei Erklärungen sind für diese Abweichungen möglich. Zum einen lassen sie sich dem ursprünglichen Zweck dieser Messgröße entsprechend dahingehend interpretieren, dass einige Teilnehmenden entweder den Fragebogen nicht gründlich genug gelesen haben oder aber in einen in Kapitel 8.1.4 erklärten Automatismus verfallen, weil die unterbewusste Grundannahme 'Rechte Seite der Skala = höchster Wert = höchste Zustimmung im positiven Sinne' vorliegt. Zum anderen lässt sich das Ergebnis aber auch mit der Formulierung der Fragen erklären. Es wurden bei der positiven und negativen Formulierung nicht die exakt selben

Worte verwendet, sondern eine teilweise stark unterschiedliche Umschreibung. Die Abweichungen werden daher als Resultat beider Phänomene interpretiert.

Akzeptanz

Es konnte eine sehr hohe Akzeptanz der Anwendung festgestellt werden. Neben dem SUS_{Score} hatten die Fragen sowohl zur eigenen Wiederbenutzung als auch die Empfehlung an andere sehr hohe Zustimmungswerte von 92% bzw. 97%. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die angestrebte Zielgruppe – also auch ohne Fachwissen, Spieleerfahrung oder Exposition durch das Aufwachsen mit der Technologie – empfänglich für diese Art der Wissensvermittlung ist.

9.3 Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten

Die Segeberg-Studie wurde als 'Nebenstudie' durchgeführt und war dem eigentlichen Veranstaltungsschwerpunkt der Unterhaltung und Informationsvermittlung untergeordnet. Unter diesen Umständen ließen sich Beeinflussungen durch die begleitende Ausstellung, durch weitere Teilnehmende der Präsentation und vor allem durch den die Studie vor Ort durchführenden Historiker, der ja auch gleichzeitig die Aufgabe hatte, zu erklären und zu unterhalten, nicht ausschließen. Eine entsprechende Verbesserung wäre die Schaffung von Laborbedingungen bzw. das Ausschließen von möglichst vielen externen Faktoren. Dazu gehört neben dem Rückzug der Studienaufsicht auf die Position einer rein neutralen Aufsicht auch die Neutralisierung des Kontexts, in dem diese Studie durchgeführt wird. Die Veranstaltung war generell auf die Präsentation der VR-Anwendung als Höhepunkt eines Geschichtsnachmittags ausgelegt. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Teilnehmenden der Studie gewisse Erwartungen/Vorfremde hatten und ihre Angaben auf dem Fragebogen davon beeinflusst wurden.

Inhaltlich haben nicht alle Teilnehmenden dieselbe Erfahrung gemacht: Der Startpunkt war zwar immer identisch, aufgrund der Größe der virtuellen Welt lotste der Historiker die Teilnehmenden aber unterschiedliche Straßen entlang und fokussierte die Erklärungen auf unterschiedliche Gebäude. Und auch die Beobachtung der anderen Teilnehmenden vor der eigenen Benutzung sollte ausgeschlossen werden.

Um die Selbsteinschätzung zur Wegfindung zu überprüfen, wäre als Erweiterungsmöglichkeit eine Kontrollgruppe interessant, die keine Hilfe von der Studienaufsicht erhält und vorgegebene Orte (beispielsweise bestimmte Gebäude in der VR-Welt) selbstständig finden muss.

Um herauszufinden, welchen Einfluss das Immersionsgefühl bei der Erstanwendung von VR hat, wird eine vergleichende Studie vorgeschlagen, bei der auf eine ausreichend große Anzahl an Teilnehmenden mit gewisser VR-Vorerfahrung geachtet wird. Alternativ ließen sich zu dieser Frage auch Aussagen treffen, wenn dieselbe Personengruppe mit einem zeitlichen Abstand von einigen Wochen oder Monaten erneut dieselbe oder eine sehr ähnliche VR-Anwendung durchläuft und die jeweils anschließend ausgefüllten Fragebögen verglichen werden. Auch der Vergleich der Reaktionen von Erstanwendenden zwischen einer großen, inhaltsreichen und detaillierten VR-Welt und einem minimalistischen, eintönigen VR-Raum könnte Aufschluss darüber liefern, wie sehr die Reaktionen bei der erstmaligen Anwendung dem Inhalt oder der Technologie zugeschrieben werden können.

10 Orientierungsstudie: Ergebnisse & Diskussion

10.1 Ergebnisse

Im Gegensatz zur Segeberg-Studie mussten bei der Orientierungsstudie alle Fragen von allen Teilnehmenden beantwortet werden. Relative Angaben sind jedoch gerundet und können in ihrer Summe daher von 100% abweichen.

10.1.1 Allgemeine Ergebnisse

Von den 64 gültigen Datensätzen wurden zunächst die allgemeinen Parameter ausgewertet. Die Altersverteilung war über die fünf zur Verfügung stehenden Auswahloptionen sehr ungleichmäßig (Abbildung 27a). Die überwiegende Mehrheit von 64% (n = 41) lag in der Altersspanne '21 – 35 Jahre', mit deutlichem Abstand folgten die 36- bis 50-jährigen (17%, n = 11) und die 51- bis 65-jährigen (14%, n = 9). Lediglich drei Personen unter 21 nahmen teil (5%) und die Gruppe der über 65-jährigen war überhaupt nicht vertreten.

35 Personen (55%) gaben als Geschlecht 'männlich' an, 28 'weiblich' (44%) und eine Person 'divers'.

Die allgemeine Vorerfahrung mit VR wurde etwas höher als bei der Segeberg-Studie eingeschätzt (Abbildung 27b). Die häufigste Antwort war 'kaum' mit 36% (n = 23). Insgesamt gaben etwa 38% (n = 24) an, zumindest 'etwas' Erfahrung im Umgang mit VR zu haben. Die Selbsteinschätzung zum Orientierungssinn wurde überwiegend mit 'gut' beantwortet (47%, n = 30) (Abbildung 27c). Symptome der Motion Sickness (Abbildung 27d) wurden von 81% (n = 52) gar nicht verspürt und von 19% (n = 12) 'kaum' oder 'etwas'. Die beiden höchsten Kategorien traten nicht auf.

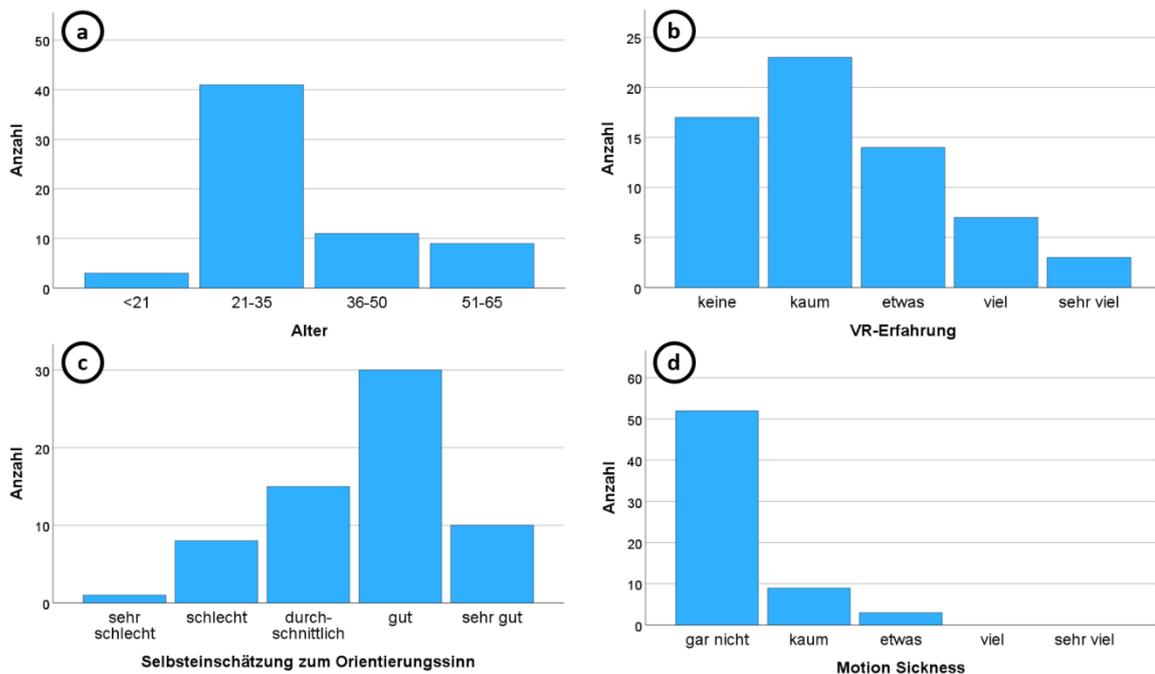


Abbildung 27. a) Altersverteilung, b) VR-Erfahrung, c) Selbsteinschätzung zum Orientierungssinn, d) Motion Sickness

10.1.2 Wegfindung

Der erste Hauptparameter der zurückgelegten Distanz pro Labyrinth, welcher als Maß für die Wirksamkeit des Hilfsmittels für die Orientierung definiert wurde, wurde nach Art des Hilfsmittels sortiert. Abbildung 28 zeigt das Ergebnis. Auffällig ist zunächst die signifikante Verschlechterung des Ergebnisses, wenn keine Hilfe verwendet wurde (MW = 194,17m, SD = 122,17m). Es lässt sich außerdem ein Unterschied zwischen den nur am Anfang der Labyrinth verfügbaren statischen Hilfsmitteln (2D-Karte und 3D-Karte: durchschnittlicher MW = 118,02m, durchschnittliche SD = 73,95m) und den während des gesamten Durchlaufs verfügbaren Hilfsmitteln feststellen (2D-Karte am Controller, Richtungspfeil, Navigationslinie, Wegweiser: durchschnittlicher MW = 90,08m, durchschnittliche SD = 32,77m). Letztere verfügen auch über eine deutlich niedrigere Standardabweichung.

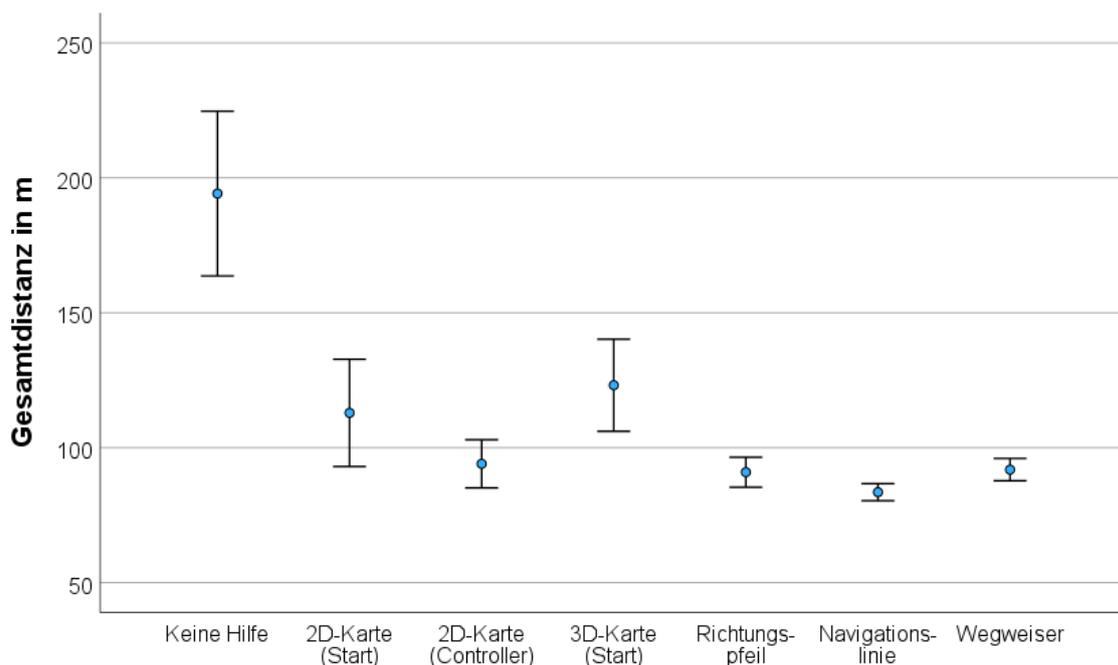


Abbildung 28. Gesamtdistanz der verschiedenen Hilfsmittel.

Zusätzlich wurde analysiert, inwiefern unter Verwendung eines bestimmten Hilfsmittels das Ergebnis signifikant von allen anderen abweicht und – sofern eine Signifikanz vorliegt – wie groß die Effektstärke dieser Signifikanz ist. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der T-Tests aller Hilfsmittel gegeneinander. Die hier aufgeführten Parameter werden in Kapitel 8.2.6 erläutert. Neben den oben erwähnten Möglichkeiten zur Kategorisierung sticht hierbei heraus, dass die Navigationslinie gegenüber allen anderen Hilfsmitteln einen signifikanten Unterschied in der Gesamtdistanz aufweist.

Tabelle 5. Signifikante Unterschiede der Hilfsmittel bezogen auf die Gesamtdistanz.

| Test gegen | t | p | Signifikanz | d | Effektstärke |
|--|------|---------|-------------|------|--------------|
| Keine Hilfe gegen... | | | | | |
| 3D-Karte | 4,60 | < 0,001 | Ja | 0,54 | Mittel |
| 2D-Karte | 4,30 | < 0,001 | Ja | 0,58 | Mittel |
| 2D-Karte am Controller | 7,86 | < 0,001 | Ja | 0,98 | Groß |
| Wegweiser | 6,65 | < 0,001 | Ja | 0,83 | Groß |
| Richtungspfeil | 6,63 | < 0,001 | Ja | 0,83 | Groß |
| Navigationslinie | 7,16 | < 0,001 | Ja | 0,90 | Groß |
| 3D-Karte gegen... | | | | | |
| 2D-Karte | 0,92 | 0,182 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte am Controller | 3,22 | 0,001 | Ja | 0,40 | Klein |
| Wegweiser | 3,54 | < 0,001 | Ja | 0,44 | Klein |
| Richtungspfeil | 3,51 | < 0,001 | Ja | 0,44 | Klein |
| Navigationslinie | 4,43 | < 0,001 | Ja | 0,55 | Mittel |
| 2D-Karte gegen... | | | | | |
| 2D-Karte am Controller | 1,76 | 0,041 | Ja | 0,22 | Klein |
| Wegweiser | 2,06 | 0,022 | Ja | 0,26 | Klein |
| Richtungspfeil | 2,09 | 0,020 | Ja | 0,26 | Klein |
| Navigationslinie | 2,85 | 0,003 | Ja | 0,36 | Klein |
| 2D-Karte am Controller gegen... | | | | | |
| Wegweiser | 0,46 | 0,322 | Nein | --- | --- |
| Richtungspfeil | 0,58 | 0,281 | Nein | --- | --- |
| Navigationslinie | 2,22 | 0,015 | Ja | 0,27 | Klein |
| Wegweiser gegen... | | | | | |
| Richtungspfeil | 0,29 | 0,388 | Nein | --- | --- |
| Navigationslinie | 4,97 | < 0,001 | Ja | 0,62 | Mittel |
| Richtungspfeil gegen... | | | | | |
| Navigationslinie | 2,37 | 0,011 | Ja | 0,30 | Klein |

Es wurden außerdem Tests über Unterschiede in der Wirksamkeit der Orientierung in Abhängigkeit vom Alter, der VR-Vorerfahrung, der Selbsteinschätzung des Orientierungssinns und der Zeit, die zur Gewöhnung an das jeweilige Hilfsmittel benötigt wurde, vorgenommen. In keinem dieser Fälle konnte ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

10.1.3 Kognitive Karte

Der Turmfehler der Teilnehmenden als Maß zur Befähigung zur Bildung einer kognitiven Karte wurde ebenfalls nach Hilfsmittel sortiert. Abbildung 29 zeigt das Ergebnis. Die Unterscheidung ist nicht mehr so deutlich wie bei der zurückgelegten Distanz. Außerdem ist auffällig, dass bei diesem Parameter die beiden statischen Karten am Anfang der Labyrinth (2D-Karte und 3D-Karte) am besten abgeschnitten haben. Diese Hilfsmittel weisen mit Mittelwerten von 5,15m (2D-Karte, SD = 8,52m) und 4,70m (3D-Karte, SD = 8,11m) den niedrigsten Turmfehler auf. Es folgen die dynamischen Hilfen mit jeweils gleichmäßigem Abstand in der Reihenfolge 2D-Karte am Controller, Wegweiser und Navigationslinie. Auf dem letzten Platz liegen nahezu gleichauf der Richtungspfeil und die Variante ohne Hilfe. Es ist jedoch zu beachten, dass die Streuung der

einzelnen Hilfsmittel sehr hoch ist. Daher wurden auch für den Turmfehler T-Tests und ggf. Effektstärkenberechnungen der Signifikanz durchgeführt (Tabelle 6).

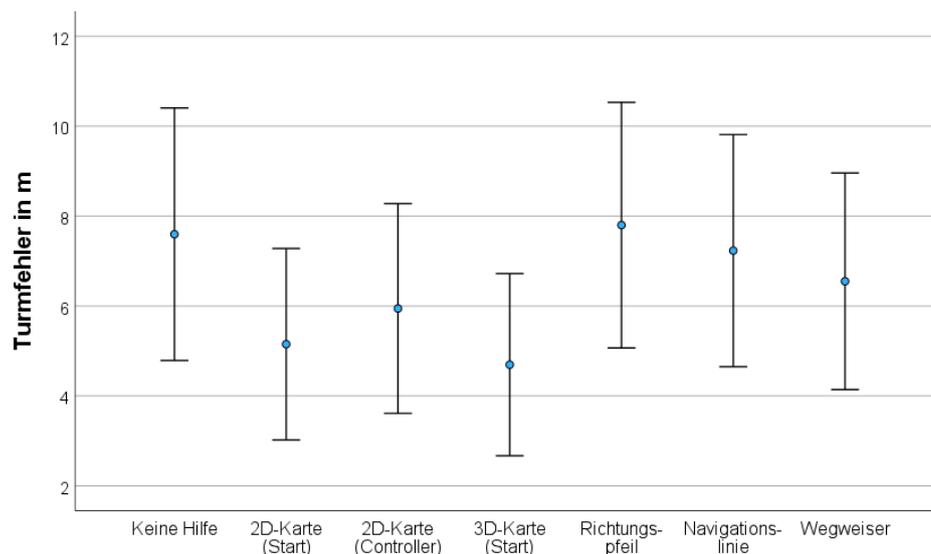


Abbildung 29. Turmfehler der verschiedenen Hilfsmittel.

Tabelle 6. Signifikante Unterschiede der Hilfsmittel bezogen auf den Turmfehler.

| Test gegen | t | p | Signifikanz | d | Effektstärke |
|--|------|-------|-------------|------|--------------|
| Richtungspfeil gegen... | | | | | |
| Keine Hilfe | 0,12 | 0,453 | Nein | --- | --- |
| Navigationslinie | 0,31 | 0,380 | Nein | --- | --- |
| Wegweiser | 0,74 | 0,230 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte am Controller | 1,02 | 0,157 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte | 1,72 | 0,045 | Ja | 0,22 | Klein |
| 3D-Karte | 1,88 | 0,032 | Ja | 0,24 | Klein |
| Keine Hilfe gegen... | | | | | |
| Navigationslinie | 0,21 | 0,417 | Nein | --- | --- |
| Wegweiser | 0,59 | 0,279 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte am Controller | 0,89 | 0,188 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte | 1,68 | 0,049 | Ja | 0,21 | Klein |
| 3D-Karte | 2,11 | 0,019 | Ja | 0,26 | Klein |
| Navigationslinie gegen... | | | | | |
| Wegweiser | 0,47 | 0,320 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte am Controller | 0,73 | 0,235 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte | 1,34 | 0,093 | Nein | --- | --- |
| 3D-Karte | 1,85 | 0,034 | Ja | 0,23 | Klein |
| Wegweiser gegen... | | | | | |
| 2D-Karte am Controller | 0,39 | 0,350 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte | 1,06 | 0,148 | Nein | --- | --- |
| 3D-Karte | 1,29 | 0,292 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte am Controller gegen... | | | | | |
| 2D-Karte | 0,56 | 0,287 | Nein | --- | --- |
| 3D-Karte | 0,80 | 0,213 | Nein | --- | --- |
| 2D-Karte gegen... | | | | | |
| 3D-Karte | 0,38 | 0,354 | Nein | --- | --- |

Eine signifikante Verbesserung der Werte für den Turmfehler ist demnach für die 3D-Karte und die 2D-Karte gegenüber keiner Hilfe und einigen der dynamischen Hilfsmittel (hier: Richtungspfeil und Navigationslinie) gegeben, wobei die 3D-Karte insgesamt am besten abschneidet.

Weitere Tests in Abhängigkeit vom Turmfehler zeigten, dass zumindest ein geringes Maß an VR-Vorerfahrung von Vorteil für die Bildung einer kognitiven Karte in VR ist. Abbildung 30a zeigt den Zusammenhang. Eine Korrelation zwischen der Größe des Turmfehlers und der Selbsteinschätzung zum Orientierungssinn konnte jedoch nicht festgestellt werden. Im Gegensatz zur Wegfindung besteht aber beim Turmfehler ein Zusammenhang zum Alter der Testpersonen, wie Abbildung 30b zeigt. Die Altersgruppe '<21' wird aufgrund der geringen Personenzahl in dieser Kategorie ignoriert. Der Mittelwert des Turmfehlers steigt von 5,19m für die 21- bis 35-jährigen (SD = 5,13m) über 7,68m für die 36- bis 50-jährigen (SD = 4,24m) auf 11,23 für die 51- bis 65-jährigen (SD = 5,18m).

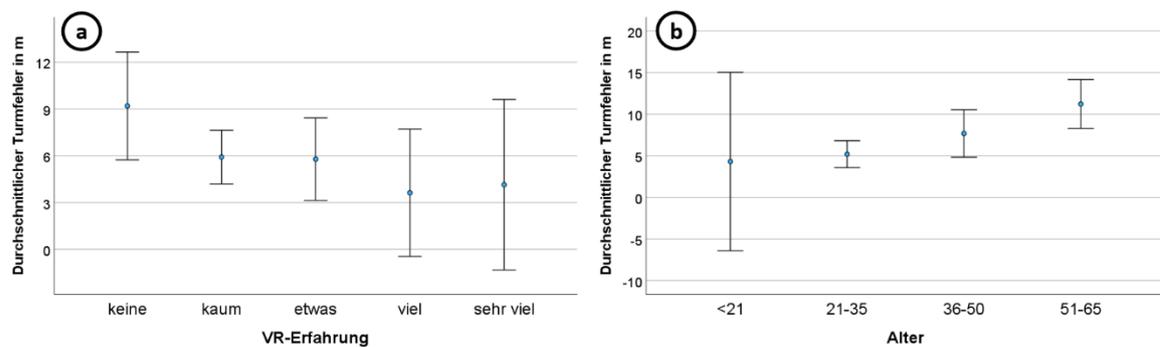


Abbildung 30. Durchschnittlicher Turmfehler in Abhängigkeit a) von der VR-Erfahrung und b) vom Alter.

10.1.4 Weitere Parametertests

Ein Vergleich der beiden Hauptparameter zeigt einen linearen Zusammenhang der Werte (Abbildung 31). Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,48. Die Abbildung verdeutlicht, dass mit zunehmender Distanz auch der Turmfehler ansteigt. Auffällig ist auch, dass die Personengruppe, die während der gesamten Studie keinen einzigen Fehler bei der Turmplatzierung begangen hat, eine vergleichsweise sehr geringe Streuung bei der zurückgelegten Distanz aufweist.

Eine klare Unterscheidung ergibt sich bei der Betrachtung der Einarbeitungszeit in die Hilfsmittel. Abbildung 32a zeigt zwei Gruppen: zum einen die Hilfsmittel, welche im Vorfeld eine Betrachtung erforderten (alle Karten) und zum anderen die erst im Verlauf des Labyrinths auftretenden Hilfsmittel. Wenn gar keine Hilfe vorhanden war, wurde direkt nach Erhalt der Audioanweisung der Durchlauf von den Testpersonen gestartet. Abbildung 32b zeigt den Vergleich zwischen den Hilfsmitteln und der durchschnittlichen Teleportationsdistanz. Es sind zwar leichte Unterschiede der Mittelwerte feststellbar, aufgrund der hohen Streuung sind diese aber knapp nicht signifikant.

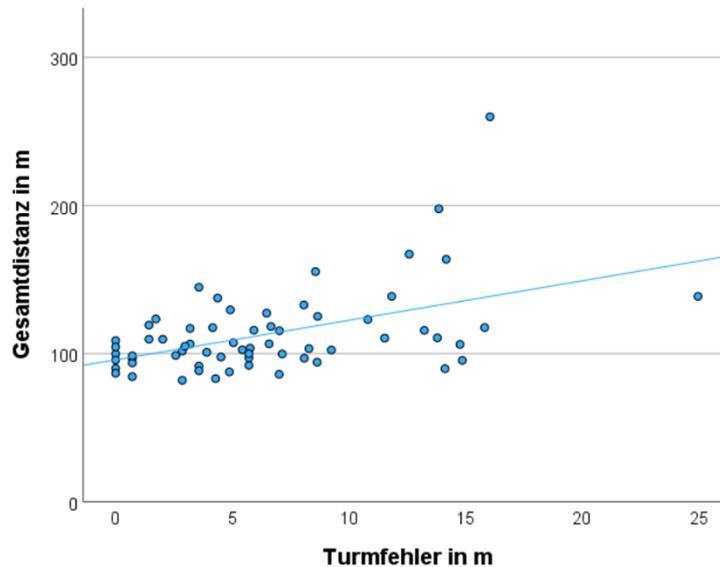


Abbildung 31. Korrelation zwischen Gesamtdistanz und Turmfehler.

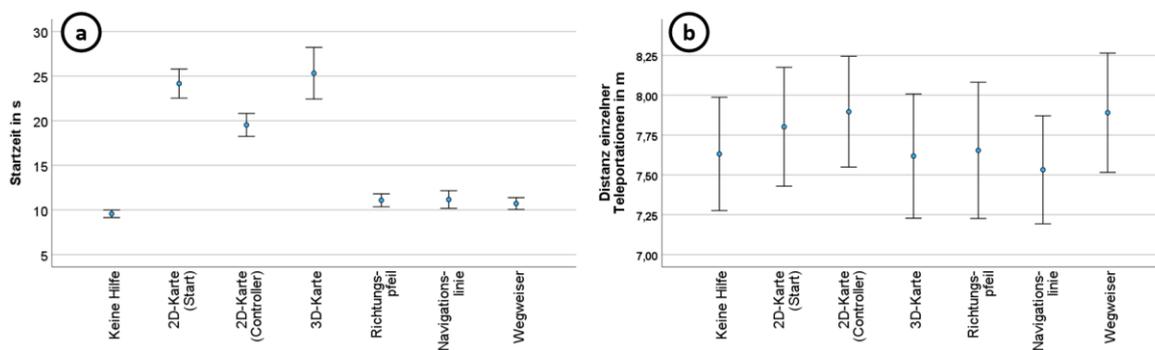


Abbildung 32. a) Startzeit und b) Distanz der einzelnen Teleportationen.

10.1.5 Ranking

Am Ende der Studie wurde von den Testpersonen die Erstellung einer Liste mit ihrer relativen Bewertung aller sieben Variationen der Hilfsmittel gefordert. Jedes Hilfsmittel erhielt also eine Platzierung zwischen eins und sieben. Abbildung 33 zeigt das Ranking aufgeschlüsselt nach den Durchschnittswerten der Platzierungen für jedes Hilfsmittel. Dabei sind sehr klare Präferenzen mit sehr geringer Streuung zu sehen, die sich in vier Gruppen einteilen lassen: Als besonders hilfreich wurden die Navigationslinie (MW = 2,47; SD = 1,66) und die 2D-Karte am Controller (MW = 2,61; SD = 1,64) bewertet, gefolgt vom Richtungspfeil (MW = 3,33; SD = 1,48) und vom Wegweiser (MW = 3,66; SD = 1,42). Die statischen Karten landen auf dem fünften und sechsten Platz, wobei die 3D-Karte (MW = 4,38; SD = 1,64) leicht besser abschnitt als die 2D-Karte (MW = 4,81; SD = 1,49). Mit deutlichem Abstand war 'Keine Hilfe' am unbeliebtesten (MW = 6,75; SD = 0,69).

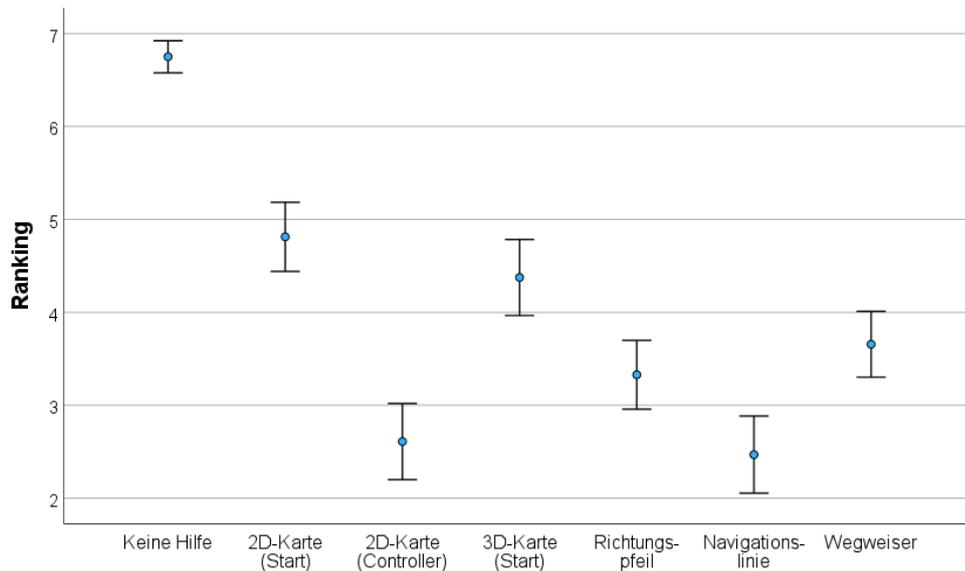


Abbildung 33. Ranking der Hilfsmittel.

10.1.6 Zufallstests & Gewöhnungseffekte

Um zu bewerten, ob die Verteilung der Labyrinth und die Zuordnung der Hilfsmittel tatsächlich zufällig war, wurde ihre Reihenfolge in der Studie als Parameter gespeichert. Abbildung 34a zeigt die Verteilung der unterschiedlichen Labyrinth-Designs und Abbildung 34b die Verteilung der Hilfsmittel während der Studie. Da es sieben Labyrinth-Varianten und sieben Hilfsmittel gab, sollte ihre Positionierung im Idealfall einen Durchschnittswert von '4' annehmen. Die Untersuchung bestätigt eine zufällige Verteilung der Labyrinth, wenngleich leichte Schwankungen zu erkennen sind. Die Verteilung der Hilfsmittel, die auf demselben Zufalls-Algorithmus basierte, zeigt bei der Positionierung des Hilfsmittels '2D-Karte am Controller' einen kleinen Ausreißer. Dieses Hilfsmittel war im Durchschnitt also etwas früher dran als die anderen.

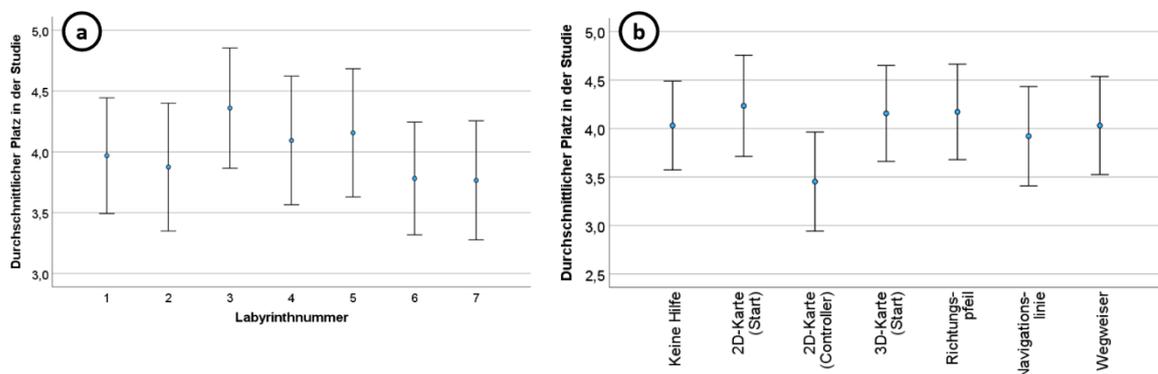


Abbildung 34. Durchschnittliche Positionierung innerhalb der Studie der a) Labyrinth und b) Hilfsmittel.

Darüber hinaus wurde getestet, ob die Labyrinth-Designs tatsächlich vergleichbar ähnlich sind. Abbildung 35a zeigt die zurückgelegte Gesamtdistanz in Abhängigkeit vom Labyrinth. Das Labyrinth Nr. 5 zeigt hier einen erhöhten Durchschnittswert für die Gesamtdistanz. Der Rest der Labyrinth zeigt sehr ähnliche Werte innerhalb der Schwankungen. Ein anderes Bild ergibt sich

allerdings beim Test der Labyrinth-Designs gegen den zweiten Hauptparameter, dem Turmfehler. Abbildung 35b zeigt für das Labyrinth Nr. 2 eine Abweichung, dafür reiht sich Labyrinth Nr. 5 wieder unauffällig in die Werte der anderen Labyrinth ein.

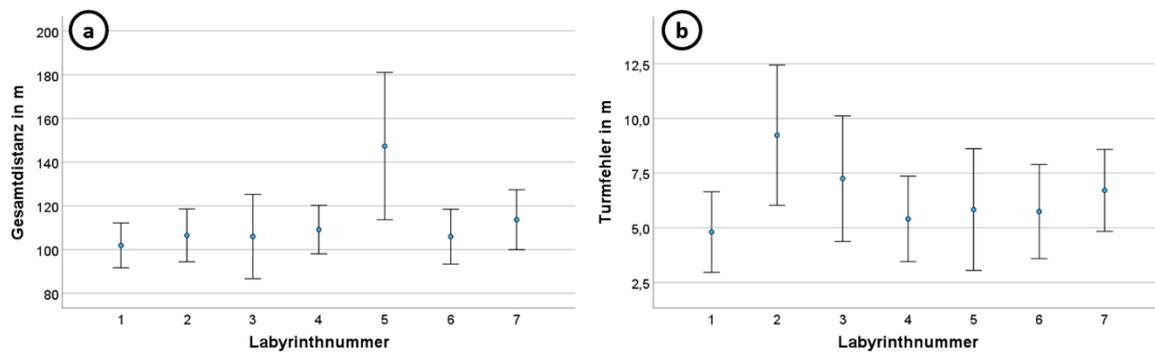


Abbildung 35. a) Gesamtdistanz und b) Turmfehler in Abhängigkeit von der Labyrinthnummer.

Um das Vorhandensein eines Gewöhnungseffekts zu bestimmen, werden die Ergebnisse der Hauptparameter der jeweiligen Reihenfolge im Studiendurchlauf zugeordnet. Wenn ein Gewöhnungseffekt vorhanden ist, müssten sich die Werte für die Gesamtdistanz und den Turmfehler also mit fortschreitendem Durchlauf im Durchschnitt (also über alle Hilfsmittel hinweg) verbessern. Abbildung 36 zeigt das Ergebnis sowohl im Vergleich mit der Gesamtdistanz (Abbildung 36a) und mit dem Turmfehler (Abbildung 36b). Es sind für die Gesamtdistanz vor allem Schwankungen festzustellen. Beim Turmfehler ist ein leichter Trend zu einem kleinerem Fehler im Verlauf der Studie zu beobachten. Aufgrund der hohen Streuung der Einzelergebnisse ist aber keine dieser Unterschiede als signifikant zu bewerten.

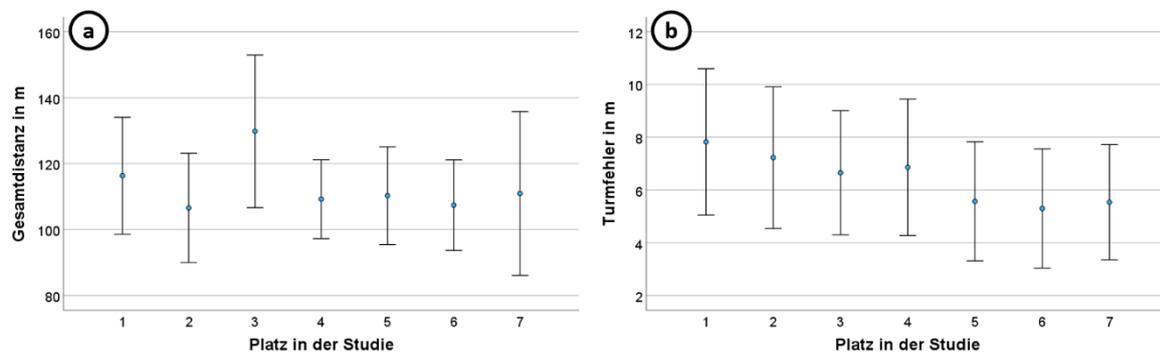


Abbildung 36. Performance im Verlauf der Studie über alle Hilfsmittel hinweg für a) Gesamtdistanz und b) Turmfehler.

10.2 Diskussion

Bewertung der Metrik zur Wegfindung

Es besteht eine mäßig bis stark ausgeprägte Korrelation zwischen dem Hauptparameter der zurückgelegten Gesamtdistanz 'Total Teleport Distance' und den für die Bewertung der Wegfindung aussortierten Parametern 'Time To Finish' (Korrelationskoeffizient = 0,71) und 'Number of Teleports' (Korrelationskoeffizient = 0,63). Untereinander korrelieren diese Parameter nur schwach bis mäßig miteinander (Korrelationskoeffizient = 0,35). Während der Studie wurde außerdem gehäuft ein herauszögerndes Verhalten beobachtet. Nach dem Auffinden des Ziels

wurde sich Zeit genommen, um sich nochmal in Ruhe umzuschauen und sich der Position des roten Turmes zu vergewissern, bevor das Ziel aktiviert wurde. Somit ist der Wert 'Time To Finish' aus einem Grund stark angestiegen, der nichts mit der beabsichtigten Messgröße der Effizienz des Hilfsmittels zu tun hatte. Eine Kombination der drei Parameter hätte also ungewünschte Effekte miteingeschlossen, für dessen zusätzliche Ursprünge Vermutungen in Kapitel 8.2.6 angestellt wurden, die sich aber im Rahmen dieser Studie nicht verifizieren lassen.

Hauptparameter

Ein signifikanter Unterschied aller Hilfsmittel gegenüber einem Absolvieren der Labyrinth ohne Hilfsmittel war erwartbar. Die Ergebnisse erlauben aufgrund dieses Vergleichs eine Aussage über die Wirksamkeit eines Hilfsmittels in absoluten Maßstäben (gegenüber dem Fehlen jeglicher Hilfe) sowie eine relative Bewertung durch einen Vergleich untereinander. Bezogen auf die Wegstrecke ergibt sich eine Verbesserung der Werte von 58% (3D-Karte) bis zu 133% (Navigationslinie) gegenüber dem Weglassen jeglicher Hilfe. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte stark vom Schwierigkeitsgrad des Weges abhängig sein können und bei komplexen, großen Labyrinthen andere Verhältnisse zu erwarten sind. Die Reihenfolge der Wirksamkeit lässt sich mit dem Kategorienunterschied der Hilfsmittel erklären. Die statischen Karten am Anfang eines Labyrinths zwangen die Teilnehmenden zum Einprägen des Layouts. Es musste sich ein Ablauf aus Richtungen und Strecken gemerkt werden. Bei fehlerhafter Einprägung und durch das Vergessen eines Streckenabschnitts oder Wendepunkts wurde das Ziel nicht nach der kürzesten Wegdistanz erreicht. Die stetig verfügbaren Hilfsmittel (2D-Karte am Controller, Richtungspfeil, Navigationslinie & Wegweiser) stellten dagegen eine ständige Verifikation zur Verfügung, ob der eingeschlagene Weg auch der Richtige ist. Die leicht höhere Streuung der Werte beim Hilfsmittel '2D-Karte am Controller' lässt sich durch die zusätzlich nötige kognitive Leistung der Kartenrotation erklären. Standpunkt und Blickrichtung wurden auf dieser Karte zwar angezeigt, die Testpersonen mussten diese Informationen aber in die tatsächlich einzuschlagende Richtung in der virtuellen Welt übersetzen. Die Hilfsmittel Richtungspfeil, Wegweiser und Navigationslinie erforderten keinerlei zusätzliche Gedächtnisleistung und erlaubten das reine Abarbeiten der durch diese Hilfsmittel vorgegebenen Richtungen, ohne auf die Umgebung zu achten. Die Navigationslinie stellte hierbei die visuell kontinuierlichste Variante dar und erzielte dementsprechend die besten Ergebnisse. Es wird außerdem vermutet, dass diese Variante auch am ehesten der Gewohnheit der Testpersonen entspricht, da eine Navigationslinie einigen Testpersonen aus dem Alltag bekannt sein dürfte, beispielsweise bei Navigationssystemen im Auto oder als Standardvariante der Zielfindung bei GoogleMaps. Die Ergebnisse entsprechen insofern den Erkenntnissen von Clemenson et al. (2020), wonach das Orientierungsverhalten in VR – sofern 6 DoF vorhanden sind, was hier der Fall war – sehr vergleichbar mit demjenigen in der Realität ist.

Demgegenüber stehen jedoch die Ergebnisse des zweiten Hauptparameters, dem Turmfehler. Die deutlich kleineren Unterschiede zwischen den Hilfsmitteln lassen darauf schließen, dass die erfolgreiche Bildung einer kognitiven Karte weit weniger von einem bestimmten Hilfsmittel abhängig ist als die Zielfindung. Die vorhandenen Differenzen deuten auf eine etwas höhere Wirksamkeit der Karten-Hilfsmittel hin. Diese exozentrischen Ansichten helfen bei der Einschätzung von Distanzen und räumlichen Beziehungen untereinander. Die Testpersonen wurden gezwungen, den einzuschlagenden Weg von den so gewonnenen Distanz- und Richtungsinformationen abhängig zu machen. Der rote Turm als einzige Landmarke musste somit als wichtiger Datenpunkt zur Zielfindung wahrgenommen und abgespeichert werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Einschätzungen von Yang et al. (2018) und Ishikawa & Montello (2006), wonach die Betrachtung einer Umgebung aus mehreren Perspektiven – insbesondere aus einer

exozentrischen – sehr hilfreich für die Bildung einer kognitiven Karte ist. Auch die Effizienz und Beliebtheit der Mini-Maps für DVEs (Kapitel 5.2) entspricht diesen Beobachtungen. Insofern lässt sich auch das Ergebnis erklären, dass es beim Turmfehler keine signifikanten Unterschiede zwischen den kontinuierlichen Hilfsmitteln und der Abwesenheit jeder Hilfe gibt. Wenn ein Hilfsmittel es gar nicht erst erfordert, sich mit der Umgebung genauer auseinanderzusetzen, so wird es auch nicht zur Erstellung einer kognitiven Karte beitragen. Eher wäre es zu erwarten, dass bei keiner Hilfe der Turmfehler sogar geringer sein müsste, da den Testpersonen nun nur die genauere Betrachtung der Umgebung als mögliche Hilfe zur Zielfindung bleibt. Die Ergebnisse lassen aber keine signifikanten Unterschiede erkennen. Bei der Studiendurchführung wurde zudem oftmals beobachtet, dass bei 'Keine Hilfe' eine reine 'Trial and Error'-Taktik angewandt und auf die visuelle Fixierung auf den Turm als Landmarke verzichtet wurde. Demzufolge kam es oftmals zum wiederholten Ablaufen derselben Sackgassen. Die Effektstärken der Signifikanz sind bei den Unterschieden des Turmfehlers jedoch sehr gering, sodass sich lediglich die 3D- und die 2D-Karte als im Vergleich wirksamer festhalten lassen.

Wenn keine Verbesserung der Werte als Annahme zugrunde liegt und somit der zweiseitige T-Test zur Signifikanzprüfung verwendet wird (Kapitel 8.2.6), bleiben die Signifikanzen bei den Ergebnissen zur Wegfindung weitgehend unverändert. Beim Turmfehler wäre dann aber lediglich der Unterschied zwischen '3D-Karte' und 'Keine Hilfe' als signifikant zu bezeichnen. Beim Vergleich der Hauptparameter mit Eigenschaften und Vorwissen der Testpersonen lässt sich ein negativer Einfluss des Alters auf die Befähigung zur Bildung einer kognitiven Karte feststellen. Diese Ergebnisse decken sich mit früheren Studien (Lokka & Çöltekin, 2020), wenngleich diese Orientierungsstudie nicht die größte Aussagekraft darüber besitzt, da die höheren Altersgruppen vergleichsweise wenig vertreten waren.

Teleportationsverhalten

Unterschiede in der durchschnittlichen Distanz pro Teleportation waren zwar generell nicht sonderlich auffällig, die kleinen Differenzen liefern aber eine Interpretationsmöglichkeit, inwiefern unterschiedliche Hilfsmittel zu einer anderen Raumwahrnehmung führen können. Als Beispiel sei hier der Unterschied zwischen dem Wegweiser (MW = 7,89m, SD = 1,50m) und der Navigationslinie (MW = 7,53m, SD = 1,36m) aufgeführt.

Diese beiden Hilfsmittel sind Gegensätze im Hinblick darauf, wohin der Blick der Testperson gelenkt wird. Die Wegweiser stehen in einiger Entfernung, der Blick geht nach oben, somit ist die Körperhaltung aufrechter und auch die Hand mit dem Controller zeigt höher. Entsprechend der Abhängigkeit der Teleportationsdistanz von der Handhaltung wird also die Teleportationsdistanz größer. Der Blick nach oben ermöglicht auch eine bessere Wahrnehmung der Umgebung. Das Gegenteil ist bei der Navigationslinie der Fall. Diese beginnt immer zu Füßen der Testperson. Die Fixierung auf diese Linie führt also dazu, dass die gesamte Körperhaltung und somit auch die Hand weiter Richtung Boden zeigen. Die Teleportationsdistanz wird somit kürzer und es wird weniger von der Umgebung wahrgenommen.

Dabei ist zu beachten, dass eine kürzere Teleportation an sich aufgrund des besseren optischen Flusses als wichtig eingeschätzt wird (Korkut & Surer, 2022). Dies hilft aber nur sehr bedingt, wenn die kurze Teleportation auf Kosten des Fokus' zur Wahrnehmung der Umgebung geht, wie Lokka & Çöltekin (2019) ganz generell für die Raumkognition festgestellt haben.

Bezüglich des Teleportationsverhaltens konnten auch andere Unterschiede beobachtet werden. Einige Testpersonen folgten in der Richtung ihrer Teleportationen dem rechtwinkligen Grid der Labyrinth und steuerten mehr oder weniger die Mittelpunkte der Module an, während andere die kürzest mögliche Distanz (also beispielsweise bei Kurven möglichst eng an der Innenwand)

bevorzugten. Außerdem behielten einige Testpersonen die absolute Ausrichtung ihres Körpers möglichst lange bei und versuchten, lediglich durch Verdrehung des Oberkörpers und Zielen mit den Armen in die richtige Richtung zu teleportieren, selbst wenn das Ziel hinter ihnen lag. Unabhängig davon merkten aber viele Teilnehmende an, dass sie bereits nach sehr kurzer Zeit keine Aussage mehr bezüglich ihrer Ausrichtung im realen Raum treffen konnten. Nahezu alle Teilnehmenden zeigten eine verwirrte/belustigte Reaktion beim Absetzen der VR-Brille am Ende der Studie, manchmal mit der Anmerkung, dass sie erwartet hatten, in eine andere Richtung zu schauen. Diese Aussagen und Beobachtungen legen nahe, dass sich trotz der teilweise erfolgten Immersion kein vollständiges Präsenzgefühl eingestellt hat und die reale Umgebung in der Wahrnehmung der Teilnehmenden als Referenzpunkt immer noch sehr präsent war.

Da keine Veränderung des jeweiligen Verhaltens während eines Studienablaufs beobachtet wurde, besitzen diese Unterschiede zwischen den Teilnehmenden keinen Einfluss auf die hier ausgewerteten Parameter, da alle Labyrinth und Hilfsmittel von jeder Person kontinuierlich mit demselben Verhalten absolviert wurden.

Ranking

Das Ranking offenbarte sehr klare Präferenzen. Sowohl die Navigationslinie als auch die 2D-Karte am Controller wurden am besten bewertet. Bei der Navigationslinie deckt sich die Selbsteinschätzung mit den tatsächlichen Ergebnissen für den Parameter der zurückgelegten Distanz. Die 2D-Karte am Controller schnitt in beiden Hauptparametern relativ gut ab, erzielte aber nirgendwo die besten Ergebnisse. Die 3D-Karte als wirksamstes Hilfsmittel für den Parameter 'Turmfehler' findet sich erst auf Rang 5, kurz vor dem anderen statischen Hilfsmittel (2D-Karte). Den Testpersonen wurde vor oder während der Studie nicht mitgeteilt, welche Parameter gemessen wurden. Die Entscheidung für das Ranking erfolgte also zumeist ohne das Bewusstsein, dass es letztlich zwei Hauptkategorien gab. Einigen Testpersonen ist die Unterschiedlichkeit der Aufgaben (Turmplatzierung und Zielfindung) jedoch aufgefallen und sie haben angemerkt, dass ihr Ranking – je nach Aufgabenstellung – unterschiedlich ausfallen würde. Die Beliebtheit der 2D-Karte am Controller lässt sich auch zu Teilen durch die Rückmeldung einiger Testperson erklären, dass dieses Hilfsmittel als besonders interessant wahrgenommen wurde, da sich die eigene Position auf der Karte in Echtzeit nachverfolgen ließ, somit 'etwas passiert ist' und den Controllern im Gegensatz zu allen anderen Hilfsmitteln eine echte Tragefunktion bekam. Die Beliebtheit dieser exozentrischen Weltsicht beim Durchlaufen einer VR-Welt wurde auch von Horbiński & Zagata (2022) festgestellt. Die 3D-Karte wurde zwar am Anfang mit am intensivsten betrachtet (höchster Wert beim Parameter 'Time To Start'), allerdings legen einige Rückmeldungen der Teilnehmenden nahe, dass durch die statischen Karten eine Ausrichtung der Labyrinthwelt vorgegeben wurde, die nicht immer mit Ausrichtung der kognitiven Karte der Testperson übereinstimmte. Auch Zagata & Medyńska-Gulij (2023) identifizierten Karten, die in ihrer Ausrichtung dynamisch der Blickrichtung der Nutzenden folgen als besonders beliebt bei den Testpersonen.

Neben der klaren Korrelation zwischen Effizienz und Beliebtheit bei der Navigationslinie legen die Ergebnisse im Hinblick auf den Turmfehler allerdings auch nahe, dass das effizienteste Hilfsmittel nicht zwangsweise das Beliebteste sein muss und dieser Umstand bei der Erstellung von VR-Anwendungen und der Auswahl der Hilfsmittel berücksichtigt werden sollte. Die Nutzungszufriedenheit einer solchen Anwendung bestimmt sich zu gewissen Teilen aus emotionsbasierten Fragestellungen aus der Perspektive der Nutzenden („Womit würdest DU dich am meisten unterstützt fühlen?“) und nicht nur aus den hier festgelegten Parametern („Was wäre objektiv am Hilfreichsten?“).

Im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Ergebnissen bezogen auf die Hauptparameter und die unterschiedlichen Teleportationsverhalten korrespondieren diese Beobachtungen mit anderen Studien zur allgemeinen Orientierung in VR (Clemenson et al., 2020; Dong et al., 2020, 2022; Halik & Kent, 2021): die Ergebnisse variieren je nach Metrik, die Herangehensweise der Testpersonen ist unterschiedlich und es lässt sich nicht pauschal die 'beste' Möglichkeit identifizieren. Diese Studie liefert jedoch erstmals eine Basis, nach der sich die Hilfsmittel untereinander vergleichen und ggf. den Ansprüchen einer speziellen Anwendung entsprechend auswählen und anpassen lassen.

Zufälligkeit und Gewöhnung

Die Zufälligkeit der Reihenfolgen der Labyrinth und der Hilfsmittel wird als gegeben angesehen, auch wenn das Hilfsmittel '2D-Karte am Controller' im Durchschnitt geringfügig früher an der Reihe war, als alle anderen Hilfsmittel (Abbildungen 34a & 34b). Der Grund für die größere Abweichung, die sich bei dem Parameter der Gesamtdistanz für das Labyrinth-Design Nr. 5 ergibt (Abbildung 35a) wird in der Tatsache vermutet, dass bei Labyrinth Nr. 5 direkt nach dem Start eine Vierer-Kreuzung liegt und den Testpersonen gleich zu Anfang drei mögliche Wege präsentiert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass der rote Turm beim erstmaligen Betreten der Kreuzung (aus der Richtung des Startmoduls) im Rücken der Testperson liegt und somit nicht unmittelbar als Orientierungshilfe verwendet werden kann. Da die Zufallstests jedoch eine Gleichverteilung der Labyrinth-Designs und der Hilfsmittelverteilung bestätigen, betrifft dieser Unterschied alle Testpersonen und Hilfsmittel gleichermaßen. Außerdem waren auch die Werte des Turmfehlers beim Labyrinth Nr. 5 nicht auffällig anders, dagegen gab es eine Abweichung bei Labyrinth Nr. 2 (Abbildung 35b). Hier war der Turmfehler im Vergleich zu den anderen Labyrinthen leicht erhöht. Dies widerspricht den Erwartungen, da bei diesem Labyrinth der Turm sehr nah am Ziel steht und für den letzten Teil des Weges gut einsehbar ist. Diese Tatsache könnte aber gleichzeitig dafür sorgen, dass der Fokus der Testpersonen durch das Sehen des Zieles sehr stark auf dieses gerichtet ist und die Umgebung somit für die letzten paar Teleportschritte – und somit auch für die Momente, in denen der Turm passiert wird – nahezu ausgeblendet wird.

Ein Gewöhnungseffekt ist erwartet worden. Dieser lässt sich aber nur sehr bedingt und ohne Signifikanz aus den Daten ablesen (Abbildung 36b) oder ist gar nicht vorhanden (Abbildung 36a). Stattdessen lässt sich eine leicht bessere Performance feststellen, wenn die Testperson vorher schon mindestens einmal Erfahrung mit VR gemacht hat (Abbildung 30a). Der ausbleibende Gewöhnungseffekt lässt sich auf zwei Arten erklären: Zum einen kann es sein, dass das Wissen um den Ablauf eines Labyrinthdurchlaufs keinen signifikanten Vorteil bietet. Immerhin können die Testpersonen frei entscheiden, wann das Labyrinth startet und sich mit dem Hilfsmittel ohne zeitlichen Druck im Vorfeld auseinandersetzen. Zum anderen kann diese Beobachtung als Wirksamkeit des Tutorials interpretiert werden, welches alle Hilfsmittel kurz vorstellt und den Testpersonen Zeit gibt, sich mit der Umgebung, mit den Controllern, mit der Steuerung, mit der Aufgabenstellung und generell mit dem Immersionsgefühl vertraut zu machen. Mehrere Testpersonen gaben die Rückmeldung, dass ihnen das Tutorial sehr gefallen hat und sie sich anschließend gut vorbereitet gefühlt haben. Es konnte außerdem beobachtet werden, dass einige Fehler, die während des Tutorials begangen wurden (Anfangsschwierigkeiten mit der Teleportation oder bei der Turmplatzierung) während der Labyrinthdurchläufe nicht mehr auftauchten. Ein umfangreiches Tutorial mit Möglichkeiten zur Eingewöhnung wird also als essentiell für eine aussagekräftige VR-Studie angesehen.

Limitationen

Aufgrund mehrerer Maßnahmen wie der Automatisierung der Parametererhebung, der

Reduzierung der virtuellen Umgebung auf das Wesentliche, dem umfangreichen Tutorial und der Vermeidung von Zufalls- und Gewöhnungseffekten wird das Studiendesign als sehr robust eingeschätzt. Einige Aspekte der Studiendurchführung könnten jedoch ungewollten Einfluss auf die Ergebnisse gehabt haben und werden im Folgenden beschrieben.

Die Studie wurde an zwei Orten mit unterschiedlichem VR-Equipment durchgeführt, wobei die eine VR-Brille (Valve Index) einer neueren Generation angehört als die andere (HTC Vive). Das FoV der Valve Index ist geringfügig (ca. 10%) größer als das der HTC Vive und bietet damit ein besseres peripheres Sichtfeld für die Testperson. Außerdem traten ab und zu Kabeleinwicklungen auf, was das Ausdrehen der Testperson notwendig machte. Diese Drehbewegung, zusammen mit der Ablenkung durch die Studienaufsicht, kann die Orientierung erschwert haben.

Es konnte darüber hinaus ab und zu eine Art Erkundungsdrang beobachtet werden, welche einige Teilnehmende dazu veranlasste, zusätzliche, für die Aufgabenstellung unnötige Teleportationen auszuführen. Die oben diskutierte beste Eignung der Gesamtdistanz als einziger Parameter zur Beurteilung der Wegfindung ist also auch nicht fehlerfrei, wenngleich sie nach wie vor als am Aussagekräftigsten angesehen wird.

Schließlich wurde ab und zu angemerkt, dass einige Hilfsmittel sich nicht so verhalten haben wie von den Testpersonen erwartet oder gewünscht. So wurde ab und zu angemerkt, dass bei den statischen Hilfsmitteln (2D-Karte und 3D-Karte) zunächst davon ausgegangen wurde, dass sie dynamisch sind und 'mit der Testperson mitreisen'. Dem Richtungspfeil wurde nicht immer vertraut, da er bedingt durch die Navigationsberechnung innerhalb der Unreal Engine manchmal einem geringfügigen ZickZack-Kurs folgte. Bei den Wegweisern war nach Aussage weniger Teilnehmenden von einem bestimmten Winkel und aus größerer Entfernung betrachtet die Richtung nicht eindeutig erkennbar.

Die Limitationen technischer Art trafen entweder auf alle Teilnehmenden gleichermaßen zu oder veränderten sich nicht während eines Durchlaufs einer Testperson. Ihr Effekt auf die Ergebnisse wird daher als sehr gering eingeschätzt. Es ist jedoch möglich, dass es aufgrund der oben genannten Rückmeldungen und Beobachtungen sowie weiterer, nicht kommunizierter Einschränkungen zu einer Beeinflussung der Ergebnisse kam, wie beispielsweise des Richtungspfeils und der Wegweiser. Die Ergebnisse zur Wegfindung unterscheiden sich zwar recht robust, jedoch sind die Unterschiede beim Turmfehler eher gering. Bei der Entscheidung, welches Hilfsmittel für welchen Zweck eingesetzt wird, ist also immer zu beachten, dass das Design dieses Hilfsmittels und der Kontext des Einsatzes eine große Auswirkung auf dessen Wirksamkeit haben kann.

Vergleich zur Segeberg-Studie

Die beiden Studien waren sehr unterschiedlich ausgelegt, dennoch lassen sich auf Basis einiger ähnlicher Parameter Vergleiche ziehen.

In der Segeberg-Studie haben 54% bis 71% (je nach Fragestellung) der Teilnehmenden die Selbsteinschätzung angegeben, keine oder nur geringe Hilfe bei der Orientierung in VR zu benötigen. Die Ergebnisse der Orientierungsstudie stehen dem entgegen, wonach bei Weglassen jeglicher Hilfe die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse bei der Wegfindung vorliegen. Diese Beobachtung der Falscheinschätzung der eigenen Orientierungsfähigkeiten in VR deckt sich sowohl mit der Erfahrung bei öffentlichen Vorführungen der Projekte 'Segeberg 1644' und 'Stade 1620' als auch mit den Rückmeldungen mehrerer Teilnehmenden der Orientierungsstudie, wonach sie überrascht darüber waren, wie schwer ihnen die Orientierung innerhalb der VR-Welt fällt. Neben einem generellen Hang zur Selbstüberschätzung kann diese Diskrepanz zwischen Einschätzung eigener Orientierungsfähigkeiten und tatsächlichen Ergebnissen zum Teil auch in

den bereits in Kapitel 5.3 beschriebenen technischen Limitationen heutiger VR-Hardware begründet liegen.

Ein Vergleich der Teilnehmenden beider Studien offenbart außerdem, dass die Vorerfahrung mit VR beim jüngeren Kreis an Teilnehmenden der Orientierungsstudie deutlich höher ist als bei den Teilnehmenden der Segeberg-Studie. Unterschiede sind also theoretisch auch mit dem Kohorten-Effekt erklärbar, den bezüglich VR auch schon Lokka & Çöltekin (2020) vermutet haben. Absolut gesehen ist aber auch die VR-Vorerfahrung bei den Teilnehmenden der Orientierungsstudie eher gering. 63% (n = 40) gaben an, kaum oder keine Vorerfahrung zu besitzen. Der Kohorten-Effekt kann somit also nur eine geringe Auswirkung besitzen und aufgrund des Nischencharakters, den VR aufgrund der Anschaffungskosten und der noch nicht langen Verfügbarkeit nach wie vor besitzt, ist zurzeit noch von einer guten Vergleichbarkeit auszugehen.

10.3 Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten

Aus den Rückmeldungen der Teilnehmenden sowie aus direkten Beobachtungen während der Studiendurchführung lassen sich einige Erweiterungsmöglichkeiten ableiten.

Getestet wurde hier nur die Locomotion-Variante 'Teleport'. Auch wenn andere Locomotion-Techniken einen signifikanten Einfluss auf das Wohlbefinden haben können (Kapitel 3.3), so können sie auch zu sehr anderen Ergebnissen für die Orientierung führen, insbesondere bei kontinuierlicher Fortbewegung und somit der Aufrechterhaltung des optischen Flusses (Korkut & Surer, 2022; Langbehn, 2019; Mallot, 2012). Eine vergleichende Studie der Hauptparameter zwischen zwei oder mehreren Kontrollgruppen mit jeweils unterschiedlicher Locomotion-Technik wäre also interessant. Zusätzlich könnte eine Kontrollgruppe ein ähnliches Labyrinthdesign in der Realität durchlaufen. Dieser Vergleich wäre zwar sehr aufwendig, würde es aber erlauben, sowohl die Limitationen als auch Vorteile der VR-Technologie für Orientierungsaufgaben direkt zu vergleichen und in einen besseren Kontext mit bisherigen Studien zu setzen, die sich mit der Übertragbarkeit des Orientierungsverhalten von der Realität in VR (und vice versa) beschäftigen (Clemenson et al., 2020; Dong et al., 2022).

Aussagen zum Einfluss des Hilfsmittels auf die Wegfindung und die kognitive Karte wurden in dieser Studie auf jeweils einen Hauptparameter gestützt. Mehr Robustheit sowie zusätzliche Erkenntnisse zum Orientierungsverhalten und insbesondere zur Entscheidungsfindung ließen sich durch zusätzlich erhobene Parameter treffen. Eye-Tracking während der Studiendurchführung erlaubt es, den Fokus der Testpersonen zu bestimmen. Einige HMDs sind explizit mit Anschlüssen oder zumindest Platz zur Erweiterung von Eye-Tracking-Sensoren ausgestattet und wurden bereits für vergleichende Studien zwischen VR und DVEs eingesetzt (Dong et al., 2020). Aus den Daten ließe sich beispielsweise ablesen, wann und wie oft eine Testperson ein Hilfsmittel konsultiert, auf welche Elemente dabei der Fokus liegt, wie oft eine Landmarke fixiert wird oder welche Blickabfolge bei einer Abzweigungsentscheidung erfolgt. In eingeschränktem Maße ließen sich diese Aussagen auch bereits durch das kontinuierliche Auslesen der Ausrichtung der HMD treffen. Das Aufzeichnen des Standpunktes der Testpersonen nach jedem Teleportationsvorgang würde es außerdem erlauben, den genauen Weg nachzuvollziehen, den die Testpersonen zwischen Start und Ziel zurückgelegt haben. Kombiniert mit Daten zur Aufenthaltsdauer an jedem Standpunkt ließe sich somit eine Heatmap erstellen, mit der sich Bewegungsmuster unterschiedlicher Hilfsmittel miteinander vergleichen ließen. Dieselbe Methodik, angewandt auf eine der Realität nachempfundene, virtuelle Welt (wie beispielsweise 'Segeberg 1644' oder 'Hamburg: Neue Burg

VR'), würde sich zur Offenlegung von Schwachstellen eignen und Hinweise liefern, an welchen Stellen der virtuellen Welt zusätzliche Unterstützung zur selbstständigen Zielfindung nötig ist. In dieser Studie wurde sich auf die Hilfsmittel an sich konzentriert. Unterstützende Mechaniken wie Fokuslenkung können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung der Umgebung und somit das Orientierungsverhalten haben. Das visuelle Hervorheben ('Highlight') von zu fokussierenden Punkten im Raum (beispielsweise der nächste Wegpunkt) können unterstützend wirken. Auch das Einblenden weiterer Hinweise wie Pfeile oder Helligkeitsanpassungen, welche die Testperson beeinflussen sollen, die Aufmerksamkeit in eine bestimmte Richtung zu lenken, sind denkbar. Solche Zusatzmaßnahmen könnten in einer weiteren Untersuchung für sich oder in Kombination mit den verschiedenen Hilfsmitteln getestet werden.

Den Rückmeldungen der Studienteilnehmenden entsprechend könnten zur besseren Ausdifferenzierung der subjektiven Wertung der Hilfsmittel für unterschiedliche Zielvorgaben jeweils eigene Rankings abgefragt werden. In diesem Fall wäre also eines für die Wegfindung und eines für die Turmplatzierung erforderlich. Eine weitere häufige Rückmeldung war der Spaßfaktor: Für viele Teilnehmende hat sich die Studie wie eine Art Mini-Spiel angefühlt. Dieser Gamification-Effekt (Kapitel 4.2) ließe sich für zukünftige Studien zunutze machen und ausbauen. Nach De Leeuw et al. (2020) ist das insbesondere zur Motivation von Interessierten zur Studienteilnahme hilfreich und kann somit für eine höhere Zahl an Teilnehmenden und somit für repräsentativere und aussagekräftigere Ergebnisse sorgen.

Schließlich wurde noch der Aspekt der Inklusion angemerkt. Es gab während der Studiendurchführung zwar nur eine Person, die eine Durchführung im Sitzen bevorzugte und somit lassen sich aus den erhobenen Daten dazu keine belastbaren Aussagen treffen. Allerdings ist bei Studiendesigns bzw. der Gestaltung von VR-Apps allgemein darauf zu achten, dass sich reale Unterschiede wie beispielsweise die Angewiesenheit auf einen Rollstuhl und somit eine niedrigere Sichthöhe und erschwerte Rotation, Einschränkungen des Seh- oder Hörvermögens oder Beeinträchtigungen in der Motorik (und somit Probleme bei der Bedienung von Geräten/Controllern) auch in die virtuelle Welt übertragen. Hier bieten VR-Welten durch Anpassungen in der Programmierung Gegenmaßnahmen und Unterstützungsmöglichkeiten, die in der Realität nicht möglich sind. Eine Untersuchung dieser Möglichkeiten wäre in einer weiterführenden Studie denkbar.

In Kapitel 11.1 werden aus den Studienergebnissen Design-Empfehlungen für VR-Anwendungen abgeleitet, die anschließend in 'Hamburg: Neue Burg VR' umgesetzt werden. Ein sinnvoller nächster Schritt der Studie wäre somit die Überprüfung der in einer generischen, minimalistischen Studienwelt erhobenen Studienergebnisse in einer der Realität nachempfundenen virtuellen Welt.

11 Das VR-Projekt 'Hamburg: Neue Burg VR'

Das VR-Projekt 'Hamburg: Neue Burg VR' stellt den zweiten, praxisbasierten Teil dieser Arbeit dar. Er versteht sich zum einen als konsequente Fortführung und Umsetzung der in den Studien gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Orientierung, Nutzersteuerung und Erwartungen. Gleichzeitig dient er aber auch den Zielen dieser Arbeit entsprechend als Praxisbeispiel für die Kombination der Aspekte (historische) Wissenschaftskommunikation, Serious Game, Virtuelles Museum, offener VR-Welt und Zugänglichkeit/Erschließung des VR-Potentials für ein breites, unerfahrenes Publikum.

11.1 Ableitungen aus den Studien

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich einige Empfehlungen für VR-Anwendungen ableiten, die sich sowohl aus den konkreten Daten zur Orientierung als auch aus den Beobachtungen während der Studien und den Rückmeldungen der Studienteilnehmenden speisen.

Zunächst bleibt festzuhalten, dass VR nach wie vor für die meisten Menschen Neuland darstellt und sich nicht auf eine generelle Vorerfahrung mit der Technologie und Kenntnisse der hierfür etablierten Methoden verlassen werden kann. Wenn es sich also nicht um spezialisierte Anwendung für eine klar definierte Zielgruppe mit Vorerfahrung oder entsprechender Unterstützung handelt, ist eine Einführung notwendig, welche die Grundzüge der Anwendung erklärt. Neben einem solchen auch aus anderen Anwendungen bekannten Tutorial muss hierbei besondere Rücksicht auf die Neuartigkeit der Eingabe (i.d.R. Handcontroller) sowie auf die Neuartigkeit der Umgebungswahrnehmung geachtet werden. Die Anwendenden benötigen Zeit, um sich an die Tiefe der Immersion zu gewöhnen. Die Rundum-Wahrnehmung steht in starkem Gegensatz zur gewohnten Informationsaufnahme digitaler Inhalte, die sich zumeist auf einen PC- oder Smartphone-Bildschirm beschränkt und eine eng umfasste räumliche Position im Blickfeld der Anwendenden einnimmt.

Als wirksamste Hilfsmittel der beiden Kategorien haben sich in der Orientierungsstudie 'Navigationsline' (für die Wegfindung) und '3D-Karte' (für die kognitive Karte) erwiesen. '2D-Karte am Controller' hat in beiden Kategorien gut abgeschnitten und lag zusammen mit 'Navigationslinie' auch in der Beliebtheit auf den vordersten Plätzen. VR-Anwendungen mit einer gewissen Bewegungsfreiheit profitieren also von dieser Art Hilfsmittel in besonderem Maße. Das in dieser Arbeit umgesetzte VR-Projekt stellt ebenfalls eine frei begehbare virtuelle Welt dar. Dementsprechend wurden diese Hilfsmittel für dieses Projekt ausgewählt und werden auch allgemein für offene VR-Welten mit entsprechender Laien-Zielgruppe empfohlen. Einige andere Hilfsmittel haben zwar auch je nach Kategorie vergleichbar gut abgeschnitten, allerdings sollen entsprechend der Cognitive Load Theory die Nutzenden auch nicht mit Informationen überfordert werden (Harrower, 2007). Einige Hilfsmittel werden daher ganz weggelassen oder ggf. mit anderen Hilfsmitteln kombiniert.

Inhaltlich lassen sich aus der Segeberg-Studie die Erwartungen an eine solche VR-Anwendung ableiten. Die meistgenannten Punkte waren neben der historischen Modellierung auch die Belebung des Ortes mit Menschen und Tieren sowie die Möglichkeit weiterführender

Interaktionen mit der Umgebung. Bei der Orientierungsstudie wurde von den Teilnehmenden der Gamification-Ansatz besonders hervorgehoben. Alle diese Elemente sollen somit im Konzept von 'Hamburg: Neue Burg VR' berücksichtigt werden. Insbesondere dem spielerisch-interaktiven Ansatz wird bei der Vermittlung von (historischem) Wissen eine große Bedeutung beigemessen (Hamari et al., 2014; Mortara et al., 2014) und soll bei der Umsetzung besonderes Gewicht bekommen.

11.2 Konzept

Das Design der VR-App basiert in vielen Punkten auf etablierten Guidelines zu allgemeinen Anwendungen für DVEs sowie für VR. Als generelle Referenz soll hier Jerald (2016) genannt werden, der einige allgemeine Empfehlungen für VR-Anwendungen zusammengestellt hat. Darüber hinaus erfordert jede Anwendung natürlich eine spezielle, individuelle und zielgerichtete Herangehensweise. Für dieses VR-Projekt werden im Folgenden die Grundpfeiler vorgestellt.

Zielgruppendefinition

'Hamburg: Neue Burg VR' soll eine VR-Anwendung für theoretisch alle sein. Die oben erwähnte Zugänglichkeit für VR-Laien und die Verfügbarmachung des Potentials der VR steht dabei an erster Stelle. Die Bedienung darf keine Vorerfahrungen zur Voraussetzung machen. Die Anwendung soll somit sowohl VR-erfahrene Menschen mit Interesse an einer unterhaltsamen, kurzweiligen Zeitreise als auch Neulinge mit Interesse an einen bestimmten Teil der Hamburger Geschichte ansprechen.

In der Praxis ergeben sich durch die Verfügbarkeit der Anwendung jedoch einige Einschränkungen. Die Benutzung setzt entweder den Besitz oder zumindest den Zugang zu VR-Hardware voraus oder ist nur durch den Besuch einer entsprechenden Vorführung im Museum oder auf speziellen Veranstaltungen möglich. Der potentiellen Zielgruppe gehören also an:

- a) Personen mit einfachem Zugang zu VR-Equipment (Besitz/Bekanntenkreis/Leihe),
- b) Besuchende des ausstellenden Museums und
- c) Besuchende/Teilnehmende einer Veranstaltung, auf der 'Hamburg: Neue Burg VR' präsentiert wird.

Eine weitere Zielgruppendefinition lässt sich auf Basis von Interessen vornehmen. Zur Zielgruppe gehören also Personenkreise, die Interesse zeigen an:

- a) Geschichte im Allgemeinen,
- b) Hamburg bzw. der Hamburger Geschichte im Speziellen,
- c) der VR-Technologie und -Anwendungen im Allgemeinen,
- d) Serious Games,
- e) Methoden der Wissenschaftskommunikation und
- f) 3D-Visualisierung / visuellen Rekonstruktionen.

Schließlich lassen sich die Zielgruppen auch nach Zugehörigkeit zu Institutionen einteilen, sofern diese Zugehörigkeit ausschlaggebend für das Interesse ist. Folgende Institutionen könnte diese VR-Anwendung ansprechen:

- a) Forschungsgruppen, die sich mit VR allgemein oder mit ähnlichen Themen wie denen in dieser Arbeit auseinandersetzen,

- b) Entwicklungsgruppen/VR-Studios, die sich für neue Erkenntnisse und abgeleitete Design-Empfehlungen für VR-Anwendungen interessieren,
- c) Bildungseinrichtungen wie Schulen oder Museen, die nach neuen didaktischen Möglichkeiten zur Wissensvermittlung suchen,
- d) Unternehmen/Institutionen aus den Bereichen Architektur/Stadtplanung/Beteiligungsverfahren mit Interesse an VR-Lösungen für Produkt- und Planungspräsentationen oder
- e) keine Zugehörigkeit zu den oben genannten.

Bei der Entwicklung ist also auf eine Ausgewogenheit zu achten, um weder Menschen ohne VR-Vorkenntnisse zu verschrecken, noch Erfahrenere zu langweilen.

Anwendungsszenarien

Für die Entwicklung sollen hauptsächlich drei Anwendungsszenarien berücksichtigt werden. Zunächst ist mittelfristig der museale Einsatz der VR-Anwendung vor Ort in einer thematisch passenden Ausstellung vorgesehen. Das AMH hatte die Ausgrabungen und Recherchen zur Neuen Burg durchgeführt und 2020/21 die Ergebnisse in einer temporären Ausstellung präsentiert (Weiss, 2021). Eine solche Präsentation vor Ort verdeutlicht die Anforderung an die Anwendung, auch Personen anzusprechen, die eigentlich gar nicht für das VR-Erlebnis angereizt sind, sondern sich nur grundsätzlich für das Ausstellungsthema interessieren und VR lediglich als Erweiterung der Ausstellung betrachten. Der zweite Anwendungsfall beschreibt den privaten Gebrauch. Die Anwendung soll online zum Download verfügbar gemacht werden und somit theoretisch weltweit Menschen Zugang zur Hamburger Geschichte bieten, sofern die VR-Hardware vorhanden ist. Der dritte Anwendungsfall beschreibt die temporäre Präsentation auf Veranstaltungen, Tagungen, Messen etc., aber auch in Schulen oder sonstigen Bildungseinrichtungen, die sich inhaltlich oder technisch mit Aspekten dieser VR-Anwendung, der Technologie allgemein oder Möglichkeiten zur Wissenschaftskommunikation befassen. Insofern versteht sich das VR-Projekt auch als Demonstrator für Forschungsergebnisse (hier insbesondere Orientierung und Nutzersteuerung) sowie als Konservator für archäologische Forschung. Damit reiht es sich auch in das Profil der in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungen für Wissenschaftskommunikation und jener Anwendungen ein, die sich der Aufnahme, Konservierung und der (digitalen) Verfügbarmachung von CHOs widmen.

Inhalt

Die VR-App soll sich auf die 'Neue Burg' als erste Hamburger Stadterweiterung vor ca. 1000 Jahren konzentrieren. Die von den Archäolog:innen gesammelten Daten und für die Ausstellung aufbereiteten Analysen sollen hierbei als Grundlage dienen, um die gesamte Ringwallanlage und ihre unmittelbare Umgebung digital zu rekonstruieren. Dieses 3D-Modell soll zunächst für sich genommen einen zentralen Bestandteil der VR-App einnehmen. Mit einer detaillierten Ausgestaltung des 3D-Modells nach Vorgaben der Historiker:innen auf Basis des aktuellen Stands der Forschung soll eine lebens- und realitätsnahe Welt entstehen, welche die Besuchenden erkunden sollen. Dieser erste Konzeptteil erfüllt somit die Anforderungen einer frei begehbaren, offenen Welt ('Open World'). Er entspricht den Rekonstruktionen und als 'Walking Simulator' konzipierten VR-Anwendungen, die bereits in vielen früheren Projekten umgesetzt wurden (Deggim et al., 2017b; Tschirschwitz et al., 2019; Walmsley & Kersten, 2019).

Darüber hinaus soll es aber ein weit höheres Maß an Interaktionen mit der virtuellen Umwelt geben, sodass die Erklärung der Geschichte nicht mehr – wie bei oben genannten Projekten – Aufgabe einer Begleitperson ist. So sieht das Konzept mehrere Stationen in der Neuen Burg vor, welche von den Nutzenden aktiviert werden können, um dann Informationen über die jeweiligen

Gebäude, über das damalige Leben oder über zeitliche Veränderungen dieses Ortes im Verlauf der Stadtgeschichte zu erhalten. Neben der Funktion als Virtuelles Museum (Kapitel 4.1) soll die Anwendung dabei dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Konzept der 'Serious Games' folgen. Die Inhalte sollen also nicht nur als eine virtuelle Datenbankabfrage präsentiert werden, sondern in thematisch passender Form in die historische Umgebung eingebettet sein. Kleine spielerische Herausforderungen auf dem Weg sowie eine übergeordnete Aufgabe, die zum Erkunden der gesamten VR-Welt und aller Stationen motiviert, sollen die Informationsaufnahme erleichtern.

Aus diesen grundsätzlichen Anforderungen ergibt sich zunächst eine räumliche und zeitliche Einordnung. Mit der Neuen Burg wurde ein neues Kapitel der Hamburger Stadtgeschichte aufgeschlagen. Es soll also eine klare Abgrenzung zur früheren Hamburger Stadtgeschichte bis 1020 und der Hammaburg geben. Als Zeitpunkt der Rekonstruktion wurde das Jahr 1024 gewählt, also ein Jahr nach der Fertigstellung der Neuen Burg. Zum einen lässt sich vermuten, dass es ein bisschen Zeit gebraucht hat, bis sich das in der App dargestellte Alltagsleben eingestellt hat. Auch die vom AMH zur Verfügung gestellten Rekonstruktionszeichnungen zeigen hauptsächlich einen Alltagszustand mit fertiggestellten, bezogenen Häusern sowie leichtem Bewuchs, sodass bereits die Datengrundlage einen Zeitpunkt vorschreibt, der nicht unmittelbar die Burgfertigstellung beschreiben kann. Zum anderen eignet sich die Tatsache, dass man (zum Veröffentlichungszeitpunkt der App) exakt 1000 Jahre in die Vergangenheit reisen kann, als öffentlichkeitswirksame Bewerbung der Anwendung.

Eine weitere grundsätzliche Anforderung ist die weiter oben beschriebene Eignung der Anwendung sowohl für den Privatgebrauch zu Hause als auch für das Museum vor Ort. Letzteres erfordert einige besondere Herangehensweisen. Ausgehend davon, dass Besuchende des Museums die VR-Anwendung lediglich als Ergänzung der Ausstellung wahrnehmen, darf es nicht zu viel Zeit kosten, wesentliche Teile der Anwendung zu erleben. Neben einer möglichst kurzen, aber vollständigen Einführung (siehe unten) soll die Anwendung daher die Möglichkeit bieten, in einem eigenen Tempo die verschiedenen Stationen zu durchlaufen und frei entscheiden zu können, sich auf wenige Stationen zu konzentrieren, die als besonders interessant empfunden werden.

Nutzersteuerung & Orientierung

Das Konzept zur Nutzersteuerung und Orientierung leitet sich aus den Studienergebnissen ab (Kapitel 11.1). Als Hauptorientierungshilfe wurde die Navigationslinie ausgewählt, die zur jeweils nächsten aktiven Station der Tour führt. Die '2D-Karte am Controller' soll in Form einer Mini-Map für die generelle Übersicht und als Möglichkeit zur Schnellreise ebenfalls zur Verfügung stehen. Die 3D-Karte soll in abgewandelter Form eingebaut werden. Zur Visualisierung der Stadtgeschichte soll die Neue Burg in mehreren Zeitzuständen modelliert werden (Kapitel 11.5.1) und somit den Nutzenden nicht nur helfen, dank dieser exozentrischen Weltsicht eine mentale Karte der VR-Welt von 1024 zu erstellen, sondern auch eine Einordnung dieser Rauminformationen in den heutigen, in der Realität beobachtbaren Zustand zu ermöglichen. Dieser Zustand soll ebenfalls als 3D-Karte verfügbar sein. Diese Verknüpfung zwischen Realität und VR-Welt soll auch in Form aktivierbarer Panoramen möglich sein, welche den Nutzenden einen direkten Vergleich zwischen Vergangenheit und Gegenwart ermöglichen (Walmsley & Kersten, 2019, 2020).

Während der Entwicklung wurde außerdem der Richtungspfeil in veränderter Form ins Konzept mit aufgenommen, da er nun nicht mehr die Richtung an sich angibt (die Aufgabe soll von der Navigationslinie übernommen werden), aber zwei zusätzliche Informationen bereitstellt: der Name der nächsten Station und die Entfernung zu dieser. Neben der Fokuslenkung sollen diese

Angaben eine bessere Einordnung des eigenen Fortschreitens der Rundtour ermöglichen. An der Distanzangabe kann man außerdem erkennen, ob man sich aus Versehen 'verlaufen' hat.

Für eine möglichst simple Nutzersteuerung wurde zunächst ein Steuerungskonzept entwickelt. Aus der Orientierungsstudie hat es sich bewährt, möglichst wenig Knöpfe am Controller zu verwenden, um den Controller als Input-Gerät nicht zu überladen und somit für die Nutzenden abschreckend zu gestalten. Neben dem Teleport sollte es zunächst nur einen weiteren Knopf geben, mit welchem alle Interaktionen ausgelöst werden können. Das beinhaltet je nach Kontext sowohl das Aktivieren von Stationen als auch physische Interaktionen wie das Festhalten beim Klettern oder das Aufheben von Objekten. Die Möglichkeit, mit etwas interagieren zu können, soll zudem klar kenntlich gemacht werden. Auf eine erfolgte Interaktion soll auch eine unmittelbare Rückmeldung erfolgen, sodass sich die Nutzenden schnell daran gewöhnen und sofort wissen, wenn sie die Steuerung nicht korrekt benutzt haben und eine wiederholte Interaktion nötig ist. Mit diesem Konzept soll ein Kompromiss aus einer ausreichend tiefen Immersion und einer ausreichend einfachen Steuerung gewährleistet werden. Als einzige Ausnahme wurde ein zusätzlicher Knopf für die Aktivierung der Karte eingeführt, da diese Funktionalität jederzeit verfügbar sein soll und sich somit ggf. mit anderen Interaktionen überschneidet.

Zur Eingewöhnung wurde ein kurzes Tutorial entwickelt, welches nacheinander die Controller und die Teleportation, die Interaktionen und die Karte vorstellt. Jeder dieser Schritte erfordert das einmalige Aktivieren der jeweiligen Funktionalität und stellt somit sicher, dass die Nutzenden das Konzept verstanden haben. Eine Übersicht über die finale Umsetzung dieses Steuerungskonzepts findet sich in Kapitel 12.1 auf Abbildung 57.

Technisch

Als Entwicklungsumgebung kommt wie auch für die beiden Studien die Unreal Engine 4 zum Einsatz. Insbesondere die Programmierung für die Orientierungsstudie bildet hierbei eine wichtige Basis, da einige Konzepte zur Orientierung und Nutzersteuerung in angepasster Form für 'Hamburg: Neue Burg VR' übernommen werden und somit auch Teile des Codes wiederverwendet werden können. Dazu zählen vor allem die Logik zur Navigationslinie, zur Mini-Map, zum Richtungspfeil und zum Auslösen von Interaktionen.

Grundvoraussetzung für ein störungsfreies VR-Erlebnis ist eine performanceoptimierte Programmierung, um das in Kapitel 3.3 erläuterte Phänomen der Motion Sickness zu vermeiden und außerdem die Verwendung der Anwendung auf möglichst vielen Endgeräten sicherstellt. Insofern sollen die in Kapitel 6 vorgestellten Maßnahmen Anwendung finden, insbesondere die zur geometriearmen Modellierung, zur Verwendung von Texturen für Detailstrukturen sowie zum sparsamen Einsatz von dynamischen Licht- und Schattenberechnungen.

Als Zielplattformen wurden die während der Entwicklung verfügbaren PCs und HMDs ausgewählt, welche in Kapitel 7.1 beschrieben wurden.

11.3 Datengrundlage

Die auf den Ausgrabungen basierenden Rekonstruktionszeichnungen und weitere Informationen zu Geschichte und Alltag der Neuen Burg wurden vom AMH zur Verfügung gestellt. Der Begleitband zur Ausstellung (Weiss, 2021) bildete dabei die Hauptquelle für Lage und Aussehen der dargestellten Bauten. Weitere geschichtliche Quellen bildeten die Grundlage zum Aussehen von Gebäuden und Personen (Maixner, 2010; Schietzel et al., 2014; Weiss, 2016; Weiss & Klammt, 2014) beziehungsweise zur allgemeinen Stadtgeschichte (Gretzschel et al., 2013; Kummereincke,

2020, 2022; Weiss, 2016, 2021). Die 3D-Modelle der Zeitscheiben wurden auf Basis von historischen Karten und Aufnahmen dieses Stadtgebiets angefertigt (Braun & Hogenberg, 1572; Hagemann-Tietjen, 1985; Melhop, 1895; Weiss, 2021).

Zusätzlich wurden persönliche Begehungen des entsprechenden Stadtgebiets und der Ausgrabungsstätten sowie Befragungen des Grabungsleiters zu geschichtlichen Details durchgeführt. Die in die virtuelle Umgebung implementierten 360°-Panoramen wurden 2023 vor Ort vom Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HCU angefertigt. Das Verfahren für diese Panoramaaufnahmen und die notwendigen Prozessierungsschritte werden u.a. in Kersten & Lindstaedt (2012) vorgestellt.

Für einzelne Objekte, für Texturen und für Geräusche wurden weitere Datenquellen verwendet. Es handelt sich hierbei um spezialisierte, frei verfügbare Datenbanken mit entsprechender Lizenz zur freien Verwendung, ggf. unter Namensnennung im Programm. Die Tiere (Schafe, Schweine, Hühner und Fische) entstammen den Datenbanken auf turbosquid.com und itch.io. Einige Landschaftselemente wie Büsche, Gras und Steine wurden über die 'Epic Games'-eigene und speziell für die Unreal Engine optimierte Modelldatenbank bereitgestellt. Die Texturen entstammen größtenteils der ebenfalls von Epic Games betriebenen Datenbank 'Quixel Bridge'. Weitere Texturen wurden von den Datenbanken auf 3dtextures.me, polyhaven.com und sketchuptexturclub.com bezogen. UI-Elemente wurden zwar größtenteils selbst erstellt, es wurden aber auch einige Symbole von cleanpng.com und freepik.com verwendet. Alle nicht-gesprochenen Audiodateien kommen von freesound.org.

11.4 Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf entspricht in weiten Teilen einem bewährtem Muster aus Vorgängerprojekten (Deggim et al., 2017c, 2017b) und wird im Folgenden zusammengefasst:

- 1) Konzeptentwicklung und Datensammlung
- 2) Entwicklung eines Prototyps mit rudimentärer Modellierung und dem Austesten der Kernfunktionalitäten
- 3) Detaillierte 3D-Modellierung aller Gebäude und Objekte
- 4) Texturierung
- 5) Platzierung aller Gebäude in der 3D-Welt
- 6) Landschaftserstellung
- 7) Hinzufügen von Details und zusätzlichen Elementen wie Menschen und Tieren
- 8) Programmierung der Fortbewegung
- 9) Programmierung der Interaktionslogiken
- 10) Design der Benutzungsoberfläche
- 11) Programmierung des Rundgangs und Implementation der Mini-Games
- 12) Hinzufügen von Sound
- 13) Aufnahme und Implementation der Sprachdateien
- 14) Programmierung der Zweisprachigkeit
- 15) Visuelle Effekte & Post-Processing
- 16) Datenreduktion & Performanceoptimierung
- 17) Erstellung eines eigenständig ausführbaren Programms
- 18) Testphase

Abbildung 37 bietet eine Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte und verdeutlicht den iterativen Charakter des gesamten Prozesses. Der anschließende Arbeitsablauf zur Veröffentlichung wird in Kapitel 12.2 beschrieben.

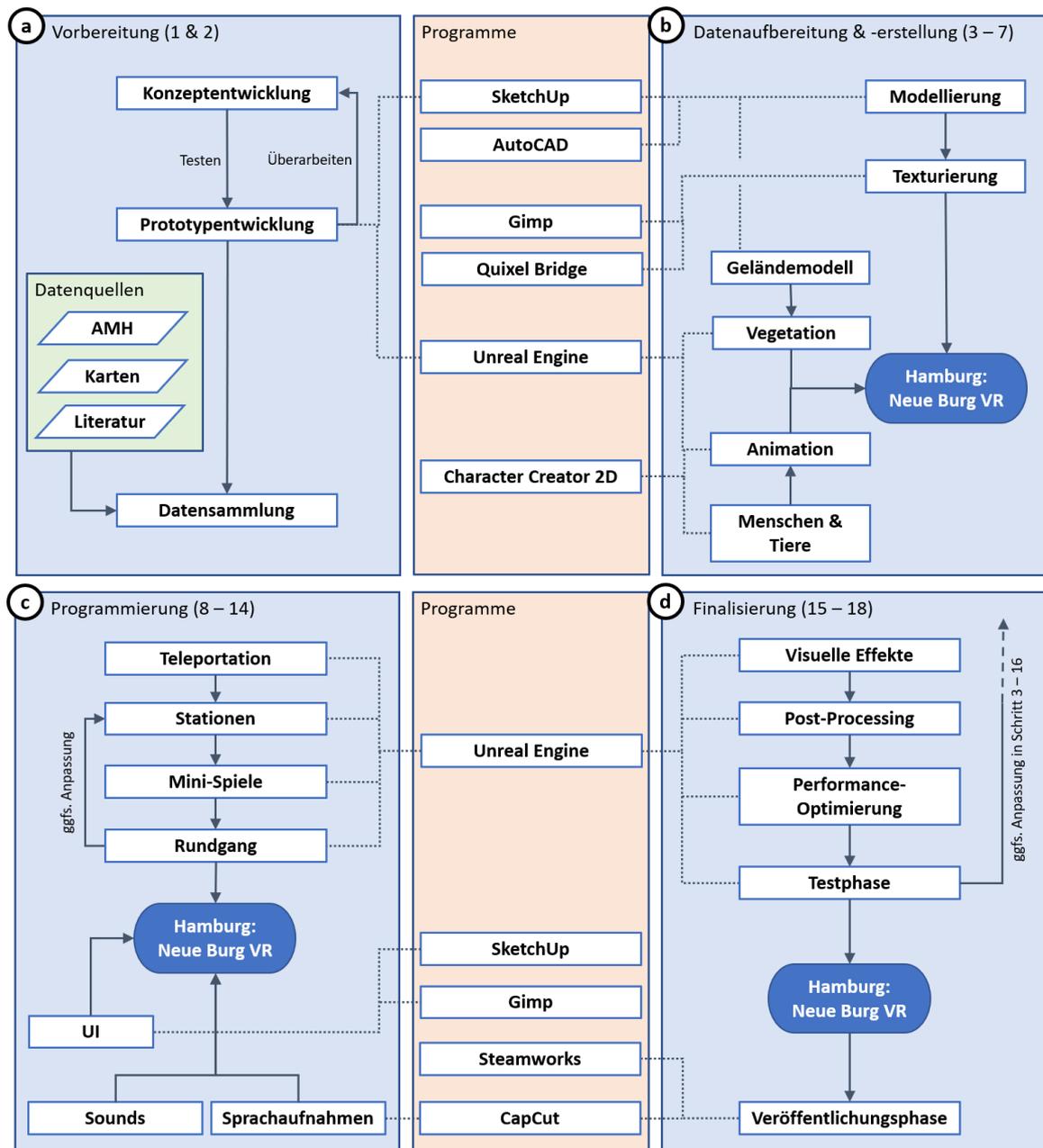


Abbildung 37. Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs.

11.5 Erstellung der 3D-Welt

11.5.1 Modellierung

Gebäude

Die 3D-Modellierung erfolgte in SketchUp. Dem oben skizzierten Arbeitsablauf entsprechend wurde zunächst eine Prototyp-Welt erstellt, in der alle relevanten Objekte – insbesondere die grobe Landschaftsaufteilung, die Ringwallanlage und die größeren Gebäude im Burginneren und im Hafengebäudebereich – detailarm modelliert wurden. Eine erste Testphase in dieser Prototyp-Welt diente anschließend dazu, iterativ die Positionen und das Design der Gebäude anzupassen, sofern dazu keine genaueren historischen Angaben vorlagen und das Zusammenspiel mit einigen Funktionalitäten wie dem Navigationssystem zu testen. Auch das grobe Ausmaß des frei zu begehenden Bereichs und somit der detailliert zu modellierenden Gebäude wurde hieraus abgeleitet.

Die eigentliche Modellierung erfolgte anschließend auf Basis der Zeichnungen und Ansichten der in Kapitel 11.3 beschriebenen Quellen. Als einzigartige Bauwerke wurden von den Historiker:innen die Erdwälle, die Torhäuser, das Herrenhaus und die Kapelle herausgestellt. Die weiteren Gebäude stellen allgemeine Wohn- und Arbeitshäuser dar und wurden später mehrfach verwendet. Abbildung 38 zeigt den Prozess anhand einiger Gebäude. Im Hinblick auf Datensparsamkeit und Performanceoptimierung wurde ein Modellierungsansatz gewählt, der mit möglichst wenig zu zeichnender Geometrie auskommt. Dieser Ansatz wird 'Low-Poly-Modeling' genannt und wird oftmals mit simplen oder einfarbigen Texturen kombiniert, um einen minimalistischen visuellen Stil zu erzeugen. Um dennoch einen gewissen Grad an Realismus zu erzeugen, sollen Oberflächendetails in einem späteren Schritt durch entsprechende Texturen hinzugefügt werden (Kapitel 11.5.2). Für das 3D-Modell der Neuen Burg wurden insgesamt 14 Gebäude modelliert, die eine Größe von ca. 1000 Polygonen (kleines Lagerhaus) bis zu 26.500 Polygonen (Torhaus) besitzen.

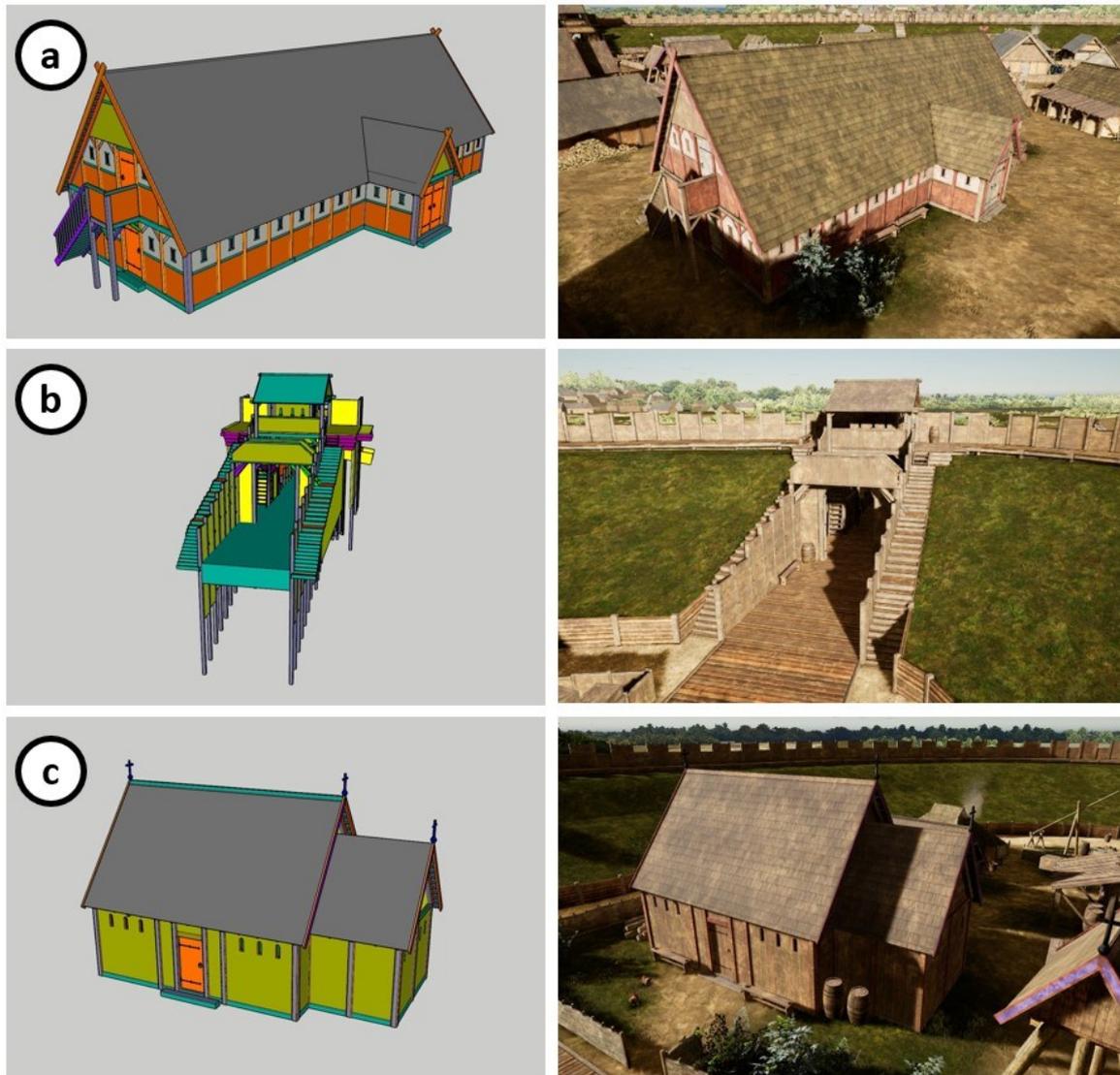


Abbildung 38. Modellierungsprozess für einige Gebäude, links in SketchUp, rechts die finale texturierte Version in der Unreal Engine: a) Herrenhaus, b) Torhaus, c) Kapelle.

Objekte & Splines

Eine weitere Kategorie bildeten Objekte wie Brunnen, Wachunterstände und Schiffe oder sonstige Details wie Fässer, Tische und Kisten, welche die Neue Burg belebter erscheinen lassen sollen. Einige dieser Detailobjekte wurden von früheren Projekten übernommen und angepasst (Deggim et al., 2017a, 2017b) und einige wurden speziell für dieses Projekt neu gezeichnet. Dazu zählen auch Gebäude- oder Objekterweiterungen, welche durch das Anfügen an eine bestehende Geometrie dessen Erscheinungsbild verändern und somit für Variationen im Stadtbild sorgen. Beispiele dafür sind einzelne Treppenabschnitte oder Dachvariationen. Abbildung 39 bietet einen Überblick über einige der insgesamt 46 Objekte, die vielfach in der 3D-Welt kopiert und platziert wurden.

Mittelalter und die frühe Neuzeit. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht über die neun modellierten Zeitepochen. Zusätzlich wurden Miniaturversionen von Bäumen, Büschen, Booten etc. modelliert und je nach Bedarf in die Modelle der Zeitepochen integriert. Diese Stadtmodelle besitzen zwischen 14.000 und 69.000 Polygone.

Tabelle 7. Übersicht über die neun Zeitepochen zur Visualisierung der Stadtentwicklung.

| Jahr | Veränderung | Abbildung |
|------|---|---|
| 1020 | Ursprünglicher unbebauter Zustand |  <p>1020</p> |
| 1022 | Neue Burg im Bau |  <p>1022</p> |
| 1024 | Neue Burg fertiggestellt; Zustand, der während der Rundtour im Maßstab 1:1 durchlaufen wird |  <p>1024</p> |

| | | |
|-------------|--|--|
| <p>1188</p> | <p>Aufgabe und Auffüllung des Innenraums der Neuen Burg; Gründung der Neustadt</p> |  <p>A 3D top-down view of a circular island in the Alster river. A central stone structure, the Neuen Burg, is surrounded by a wooden palisade. A narrow path leads from the river to the inner courtyard. The surrounding area is mostly open land with some greenery. A banner at the top reads '1188'. A compass rose and the label 'Alster' are visible at the bottom.</p> |
| <p>1500</p> | <p>Stadtbild mit Neustadt und Nikolaikirche</p> |  <p>A 3D top-down view of the same island, now densely packed with wooden buildings. A prominent church with a tall spire, the Nikolaikirche, stands in the center. The Alster river is visible around the island. A banner at the top reads '1500'. A compass rose and the label 'Alster' are visible at the bottom.</p> |
| <p>1842</p> | <p>Zerstörung durch den Großen Brand</p> |  <p>A 3D top-down view of the island in a state of complete ruin. The wooden buildings are reduced to a charred, skeletal remains. Plumes of smoke or steam rise from the wreckage. A banner at the top reads '1842'. A compass rose and the label 'Alster' are visible at the bottom.</p> |
| <p>1939</p> | <p>Wiederaufbau nach dem Großen Brand; neue Nikolaikirche</p> |  <p>A 3D top-down view of the island, now fully reconstructed with modern buildings. The new Nikolaikirche, a neoclassical structure, is the central focus. The Alster river is visible around the island. A banner at the top reads '1939'. A compass rose and the label 'Alster' are visible at the bottom.</p> |

| | | |
|------|---|--|
| 1945 | Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg |  |
| 2023 | Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg; heutiger Zustand |  |

Schließlich wurden während der Programmierung noch weitere Objekte erstellt oder bearbeitet, welche für das UI, für die Visualisierung von Interaktions- und Orientierungshinweisen oder zur allgemeinen Fortbewegung benötigt wurden. Dazu zählen beispielsweise die virtuellen Versionen der Handcontroller, Pergamente, Banner und Silhouetten von modernen Gebäuden.

Alle Modelle wurden im FBX-Format gespeichert und für die weitere Bearbeitung in die Game Engine importiert.

11.5.2 Texturierung

Texturen

Die Texturierung erfolgte direkt in der Entwicklungsumgebung 'Unreal Engine'. Dem in Kapitel 6.3 beschriebenen Prinzip folgend wurden zunächst Texturen ausgewählt, welche dem gewünschten Aussehen der darzustellenden Materialien der Gebäude, Objekte und der Umgebung möglichst nahekommen. Für Gebäude und Objekte wurden von den in Kapitel 11.3 angegebenen Texturdatenbanken insgesamt 27 Texturen ausgewählt, welche hauptsächlich verschiedene Arten und Verarbeitungsformen an Baumaterialien wie Holz abbilden. Die Texturauflösung sollte gemäß dem Prinzip der Datensparsamkeit und Performance-Optimierung möglichst niedrig sein, gleichzeitig sind diese Texturen für die Nutzenden später im Nahfeld zu sehen und benötigen somit eine gewisse Mindestauflösung, um nicht verwaschen zu wirken und die Immersion zu brechen. Je nach Einsatzzweck wurde für die meisten Texturen eine Auflösung zwischen 1024 x 1024 und 2048 x 2048 Pixel gewählt. Die meisten dieser Texturen wurden außerdem in Paketen

von jeweils drei Maps implementiert: Albedo-Map (Grundfarbe), Normal-Map (Oberflächenunebenheiten) und Roughness-Map (Rauigkeit/Reflektionsverhalten).

Darüber hinaus wurden 19 Texturen für die Gestaltung des Landschaftsbodens und des Bewuchses (Kapitel 11.5.4), 20 Texturen für UI-Elemente (Kapitel 11.6.2), sieben Texturen für die 360°-Panoramen (Kapitel 11.6.3) und 260 Texturen für die Animation der Charaktere (Kapitel 11.5.5) verwendet. Die Landschafts- und Charaktertexturen wurden zudem als Alpha-Texturen importiert. Das bedeutet, dass nur ein Teil der Textur dargestellt wird und der Rest durchsichtig ist (siehe auch Kapitel 6.1). Auf diese Weise lassen sich 2D-Charaktere und Büsche/Gras etc. in ihrer korrekten Form darstellen.

Materialien

Für eine einfachere Handhabung aller Materialien wurde zunächst ein Master-Material erstellt, aus dem sich später alle Materialinstanzen mit entsprechend veränderbaren Parametern ableiten. Abbildung 40 verdeutlicht schematisch den Aufbau der Materialien. Neben der Implementierung der (bis zu) drei Maps, welche die texturspezifischen Informationen beinhalten, konnten zusätzliche Parameter verändert werden:

- a) Skalierung
- b) Rotation
- c) Intensität der Normal- und Roughness-Maps
- d) Einfärbung
- e) statische Werte für Metallizität und Glanz
- f) positionsabhängige Verschiebung
- g) Überlagerung mit sogenannten 'Noise'-Texturen.

Für jedes gewünschte Material wurde nun eine eigene Materialinstanz erstellt, in dem hauptsächlich die Unterpunkte a) bis e) angepasst wurden. Wurde beispielsweise ein Holz-Material mit einer Ausrichtung der Holzmaserung in einem 45°-Winkel benötigt, um einen entsprechend angewinkelten Fachwerkbalken eines Gebäudes darzustellen, so wurde hierfür eine eigene Materialinstanz mit entsprechenden Anpassungen des Rotationsparameters erstellt. Insgesamt wurden ca. 140 Materialien erstellt.

Um das in Kapitel 6.3 angesprochene Problem der sichtbaren Texturwiederholung bei großen oder sich wiederholenden Gebäuden/Objekten zu vermeiden, wurden die Unterpunkte f) und g) angewandt. Die positionsabhängige Verschiebung sorgt für eine Verschiebung des Materials auf einem Objekt, sobald das Objekt in der 3D-Welt verschoben wird. Dazu werden bei der Platzierung die Weltkoordinaten des Objekts abgefragt, mit einem Multiplikator versehen und das Ergebnis als Texturursprung festgelegt. Somit erhalten gleiche Objekte, die direkt nebeneinanderstehen, ein dennoch unterschiedliches Aussehen, da markante Punkte einer Textur nun nicht mehr an derselben Stelle des Objekts auftreten. Schließlich wurden alle Texturen mit drei unterschiedlich skalierten Noise-Texturen überlagert (engl. 'noise' = 'Rauschen'). Diese Noise-Texturen bestehen aus einem chaotischen Muster an zufällig generierten Helligkeitsabstufungen. Da die Skalierungen nicht mit der Skalierung der zugrundeliegenden Farbtextur identisch sind, lässt sich somit die durch den Kachelungseffekt hervorgerufene visuelle Wiederholung kaschieren. Abbildung 41 verdeutlicht dieses Prinzip.

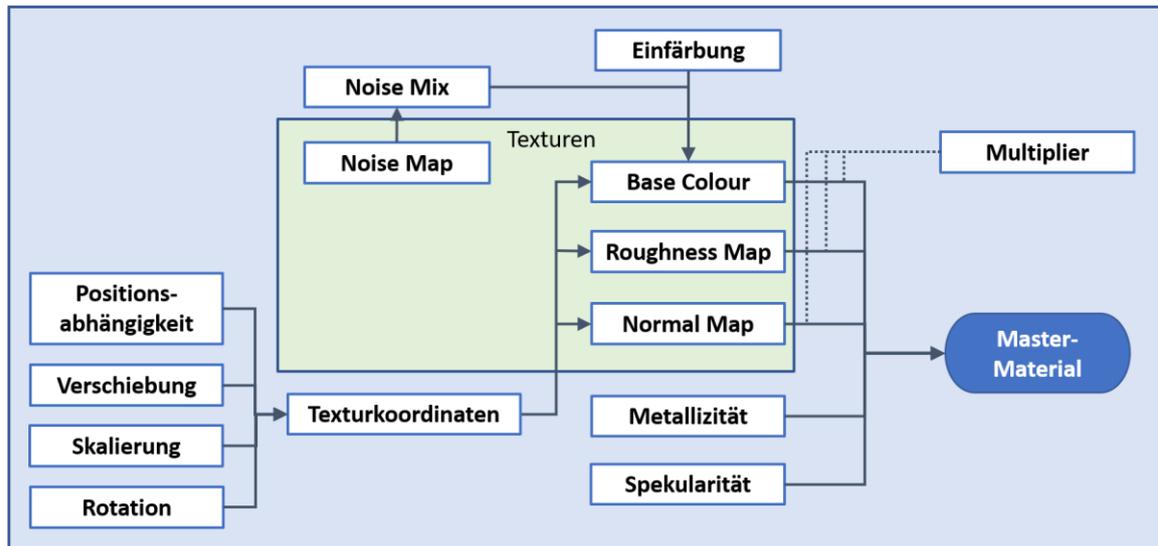


Abbildung 40. Schematische Übersicht über das Master-Material. Alle Werte können in den jeweiligen Materialinstanzen angepasst werden, um die passenden Eigenschaften darzustellen.

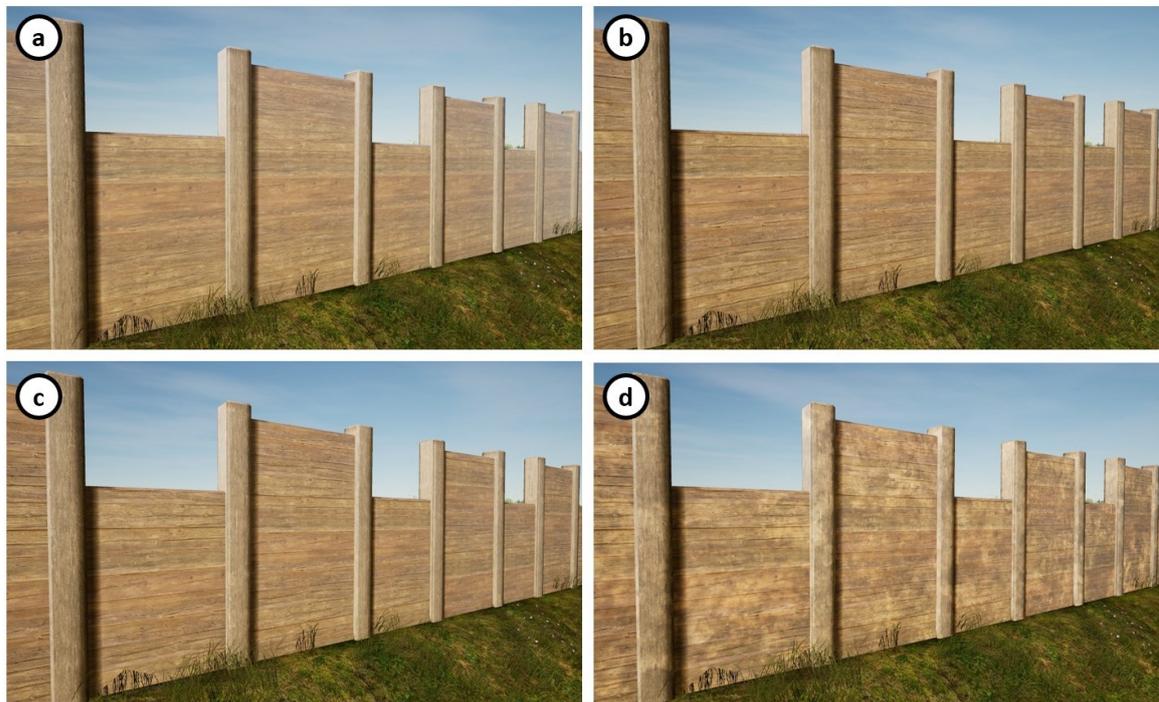


Abbildung 41. Palisadentextur a) nur als Farbtexur, b) mit zusätzlichen Maps (siehe Kapitel 6.3), c) mit positionenabhängiger Verschiebung, d) mit Noise-Texturen.

Für die Miniatur-Stadtmodelle wurde passend zum abweichenden Stil in der Modellierung auch ein etwas anderer Texturierungsansatz gewählt: Um den Eindruck zu erwecken, dass es sich hierbei um ein geschnittenes/gezimmertes und bemaltes Holzmodell handelt, wurde zunächst mit einer einzigen Holztextur gearbeitet. Diese wurde für die verschiedenen Stadtelemente (Dächer, Wände, Felder etc.) unterschiedlich eingefärbt und teilweise wurde die Rotation der Textur angepasst, um Variationen durch eine unterschiedliche Ausrichtung der Holzmaserung zu erzeugen.

Es gab für spezielle Anwendungen weitere Master-Materialien. So greifen beispielsweise alle

Objekte für die Landschaftsgestaltung auf eigene Materialien zu, was aufgrund der hier zusätzlich vorhandenen Alpha-Kanäle notwendig ist.

Projektion

Für dieses Projekt wurde das prozedurale Texturierungsverfahren (Kapitel 6.3) verwendet, da es sich hierbei zumeist um anorganische, rechtwinklige Architektur/Objekte handelt. Eine Würfel-Projektion hat daher ausreichende Ergebnisse geliefert. Somit konnte das aufwendige Verfahren des UV-Unwrappings umgangen werden. Lediglich einige Objekte aus externen Quellen (z.B. die Vegetation), die bereits ein UV-Mapping besaßen, wurden so belassen.

11.5.3 Platzierung in der 3D-Welt

Gebäude

Die Platzierung erfolgte auf Basis der vom AMH zur Verfügung gestellten Zeichnungen und Karten der Neuen Burg. Dabei wurden die Erkenntnisse aus der Prototyp-Welt (Kapitel 11.5.1) übernommen und zumeist die Prototyp-Gebäude durch die ausmodellierten und fertig texturierten Versionen ersetzt. Bei der Platzierung der Gebäude wurde entsprechend den Vorlagen Variationen im Aussehen eingefügt, beispielsweise ein anderes Dachmaterial, die Verwendung von Stützbalken oder das Hinzufügen von Anbauten wie Holzunterständen. Somit entstanden ca. 40 individuelle Gebäude, welche in und um die Neue Burg platziert wurden. Zusätzlich wurde im Nordosten die Hammaburg-Siedlung angedeutet, welche aus 45 detailärmeren Versionen der Gebäude besteht.

Details & Variationen

Palisaden und Holzwege bestehen aus sich wiederholenden Elementen. Für die Platzierung wurden daher Splines erstellt, welche die Anordnung dieser Elemente entlang einer vordefinierten Linie beschreiben. Neben den im vorherigen Kapitel für diese Fälle erwähnten Variation wurden auch Variationen in der räumlichen Anordnung der Elemente eingebaut. Zur Platzierung wurde ein Algorithmus implementiert, welcher bei jedem neu platzierten Element leichte Verschiebungen einbaut. Somit lassen sich auffällig glatte und unnatürlich harmonische Anordnungen vermeiden und es entsteht der Eindruck eines groben Bauwerks/Weges mit kleinen Unebenheiten und Schönheitsfehlern. Diese Methode wurde auch bei der Platzierung vieler Details angewandt. Für Kisten, Fässer, etc. wurde ein Algorithmus geschrieben, welcher zusätzlich zu Verschiebungsparametern auch die Rotation und die Skalierung des Objekts innerhalb eines vorgegebenen Rahmens zufällig bestimmt. Dieser Algorithmus konnte auch wahlweise deaktiviert werden, wenn für die Platzierung die Notwendigkeit einer genauen Ausrichtung bestand, wie beispielsweise bei übereinander gelagerten Fässern.

Bei der Platzierung der Details wurde sich eng an die Vorgaben gehalten, sofern die Details auf den Zeichnungen zu erkennen waren. Zusätzlich, beziehungsweise für in den Zeichnungen nicht einsehbare Bereiche, wurde das Prinzip der Umgebung entsprechend fortgeführt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass sich aus der Platzierung der Objekte ein erkennbarer Zusammenhang ergibt. Beispielsweise gibt es einige Bereiche, in denen gehäuft Objekte zur Holzverarbeitung wie Baumstämme, Lagerunterstände, bearbeitetes Holz und Werkbänke auftauchen, ggf. später ergänzt durch einen NPC mit entsprechender Arbeitsanimation. Auf diese Weise heben sich auch Bereiche für den Schiffbau, der Hafengebiete oder Anordnungen zur Viehhaltung hervor. Insgesamt wurden ca. 1600 Detailobjekte bzw. Gebäude- und Objekterweiterungen platziert. Abbildung 42 zeigt einen Vergleich der Vorlage und des resultierenden 3D-Modells.



Abbildung 42. Gesamtansicht der Neuen Burg. Links: Illustration als Vorlage (Roland Warzecha für das AMH, <https://amh.de/ausstellung-ort/burgen-in-hamburg-eine-spurensuche>). Rechts: Dieselbe Perspektive des VR-Modells.

11.5.4 Landschaft & Umgebung

Landschaftsdesign

Die Landschaft besteht im Gegensatz zur restlichen Geometrie nicht aus extern modellierten und importierten 3D-Modellen. Es handelt sich hierbei stattdessen um ein Netz aus Polygonen, welches sich mit einem UE-eigenen Werkzeug verformen und bearbeiten lässt. Auch hierfür wurden als Basis wieder die Landschaftszeichnungen der Vorlagen bzw. die darauf aufbauenden groben Landschaftsgeometrien der Prototyp-Welt verwendet. Aus georeferenzierten Versionen der Vorlagenkarten lassen sich die Dimensionen und Orte der umliegenden Landschaftsteile ableiten. Dazu gehören insbesondere der Verlauf und die Breite des Erdwalls und der ihn umfließenden Alsterschleife, an denen sich die restliche Landschaft ausrichtet. Bei dem Landschaftsnetz handelt es sich Engine-intern um ein einzelnes großes Objekt, daher wurde eine LoD-Funktionalität implementiert, welche die Auflösung des triangulierten Landschaftsnetzes dynamisch dem Standort der Nutzenden anpasst und in der Umgebung des Beobachtenden die Landschaft mit einer hohen Polygondichte von ca. einem Meter Kantenlänge rendert. In der Entfernung vom Betrachtenden nimmt die Auflösung ab und die Kantenlänge steigt bis auf über zehn Meter, insbesondere also in Landschaftsbereichen, welche zur Darstellung der weitläufigen Umgebungslandschaft dienen und weit außerhalb des vom Nutzenden betretbaren Bereichs liegen. Diese relativ grobe Auflösung ist aufgrund des generell flachen Charakters der Umgebungslandschaft möglich und Kantenübergänge sind somit nicht weiter auffällig.

Eine Ausnahme bildet die Wasseroberfläche der Alster und der Elbe. Diese besteht aus einer einzigen, planaren Fläche, welche mit einer speziellen Textur versehen wurde, die sich dynamisch mit der Zeit verändert und somit die Illusion von fließendem Wasser und leichten Wellenbewegungen erzeugt.

Die Landschaft selbst wurde anschließend digital bemalt. Dafür wurden fünf Texturen ausgewählt, um unterschiedliche Untergründe zu simulieren: Gras, Erde, Sand, Kies und Gestein. Die Übergänge zwischen den Texturen wurden mit einer Funktionalität kaschiert, welche die Texturen an den Rändern vermischt und somit harte Kanten vermeidet ('Blending').

Flora

Der Bewuchs wurde mit aus externen Quellen importierten Vegetationsobjekten realisiert. Eine besondere Herausforderung stellte die Gestaltung des Bodens dar, da dieser immer im

Nahbereich um die Nutzenden sichtbar ist und somit einen großen Einfluss darauf hat, wie realistisch die Umgebung auf die Nutzenden wirkt. Andererseits ist eine realistische Bodengestaltung sehr aufwendig umzusetzen, insbesondere, wenn es sich um natürlichen Boden handelt. Die Oberfläche einer Graslandschaft ist sehr dynamisch und detailreich. Gras, Steine und Kleinbewuchs sorgen dafür, dass theoretisch eine sehr aufwendige Geometrie nötig wäre, um eine solche Bodenfläche realistisch darzustellen. In Anbetracht der Größe der Landschaft wäre es aber für handelsübliche Hardware nicht realistisch, eine große Fläche einzelner Grashalme in Echtzeit zu rendern. Um diesem Problem zu begegnen, wurden mehrere Techniken zur Landschaftsgestaltung angewandt, die sich für die Gestaltung von Echtzeit-kritischen 3D-Landschaften bewährt haben.

Zunächst wurde darauf geachtet, dass alle Flora-Objekte mehrere LoDs besitzen (siehe Kapitel 6.1) und insbesondere die niedrig aufgelösten LoDs mit einer sehr geringen Anzahl von Polygonen auskommen. Es wurden zwar 3D-Modelle für das Gras verwendet, dieses ist aber relativ dünn in der Landschaft verteilt. Stattdessen wurde eine farbliche Abstimmung mit der darunterliegenden Grastextur vorgenommen, außerdem wurde die Grasgeometrie etwas hochskaliert, sodass bereits ab einer geringen Distanz die Lücken zwischen den einzelnen Graselementen kaschiert werden. Außerdem sorgen kleine Steine und Kleinbewuchs für Auflockerung und Ablenkung. Ein weiterer Grad an Realismus wird durch die Animation der Landschaftsobjekte erzeugt. Alle Bewuchsobjekte wurden so animiert, dass der Eindruck eines leichten Windes entsteht, der die Halme und Blätter bewegt. Die letzte Technik nennt sich 'Distance Culling', schränkt den Renderradius ein und wird in Abbildung 43 schematisch dargestellt. Nur innerhalb eines bestimmten Bereichs um die Nutzenden wird Kleinbewuchs gerendert. Außerhalb dieses Bereichs ist ein Unterschied zwischen Bepflanzung und Bodentextur aufgrund der farblichen Anpassung kaum noch zu erkennen. Es wandert also immer ein 'Bepflanzungskreis' dynamisch mit den Nutzenden mit.

Für die Landschaft, die weiter entfernt und außerhalb des für die Nutzenden betretbaren Bereichs liegt, wurden 'Billboards' verwendet. Hierbei handelt es sich um zweidimensionale Abbildungen eines Objekts mit dem Ziel, möglichst viel Geometrie einzusparen. Das Prinzip lässt sich mit Pappaufstellern im Hintergrund einer Theater- oder Filmkulisse vergleichen und basiert auf demselben Gedanken wie LoDs: Objekte in der Entfernung können sowieso nicht mehr in ihrem Detailreichtum oder ihrer Dreidimensionalität wahrgenommen werden, daher lassen sie sich durch zweidimensionale Abbildungen ersetzen. Abbildung 44 zeigt die Anwendung für Baumreihen in 'Hamburg: Neue Burg VR'. Ein Nebeneffekt dieses Prinzips ist außerdem die Kaschierung des Horizonts, da sonst die Landschaft bis in eine weite Entfernung gestaltet werden müsste.

Für die Landschaftsgestaltung wurden 13 verschiedene Objekte 13.098-mal verwendet: Grasflecken (eine Variante, 9.560 Stück), Steine (eine Variante, 987 Stück), Kleinbewuchs (zwei Varianten, 1941 Stück), Büsche (sechs Varianten, 536 Stück) und Baum-Billboards (drei Varianten, 74 Stück). Die gestaltete Umgebung erstreckt sich über eine Fläche von ca. 1000 x 1000 Metern und geht somit deutlich über den enger abgegrenzten begehbaren Bereich hinaus.

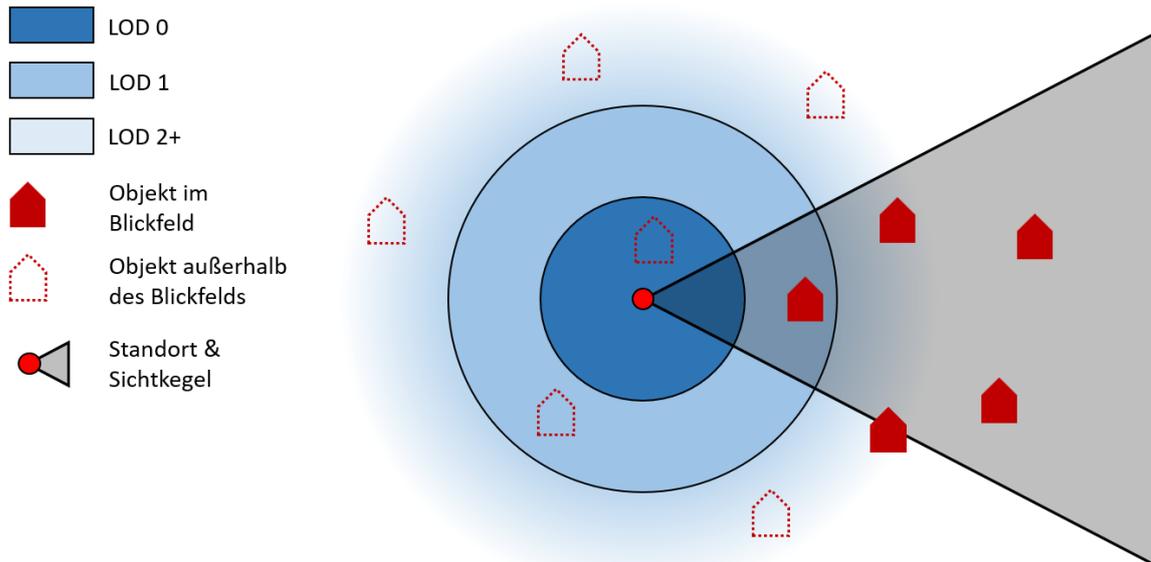


Abbildung 43. Je näher sich Objekte am Betrachtenden befinden, desto höher ist ihre Auflösung. Außerhalb des Sichtkegels werden Objekte nicht gerendert. Lediglich die entsprechenden Objekte im grau hinterlegten Sichtkegel werden berechnet.



Abbildung 44. Oben: Perspektive der Nutzenden. Unten: Derselbe Hintergrund aus einer etwas anderen Perspektive offenbart die ressourcenschonende Zweidimensionalität der Bäume und Büsche.

11.5.5 Menschen & Tiere

Stil und Erstellung

Wie sich aus den Rückmeldungen der Vorgängerprojekte und der Segeberg-Studie ergibt (Kapitel 9.1.4), wird sich häufig eine Belebung der virtuellen Welt mit Menschen und Tieren gewünscht. Somit entsteht der Eindruck, durch eine Alltagsszene zu wandern und kein reines Architekturmodell zu betrachten. Die realistische Modellierung von Menschen ist jedoch mit sehr viel Aufwand verbunden und kann leicht in einem 'Uncanny Valley' enden (Kapitel 6.2). Daher wurde für 'Hamburg: Neue Burg VR' eine stilisierte, zweidimensionale Repräsentation der Menschen gewählt. Neben dem im Rahmen dieses Projekts vertretbaren Arbeitsaufwand wurde diese Lösung auch wegen der Verfügbarkeit des Programms 'Character Creator 2D' (CC2D, Kapitel 7.2) und somit der Möglichkeit eines schnellen Arbeitsablaufs zur massenhaften Erstellung von Charakteren gewählt. Eine alternative Methode, die auf manuell angefertigten Zeichnungen der Charaktere basiert, wurde zunächst getestet, allerdings wegen zu hohem Aufwand im Hinblick auf die benötigte Menge und die gewünschten Variationen verworfen. Im Weiteren werden diese Charaktere mit dem für solche Anwendungen etablierten Begriff 'NPC' bezeichnet (aus dem Englischen: Non-Player Character; zu Deutsch: Nicht-Spieler-Charakter).

Die Erstellung der Zeichnungen basiert auf einer parametrischen Gestaltung des Aussehens und einer modularen Auswahl an vorgezeichneten Kleidungsstücken und vorhandenen Animationsabläufen. Begonnen wurde mit der Anpassung des Aussehens der verschiedenen NPCs. Die Kleidung muss natürlich historisch passen, allerdings ist die Auswahl an solchen Vorlagen in CC2D sehr beschränkt. Daher wurde zusätzlich mit unterschiedlicher Farbgestaltung Diversität erzeugt. Als Vorlage galten hier die in den Quellen verfügbaren Charakterzeichnungen, insbesondere Schietzel (2014) und Weiss (2021). Schließlich wurde die passende Animation für den jeweiligen NPC ausgewählt. Von den insgesamt 13 erstellten NPCs wurde für zehn eine Geh-Animation verwendet, für zwei eine Steh-Animation in verschiedenen Körperhaltungen (Wachposten und Schäferin) und für einen eine Arbeitsanimation (Holzhacker). Abbildung 45 zeigt eine Übersicht der erstellten NPCs. Diese animierten Bewegungsabläufe wurden anschließend als Einzelbilder im PNG-Format exportiert.

In der Unreal Engine wurden alle Einzelbilder zunächst in sogenannte 'Sprites' transformiert. Sprites sind in der Unreal Engine (und ganz allgemein in der Computergrafik) Container zur Darstellung von 2D-Elementen, denen neben einer Textur auch noch andere Eigenschaften zugewiesen werden können. Sprites ersetzen somit das Material aus dem üblichen Texturierungsprozess für 3D-Elemente. Die Sprites werden wiederum in einem UE-eigenen Animationswerkzeug namens 'Paper Flipbook' zu Entitäten zusammengefügt, welche die Einzelsprites in einer bestimmablen Abfolge und Geschwindigkeit hintereinander in einer Endlosschleife anzeigen und somit die Bewegungsillusion erzeugen. Jede Bewegungsanimation besteht aus zehn Einzelbildern. Alle Animationen wurden außerdem einmal gespiegelt, um den NPC aus der Perspektive des Betrachtenden sowohl nach links als auch nach rechts laufen lassen zu können. Die Paper Flipbooks können dann schließlich einer Blueprint zugewiesen werden, in der die restliche Logik zur Bewegung und Darstellung der NPCs programmiert wird.



Abbildung 45: Übersicht über die 13 NPCs. Abgebildet ist jeweils das erste Bild der Animation. Obere Reihe: Männer, mittlere Reihe: Frauen, untere Reihe: Berufe (Wachtposten, Holzfäller, Schäferin).

Programmierung

Die NPCs wurden mehreren vorher festgelegten Routen zugewiesen und laufen diese Strecken in einer Endlosschleife ab. Um zu vermeiden, dass diese Kreisbewegung als repetitiv wahrgenommen wird, wurden die Routen sehr großzügig angelegt, sodass es teilweise über zehn Minuten dauert, bis ein NPC wieder am Ausgangspunkt angelangt ist. Insgesamt wurden sechs Routen erstellt, von denen zwei das Gelände der Neuen Burg über die Handelsstraße nach Osten und Westen verlassen und wieder betreten. Die restlichen vier Routen verlaufen in mehreren Schleifen durch die neue Burg und den Hafengebiet. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst alle zur Verfügung stehenden Wege von mindestens einer Route erschlossen werden. Jeder Route wurden dann zwischen zehn und zwanzig NPCs zugewiesen, die zufällig auf einen Punkt der Route verteilt wurden. Beim Start des Programms wird automatisch die Animation gestartet und die NPCs entlang der Route in einer voreingestellten Geschwindigkeit fortbewegt. Um die Zweidimensionalität der Animationen etwas zu kaschieren wurde eine automatische Ausrichtung programmiert. Die Sprites der NPC werden somit immer in Richtung der Betrachtenden gedreht. Außerdem wird aus den Standpunkten der Nutzenden und der NPCs kontinuierlich errechnet, ob der NPC aus der Perspektive des Betrachtenden in die rechte oder in die linke Richtung läuft.

Dementsprechend wird fortlaufend zwischen der normalen und der gespiegelten Animation gewechselt.

Weitere Programmierungsschritte sorgten unter anderem dafür, dass die NPCs auch bei unebenem Gelände – wie zum Beispiel auf Treppen oder auf dem Erdwall – so ausgerichtet werden, dass sie visuell immer Bodenkontakt haben und somit der Eindruck des Schwebens vermieden wird. Auch wurde den NPCs hier ein 'falscher Schatten' hinzugefügt. Dieser besteht lediglich aus einem schwarzen, halbtransparenten Kreis unterhalb des NPCs, der sich mit der Figur mitbewegt. Somit lassen sich aufwendige Schattenberechnungen für die NPCs vermeiden und es entsteht dennoch ein Eindruck von Dreidimensionalität und Tiefe. Insgesamt wurden 81 NPCs in der Neuen Burg verteilt, davon 70 auf den sechs Routen, vier Holzhacker, sechs Wachtposten und vier Schäferinnen. Nach Weiss (2021) dürften um die 200 Menschen in der Neuen Burg gelebt haben. Ausgehend davon, dass sich ein Teil davon in Häusern oder in der Umgebung aufhält, sorgt diese Anzahl für ein durchaus realistisches Straßenbild.

Tiere

Tiere gehörten zum Alltags- und Straßenbild der Neuen Burg. Viele Bewohnende hatten vermutlich zur Selbstversorgung Hühner, Schweine und Schafe (Weiss, 2021). Für die Tiere wurde auf extern erstellte Tiermodelle zurückgegriffen, die im Low-Poly-Stil modelliert wurden. Sie wurden mit SketchUp nachbearbeitet und anschließend in der Unreal Engine texturiert. Die Tiermodelle selbst sind nicht animiert, jedoch wurden später einige Bewegungen des gesamten Tiermodells hinzugefügt, um die Illusion einer Lebendigkeit zu erzeugen. Dazu gehörten zum einen Atembewegungen, die durch periodische Skalierungsänderungen des Tiers realisiert wurden und zum anderen das neugierige Umschauen, welches mittels zufallsbasierter Rotationen des Tiermodells umgesetzt wird. Außerdem wurden die Tiere in verschiedenen Größen eingefügt, um das unterschiedliche Alter der Tiere zu simulieren. Die Tiere wurden anschließend in durch die Modellierung vorbereitete Szenen eingefügt, wie zum Beispiel in Hühnerställe, Schweinegehege mit Futtertrögen, oder Schafherden mit einer Schafhirtin als NPC. Schließlich wurde die Implementation der Tiere durch eine entsprechende Geräuschkulisse mit Tierlauten (Kapitel 10.4.7) sowie einer Interaktion beim Streicheln der Tiere (Kapitel 10.5.3) ergänzt. Es wurden Schafe, Hühner, Schweine und für eine Interaktion Fische verwendet. Insgesamt sind in der virtuellen Neuen Burg 181 Tiere verteilt: 64 Schafe, 66 Hühner, 40 Schweine und 11 Fische.

11.5.6 Beleuchtung & Visuelle Effekte

Partikel-Effekte

Einige Animationen und Effekte sind mit solider Geometrie nur schwer umsetzbar. Chaotische oder hochdynamische visuelle Effekte wie Feuer, Rauch, Explosionen, etc. werden daher in Game Engines mit Partikel-Systemen umgesetzt. Diese Systeme emittieren eine Masse einzelner (2D/3D)-Partikel mit sehr frei gestaltbaren Eigenschaften wie Form, Farbe, Skalierung oder Geschwindigkeit (und der Änderung dieser Werte mit der Zeit) im 3D-Raum. Die Animation und schnelle Abfolge dieser ausgestoßenen Partikel können dann die Illusion eines gewünschten chaotischen Systems erzeugen. Für dieses Projekt wurden zwei Varianten an Partikel-Systemen erstellt. Zum einen wurde einigen Häusern eine Rauchfahne zugewiesen, um die für diesen Zeitraum typischen Feuerstellen im Inneren der Wohnhäuser zu simulieren. Eine modifizierte Version davon kam für die Miniatur-Stadtmodelle zum Einsatz, um die Zerstörungen der Jahre 1842 (Großer Brand) und 1945 (Zweiter Weltkrieg) visuell zu unterstreichen. Außerdem wurde ein

Partikelsystem aus roten Bläschen erstellt, um für das Mini-Game zur Bildteilsuche die einzelnen versteckten Bildteile auffälliger zu gestalten und einen klaren Hinweis zur Interagierbarkeit zu geben.

Licht- und Schattenberechnungen

Wie in Kapitel 6.1 genauer erklärt, haben Licht- und Schattenberechnungen einen sehr großen Einfluss auf die Performance zur Darstellung einer 3D-Welt. Aus diesem Grunde wurden einige Maßnahmen getroffen, um dieses VR-Projekt mit möglichst unkomplizierten Lichtberechnungen dennoch realistisch aussehen zu lassen. Diese Maßnahmen sind

- a) Reduzierung auf eine einzige Lichtquelle,
- b) Nutzung eines simplifizierten globalen Beleuchtungsmodells,
- c) Vorberechnung des Schattenwurfs und
- d) Vermeidung dynamischen Schattenwurfs und Nutzung von 'falschen Schatten'.

Abbildung 46 zeigt die Auswirkung dieser Maßnahmen, die im Folgenden kurz erläutert werden. Als Hauptlichtquelle dient die Sonne. Das historische Szenario begünstigt praktischerweise diese Maßnahme. Abend- oder Nachtszenen mit Fackelschein sind zwar visuell sehr ansprechend, benötigen aber viele verschiedene Lichtquellen und sind somit deutlich anspruchsvoller, daher wurde als Zeitpunkt für die Szene ein später Nachmittag / früher Abend gewählt mit einer schon weit in den Westen gezogenen Sonne. Somit ergibt sich eine ausreichende Helligkeit und eine leichte szenische Dramatik dank der etwas in die Länge gezogenen Schatten und einer leicht rötlichen Einfärbung des gesamten Lichts. Dank der großen Entfernung zur Lichtquelle konnte außerdem eine weitere Vereinfachung angewandt werden. Die Entfernung zur Lichtquelle wird Engine-intern als unendlich angesehen, somit verlaufen alle Lichtstrahlen parallel zueinander und jegliche Abstandsberechnung zur Lichtquelle entfällt.

Für die Grundhelligkeit der Szene wurde ein globales Beleuchtungsmodell verwendet, welches auf die realistische Berechnung reflektierter Lichtstrahlen verzichtet und stattdessen alle Bereiche der Szene einheitlich aufhellt. Durch Abgleich der Lichtfarbe mit jener des Sonnenlichts entstehen somit ausreichend ausgeleuchtete Schattenbereiche und die Illusion, dass dieses indirekte Licht durch Reflektionen der Umgebung stammt.

Eine große Performance-Optimierung lässt sich durch die Vereinfachung der Schattenberechnung erzeugen. Hierfür wurden sogenannte Shadow-Maps (dt. etwa: Schattenkarten) verwendet. Jedes Objekt wurde mit einer zusätzlichen Textur versehen, welche den Betrag des einfallenden Lichts speichert und damit das Material des Objekts überlagert. Diese Methode macht die einmalige, aufwendige Schattenberechnung für alle Objekte der Szene nötig, bietet dafür aber den Vorteil, dass nun keine Berechnung mehr in Echtzeit erfolgen muss. Dieses Vorgehen ist umso wirksamer, je mehr Objekte in der Szene statisch bleiben, ihre Position und somit ihren Schattenwurf also nicht verändern.

Diese Voraussetzung wurde mit der letzten Maßnahme, der Optimierung der Szene auf möglichst wenig dynamischen Schattenwurf, umgesetzt. Alle Objekte, die sich bewegen oder animiert sind, wurden daraufhin geprüft, ob ein Schattenwurf des jeweiligen Objekts nötig ist oder ob er durch einen stark vereinfachten Schattenwurf ersetzt werden kann. So wurden etwa alle Pflanzenobjekte, die sich animiert im Wind bewegen, in Bezug auf ihre Schatten als statisch definiert. Da die Bewegungsanimation der Fauna relativ klein ist, ist die Diskrepanz zwischen dynamischem Objekt und statischem Schatten nicht sonderlich auffällig. Aufgrund der hohen Anzahl an Flora-Objekten ließen sich bei Tests alleine durch diese Maßnahme mehrere FPS einsparen. Für dynamische Kleinobjekte wurde der Schattenwurf deaktiviert. Dazu gehören beispielsweise die Handcontroller, die Mini-Map, die einzusammelnden Bildteile und alle Hinweis-

Pergamente an den Stationen. Für NPCs und Tiere war durchaus ein Schatten nötig, um einen Schweben-Eindruck zu vermeiden. Allerdings wurde auch hier die realistische Schattenberechnung vollständig deaktiviert und stattdessen ein 'falscher Schatten' in Form einer schwarzen Verdunklung unter den Objekten programmiert (Abbildung 47, siehe auch Kapitel 10.5.5).



Abbildung 46. Dieselbe Ansicht der Neuen Burg ohne (oben) und mit (unten) Licht- und Schattenberechnung.



Abbildung 47. 'Falscher' schwarzer Schatten unter den NPCs.

Post-Processing

Nach Anwendung aller in Kapitel 6.1 erläuterten Schritte zur Darstellung der Geometrie und zur Licht- und Schattenberechnung kann die gesamte Szene für jedes Frame nachbearbeitet werden, um beispielsweise Farben der gesamten Szene anzugleichen, Filter zu verwenden oder sonstige Einstellungen vorzunehmen, welche die gesamte Szene betreffen. Auch diese Maßnahmen kosten im Regelfall Performance und werden daher hauptsächlich verwendet, wenn auf besonderen Realismus Wert gelegt wird oder ein bestimmter visueller Stil erzeugt werden soll. Für Projekte wie dieses, dessen Priorität auf flüssiger Darstellung liegt, werden aufwendige Post-Processing-Schritte eher vermieden. Es wurden lediglich drei Optionen verwendet, die als besonders wichtig angesehen wurden. Dies sind zum einen die sogenannten 'Render-Outlines'. Dabei handelt es sich um eine visuelle Hervorhebung eines Objekts durch eine farbige Umrisslinie. Der Zweck dieser Linie ist für dieses Projekt das Hinweisen der Nutzenden auf ein interagierbares Objekt. Durch Ein- und Ausblenden dieser Umrisslinie soll intuitiv klar werden, wann ein bestimmtes Objekt ausgewählt werden kann. Eine solche Umrisslinie ist jedoch aufwendig umzusetzen, da es nicht einfach als Geometrieobjekt ein- und ausgeblendet werden kann. Ein Objekt im 3D-Raum besitzt aus jeder Perspektive einen anderen Umriss. Somit muss die Form des Objekts aus dem aktuellen Blickwinkel in Echtzeit erkannt und der entsprechende Umriss berechnet werden. Abbildung 48 verdeutlicht den Prozess.

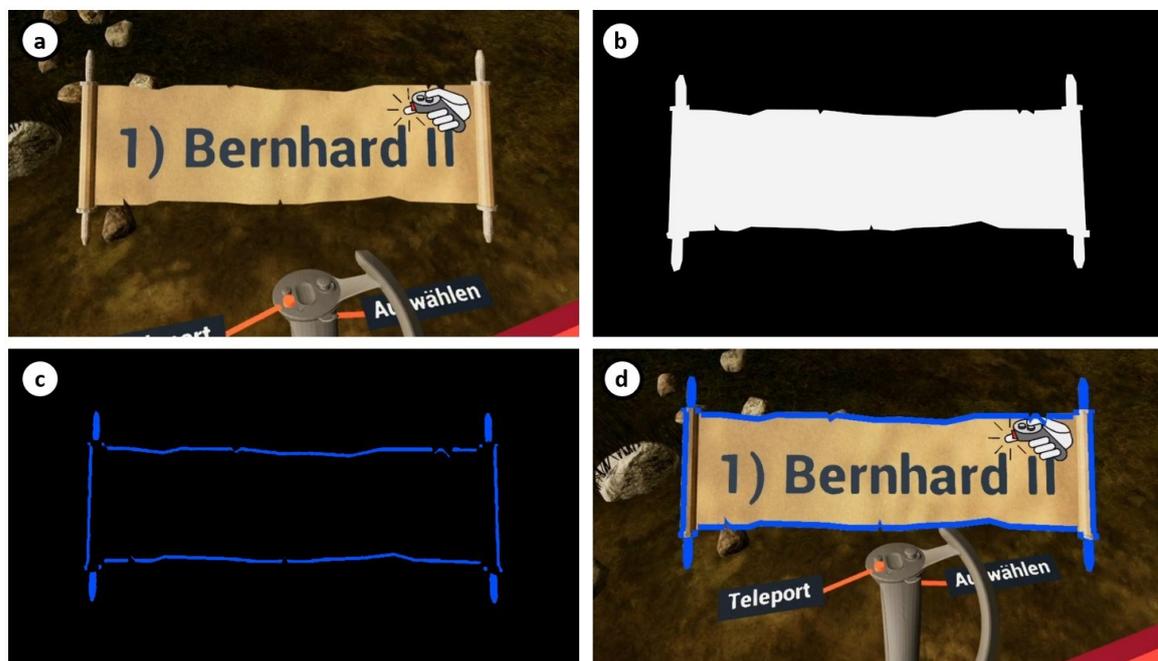


Abbildung 48. Umrisslinie am Beispiel eines Pergaments. a) Pergament vor Überlappung mit dem Controller, b) Separierung des Objekts vom Hintergrund, c) Definition des Umrisses aus Perspektive der Betrachtenden, d) Überlagerung mit dem gerenderten Bild.

Anti-Aliasing ist zwar nicht direkt eine Option im Post-Processing der Unreal Engine, wird aber ebenfalls nach Zeichnung der gesamten Geometrie jedes Frames auf die gesamte Szene angewandt. Für dieses Projekt wurde als Methode 'Multi-Sample Anti-Aliasing' (MSAA) gewählt. Bei dieser Methode wird zunächst das Bild dahingehend analysiert, wo typischerweise kritische Stellen wie Objektkanten liegen. In einem weiteren Schritt werden die Kanten dieser Stellen abgeschwächt, indem Pixel beider Seiten dieser Kanten farblich angeglichen werden.

Als dritte Option wurde auch das Fading zu und von schwarz zur Überleitung bei der Teleportation

über Post-Processing-Einstellungen gelöst.

11.5.7 Sound & Sprache

Auch wenn VR insbesondere eine visuelle Immersion ist, so kann die Stereo-Tonausgabe für lokalisierte Geräuschquellen innerhalb der virtuellen Welt – je nach Anwendungszweck – ebenfalls stark unterstützend bis unverzichtbar sein (Brinkman et al., 2015; Gigante, 1993). Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wurden drei Arten von Audioausgaben implementiert: Atmosphärische Umgebungsgeräusche, Audio-Feedback für Interaktionen und Sprachausgabe. Auf Hintergrundmusik als Mittel zur künstlichen Erzeugung einer Stimmung wurde verzichtet, um nicht von den realistischeren Hintergrundgeräuschen und der Sprachausgabe abzulenken. Alle Geräusche wurden extern erstellt und entstammen der Plattform 'freesound.org'. Alle Sprachaufnahmen wurden spezifisch für 'Hamburg: Neue Burg VR' selbst angefertigt.

Umgebung

Alltag erzeugt Geräusche. Das können natürliche Geräusche wie Wind- und Meeresrauschen sein oder aber Geräusche, die den (Arbeits-)Alltag der Umgebung unterstreichen. Solche Geräusche können sehr dezent und unauffällig sein, dennoch sind sie wichtig für die Immersion, um die Unnatürlichkeit einer vollkommenen Stille zu vermeiden. Für die allgemeine Geräuschkulisse wurde eine ca. zweieinhalbminütige Zusammenstellung an ländlichen, zum historischen Szenario passenden Geräuschen wie Tierlaute, Windrauschen, Vogelgezwitscher, entfernte Arbeitsgeräusche und unverständliche Hintergrundgespräche verwendet. Diese Geräusche laufen in Endlosschleife. Für diese und alle weiteren Umgebungsgeräusche wurde das Prinzip lokalisierter Audioquellen angewandt. Die Geräusche besitzen also einen Ursprungsort innerhalb der virtuellen Welt. Bei größerer Entfernung zu diesem Ort wird das Geräusch leiser, bis es ab einer gewissen Distanz vollständig verschwindet. Die allgemeine Geräuschkulisse ist zwar im gesamten begehbaren Bereich zu hören, allerdings liegt der Mittelpunkt innerhalb der Neuen Burg, sodass bei einem Aufenthaltsort außerhalb des Erdwalls diese Geräusche etwas leiser sind. Stattdessen wurden in der Alster mehrere Geräuschquellen für Wasserrauschen und leichte Uferwellen eingefügt. Wenn man auf einem Hafenstein steht, hört man also die Burggeräusche im Hintergrund, während vor einem das Wasser hörbar ans Ufer schwappt. Sobald man sich in den Panoramen der Gegenwart befindet, wird diese historische Soundkulisse durch eine moderne Stadtgeräuschkulisse mit Motorengeräuschen etc. ersetzt.

Besonders effektiv ist das Prinzip lokalisierter Sounds für räumlich relativ eng begrenzte Soundquellen. Bei Kopfdrehung wird auch die Intensität der Lautstärke auf beiden Ohren der Nutzenden in Echtzeit angepasst, sodass eine rein auditive Orientierung möglich wird (Lewald, 2012). Die Zuordnungsbarkeit zwischen einem wahrgenommenen Geräusch und einem sichtbaren Objekt als Quelle dieses Geräuschs erhöht die Immersion stark und sorgt für eine als glaubwürdig und konsequent wahrgenommene Umgebung. Daher wurden einige Objekte mit eigenen, spezifischen Geräuschquellen versehen. Die Tieransammlungen haben – je nach Tierart – entsprechende Soundquellen erhalten, die in Endlosschleife laufen. Zusätzlich wurde als Interaktion das 'Streicheln' der Tiere ermöglicht (Kapitel 11.6.3). Bei Berührung eines Tieres mit dem Controller wird ein besonders hervorstechender Tierlaut abgespielt. Darüber hinaus wurde den Holzfällern ein Holzhack-Geräusch zugeordnet, welches überdies mit der Bewegungsanimation der NPCs synchronisiert wurde. Für alle gehenden NPCs wurde eine sich mit dem jeweiligen NPC mitbewegende Soundquelle eingefügt, die Gehgeräusche abspielt. Somit lässt

sich die Anwesenheit, Entfernung, Anzahl und Bewegungsrichtung von NPCs wahrnehmen, selbst wenn sie hinter einem vorbeilaufen.

Effekt-Geräusche

Diese Art von Geräuschen soll die Nutzersteuerung unterstützen, indem sie eine auditive Rückmeldung über eine erfolgte Interaktion geben. Somit sind sich die Nutzenden sofort bewusst, ob eine beabsichtigte Interaktion erfolgreich war oder nicht. Die Teleportation wird mit einem 'Swoosh'-Sound begleitet, einem kurzen Windgeräusch, das eine schnelle Fortbewegung suggeriert. Die Auswahl eines Pergaments wird mit einem kurzen Papierrascheln vertont. Das Greifen eines Hufeisens an den Stationen, die das Klettern erforderlich machen, wird von einem kurzen metallischen 'Pling' begleitet. Die Tatsache, dass die Auswahl eines Objekts möglich ist, wird sowohl durch eine visuelle Hervorhebung (Kapitel 10.4.6) als auch durch ein kurzes 'Plop'-Geräusch untermalt. Und schließlich wird das erfolgreiche Einsammeln eines Bildteils oder das Treffen der Zielkiste bei der Fischwurf-Station von einem kurzen Sound begleitet, der an den Belohnungssound von 'PowerUps' früher Videospiele erinnern soll.

Audiokommentar

Das Tutorial, alle Stationen und einige ausgewählte Interaktionen werden von Audiokommentaren begleitet. Bei der Rundtour durch die Neue Burg enthalten diese Kommentare den Kernteil der historischen Informationen und sind insofern mit der Audiobegleitung eines realen Museums vergleichbar. Diese Assoziation soll bewusst geweckt werden, um den Museumscharakter der Anwendung zu unterstreichen und bei neuen VR-Nutzenden das möglichst beruhigende Gefühl auszulösen, dass nicht zu viele neue Konzepte auf sie zukommen, sondern die virtuelle Museumstour zunächst mal einem gewohnten Prinzip folgt. Dementsprechend ist auch das Textskript ausgelegt, welches in der deutschen Version im Anhang C zu finden ist. Jede Station soll zwar einige historische Informationen zur jeweiligen Station liefern, diese müssen jedoch kurz und prägnant sein, um den Fokus auf die dazugehörige Interaktion zu legen und keine Langeweile aufkommen zu lassen. Als Richtwert wurde eine Länge der einzelnen Aufnahmen von 30 bis 40 Sekunden festgelegt. Dieser Wert wurde nur überschritten, wenn es unbedingt nötig war. So dauert beispielsweise die Begrüßung samt erster Tutorialanweisung eine knappe Minute.

Der Arbeitsablauf für die Sprachaufnahmen begann mit der Erstellung des Textskriptes, welches auf den historischen Quellen (Kapitel 2) sowie auf persönlicher Kommunikation mit dem Archäologen des AMH für einige Detailfragen basiert. Die Aufnahmen wurden anschließend per Smartphone im MP3-Format aufgenommen und zur Bearbeitung in CapCut importiert. Dort wurden die einzelnen Sprachdateien zurechtgeschnitten und ein Filter zur Rauschunterdrückung angewandt. Die Anfänge und Enden der Audiospuren wurden mit einem Fade-In und Fade-Out versehen, um die Übergänge gleichmäßig zu gestalten und vorhandenes Rest-Rauschen zu kaschieren. Die Aufnahmen wurden anschließend als unkomprimierte WAV-Datei in die Unreal Engine importiert. Nach Anpassung der Lautstärke an das von der restlichen Geräuschkulisse vorgegebene Level wurden der Aufruf der Sprachdateien in die Programmierung der zugehörigen Station / des Tutorials implementiert.

Insgesamt wurden für die deutsche Version 39 Sprachdateien aufgenommen, davon sechs für das Tutorial, 22 für die einzelnen Stationen, neun für die verschiedenen Zeitabschnitte der Modelle zur Stadtgeschichte und zwei für zusätzliche Hinweise während der Tour. Die Gesamtspieldauer der Dateien beträgt 20:17 Minuten. Es wurde außerdem eine englische Version des Programms erstellt (siehe Kapitel 11.6.5). Daher wurde das Textskript ins Englische übersetzt und alle

Sprachaufnahmen erneut durchgeführt. Insgesamt enthält das Programm also 78 Sprachdateien mit einer Gesamtspieldauer von ca. 40 Minuten.

11.6 Programmierung

11.6.1 Fortbewegung (Teleportation)

Aus der Vielzahl an Möglichkeiten zur Fortbewegung in VR (Di Luca et al., 2021) wurde für das VR-Projekt wie auch für die Orientierungsstudie die Teleportation gewählt. Neben der nachgewiesenen niedrigeren Motion Sickness als bei anderen Fortbewegungsarten (Berger & Wolf, 2018) – eine Kernvoraussetzung mit hoher Priorität für das Konzept dieses Projekts (Kapitel 11.2) – war für diese Entscheidung auch die Vergleichbarkeit zur Orientierungsstudie und somit die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse ausschlaggebend. Die grundsätzliche Umsetzung ist identisch mit der in der Orientierungsstudie und wurde bereits ausführlich in Kapitel 8.2.4 und dort schematisch auf Abbildung 17 erläutert.

Teleportation & Handcontroller

Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wurden einige kleinere Anpassungen vorgenommen. So wurde ein Sound als Rückmeldung für eine erfolgte Teleportation eingefügt (Kapitel 11.5.7), die Farben des Teleportationsstrahls und der Zielanzeige angepasst sowie die Teleportationsdistanz geringfügig reduziert. Zusätzlich wurden die Visualisierungen der Handcontroller überarbeitet und etwas simplifiziert, um visuell einer möglichst breiten Palette an Controllern zu entsprechen. Als zusätzliche Beschriftung wurde der Knopf zur Aktivierung der Übersichtskarte hinzugefügt. Abbildung 49 zeigt das finale Design. Bei der Orientierungsstudie gab es nur eine Art von Handcontrollern. Neben der visuellen Anpassung mussten allerdings für dieses VR-Projekt auch die Eingaben so programmiert werden, dass die unterschiedlichen Knöpfe verschiedener Arten von Controllern trotzdem die richtige Aktion auslösen. Daher wurde eine übergeordnete Schnittstelle geschaffen, die UE-intern als 'Input Mapping' bezeichnet wird. Dabei werden listenartig zunächst alle benötigten Knöpfe und die jeweils hinterlegten Aktionen definiert. Für dieses Projekt sind es sechs Stück: 'Teleport (links)', 'Teleport (rechts)', 'Auswählen (links)', 'Auswählen (rechts)', 'Karte (links)' und 'Spiel beenden'. Es wird hierbei zwischen linkem und rechtem Handcontroller unterschieden. Die Karte lässt sich nur über den linken Controller öffnen. Die Funktion zum Beenden des Spiels lässt sich auch innerhalb des Spiels über eine Menüauswahl aktivieren. Für Testzwecke und bei Nichtfunktionalität der Controller sollte jedoch auch eine einfache Möglichkeit zum Beenden über Tastatureingabe existieren. Für die Nutzenden sind während des Spiels somit lediglich die drei Optionen 'Teleport', 'Auswählen' und 'Karte' sicht- und ausführbar. Nach dieser Definition werden allen Aktionen die für jedes Controllersystem passenden Knöpfe zugewiesen. So wurden für die Teleportaktion beispielsweise sieben verschiedene Controllersysteme wie Oculus, Valve Index, Vive etc. hinterlegt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Belegung der Knöpfe trotz unterschiedlichen Designs der einzelnen Controllersysteme dennoch ungefähr vergleichbar ist und grob der im Spiel gezeigten Visualisierung entspricht, welche auf der Geometrie eines Valve Index - Handcontrollers basiert. So sollte bei entsprechender Handhaltung der Teleport-Knopf immer mit dem Daumen und der Auswählen-Knopf immer mit dem Zeigefinger erreichbar sein.

In der Programmierung selbst wurde lediglich auf die definierten Aktionen zugegriffen, sodass weitere Controllersysteme beliebig hinzugefügt werden können, ohne in die Programmierung

eingreifen zu müssen. Mit dieser Methode konnte das Programm auf allen getesteten Controllersystemen (HTC Vive & HTC Vive Pro, Oculus Quest 2 & 3, Valve Index, Pico 4) problemlos ausgeführt werden.

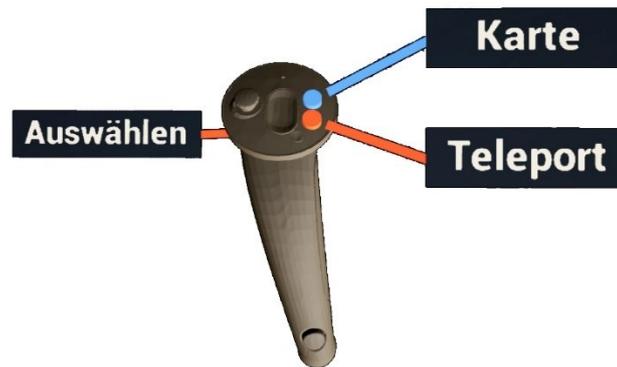


Abbildung 49. Finales Design der Handcontroller.

Spielfläche

Der begehbare Bereich innerhalb der 3D-Welt wird durch ein sogenanntes 'Navigation Mesh' definiert, wie in Kapitel 8.2.4 näher erläutert wird. Bei 'Hamburg: Neue Burg VR' handelt es sich nun allerdings nicht mehr um eine durch Wände unterteilte zweidimensionale Fläche, sondern es kommen durch den Erdwall, Torhäuser, Uferkanten etc. Unebenheiten, Treppen und Plattformen hinzu. Dies machte eine umfangreiche Bearbeitung des Navigation Mesh notwendig. Zunächst wurden manuell die groben Ränder des begehbaren Bereichs mit (für die Nutzenden unsichtbaren) Blocker-Elementen abgesteckt. Aber auch innerhalb dieses Bereichs wurden viele Stellen wie Hausdächer oder das Innere von Gebäuden als nicht zugänglich definiert, um unrealistische und für die Nutzenden verwirrende (und ggf. immersionsbrechende) Standorte zu vermeiden. Andere besondere Stellen wie enge Treppen oder die Schiffe am Hafen sollten wiederum begehbar bleiben. Das Navigation Mesh erlaubt einige Einstellungen zur automatisierten Definition von erlaubten und verbotenen Bereichen. So lässt sich ein Beispiel-Avatar definieren, der u. a. eine bestimmte Höhe und Breite hat, einen Maximalwinkel einer schrägen Ebene, die er gerade noch hinaufsteigen kann und eine Maximalhöhe für Sprünge/Treppenstufen. Mit diesen Werten wird über das gesamte Gelände ein Test durchgeführt und Bereiche, die zu eng, zu niedrig, zu hoch oder zu steil sind als nicht begehbar definiert. Als Resultat erhält man, wie in Abbildung 50 dargestellt, einen Bereich mit erlaubten Standorten und Teleportationszielen. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' hat dieser Bereich eine maximale Ausdehnung von 210 Metern in Ost-West-Richtung und 230 Metern in Nord-Süd-Richtung. Die begehbare Fläche hat ca. 30.000 Quadratmeter.



Abbildung 50. Draufsicht der Neuen Burg. Der begehbare Bereich ist in grün markiert.

11.6.2 User Interface (UI)

Das UI ist ein zentraler Bestandteil von Desktopanwendungen, um Möglichkeiten zu bieten, mit einem Eingabegerät wie der Maus als Schnittstelle auf Funktionalitäten des Programms zuzugreifen. In VR-Anwendungen wird diese Schnittstelle durch Handcontroller ersetzt und es bietet sich vielmehr die Möglichkeit, mit Objekten direkt zu interagieren. Dennoch können bei der Bedienung Abstraktionen nötig sein, bestimmte Funktionalitäten können eine Art Menü benötigen oder aber das UI soll zusätzliche Informationen liefern.

Design & Symbolik

Zum UI gehört auch das Designkonzept all dieser Elemente, da ein UI nach Möglichkeit selbsterklärend und zur restlichen Anwendung passend gestaltet sein soll. Die Hinweise an den Controllern wurden bereits in Kapitel 11.6.1 beschrieben und sind bewusst einfach gehalten. Demgegenüber steht das Design aller interaktiven Elemente innerhalb der 3D-Welt. Alle 'Knöpfe' zum Aktivieren sind als Pergament dargestellt. Zwar ist das Vorhandensein eines schwebenden Pergaments bei einer Station bereits eine Art Immersionsbruch, durch das Design soll jedoch der historische Charakter gewahrt werden und schnell eine Gewöhnung eintreten. Die notwendige Fokuslenkung soll somit nicht direkt als solche wahrgenommen werden, sondern die UI-Elemente sollen sich zur Umgebung passend harmonisch in den Gesamteindruck des historischen Settings eingliedern. Alle Interaktionen und Hinweisschilder folgen diesem Design, so sind die Pergamente auch auf der Mini-Map (siehe unten) zu finden. Als zusätzliche Hinweise wurden zwei animierte Symbole erstellt (Abbildung 51), welche auf eine Möglichkeit zur Teleportation oder Interaktion hinweisen sollen. Das Interaktionssymbol findet sich auf allen Pergamenten, die ausgewählt werden können, sowie auf einem eigenen Pergament neben allen interagierbaren Objekten wie den Kletterstationen oder der Station zur Fischerei.

Für Interaktionen wurde rot als Signalfarbe gewählt. Sowohl auf den animierten Symbolen als auch auf der Controllergeometrie sind die zu betätigenden Knöpfe rot markiert. Auch die Navigationslinie und die Partikeleffekte zur Hervorhebung der einsammelbaren Bildteile sind rot. Die Stationen wurden so designt, dass sie die Orientierung unterstützen und selbst als Landmarken fungieren. Jede Station besitzt ein großes Banner, welches über der Station schwebt und die Nummer und den Namen der Station anzeigt. Dieses Banner wurde so programmiert, dass es sich immer der Position des Beobachtenden zuwendet und außerdem seine Größe der Entfernung zum Nutzenden anpasst. So lässt sich für die Nutzenden auch eine Station auf der gegenüberliegenden Seite der Neuen Burg erkennen, da das Banner dieser Station über die Häuser aufragt.

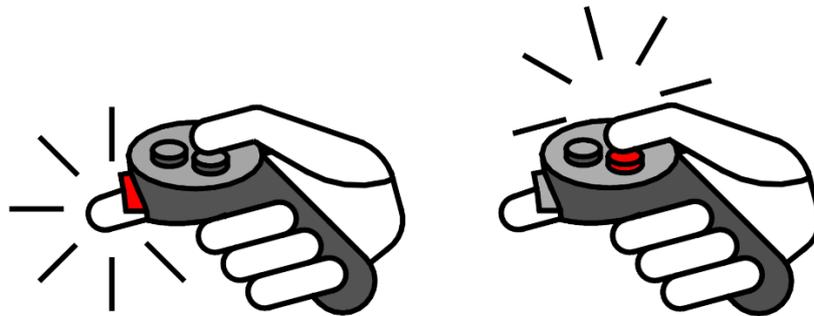


Abbildung 51. Hinweissymbole zur Teleportation (links) und zur Interaktion (rechts).

Mini-Map

Über einen Knopf am linken Handcontroller lässt sich die Mini-Map aufrufen, die auf Abbildung 52 dargestellt wird. Als direkte Folge aus den Studienresultaten wurde die Mini-Map in das VR-Projekt zur Neuen Burg eingebaut, um eine Gesamtübersicht bereitzustellen und außerdem die eigene Position und Blickrichtung als Orientierungshilfe zu visualisieren. Die grundsätzliche Funktionsweise wurde auch hier wieder aus der Mini-Map der Orientierungsstudie übernommen. Die Mini-Map lässt sich nun beliebig ein- und ausschalten. Als Kartenbasis wurde eine Draufsicht der finalen virtuellen Neuen Burg gerendert und verwendet. Die Positionierung des Avatars auf der Mini-Map erfolgt durch Transformation der UE-Weltkoordinaten auf die Karten-Koordinaten. Zur Visualisierung des Sichtkegels wird fortlaufend die Blickrichtung des HMD abgefragt und das Sichtkegelobjekt der Mini-Map entsprechend rotiert. Neben dieser Übersichtsfunktionalität bietet die Mini-Map auch eine Schnellreisemöglichkeit zu allen 22 Stationen. Dafür wurden kleine, auswählbare Pergamente mit den jeweiligen Stationsnamen an den entsprechenden Stellen der Mini-Map platziert. Bei Auswahl eines Pergaments erfolgt derselbe Programmablauf wie bei einer gewöhnlichen Teleportation, als Zielkoordinaten wird aber nun ein Standpunkt neben der ausgewählten Station verwendet.

Die Mini-Map beinhaltet außerdem ein kleines Menü am rechten Rand, welches drei Interaktionen erlaubt: Das Beenden des Programms, den direkten Neustart des Programms sowie das Auf- und Zuklappen der Credits-Seite. Der Neustart ist vor allem dazu gedacht, um bei Live-Demonstrationen (im Museum, auf Messen etc.) eine schnelle Möglichkeit zu bieten, einen neuen Nutzenden wieder am Anfang starten zu lassen. Er kann aber auch dazu dienen, unvermittelt auftauchende Probleme wie das Steckenbleiben zwischen Objekten zu umgehen, bei Orientierungsverlust zum Startpunkt zurückzukehren oder eine andere Sprache zu wählen. Die Credits-Seite ist standardmäßig ausgeschaltet. Nach Aktivierung listet diese Seite Entwickler und Kontaktmöglichkeiten, weitere Beteiligte sowie die für diese Anwendung verwendeten externen Assets auf. Außerdem ist hier die Versionsnummer zu finden.



Abbildung 52. Mini-Map mit Schnellreiseoptionen (links), Menü (Mitte) und Credits-Sektion (rechts).

11.6.3 Interaktionen

Auslösung

Die Auslösung der meisten Interaktionen folgen einem einfachen Prinzip, bestehend aus drei Schritten:

- 1) Überlappung des interagierbaren Objekts mit der Interaktionssphäre eines Handcontrollers
- 2) Betätigung der 'Auswählen'-Taste
- 3) Starten der für dieses Objekt hinterlegten Ereigniskette

Dieses Prinzip wurde bereits für die Orientierungsstudie angewandt, allerdings wurde hier nun eine performance-optimierende Modifizierung vorgenommen. Anstatt einen Bereich zu definieren, innerhalb dessen eine fortlaufende Überwachung der Aktivierung erfolgt, wurde hier lediglich eine einmalige Abfrage bei Betätigung des Auswählen-Knopfes vorgenommen und innerhalb eines kleinen Bereichs nach Objekten gesucht, die nah genug am Handcontroller dran sind, um als 'berührt' definiert zu werden. Ein Maximalabstand von 10 cm zur Spitze des Handcontrollers wurde bei Tests als angemessen empfunden, um noch den Eindruck des 'in der Hand Haltens' zu vermitteln.

Kategorien

Die Stationen wurden in verschiedene Kategorien eingeteilt. Mehrere Stationen teilen sich dieselbe Art der Interaktion, sodass auf dieselbe Funktion zurückgegriffen werden konnte. Tabelle 8 bietet eine Übersicht über die Zuordnung zu den einzelnen Stationen. Folgende Interaktionskategorien wurden programmiert.

Silhouette. Die Neue Burg hat nichts mehr mit dem heutigen Stadtbild gemein und trotz zahlreicher Erklärungen ist es für Nutzende schwer vorstellbar, die historischen Bauten innerhalb des heutigen Stadtbilds zu verorten, sofern die Nutzenden überhaupt das heutige Stadtbild

kennen. Daher sollten wahlweise einige moderne Landmarken eingeblendet werden, um den Nutzenden einige Anhaltspunkte zur Unterstützung der Orientierung zu bieten. Die Gebäude werden nach Aktivierung der Station langsam eingeblendet und der begleitende Audiokommentar erklärt den Bezug zum gezeigten Gebäude und dessen Lage in Relation zur Neuen Burg. Nach Beendigung des Audiokommentars werden die Silhouetten wieder ausgeblendet.

360°-Panorama. Auch diese Art der Interaktion soll eine Verbindung zwischen damals und heute schaffen. An den modernen Standorten von sieben Stationen wurden 360°-Panoramen aufgenommen und an entsprechender Stelle in der 3D-Welt eingefügt, allerdings etwas unterhalb der Neuen Burg. Bei Aktivierung einer Panorama-Station werden die Nutzenden abwärts in die Mitte des Panoramas teleportiert, die Audiokulisse angepasst und ein Audiokommentar abgespielt. Die Teleportations-Funktion ist währenddessen deaktiviert, um sich nicht außerhalb der Panoramen teleportieren zu können. Stattdessen wird ein weiteres Pergament mit der Aufschrift 'Zurück' eingeblendet. Bei dessen Aktivierung wird man wieder zurück an den Ausgangspunkt in der Neuen Burg teleportiert.

Stadtanimation. Die Visualisierung der Stadtentwicklung an Station 2 besteht letztlich aus neun einzelnen Ereignisketten, die je nach ausgewähltem Jahr ausgelöst werden. Bei Aktivierung eines bestimmten Jahres wird zunächst eine Animation abgespielt, welche das aktuelle Stadtmodell auf der Z-Achse zusammenstaucht. Gleichzeitig wird das Modell des ausgewählten Jahres sichtbar gemacht und eine umgekehrte Animation abgespielt. Somit entsteht der Eindruck, dass der alte Zustand im Boden verschwindet und gleichzeitig der neue Zustand aus dem Boden erwächst. Gleichzeitig wird der zum jeweiligen Jahr zugehörige Audiokommentar abgespielt. Abbildung 53 zeigt beispielhaft und stellvertretend für die anderen Interaktionen den schematischen Programmierungsablauf einer Interaktion.

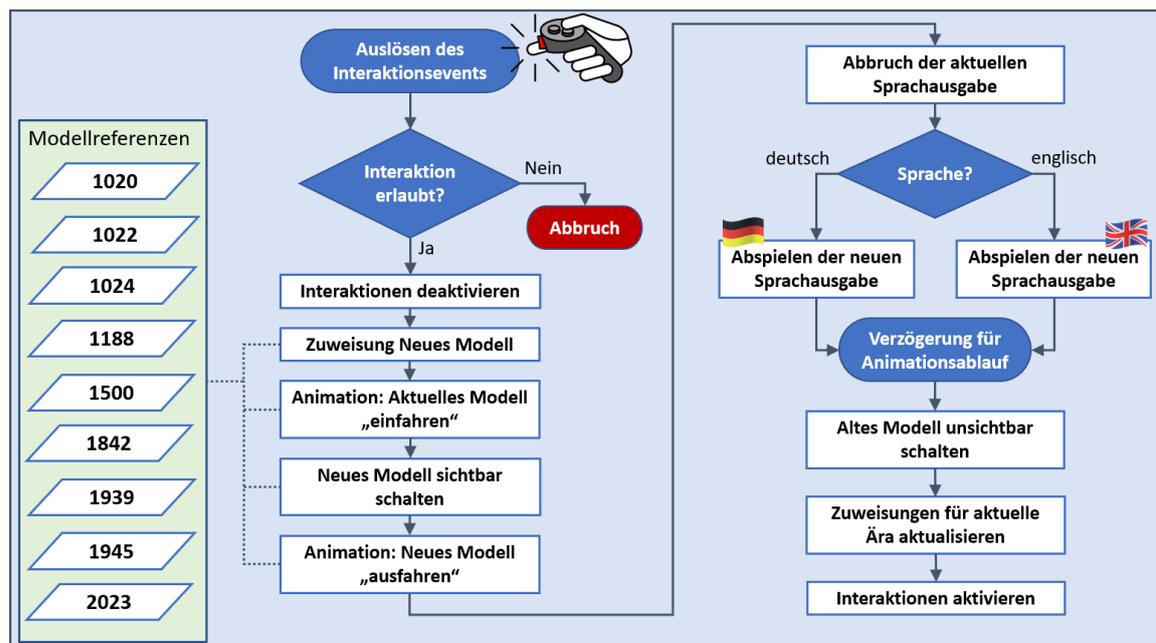


Abbildung 53. Schema der Programmierung zur Visualisierung der Stadtgeschichte.

Bilder. Bei diesen Stationen werden nach Aktivierung mit einer kurzen Animation drei Pergamente mit Abbildungen vor den Nutzenden eingeblendet. Diese Abbildungen untermalen den Audiokommentar. Wie bei den Silhouetten erfolgt nach einiger Zeit eine weitere Animation,

welche die Bilder wieder in ihren unsichtbaren Ausgangszustand zurückversetzt. Diese stationsspezifischen Bilder sind nicht zu verwechseln mit dem Mini-Spiel der Bildersuche.

Bildersuche. Hierbei handelt es sich um das Mini-Spiel, welches den Bogen über alle Stationen spannt und der Rundtour eine übergeordnete Geschichte gibt (Kapitel 11.6.4). Bei allen 22 versteckten Bildteilen handelt es sich um Instanzen desselben Objekts. Sobald ein Bildteil ausgewählt wird, wird ein kleiner Belohnungston abgespielt und ein Zähler hochgesetzt. Gleichzeitig wird beim Bilderrahmen am Startpunkt ein neuer Bildteil dem Gemälde hinzugefügt. Wenn alle 22 Bildteile gefunden wurden, werden die Nutzenden dazu aufgefordert, zum Startpunkt zurückzukehren. Wenn dies geschehen ist, wird ein finaler Audiokommentar abgespielt, der zusätzliche Informationen zu Bernhard II. bietet und schließlich die Tour durch die Neue Burg für beendet erklärt.

Streicheln. Bei einer Station (Nr. 3: 'Vieh') und auch unabhängig von der Tour an anderen Stellen der Neuen Burg können die Tiere 'gestreichelt' werden. Bei Berührung eines Tieres wird ein passendes Tiergeräusch abgespielt, welches sich zudem in der Tonlage der Größe des Tieres anpasst.

Die Interaktionen der folgenden Kategorien sind etwas komplexer, da sie nicht nur eine lineare Ereigniskette auslösen, sondern weiterhin den Input der Nutzenden verarbeiten. Sie erfordern eine aktive Nutzung der Handcontroller und sorgen somit für eine höhere Immersion.

Klettern. Diese Aktivität erlaubt es den Nutzenden, sich in die Höhe zu ziehen und einen Überblick über die Umgebung zu erlangen. Als zusätzliche Motivation ist an allen drei Kletterstationen ein Teil des Bildes am Ende der Klettertour positioniert. Als Kletterelement wurden Hufeisen modelliert und an den entsprechenden Kletterstellen (Schiffsmast, Glockenturm, Burgtor) in kurzen Abständen platziert. Beim Greifen dieser Hufeisen (Halten des Auswahlknopfes am Handcontroller) wird der greifende Handcontroller an der Position des Hufeisens verankert. Das HMD und der zweite Controller bewegen sich innerhalb der virtuellen Welt nun relativ zu diesem Ankerpunkt. Somit lässt sich die Illusion erzeugen, sich an einer Wand 'hochzuziehen' und den Körper relativ zur fixierten Hand zu bewegen, obwohl man in der Realität die Kletterhände relativ zum auf dem Boden fixierten Körper bewegt. Da es sich hierbei aber um kontinuierliche Bewegungen handelt, die parallel in der Realität nicht stattfinden, besteht bei zu langer Anwendung die Gefahr, Motion Sickness auszulösen (Kapitel 3.3). Daher sind die Kletterstrecken in 'Hamburg: Neue Burg VR' sehr kurz und außerdem – wie alle Interaktionen – optional. Außerdem existiert eine Fallsicherung. Sobald die Nutzenden die Hufeisen loslassen, schweben sie mit moderater Geschwindigkeit zurück zum Boden.

Bauen. An Station 4 wird auf die historische Ungenauigkeit solcher Visualisierungen hingewiesen und die Nutzenden dazu aufgefordert, den Innenbereich der Neuen Burg selbst zu bebauen. Dazu können die Miniaturhäuser aufgenommen und wieder abgesetzt werden. Die Logik ist ähnlich wie beim Klettern, nur dass kein neuer Ankerpunkt gesetzt wird, sondern das Miniaturhaus beim Greifen relativ zur greifenden Hand mitbewegt wird. Für diese Objekte ist außerdem ein Physik-Modus aktiv: Beim Loslassen fallen die Objekte zu Boden. Außerdem besitzen sie Kollisionsinformationen und können somit andere Objekte wegschieben oder übereinander gestapelt werden. Es wurde außerdem eine Wegwurf-Sicherung eingebaut. Sobald ein Haus vom Tisch auf den Boden fällt oder von Nutzenden weit außerhalb des Modelltischs geworfen wird, verschwindet das Objekt und an dessen Stelle wird ein neues an der ursprünglichen Stelle erzeugt.

Werfen. Das Werfen der Fische an Station 12 basiert auf demselben Prinzip wie das Greifen und die Physikberechnung beim Bauen. Für die Fische wurde zusätzlich ein Ton eingebaut, wenn die Nutzenden es wie aufgefördert schaffen, einen Fisch in die Kiste zu schmeißen. Auch hier werden Fische, die zu weit entfernt oder aber in der Zielkiste landen, nach einiger Zeit wieder an ihre Ausgangsposition zurückversetzt.

Tabelle 8. Übersicht über die Stationen und die zugehörigen Interaktionen.

| Station | Name | Interaktionskategorie |
|---------|---------------------|-----------------------|
| 1 | Bernhard II. | Bildersuche |
| 2 | Stadtentwicklung | Stadtanimation |
| 3 | Vieh | Streicheln |
| 4 | Hausbau | Bauen |
| 5 | Kapelle | Klettern |
| 6 | Michel | Silhouette |
| 7 | Hopfenmarkt | 360°-Panorama |
| 8 | Elbphilharmonie | Silhouette |
| 9 | Mahnmal St. Nikolai | Silhouette |
| 10 | Kirchenschiff | 360°-Panorama |
| 11 | Nikolaifleet | 360°-Panorama |
| 12 | Fischerei | Werfen |
| 13 | Trostbrücke | 360°-Panorama |
| 14 | Schiffbau | Klettern |
| 15 | Hammaburg | Bilder |
| 16 | Großer Burstah | 360°-Panorama |
| 17 | Nordtor | Klettern |
| 18 | Handwerk | Bilder |
| 19 | Rathaus | Silhouette |
| 20 | Ausgrabung | 360°-Panorama |
| 21 | Willy-Brandt-Straße | 360°-Panorama |
| 22 | Herrenhaus | Bilder |

Zur verbesserten Nutzersteuerung wurden außerdem einige Sicherungsmaßnahmen programmiert, um Verwirrungen oder versehentliche Eingaben zu vermeiden. Wie aus Abbildung 53 deutlich wird, erfolgt vor dem Abspielen eines neuen Audiokommentars zunächst ein Abbruch des alten, sofern noch einer abgespielt wird. Um ungewolltes mehrfaches Teleportieren oder Auswählen kurz hintereinander auszuschließen, wird nach Betätigung von Tasten ein kleiner Cooldown eingeführt, währenddessen eine erneute Tastenbetätigung keine Auswirkungen hat. An einigen Stellen – wie beispielsweise während der 360°-Panoramen oder ganz am Anfang des Programms – wird die Teleportation vollständig deaktiviert.

Haptik

Für die Fortbewegung und die Interaktionen wurde eine haptische Rückmeldung implementiert. Die meisten Controller besitzen die Möglichkeit zur Vibration. Somit lassen sich die Nutzenden auf bestimmte Ereignisse und Interaktionsmöglichkeiten hinweisen. Neben der audiovisuellen Immersion ist dies der dritte Sinn, der – wenn auch nur rudimentär – in VR angesprochen werden kann. Auch für dieses Projekt wurden leichte und kurze Vibrationen als Rückmeldung eingebaut, um eine erfolgte Interaktion/Teleportation zu bestätigen oder auf die Überlappung des Controllers mit einer möglichen Interaktion (Pergament, Hufeisen zum Klettern, etc.) hinzuweisen.

11.6.4 Geführte Tour

Ein sehr wichtiger Aspekt zur gezielten Nutzersteuerung und somit auch gleichzeitig zur Unterstützung der Orientierung innerhalb der virtuellen Welt ist die Etablierung eines Roten Fadens, nach dem sich die Nutzenden richten können. Eine freie Erkundung bleibt nach wie vor möglich, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass selbst erfahrene VR-Anwendende sich bei einem Erstbesuch an die Anweisungen halten, um zu erfahren, welche Funktionalitäten das Programm bietet. Darüber hinaus ist aus (museums-)didaktischen Gesichtspunkten die Einbettung der Informationen in eine übergeordnete Geschichte der reinen Präsentation an Informationen vorzuziehen (Lacet et al., 2022). Die Etablierung einer guten und passenden Geschichte benötigt jedoch mitunter Zeit und verschiebt die Aufmerksamkeit der Nutzenden. Je nach Zielsetzung des Programms muss also eine Balance zwischen den zu vermittelnden Informationen und der Art der Präsentation gefunden werden. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wurde ein Ansatz gewählt, der sich das Konzept der Gamification zunutze macht (Kapitel 4.2). Das übergeordnete, verbindende Element soll also ein Mini-Spiel sein, welches zum Besuch aller Stationen anregt. Dafür wird zunächst ein leerer Bilderrahmen bei der ersten Station eingeführt und auf die versteckten Bildteile hingewiesen. Da die Position dieser Bildteile nicht immer offensichtlich oder einfach zu erreichen ist, regt diese Methode zur weitergehenden Erkundung der Neuen Burg an und geht über das reine 'Abarbeiten' der vorgegebenen Stationen hinaus.

Rundgang

Der Rundgang beginnt mit einem Tutorial, um die Steuerungskonzepte und das Mini-Spiel einzuführen. Seitlich vom Startpunkt befindet sich ein interaktives Pergament mit der Möglichkeit, das Tutorial zu überspringen. Es ist für Nutzende gedacht, die das VM zum wiederholten Male durchspielen und bereits mit der Steuerung vertraut sind. Teleportation, Interaktion, Bildsuche und Kartenbenutzung werden nacheinander eingeführt, sodass die Nutzenden bereits nach diesen vier Schritten alle Möglichkeiten kennen, mit der virtuellen Umwelt zu interagieren. Um eine Informationsüberladung zu vermeiden, werden Steuerungskonzepte, die sich daraus ableiten (z. B. das Anfassen/Aufheben von Miniaturgebäuden oder Fischen sowie das Klettern) erst mit der entsprechenden Station eingeführt.

Anschließend führt die Navigationslinie zur jeweils nächsten, aktiven Station. Eine Station wird dann aktiv geschaltet, sobald mit der vorherigen Station interagiert wurde. Somit sind die Nutzenden nicht gezwungen, bei einer Station länger zu verweilen und sich den gesamten Audiokommentar anzuhören, sondern können direkt weiterziehen, falls sie die aktuelle Station nicht sonderlich interessiert. Daraus folgt auch, dass zum Absolvieren des Rundgangs die Interaktionen der Stationen optional sind. Es muss also weder geklettert noch mit den Miniaturmodellen hantiert werden. Die Interaktivität ist also ein Angebot und eine Einladung, kein Zwang. Somit können die Nutzenden selbst entscheiden, wieviel Gamification sie während der Benutzung erleben wollen. Der vollständige Abschluss des Mini-Spiels macht jedoch ein hohes Maß an Interaktion erforderlich, da einige Bildteile beispielsweise nur durch eine Klettertour erreichbar sind. Auch diese Maßnahme soll zum Ausprobieren der Interaktionen anregen. Aus der Rundtour-Logik folgt auch, dass die Nutzenden zwar nach Belieben Stationen überspringen und ihre eigene Reihenfolge wählen können, die Navigationslinie führt aber immer zur nächsten aktiven Station und stellt somit sicher, dass bei absichtlichem oder versehentlichem Überspringen jederzeit zur vorgesehenen Route zurückgekehrt werden kann. Die Audiokommentare funktionieren ebenfalls weitgehend unabhängig voneinander. An einigen Stellen wird jedoch eine in der Tour vorangegangene Station referenziert. So folgt beispielsweise das 360°-Panorama des Kirchenschiffs des Mahnmals St.-Nikolai direkt auf eine Station, die die Außenansicht als

Silhouette zeigt und generelle, einführende Informationen zum Bauwerk bietet. Das Befolgen der vorgegebenen Rundtour sorgt also für eine etwas bessere Einordnung der erhaltenen Informationen.

Als Gesamtzeit der Rundtour inklusive Tutorial wird eine Zeitspanne von 30 bis 40 Minuten angestrebt.

Reihenfolge

Die Reihenfolge der Stationen während des Rundgangs wurde anhand von mehreren Kriterien festgelegt. Eine Maxime bestand darin, dass die gesamte Neue Burg erkundet werden soll. Die Nutzenden sollen möglichst viele neue Wege und Perspektiven einnehmen, auch wenn dies bedeutet, dass nicht die kürzest mögliche Verbindung zwischen den Stationen genommen wird. Gleichzeitig sollen aber auch Wiederholungen vermieden werden. Eine zweite Anforderung bestand darin, dass Start- und Endpunkt identisch sein sollen, um tatsächlich eine 'Rund'-Tour zu absolvieren, den Nutzenden das Gefühl von Abschluss und Erreichen eines Ziels zu vermitteln sowie das Mini-Spiel zu vereinfachen, indem am Ende automatisch zum fertigen Bild zurückgekehrt wird. Die Freifläche vor dem Herrenhaus war außerdem gut geeignet für die Station mit den Miniatur-Stadtmodellen. Diese Station sollte ganz am Anfang der Tour stehen, um den Nutzenden den Ergebnissen der Orientierungsstudie entsprechend frühzeitig eine Draufsicht auf die begehbare virtuelle Welt zu bieten, um die Orientierung zu erleichtern. Und schließlich sollten die Stationen auch so angeordnet sein, dass sich verschiedene Interaktionsarten miteinander abwechseln. Aus diesen Kriterien entstand die in Abbildung 54 gezeigte Reihenfolge der Rundtour.



Abbildung 54. Ausschnitt der Mini-Map mit der Rundtour durch die Neue Burg.

11.6.5 Lokalisierung

Unter Lokalisierung wird zunächst das Übersetzen von Text- und Audioelementen einer Anwendung in andere Sprachen verstanden. Die Überarbeitung kann jedoch auch darüber hinaus die Anpassung einer Anwendung in kultureller Hinsicht beinhalten (Mangiron, 2016). Grundsätzlich besteht das Ziel darin, das Zielpublikum einer Anwendung zu vervielfachen und Menschen unterschiedlichster Sprachen Zugang zu gewähren. Die Übersetzung muss dabei alle Ebenen der Anwendung miteinschließen, die sprachspezifische Inhalte aufweisen. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' sind das zum einen alle UI-Elemente wie Beschriftungen der Stationen, Controller und Karten, zum anderen alle Audio-Elemente, die gesprochene Sprache beinhalten, also die Tutorial-Anweisungen und die Erklärungen an den Stationen. Zur Optimierung des Arbeitsablaufs und zur flexiblen Hinzufügung von Sprachen zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung werden bei der Programmierung üblicherweise alle Elemente, die sich mit der Sprache ändern, nicht direkt in den Code eingebaut, sondern stattdessen eine Referenz verwendet, die auf eine Datenbank mit einer eindeutigen ID verweist. Diese Datenbank enthält dann den entsprechenden Text / die entsprechende Audiodatei in allen hinterlegten und auswählbaren Sprachen.

Für die erste Version dieses Projekts wurde ursprünglich nur eine deutsche Variante geplant, daher wurde der Aufruf aller Text- und Sprachelemente direkt in den Code eingebaut. Erst im späteren Verlauf des Projekts ist noch eine vollvertonte englische Übersetzung für die Erstveröffentlichung hinzugekommen, als Aufruf-Statistiken während der Ankündigung nahelegten, dass trotz des Inhalts mit sehr regionalem Bezug die meisten Aufrufe aus nicht-deutschsprachigen Ländern kommen (Abbildung 55). Daher wird nun mittels einer Abfrage am Programmstart die Sprache gewählt und eine Variable mit der aktiven Sprache gesetzt, wie auf Abbildung 56 zu sehen ist. Nach Bestätigung wird für alle Textelemente aus zuvor hinterlegten Sprachversionen die entsprechende Variante ausgewählt. Bei der Aktivierung von Sprachelementen wird anhand der Sprachvariable entschieden, welche Audiodatei abgespielt wird.

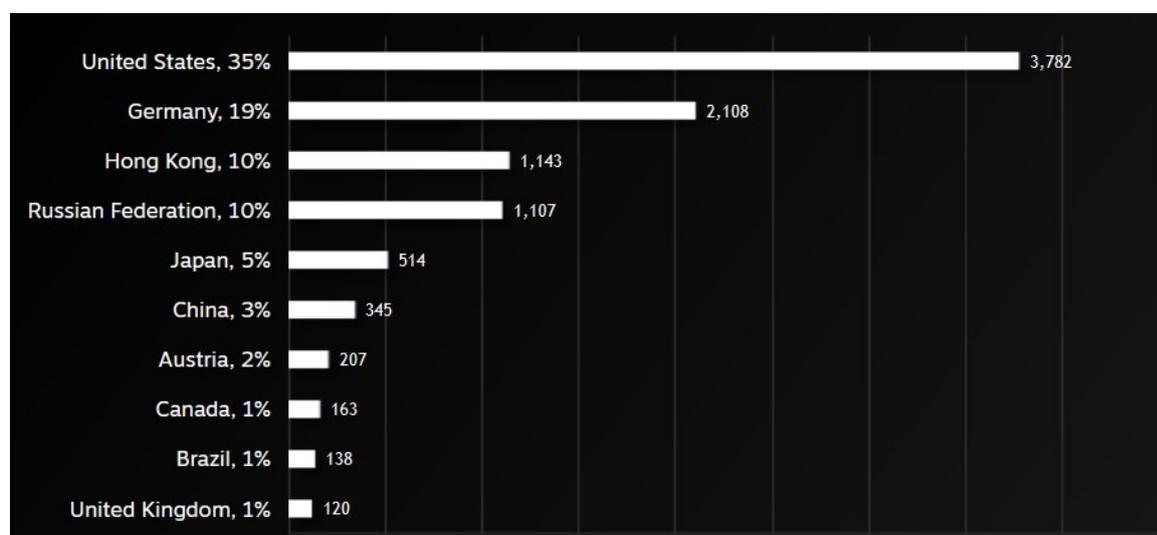


Abbildung 55. Aufrufstatistik von Steamworks (Stand: 16. April 2024).

Übersetzungen ziehen einige Konsequenzen mit sich, die bei der Programmierung und dem Welt-Design bedacht werden müssen. So kommt es vor, dass die Übersetzung eines Texts in einer bestimmten Sprache deutlich länger oder kürzer ist als in der Originalsprache und somit ggf. Anpassungen an der Schriftgröße oder an der Größe des UI erforderlich machen. Auch zeitkritische

Sprachanweisungen (beispielsweise die Aktivierung einer Funktion bei einer bestimmten Stelle im gesprochenen Text) können abhängig von der gewählten Sprache sein. Beides kam in diesem Projekt vor und zeigt die Wichtigkeit eines robusten, sprachunabhängigen Designs für komplexere Projekte. Auf die Übersetzung von Eigennamen wurde weitestgehend verzichtet. Stattdessen wurde in den englischen Sprachaufnahmen eine kurze Bedeutung des Wortes im Englischen angegeben (z. B. hop market = Hopfenmarkt) und anschließend mit dem deutschen Eigennamen fortgefahren.



Abbildung 56. Sprachauswahl am Anfang des VR-Programms. Die Beschriftungen der Controller (Abbildung 51) sind für diesen ersten Moment des Programms zweisprachig ausgeführt und werden nach der Sprachauswahl angepasst.

12 VR-Projekt: Ergebnisse & Diskussion

12.1 Ergebnisse

Daten

Die final kompilierte Version 1.1 des Programms 'Hamburg: Neue Burg VR' besitzt 1,74 GB und ist eigenständig ohne Unterstützung der UE als lokale Anwendung ausführbar. Das Programm ist für Windows-Systeme ausgelegt, jedoch legen Rückmeldungen nach der Veröffentlichung nahe, dass die Steam-Version des Programms (Kapitel 12.2) auch auf Linux-Systemen funktioniert. Getestet wurde auf den VR Brillen HTC Vive, HTC Vive Pro, Valve Index, Oculus Quest 2, Oculus Quest 3 und Pico 4. Als Hardwareanforderung können die Spezifikationen des Entwicklungssystems gelten (PC 4 in Tabelle 1, Kapitel 7.1), aufgrund der Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Performance ist jedoch auch eine reibungslose Ausführung auf leistungsärmerer Hardware wahrscheinlich.

Das inhaltliche Ergebnis ist ein eigenständiges virtuelles VR-Museum. Die dargestellte virtuelle Welt entspricht dem Zustand der Neuen Burg in Hamburg im Jahre 1024. Der erkundbare Bereich von ca. 30.000 Quadratmetern erstreckt sich auf das gesamte Burgareal zuzüglich eines Bereichs, der sich von Norden bis Südwesten außerhalb der Neuen Burg erstreckt und den Hafen sowie Teile der alten Handelsstraße abdeckt. Entsprechend den Vorgaben der Mitarbeitenden des AMH wurden Wälle, Torhäuser, Gebäude, Details sowie Landschaft, Flora und Umgebung modelliert, texturiert und in der virtuellen Welt angeordnet.

Zur Erkundung wurden Fortbewegungs- (Teleportation, Schnellreise) sowie Interaktionsmöglichkeiten geschaffen und in eine virtuelle Tour eingebettet. 22 Stationen inklusive Audiokommentar erklären die Neue Burg. Ein Tutorial führt in die Handhabung der Steuerung ein. Die Orientierung wird durch eine Navigationslinie, eine Mini-Map, eine 3D-Übersicht, großen Hinweisschildern über den Stationen sowie verschiedenen in die Interaktionen eingebetteten Referenzen zum modernen Stadtbild (360°-Panoramen, Silhouetten) ermöglicht. Animierte NPCs, Tiere und audiovisuelle Effekte runden das VR-Erlebnis ab.

Nutzungserlebnis

Der typische Ablauf der VR-Anwendung ist auf Abbildung 57 schematisch dargestellt. Nach der Sprachauswahl durchlaufen die Nutzenden ein kurzes Tutorial, das ihnen Steuerung, Interaktionen, Orientierung und die Bildersuche erklärt. Anschließend können alle Stationen der Tour in Reihenfolge durchlaufen werden, es ist aber auch eine freie Erkundung sowie jederzeit die Rückkehr zur geführten Tour möglich. Parallel oder unabhängig von der Tour können die Bildteile eingesammelt werden, um das Mini-Spiel zu absolvieren.

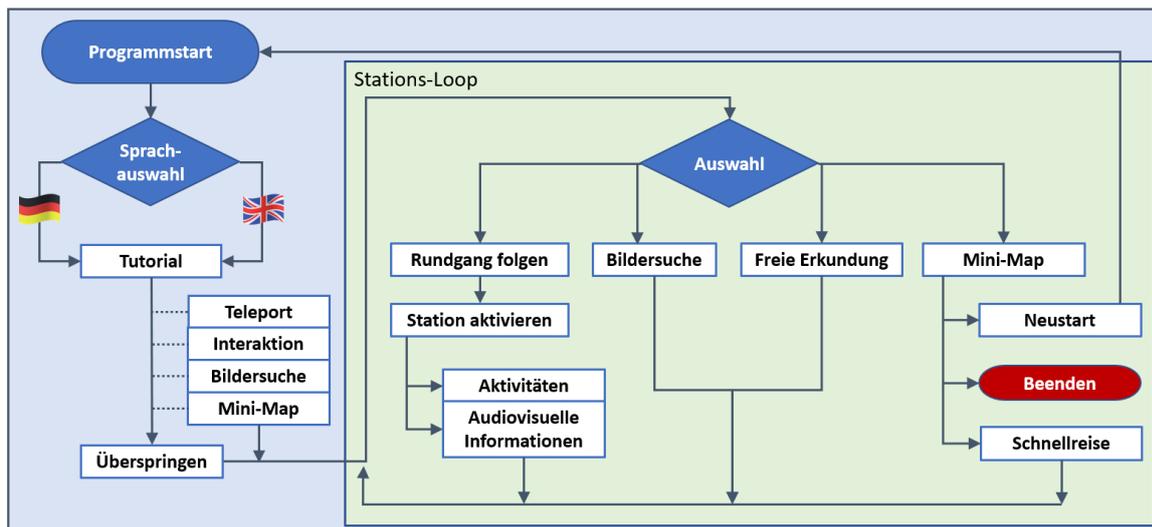


Abbildung 57. Schematische Übersicht über das Nutzungserlebnis.

12.2 Veröffentlichung

Zur Veröffentlichung wurde die Spieleplattform Steam aufgrund der weltweiten Verbreitung und der Marktführung für (VR-)Spielangebote gewählt (Kapitel 7.2). Außerdem wird mit Steamworks Unterstützung für den Veröffentlichungsprozess angeboten, der im Folgenden kurz erläutert werden soll.

Promotionsmaterial & Internetauftritt

Nach Aufnahme in das Steam-Entwicklerprogramm gibt es zwei Hauptaufgaben: die Gestaltung der Shopseite auf der Plattform, welche das Spiel vorstellt, sowie den Upload und die Konfigurationen zur Veröffentlichung des Programms. Die Shopseite auf Steam lässt sich als Hub verstehen, von dem aus alle relevanten Inhalte zum angebotenen Spiel erreichbar sind. Neben obligatorischem Bild- und Videomaterial gehören dazu Bewerbungstexte, Angabe von Systemvoraussetzungen, Jugendfreigabe, unterstützte Sprachen, Zugriff auf ein Spiel-spezifisches Diskussions-Forum und Rezensionssystem, ggf. Zugriff auf gesonderte Inhalte wie Updates oder Erweiterungen sowie optionale Kanäle wie eine Plattform zum Management von spielergenerierten Inhalten. Außerdem lassen sich Spiele über diese Seite vormerken ('Wishlist'-System) und nach Veröffentlichung käuflich erwerben und downloaden. Der Hauptaspekt zur Gestaltung dieser Seite sowie zur weiteren Bewerbung ist aussagekräftiges Bildmaterial, welches die Essenz des Spiels abbildet und Interesse wecken soll. Daher wurden entsprechend den Vorgaben Bildmaterial aus Screenshots angefertigt und ein Logo für das VR-Programm erstellt, welches auf allen Abbildungen mit Bezug zum Spiel enthalten ist. Abbildung 58 zeigt das Logo und weiteres zur Bewerbung genutztes Bildmaterial.

Außerdem wird zur Veröffentlichung auf Steam zwangsweise Videomaterial benötigt, welches das Spiel bzw. das Gameplay vorstellt. Hierzu wurden mehrere Sequenzen direkt aus der virtuellen Umgebung innerhalb der UE rausgerendert. Außerdem wurde eine komplette Spiele-Session in VR mitgeschnitten sowie einzelne Bilder und Sequenzen von Objekten, insbesondere der Miniatur-Stadtmodelle, gerendert. Aus diesem Material wurde mit dem Schnittprogramm CapCut (Kapitel 7.2) ein Trailer von 50 Sekunden Länge zusammengestellt (MP4-Format, 1920 x 1080 Pixel, 'FullHD', 56 MB). Neben Szenenübergängen wurden auch Geräusche und vor allem eine

untermalende Trailermusik eingefügt. Der finale Trailer ist sowohl auf der Shopseite bei Steam als auch auf Youtube verfügbar. Die Shopseite selbst besitzt auch Möglichkeiten zur Lokalisierung. So können Texte in mehreren Sprachen hinterlegt werden, die den Besuchenden der Shopseite je nach Herkunft angezeigt werden. Auch Bild- oder Videomaterial lässt sich entsprechend anpassen. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wurden Inhaltsangaben und Systemvoraussetzungen auf Deutsch und Englisch verfasst. Abbildung 59 zeigt die fertig gestaltete Shopseite auf Steam.



Abbildung 58. Logo (links oben) sowie weitere Screenshots als Werbematerial.

Alle Spiele > Gelegenheitsspiele > Hamburg: 'Neue Burg' VR

Hamburg: 'Neue Burg' VR

Communityhub

Allgemein/Film | Hamburg Neue Burg VR - Trailer

Kasi Workshop Erhältlich auf Available on STEAM

Hamburg vor 1000 Jahren: Ein immersives Virtual Reality-Erlebnis mit vielen interaktiven Stationen und der detaillierten Rekonstruktion einer ganzen Erdwall-Burg und des frühen Hafens. Erkunde auf eigene Faust oder folge der komplett vertonten Tour.

ALLE REZENSIONEN: 4 Nutzerrezensionen
VERÖFFENTLICHUNG: 26. März 2024
ENTWICKLER: Kasi Workshop
PUBLISHER: Kasi Workshop

Beliebte benutzerdefinierte Tags für dieses Produkt:
VR Historisch Erkundung Atmosphärisch +

Melden Sie sich an, um dieses Produkt zu Ihrer Wunschliste hinzuzufügen, zu abonnieren oder als „Ignoriert“ zu markieren.

VR Dieses Spiel erfordert ein VR-Headset zum Spielen. Weitere Informationen erhalten Sie in den Systemanforderungen.

Hamburg: 'Neue Burg' VR spielen Nur VR

Kostenlos **Spiel starten**

KÜRZLICHE EVENTS UND ANKÜNDIGUNGEN Alle anzeigen

NEUES SPIEL Di., 26. März 2024 14:08 CET
Hamburg: Neue Burg VR jetzt verfügbar!

Hamburg: Neue Burg VR

Alterskennzeichen: 0+
Bewertung für: Deutschland

Ist dieses Spiel relevant für Sie?
Melden Sie sich an, um zu erfahren, warum Sie dies mögen könnten, basierend auf Ihren Spielen, Freunden und Kuratoren, denen Sie folgen.

Anmelden oder Steam öffnen

Einzelspieler

ÜBER DIESES SPIEL

Tauche in die über 1000-jährige Geschichte Hamburgs ein und erlebe die Anfänge der Stadt im Jahre 1024! Die 'Neue Burg' - die Keimzelle der frühen Hamburger Neustadt - wurde in Zusammenarbeit mit Archäologen detailgetreu rekonstruiert. Dieses immersive VR-Erlebnis bietet 22 interaktive Stationen, die dazu einladen, das historische Hamburg zu entdecken und zu verstehen.

Erklimme die Burgwälle und Schiffsmasten, unternehme Zeitsprünge und vergleiche zwischen damals und heute, sammle Teile eines Gemäldes ein, um ein Porträt des Bauherren zu erstellen und erkunde Modelle, welche die 1000-jährige Stadtentwicklung dieses Ortes visualisieren. Dabei kannst du der komplett vertonten Tour folgen oder aber das gesamte Gebiet frei erkunden.

'Hamburg: Neue Burg VR' wurde im Rahmen einer Promotionsarbeit entwickelt und zielt ab auf die Nutzung des Potentials von VR für die spielerische Vermittlung von Geschichte.

VR-Hardware benötigt! Getestet auf HTC Vive Pro, Valve Index, Oculus Quest 2 & Pico 4

SYSTEMANFORDERUNGEN

| MINDESTANFORDERUNGEN: | EMPFOHLEN: |
|---|---|
| Setzt 64-Bit-Prozessor und -Betriebssystem voraus Betriebssystem: Windows 11 | Setzt 64-Bit-Prozessor und -Betriebssystem voraus Betriebssystem: Windows 11 |
| Speicherplatz: 2 GB verfügbarer Speicherplatz | Prozessor: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11800H oder vergleichbar |
| VR-Unterstützung: VR-Brille und Controller benötigt. Getestet auf der HTC Vive, Valve Index, Oculus Quest 2 & Pico 4 | Arbeitsspeicher: 16 GB RAM |
| | Grafik: NVIDIA GeForce RTX 3070 oder vergleichbar |
| | Speicherplatz: 2 GB verfügbarer Speicherplatz |
| | VR-Unterstützung: VR-Brille und Controller benötigt. Getestet auf der HTC Vive, Valve Index, Oculus Quest 2 & Pico 4 |

Nur VR
Steam sammelt noch Informationen über dieses Spiel

Sprachen:

| | Oberfläche | Ton | Untertitel |
|----------|------------|-----|------------|
| Deutsch | ✓ | ✓ | |
| Englisch | ✓ | ✓ | |

TITEL: Hamburg: 'Neue Burg' VR
GENRE: Gelegenheitsspiele, Indie, Kostenlos
ENTWICKLER: Kasi Workshop
PUBLISHER: Kasi Workshop
VERÖFFENTLICHUNG: 26. März 2024

Kasi Workshop auf YouTube

Updateverlauf anzeigen
Ähnliche News lesen
Diskussionen anzeigen
Communitygruppen finden

Teilen Einbetten

Abbildung 59. Auftritt des VR-Programms auf Steam mit Video und Screenshots (oben) sowie Beschreibungstext und Systemvoraussetzungen (unten).

Programmvorbereitung

Zum Upload des Spiels auf die Steam-Datenbank wird das Steamworks Software Development Kit (SDK) benötigt. Die aktuelle Version (Stand: März 2024) ist v1.59. Das SDK partitioniert das Programm in kleine Teile und passt sie der Datenbank auf Steam an. Dieser Prozess wird auch dazu genutzt, um potentielle Updates und Erweiterungen einzuführen. Bei einem Update werden lediglich die Teile ausgetauscht, die neuen Code beinhalten, somit lassen sich vollständige neue Downloads und Neuinstallationen vermeiden. Über Steamworks lassen sich nun einige Einstellungen zum Aufruf, zur Sichtbarkeit und zum Testen des Programms vornehmen. Zunächst müssen Pakete definiert werden, welche den Endkunden schließlich als Download zur Verfügung gestellt werden sollen. Dies wird relevant, wenn ein Programm aus mehreren unabhängigen Teilprogrammen besteht oder zusätzliche Extras bereitgestellt werden sollen. Für VR-Programme ist es überdies notwendig, Angaben zur korrekten Ansprache der Handcontroller zu hinterlegen sowie einzustellen, wie beim Programmstart verfahren werden soll, da es Programme gibt, die sowohl einen VR- als auch einen Desktop-Modus besitzen. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wird beim Start direkt auf die VR-Brille gestreamt, sodass keine weiteren Angaben seitens der Nutzenden erforderlich sind.

Einige Programme benötigen zusätzliche Drittanbieter-Software, um reibungslos zu funktionieren. Das ist auch bei den meisten VR-Programmen der Fall. Daher wurden dem Paket einige gängige 'Redistributables' hinzugefügt. Dabei handelt es sich um die aktuellen Versionen der Multimedia-Schnittstelle 'DirectX' und des Compilers 'Visual C++'.

Im Rahmen einer Vorveröffentlichung lassen sich Betatests durchführen. Dabei handelt es sich um die Veröffentlichung des Spiels für einen kleinen Personenkreis mit dem Ziel, letzte Rückmeldungen zum Spiel zu bekommen oder das gesamte Paket auf Funktionstüchtigkeit auf verschiedenen Systemen zu testen. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' wurden daher einige 'Beta Keys' zur Vorabaktivierung des Spiels verteilt. Die Rückmeldungen ergaben auf technischer und inhaltlicher Seite kleine Probleme. Es wurden lediglich Vorschläge zu Erweiterungsmöglichkeiten gegeben.

Steamworks enthält außerdem einige Werkzeuge zur Analyse der Nutzungszahlen. So lassen sich Anzahl, Spielzeit, Vorbestellungen und Herkunft der Nutzenden anzeigen. Stand 16.04.2024 haben 71 Personen die Anwendung ausprobiert, weitere 104 Personen haben sich das Programm vorgemerkt. Abbildung 60 zeigt den prozentualen Anteil der Nutzungszeiten zu diesem Zeitpunkt. Der Medianwert der Spielzeit beträgt laut Steamworks 11 Minuten. Allerdings ist zu beachten, dass sehr große Schwankungen existieren. Da nicht öffentlich bekannt ist, wie die Datenerhebung genau funktioniert, welche Aktion als 'Spielzeit' definiert wird, und zum Zeitpunkt der Datenerhebung erst eine kleine Anzahl an Nutzenden das Programm verwendet hat, sind die Ergebnisse mit Bedacht zu betrachten.

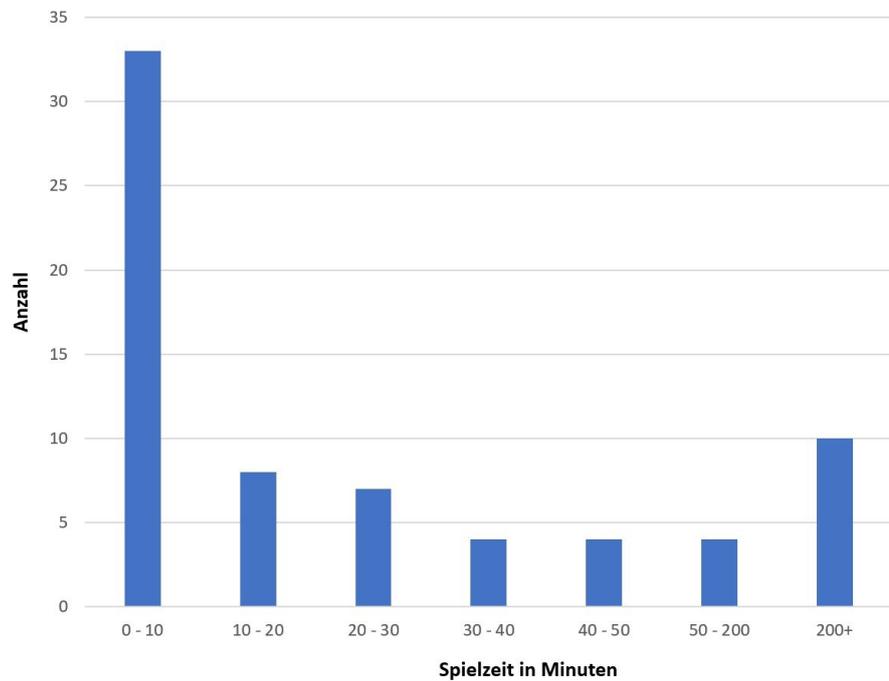


Abbildung 60. Verteilung der Spielzeiten (Stand: 16. April 2024).

12.3 Diskussion

12.3.1 Orientierung & Nutzersteuerung

Orientierungshilfen

Die Orientierungshilfen und die Nutzersteuerung sind eine direkte Ableitung aus den Erkenntnissen der Studien (Kapitel 9 & 10). Mit der Navigationslinie wurde eine Hauptorientierungshilfe gewählt, die sich für die Wegfindung deutlich von anderen Hilfen abgehoben hat, sich in verschiedenen DVE-Anwendungen bewährt und für VR u.a. von Edler et al. (2019) diskutiert wurde. Somit besteht – unabhängig von weiteren Hilfsmitteln – eine klare Vorgabe zum 'Durchspielen' und eine Hilfe, die sich dynamisch an die Position der Nutzenden anpasst und auch dann noch unterstützen kann, wenn kompletter Orientierungsverlust besteht und somit alle anderen Hilfen (Karten) versagen. Die zweite Hilfe ist die Mini-Map, welche eine Übersicht über das gesamte Gebiet bietet. Insbesondere die Verortung der eigenen Position und die Visualisierung des Sichtkegels dürften hierbei zur Orientierung beitragen. Mit dieser exozentrischen Variante reiht sich diese Lösung in die Hilfen ein, die von Lokka & Çöltekin (2020), Yang et al. (2018) sowie – in Bezug auf Mini-Maps – von Zagata et al. (2021) diskutiert wurden. Außerdem lässt sich auch physisch eine Übersicht erreichen, indem innerhalb des VR-Programms erhöhte Punkte (Schiffsmasten, Torhäuser, Glockenturm der Kapelle) eingenommen bzw. erklettert werden. Die Wichtigkeit von Landmarken zur Orientierung wird im VR-Projekt an einigen Stationen während der Rundtour sowie ganz grundsätzlich im Stationsdesign aufgegriffen. Die Neue Burg selbst besaß keine hochaufragenden, hervorstechenden Bauten, an denen man sich auch aus einiger Entfernung hätte orientieren können. Stattdessen bieten vier Stationen die Möglichkeit, Landmarken einzublenden und somit den eigenen Standpunkt in Bezug auf diese Landmarken einzuschätzen. Insbesondere das Mahnmal St. Nikolai dient hierbei – sowohl als

Silhouette als auch als Miniaturmodell bei den 3D-Karten der Stadtvisualisierung – als Fixpunkt. Das Stationsdesign führt darüber hinaus künstliche Landmarken ein (Kapitel 11.6.2). Mit dieser Bandbreite an Orientierungshilfen ist davon auszugehen, dass die Nutzenden innerhalb der Neuen Burg zumindest der Tour folgen können. Diese Mindestanforderung ist wichtig zum erfolgreichen 'Absolvieren' des Programms. Weitergehende Orientierung – wie beispielsweise das Einordnen des eigenen Standpunktes in das Stadtbild des modernen Hamburgs – ist zwar mit den gegebenen Hilfen und Interaktionen möglich (vor allem mit den Miniaturmodellen der Stadtentwicklung und den 360°-Panoramen), erfordern aber eine gewisse Vorkenntnis des modernen Stadtbildes. Es ist somit eher zu erwarten, dass nur Einheimische oder häufige Hamburg-Besuchende mit diesen zusätzlichen Verknüpfungen etwas anfangen können und bei ihnen für einen zusätzlichen 'Aha-Moment' gesorgt wird. Die Optionalität der Silhouetten, 360°-Panoramen und Mini-Map sorgt dafür, dass entsprechend Harrower (2007) keine kognitive Überlastung der Nutzenden erfolgt.

Nutzersteuerung

Die Kernelemente der Nutzersteuerung bestehen in 'Hamburg: Neue Burg VR' aus einem kurzen Tutorial, einem einheitlichen UI-Design mit animierten Hinweisen, visuellen, auditiven und haptischen Rückmeldungen für Interaktionen sowie einem lenkenden und erklärenden Audiokommentar. All diese Elemente sollen entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit für eine möglichst niedrige Einstiegsschwelle sorgen. Während kleiner, nicht-repräsentativer Tests zum Ende der Entwicklung konnten Verhaltensweisen beobachtet werden, welche in mehrere Richtungen gingen: Die Orientierung stellte in der Regel kein Problem dar. Auch die Bedienung schien weitestgehend intuitiv zu sein. Wie bei der Orientierungsstudie tauchte aber auch hier ab und zu die Erwartung auf, dass Interaktionen ohne physische Berührung mit dem Gegenstand zu funktionieren hätten. Nach kurzem Probieren oder einmaliger Erklärung löste sich dieses Missverständnis sofort auf, zumal somit auch die erstmalige visuelle Rückmeldung bei Überlappung mit einem interaktiven Gegenstand ausgelöst wurde und somit die Nutzenden direkt wussten, ob sie mit etwas interagieren können oder nicht. Als Konsequenz wurden gleich am Start des Programms eine direktere Sprache gewählt („... Pergament mit dem Controller *berühren*“) und ein Hinweis in den Audiokommentar des Tutorials eingebaut. Es gab aber auch Fälle, bei denen der Entdeckungsdrang der Testpersonen dazu führte, das Tutorial nicht abzuwarten, sondern direkt in die selbstständige Erkundung der virtuellen Welt zu starten. Diese Beobachtung verdeutlicht den Spagat, den ein Programm mit einem solchen Anspruch ausführen muss, namentlich das Abholen von Menschen ohne Vorerfahrung und das gleichzeitige Nicht-Ausbremsen von erfahrenen, aktiv-neugierigen Nutzenden.

In Bezug auf die fünf in Kapitel 5.4 aufgeworfenen Fragestellungen ergibt sich für 'Hamburg: Neue Burg VR':

- a) Die angestrebte Gruppe an Nutzenden ist möglichst breit, ergo muss die Einstiegshürde so niedrig wie möglich sein. Sie setzt allerdings neben Hardware-Anforderungen die Fähigkeit voraus, gegenüber einer ungewohnten Steuerung offen zu sein.
- b) Dasselbe gilt für die Einarbeitungszeit. Das Tutorial stellt alle vier Grundpfeiler (Teleportation, Interaktion, Karte, Bildersuche) innerhalb von ca. drei Minuten vor, bevor die Nutzenden in die geführte Rundtour bzw. die freie Erkundung entlassen werden.
- c) Die essentiellste Interaktion ist (neben der Teleportation) das simple Aktivieren einer linearen Ereigniskette. Diese Interaktionsart ist intuitiv und immer gleich. Die darüberhinausgehenden Interaktionen (Klettern etc.) bilden eine wichtige Erweiterung der Immersion und Motivation, sind aber ggf. komplexer und müssen daher optional bleiben.

- d) Das Konzept hat als Anspruch die Verbindung der Einstiegshürde einer passiven Anwendung mit dem Potential einer interaktiven Anwendung. Beides ist nicht vollständig erreichbar. In Bezug auf die Komplexität liegt 'Hamburg: Neue Burg VR' aufgrund der einfachen Bedienung näher an einer passiven Anwendung als an einer umfangreichen interaktiven VR-Anwendung mit vielen Steuerungsmöglichkeiten.
- e) Aufgrund der einfachen Bedienung reicht ein ca. dreiminütiges Tutorial zur Einführung aus. Bei einem vollständigen, schnellen Durchspielen des Programms ergibt sich eine Spielzeit von ca. einer halben Stunde. Somit liegt das theoretische Verhältnis zwischen Einarbeitungszeit und tatsächlicher Nutzung bei eins zu zehn.

Nutzersteuerung beginnt außerdem bereits im analogen, realen Raum. Vor dem Hintergrund, dass das Programm autark und ohne Hilfe einer einweisenden Person spielbar sein soll, ist es notwendig, dass der generelle Umgang mit der Hardware, das korrekte Aufsetzen und ggf. das Starten der Anwendung möglichst intuitiv gestaltet wird und bei Bedarf einfach und gut erklärt wird. Für den Heimgebrauch kann davon ausgegangen werden, dass Personen, die ohnehin bereits eine VR-Brille besitzen, genügend Vorkenntnisse zu diesen Themen besitzen. Für Vor-Ort-Anwendungsszenarien wie im Museum wäre aber beispielsweise eine (bebilderte) Kurzanleitung neben der VR-Station notwendig, welche die drei Schritte bis zum Starten der VR-Anwendung erklärt:

- 1) Aufsetzen und Justierung der VR-Brille
- 2) Korrekte Handhaltung der Controller, ggf. bereits mit entsprechend markierten Steuerungsknöpfen, die der Teleportations- und Interaktionslogik des Programms entsprechen
- 3) Start bzw. Neustart des Programms

12.3.2 Anwendungsszenarien & Zielgruppen

Zunächst soll an dieser Stelle nochmal die Erkenntnis aus Punkt d) des letzten Unterkapitels betont werden, dass nicht alle Anforderungen aller Zielgruppen bedient werden können. Zielgruppenorientiertes Programmdesign beinhaltet immer auch, die Stärken und Schwächen einer bestimmten Zielgruppe besonders zu berücksichtigen. Wenn mehrere, sehr heterogene Zielgruppen angesprochen werden sollen, können deren Anforderungen zwangsweise nur bis zu einem gewissen Grad erfüllt werden, sofern die Anforderungen der Zielgruppen in gewisser Konkurrenz zueinanderstehen. Die für 'Hamburg: Neue Burg VR' entwickelte Lösung muss sich also als Kompromissvorschlag verstehen, dessen Konzept die deutliche Fokussierung auf eine bestimmte Zielgruppe ablehnt und stattdessen viele im Blick hat (siehe Konzept in Kapitel 11.2). Gleichwohl kann dieses Konzept als Grundlage dienen, dass je nach Kontext und Einsatzzweck sowie je nach Tendenz zur Gewichtung in Richtung einer bestimmten Zielgruppe angepasst werden kann.

Insofern bietet sich dieses VR-Projekt, wie in der Zielsetzung formuliert, in erster Linie für den begleitenden Einsatz im Museum an, wird aber auch als unabhängiges, eigenständiges VR-Erkundungsspiel von Nutzenden angenommen (Kapitel 12.2). Inwiefern sich das Programm in eine begleitende Ausstellung integrieren lässt und in allen relevanten Kategorien (z. B. Zeitaufwand, Ausstellungsdidaktik, etc.) mit dieser Ausstellung harmoniert, lässt sich nur in der Praxis über einen längeren Testzeitraum in Erfahrung bringen. Die Voraussetzungen werden jedenfalls aufgrund der entsprechenden Konzeption des Programms als gegeben angesehen. Auch für alle

anderen in Kapitel 11.2 definierten Zielgruppen wird das VR-Programm für die dort definierten Anwendungsszenarien als geeignet bewertet. Hier sticht insbesondere zunächst die selbstständige Nutzung des Programms aufgrund der bereits erfolgten weltweiten Verfügbarkeit über die Plattform Steam heraus. Lokale Szenarien vor Ort – beispielsweise in Schulen oder auf Messen – sind gut denkbar, müssten sich aber ebenfalls im Rahmen von Testphasen beweisen.

Im Vergleich zu den in Kapitel 3.4 vorgestellten Anwendungen reiht sich 'Hamburg: Neue Burg VR' zwischen den rein passiven oder interaktionsarmen/-losen Simulatoren auf der einen Seite (Bunnenberg, 2020; Deggim et al., 2017b; J. Richardson, 2023) und den komplexeren, spielorientierten Anwendungen auf der anderen Seite (Valve, 2020) ein. In Umfang und Interaktionslogik entspricht dieses VR-Projekt am ehesten der historischen musealen VR-Tour durch die sixtinische Kapelle (Evans, 2019) mit der Erweiterung, dass es sich nun um eine offene VR-Welt handelt und entsprechende Unterstützung zur Wegfindung hinzugekommen ist. Der Anspruch an geschichtlicher Vermittlung ist am ehesten mit den kommerziellen, für verschiedene deutsche Städte verfügbaren 'Timeride'-Anwendungen vergleichbar (Bunnenberg, 2020). Diese sind zwar deutlich umfangreicher in der Modellierung, es handelt sich dabei aber um rein passive VR-Erfahrungen.

12.3.3 Fortbewegung & Interaktion

Teleportation

Mit der Wahl der Teleportation als Fortbewegungsmittel wurde ein Kompromiss eingegangen, um Motion Sickness zu vermeiden und einen ausreichenden Nutzungskomfort zu bieten. Diese Wahl geht, wie in Kapitel 5.3 erklärt, mit schlechteren Voraussetzungen für die Orientierung einher. Hinzu kommt der für VR-Laien gewöhnungsbedürftige Perspektivwechsel während den ersten Teleportationen. Alternativen wie Laufbänder, kontinuierliche Fortbewegung, Fahr-/Flugmodi oder Redirected Walking (Di Luca et al., 2021; Langbehn, 2019) sind aus verschiedenen Gründen (Anschaffungskosten, Zugänglichkeit, Verfügbarkeit des physischen Raumes, Bedienkomfort, historische Immersion) nicht mit den für dieses Projekt aufgestellten Anforderungen (Kapitel 1.2) und dem Projektkonzept (Kapitel 11.2) vereinbar. Gleichwohl sind diese Alternativen in spezifischen Situationen durchaus denkbar. So ließen sich in einem großen Raum, mithilfe eines omnidirektionalen Laufbandes oder durch Anwendung des 'Redirected Walking'-Konzepts große Wegestrecken innerhalb der Neuen Burg durch physisches Gehen zurücklegen. Sofern der Schnellteleport über die Mini-Map erhalten bliebe, ließe sich dennoch die gesamte Burg erschließen. Letztlich ist die Akzeptanz der Teleportations-Methode als Fortbewegung vor allem davon abhängig, wie schnell sich die Nutzenden daran gewöhnen. Visuelle Unterstützung (Anzeigen des Teleportationsbogens, kurze Verdunklung des Blickfeldes während der Teleportation) und auditive Rückmeldung (Wind-Geräusch während der Teleportation) können diese Methode trotz ihrer Unnatürlichkeit dennoch in sich konsistent wirken lassen. Ein klarer Nachteil muss allerdings in der Tatsache erkannt werden, dass der Vorgang der Teleportation mit dem Beugen eines Fingers ausgelöst werden kann und sich die Nutzenden somit schnell daran gewöhnen, ihren Körper nicht wie in der Realität einzusetzen, sondern einigermaßen statisch stehen zu bleiben. Dieser Effekt wurde auch während der Orientierungsstudie beobachtet und bedeutet letztendlich das Verschenken eines Teils des Potentials von VR. Diesem Immersionsbruch kann entgegengewirkt werden, indem andere Maßnahmen wie Interaktionen zum Bewegen animieren.

Interaktionen

Die vereinfachte Interaktionsmechanik erlaubt das barrierearme Durchspielen der Anwendung und die Aktivierung aller Stationen. Um der oben beschriebenen Motivation zur Bewegung und somit zur erhöhten Immersion gerecht zu werden, gibt es allerdings Interaktionen, welche etwas Einsatz der Arme und des Körpers erfordern. Insbesondere die Klettertouren fallen unter diese Kategorie. Aber auch die Positionierung der Bildteile in Bodennähe oder an einem erhöhten Punkt kann bereits zur Bewegung animieren. Mit diesen Ansätzen an realen Bewegungen wird zwar nur die Oberfläche dessen angekratzt, was theoretisch möglich ist und in einigen VR-Spielen auch eingesetzt wird (z. B. 'Beatsaber' (Ilavský & Hrinčár, 2018) oder 'Half-Life: Alyx' (Valve, 2020)), allerdings muss auch hier wieder die sehr breit gefasste Zielgruppe im Auge behalten werden. Unter dem Aspekt der Inklusion (Kapitel 10.3) ist zu beachten, dass auch Menschen mit körperlichen Einschränkungen Zugang zu VR gewährt wird. Gerade diese allgemeingültige Zugänglichkeit ist ein großes Argument für den Einsatz von VR. Dieser Aspekt ist somit ein gutes Beispiel für die in Konkurrenz stehenden Ansprüche.

Der Gamification-Aspekt (Kapitel 4.2) wird in 'Hamburg: Neue Burg VR' durch die übergeordnete Bildsuche aufgegriffen. Diese Suche soll parallel zur Informationsaufnahme zur weiteren Erkundung anregen. Insbesondere die nicht immer offensichtlich und einfach zu erreichenden Verstecke (auf einem Schiffsmast, in einem 360°-Panorama, in einem Brunnen, im Schweinegehege) sollen eine spielerische Auseinandersetzung mit der virtuellen Umwelt motivieren. Im Idealfall werden die Informationsaufnahme und das Spiel als eine zusammengewachsene Einheit wahrgenommen und das Suchen der Bildteile integriert sich nahtlos in die geführte Rundtour. Sofern das auf die Nutzenden zutrifft, ist die Forderung von Kerres et al. (2009) nach einer Verschmelzung aus Spiel- und Lerninhalten erfüllt. Der Erfolg einer solchen Maßnahme ist wiederum sehr vom Charakter der Nutzenden abhängig und wie sehr man sich vom Angebot des Mini-Spiels motivieren lässt. Die Variation kann von vollständiger Ignoranz des Mini-Spiels bis zur reinen Fokussierung auf die Bildersuche und das Auslassen der Stationen reichen. Empirisch ließe sich das Verhältnis und die Wirksamkeit mit einer Studie nachweisen, welche die unterschiedliche Beschäftigungszeiten mit den jeweiligen Lehr- und Spielelementen misst und nach Benutzung die vermittelten Inhalte abfragt.

Das von Lacet et al. (2022) für VMs geforderte Storytelling ist rudimentär über die Bildersuche und den Audiokommentar vorhanden. Die Immersion an sich sorgt bereits für ein gewisses Eintauchen in die Geschichte und die Atmosphäre, auch wenn keine tiefergehenden Storyelemente oder Charaktere mit ausgearbeiteten Hintergrundgeschichten vorhanden sind. Die detailreiche Modellierung und Maßnahmen wie animierte NPCs vermitteln dennoch subtil eine in sich konsistente Welt voller Leben und Geschichten. Ein weiteres Ausarbeiten dieser Charaktere und Geschichten und die Einbindung dieser in das VR-Erlebnis ginge über das Ziel dieser Arbeit hinaus, würde aber eine tiefere Immersion bieten und den Fokus in Richtung Serious Game – also eher ein Spiel mit Lehrinhalten als andersherum – verschieben.

12.3.4 Historische Genauigkeit

Bereits in Kapitel 2.2 wurde auf die Problematik eingegangen, dass oftmals eine nicht ausreichend gesicherte Datenlage existiert, um eine in allen Details belastbare historische Rekonstruktion anzufertigen. Barrat (2021) weist darauf hin, dass die (hyper-)realistische Darstellung Betrachtende zur Annahme verleiten könnten, dass jedes gezeigte Detail tatsächlich so und an

genau dieser Stelle existierte. Es werde somit eine Fülle an Forschungsdaten suggeriert, die nicht vorliegt. Es werden auch einige Lösungsvorschläge vorgestellt, wie das Einbetten von Metadaten zu jedem gezeigten Objekt oder die visuelle Anpassung für die Darstellung von Unsicherheiten. So könnten beispielsweise farbkodierte Elemente auf ungesicherte Informationen hinweisen, oder aber es wird auf eine detaillierte Darstellung vollständig verzichtet und Annahmen werden lediglich mit visuell vom Rest klar abgegrenzten groben Formen oder Drahtgittermodellen dargestellt. Auch Wolf et al. (2018) haben in einer Untersuchung festgestellt, dass Museumsmitarbeitende zuweilen skeptisch gegenüber der Erstellung neuer, 'ausgedachter' Inhalte sind, sofern es sich nicht um Originale handelt und die Gefahr besteht, falsche Vorstellungen zu vermitteln. Insbesondere das Einbetten von Charakteren und somit die Darstellung von Alltag und Verhaltensweisen wird hinterfragt. Sie weisen aber auch darauf hin, dass diese Einstellung sehr kulturabhängig sei. So gehe es in der deutschen Museumslandschaft eher trocken und mit mehr Fokus auf Exaktheit zu, während beispielsweise englische Museen einen größeren Fokus auf die Sensation legen.

Demgegenüber steht der Anspruch der Wissenschaftskommunikation im Allgemeinen und der Herangehensweise von Gamification und Serious Games im Speziellen, eine lebendige und somit vermittelbare Vergangenheit/Wissenschaft zu präsentieren, um zur Auseinandersetzung mit der gezeigten Thematik zu motivieren (Illingworth, 2020; Metag, 2017). Eine Abstrahierung sorgt dafür, dass es schwerer fällt, sich in gewisse Situationen hineinzusetzen. Somit ist gerade das Alleinstellungsmerkmal der körperlichen Präsenz in VR-Anwendungen dafür geeignet, mit mehreren Sinnen in ein Themengebiet einzutauchen (Cummings & Bailenson, 2016). Die verschiedenen Herangehensweisen sind somit weiterhin Gegenstand von Diskussionen (Muckel, 2023).

Um diesem Aspekt für dieses VR-Projekt gerecht zu werden, wurde für 'Hamburg: Neue Burg VR' eigens eine Station implementiert, welche die historische Unsicherheit bei solchen Rekonstruktionen thematisiert. Die vierte Station der Tour besteht aus dem Modelltisch des Zustands von 1024. Allerdings sind hier die Miniaturgebäude nicht festgesetzt, sondern die Nutzenden werden dazu animiert, sie frei zu verschieben und neu anzuordnen. Somit wird die Möglichkeit gegeben, eine eigene Interpretation zum Aussehen der Burgbebauung umzusetzen. Begleitet wird diese Station von einem Audiokommentar, der auf die Unmöglichkeit einer detailreichen Konstruktion bei ungenauer oder fehlender Quellenlage hinweist. Der Audiokommentar fasst abschließend das Dilemma zu dieser Thematik wie folgt zusammen: „Bei allen historischen Rekonstruktionen muss immer abgewogen werden zwischen einer vermittelbaren, lebendigen Vergangenheit und dem tatsächlichen Kenntnisstand.“ Somit wird den Nutzenden bereits zu Anfang der Tour die Möglichkeit gegeben, das Gesehene und Erlebte einzuordnen.

Darüber hinaus muss die Einordnung auf einem Spektrum zwischen reiner Darstellung der gesicherten Erkenntnisse und freier Interpretation für bessere Zugänglichkeit auch immer stark von der Zielgruppe abhängig gemacht werden. 'Hamburg: Neue Burg VR' ist für die breite Allgemeinheit gedacht und fällt somit nach der Einordnung von Schäfer et al. (2015) hauptsächlich in die Kategorie der externen Wissenschaftskommunikation. Bei höherem Fokus auf eine interne Kommunikation, beispielsweise für Historiker:innen und Archäolog:innen anderer Bereiche, wäre eine abstraktere Darstellung der ungesicherten Elemente denkbar und angebrachter.

12.3.5 Eignung von Geodaten für VR

Bereits in Kapitel 4.3 wurden einige Beispiele – insbesondere aus dem Cultural Heritage-Bereich – vorgestellt, die auf Geodaten basieren. Auch 'Hamburg: Neue Burg VR' wurde zum Teil und indirekt auf Basis dieser Daten erstellt. In erster Linie kamen entsprechende Verfahren bei der Vermessung der archäologischen Ausgrabungsstätten zur Anwendung. Diese Datengrundlage erlaubte es den Archäolog:innen, zum einen hochpräzise digitale Zeichnungen der Ausgrabungsbefunde anzufertigen, zum anderen wurde dadurch eine Georeferenzierung und Einordnung dieser Befunde in Kartenmaterial des heutigen Stadtbilds ermöglicht. Diese Informationen waren von besonderer Bedeutung für das VR-Projekt bei der Verortung vieler Interaktionen wie beispielsweise die exakte Positionierung der Silhouetten, der 360°-Panoramen sowie bei der Gestaltung der umgebenen Landschaft. Die vom AMH beauftragten Rekonstruktionszeichnungen bildeten die Hauptquelle für das VR-Projekt.

Vorteile

Auf diese indirekte Art sind Geodaten unerlässlich für die Nachbildung realer Orte, da zumindest Kartenmaterial unverzichtbar zur detailgetreuen Nachbildung ist. Neben der Neuen Burg an sich trifft das für dieses Projekt auch für die neun modellierten Zeitscheiben der Miniatur-Stadtmodelle an Station 2 zu. Auf ähnliche Weise wurde auch Stade im Jahre 1620 und die Siegesburg im Jahre 1588 rekonstruiert, beides basierend auf physischen Miniaturmodellen (Deggim et al., 2017a; Walmsley & Kersten, 2019). Auch eine direktere Verwendung ist denkbar und würde einige Vorteile mit sich bringen. So wurden in Kapitel 4.3 bereits einige Beispiele aufgelistet, in denen Punktwolken direkt zur Visualisierung verwendet wurden. Die Einsparung der Modellierungsarbeit ist dabei nicht nur ein zeitlicher Vorteil gegenüber einer manuellen Modellierung, sondern entspricht auch eher der Maxime zur historischen Genauigkeit (siehe oben), da nur das dargestellt wird, was tatsächlich gemessen wurde. Das setzt natürlich voraus, dass die zu visualisierenden Objekte noch existieren und erreichbar sind, um sie entsprechend zu vermessen. Sofern bereits digitale Varianten existieren, lassen sich diese auch direkt verwenden. Tschirschwitz et al. (2019) haben für das historische Duisburg eine VR-Anwendung entwickelt. Zusätzlich setzten sie für die Lehre in der VR-Entwicklung 3D-Modelle von Gebäuden ein, welche in vorangegangenen Abschlussarbeiten mittels Laserscanning und/oder Photogrammetrie aufgenommen worden sind (Tschirschwitz et al., 2018). Statham (2020) beschreibt den Nutzen der Photogrammetrie für die Erzeugung von 3D-Objekten für virtuelle Welten. Es bleibt also festzuhalten, dass sowohl Qualität (hochauflösende Punktwolken) als auch Quantität und Zugänglichkeit (Verfügbarmachung von umfangreichen 3D-Stadtmodellen, beispielsweise von den jeweiligen Landesämtern für Geoinformation und Vermessung) für die direkte oder indirekte Verwendung dieser Daten sprechen.

Herausforderungen

Die Regeln der Computergrafik diktieren für die Echtzeit-Visualisierung eine Herangehensweise, die sich dem Einfluss der Modelle auf die Performance sehr bewusst ist und die Datenoptimierung und Datensparsamkeit in den Mittelpunkt stellt (Kapitel 6). Die grundlegende Problematik, die sich somit aus der direkten Verwendung hochauflösender Punktwolken oder detaillierten, großen Abschnitten von 3D-Stadtmodellen ergibt, wurde bereits in Kapitel 4.3 erläutert. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' standen entsprechende Daten zur Rekonstruktion aufgrund des historischen Settings gar nicht erst zur Verfügung, somit stellte sich auch nicht die Frage zur Herangehensweise. Eine Ausnahme bildete allerdings die aktuellste Zeitscheibe der Miniatur-Stadtmodelle. Hier gab es die Auswahl zwischen einer direkten Verwendung der vorhandenen 3D-Modelle für den

Ausschnitt um das Mahnmal St. Nikolai und der manuellen Nachmodellierung. Eine direkte Verwendung wäre durchaus möglich gewesen, wurde aber zugunsten eines mit den anderen Zeitscheiben übereinstimmenden visuellen Stils – v. a. im Hinblick auf die simplifizierte Geometrie – verworfen. Die notwendige, umfangreiche Überarbeitung hätte aber selbst bei vorhandenen 3D-Modellen oder Punktwolken eine direkte Verwendung fraglich gemacht.

Edler et al. (2019) schlagen zumindest die Verwendung eines Digitalen Geländemodells (DGM) als Grundlage vor, merken aber gleichzeitig an, dass aufgrund inkompatibler Formate eine direkte Verwendung schwierig bleibt und dass als Grundlage Modelle benötigt werden, welche den VR-Anforderungen gerecht werden. Für 'Hamburg: Neue Burg VR' konnte aufgrund der umfangreichen Änderungen von der damaligen Flusslandschaft zur heutigen, stark bebauten Stadtfläche kein DGM als Grundlage verwendet werden, stattdessen wurde sich an den vom AMH bereitgestellten Karten zur rekonstruierten, mittelalterlichen Landschaft und dem damaligen Flussverlauf orientiert.

Auch beim Vorhandensein einer passenden Datengrundlage ist die Eignung sehr kontextabhängig. Digitale Stadtmodelle werden zumeist in großen, zusammenhängenden Paketen angeboten. Zur Optimierung ist eine Aufteilung in kleine Abschnitte bis hinunter auf einzelne Gebäude nötig, um die Objekte in VR einzeln je nach Blickrichtung der Betrachtenden anzuzeigen oder ausblenden zu können ('Occlusion Culling').

Lösungen

Der Aspekt der besseren VR-Eignung der Datengrundlage ist essentiell. Neben der Bereitstellung der Daten in Formaten, welche sich in die Arbeitsabläufe gängiger VR-Entwicklungsumgebungen implementieren lassen, wäre eine adaptive Auflösung der 3D-Modelle auf kleinem Maßstab vorteilhaft. Für VR-Visualisierungen im lebensechten Maßstab 1:1 sind die Stadtmodelle und v. a. die Texturen in der Regel zu grob, selbst wenn sie der besten Auflösung nach CityGML-Standard (LoD 3) entsprechen. Ausnahmen bilden Programme, welche das Stadtmodell lediglich als Hintergrundvisualisierung benötigen. Die von Unterhaltungsmedien, Architekturvisualisierungen oder von manuellen Neumodellierungen geprägten Gewohnheiten und somit Anforderungen an den Detailgrad machen für eine glaubhafte, realitätsnahe Visualisierung im Nahbereich umfangreiche Nacharbeiten notwendig. Eine feingranulare Anpassungsmöglichkeit der Abschnittsgrößen und LoDs entspräche auch der Anforderung, zum Zwecke der Performance-Optimierung Objekte je nach Entfernung von möglichen Betrachtungspunkten in ihrem Detailgrad zu ändern.

Für spezielle Anwendungsbereiche existieren bereits Lösungen. So bieten einige Hersteller von Vermessungsinstrumenten eine Software zur direkten VR-Visualisierung der erstellten Punktwolke an (z. B. von Faro, Anwendungsbeispiel in Wang et al. (2019)). Für Game Engines wurden Algorithmen vorgestellt, welche den Arbeitsablauf zum Importieren und Darstellen von Punktwolken optimieren (Conde et al., 2023; Kharroubi et al., 2019). Für Anwendungen, bei denen niedrigere und/oder texturlose LoDs ausreichen, lassen sich auch diese mit entsprechenden Anpassungen auch direkt für Echtzeit-Visualisierungen verwenden (Deggim & Kersten, 2023; Keil et al., 2021b). Für eine direkte, flexible Verwendung wäre ein Kompromiss zwischen den skalierenden 'hochaufgelöste, lokal begrenzte Punktwolke' und '(relativ) niedrig aufgelöstes aber umfangreiches 3D-Stadtmodell' nötig. Dass eine solche Lösung (noch) nicht existiert, ist aber auch der bislang vergleichsweise geringen Anzahl an Anwendungsfällen und somit der geringen Nachfrage zuzuschreiben, da 3D-Daten weiterhin hauptsächlich für Anwendungen mit anderen Anforderungen in der klassischen Geodäsie oder der Geoinformatik benötigt und produziert werden.

12.3.6 Verbesserungs- & Erweiterungsmöglichkeiten

Das Projekt 'Hamburg: Neue Burg VR' ließe sich durch eine Vielzahl an Maßnahmen erweitern, um neue Zielgruppen anzusprechen, mehr oder tiefergehende Inhalte zu präsentieren oder die als Ziel dieser Arbeit gesetzte Orientierung und Nutzersteuerung stärker zu optimieren.

Inhaltlich

Unter dem Aspekt der Wissenschaftskommunikation ließe sich das Programm beliebig erweitern. Weitere zeitliche oder räumliche Ausschnitte der Hamburger Stadtgeschichte ließen sich mit dem existierenden Rundgang kombinieren. Es müsste allerdings weiterhin auf die Möglichkeit geachtet werden, die VR-Erfahrung auch innerhalb einer kurzen Zeit abschließen zu können. Insofern würde sich die Auswahl verschiedener, in sich geschlossener und voneinander unabhängiger Rundgänge anbieten, sodass die Nutzenden nicht zu lange darauf warten müssen, eine bestimmte Station von Interesse zu erreichen. Die Flexibilität in der Erreichbarkeit aller Information müsste also gewahrt bleiben.

Auch der Gamification-Aspekt könnte ausgebaut werden. Um eine stärkere Immersion und – sofern gewünscht – emotionale Bindung zu gezeigten Zuständen oder Geschichten von Charakteren zu erreichen, können Aufgaben oder NPCs eingebaut werden, welche die Informationen stärker in eine übergeordnete Geschichte einbinden und somit die Motivation der Nutzenden erhöhen, der Geschichte zu folgen (Konzept und Anwendungsbeispiel in Rizvic et al. (2024)). Diese Maßnahme würde noch stärker dem Bedarf nach mehr Storytelling für (virtuelle) Museen entsprechen (Lacet et al., 2022). Dabei muss allerdings kontextabhängig abgewogen werden, inwiefern das Programm als 'Serious Game' wahrgenommen werden soll und inwieweit zur Informationsaufnahme auch eine gewisse emotionale Distanz zum Gezeigten notwendig bleibt.

Zur fokussierten Zielgruppenansprache wäre auch ein anpassbarer Grad an Interaktion und Umfang denkbar. So ließe sich beispielsweise ein Modus aktivieren, der das Einsammeln der Bildteile schwieriger macht oder ganz generell neue Interaktionen einführt, welche das Aktivieren der Stationen herausfordernder, aber somit auch erstrebenswerter macht (Wiegand & Stieglitz, 2014). Auf der anderen Seite ließe sich die Interaktion auf ein Minimum beschränken und die Tour auf eine passive Erfahrung reduzieren, sofern bestimmte Nutzende trotz aller Hilfsmittel mit der selbstständigen Erkundung überfordert sind oder aus anderen Gründen darauf verzichten wollen.

Für 'Hamburg: Neue Burg VR' ergäben sich als realistische nächste Schritte in dieser Richtung der Ausbau der Rundtour. In der Entwicklungsphase wurde dafür bereits ein Charakter erstellt und Animationstests durchgeführt (Abbildung 61). Dieser Tourguide sollte die Nutzenden begleiten und an allen Stationen mit animierter Mimik und Gestik der Story eine persönlichere Note geben und somit für ein höheres Präsenzgefühl sorgen. Aufgrund eines erhöhten Programmieraufwands bezüglich Animation, Positionierung und Navigation des Tourguides wurde jedoch in dieser Version darauf verzichtet.

Weitere konzipierte aber nicht umgesetzte Interaktionen beinhalteten Stationen mit weiteren Mini-Spielen wie das Werfen von Steinen gegen den Glockenturm der Kapelle oder das Helfen beim Hüten der Schafe, indem diese durch geschickte Teleportation in einen umzäunten Zielbereich getrieben werden müssen. Zur Thematik der historischen Genauigkeit wurde eine Erweiterung der Station 4 konzipiert, bei der das Innere der Neuen Burg nach Belieben verändert werden kann. Durch Verbindung der Position der Modellgebäude mit ihren jeweiligen Gegenständen in der großen virtuellen Neuen Burg im Maßstab 1:1 ließe es sich somit erreichen,

dass die Neue Burg auch um einen herum eine neue Form annimmt und ein Rundgang durch die Alternativen der Rekonstruktion ermöglicht wird. Das Abspeichern des neuen Arrangements (Position, Größe und Ausrichtung der Gebäude) in einer Datenbank und eine Funktionalität zum Anzeigen und Bearbeiten bereits abgespeicherter Entwürfe würde das Teilen von Ideen mit weiteren Nutzenden ermöglichen und somit die Basis dafür schaffen, die Anwendung als Diskussionsgrundlage über verschiedene Rekonstruktionshypothesen verwenden zu können. Damit würde 'Hamburg: Neue Burg VR' zu einem Kollaborationswerkzeug erweitert werden. Dem Teilen von Informationen über die eigene unmittelbare VR-Erfahrung hinaus und ggf. auch über mehrere Medien und Plattformen hinweg wird ein großes Potential zugeschrieben und ist weiterhin Gegenstand der Forschung (Haesler et al., 2016; Postert et al., 2022).



Abbildung 61. Animationstests mit gestikulierendem und redendem Burgvogt.

Multiplayer

Neben diesem indirekten Multiplayer-Konzept ist auch das gleichzeitige Betreten der virtuellen Welt durch verschiedene Nutzende und die direkte Begegnung innerhalb der Neuen Burg eine mögliche Erweiterung. Damit würde die Anwendung eine soziale Komponente erhalten und die Isolation – hervorgerufen durch die weitgehende Abschottung durch das HMD von der realen Außenwelt – würde aufgebrochen werden. Diese Isolation und somit erschwerte Kommunikation mit anderen über das Gesehene und Erlebte wird weiterhin als eine große Herausforderung angesehen, VR in den verschiedensten Einsatzbereichen zu etablieren (Loumos et al., 2018). Für einige Anwendungen in VMs, Partizipationsprojekten oder zur Visualisierung von archäologischen Befunden wurden bereits Konzepte vorgeschlagen und Prototypen entwickelt, bei denen durch die Repräsentation der Nutzenden mittels einfacher Avatare und Austausch der Bewegungsdaten zwischen den beteiligten Systemen ein gemeinsames Erleben der Anwendung möglich ist (Bekele et al., 2018; Kersten et al., 2017a, 2019; Postert et al., 2022). In der Unterhaltungsbranche sind Multiplayer-Anwendungen sehr beliebt, entweder als untergeordneter Teil der Spielerfahrung oder aber indem der soziale Aspekt den Hauptzweck der Anwendung ausmacht. Diese Anwendungen besitzen zwar ihre eigenen Pakete an Herausforderungen (Freeman et al., 2022; Reinhardt & Wolf, 2020), ermöglichen aber gegenüber einer Solo-Anwendung eine Erweiterung der Immersion durch Aufhebung der Isolation.

'Hamburg: Neue Burg VR' wäre für eine solche Erweiterung sehr geeignet, sei es für erweiterte Gamification-Konzepte oder aber zum gemeinsamen Erkunden der historischen Welt. Das Konzept müsste entsprechend angepasst werden, um andere Vorteile der Solovariante – wie

beispielsweise das Erkunden im eigenen Tempo oder die Möglichkeit, direkt zu den interessanten Stationen zu springen und andere auszulassen – zu kompensieren. Denkbar wäre beispielsweise die Umsetzung des Konzepts von Weissker & Froehlich (2021), bei dem eine virtuelle Führung in VR stattfindet und ein realer Tourguide mit virtueller Repräsentation die grobe Positionierung der VR-Avatare aller Besuchenden bestimmt. Diese Methode vermeidet die Notwendigkeit zur Orientierung und Interaktion und wäre ein weitgehend passives und einstiegfreundliches Angebot, das somit aber wiederum auf die Möglichkeit zur tiefergehenden, selbstbestimmten Interaktion verzichten würde.

Technisch

Mit der immer größer werdenden Palette an Endgeräten (VRcompare, 2023) stellt sich auch die Frage nach Kompatibilität zwischen der Software und den verschiedenen Hardware-Lösungen, welche mitunter unterschiedlichen Konzepten folgen. Zu diesem Zweck wurde von der Khronos Group der offene und lizenzfreie Standard 'OpenXR' entwickelt, welcher von einer wachsenden Anzahl von Entwicklungsumgebungen unterstützt wird. Anstatt – wie auch in dieser Anwendung geschehen – unterschiedliche Hardwaretypen in der Programmierung einzeln zu adressieren, um beispielsweise die Knöpfe auf den Handcontrollern bestimmten Aktionen in der Anwendung zuzuordnen, ließe sich mit diesem Standard eine Aufwärtskompatibilität sicherstellen, damit das Programm auch mit zukünftiger Hardware noch bedienbar bleibt. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass dank der Ausrichtung an aktuellen VR-Systemen 'Hamburg: Neue Burg VR' noch über viele Jahre mit gängigen VR-Handcontrollern benutzbar bleibt.

Aktuellere Versionen der Entwicklungsumgebung (inzwischen: Unreal Engine 5 (UE5)) unterstützen diesen Standard und somit ist zukünftig ein Update denkbar. Auf technischer Seite bietet die UE5 außerdem einige Neuerungen, welche u.a. die Licht- und Schattenberechnungen (Kapitel 11.5.6) und die Notwendigkeit zur polygonarmen Modellierung betreffen (Kapitel 11.5.1) und unter bestimmten Umständen einen vereinfachten Arbeitsablauf oder die Darstellung von mehr Details ohne Einbußen in der Performance ermöglichen.

Arbeitsablauf

Die in Kapitel 11.4 vorgestellte Herangehensweise wurde weitestgehend befolgt. Bei der Projektentwicklung stellte sich jedoch heraus, dass eine klarere Definition der begehbaren Bereiche, der durchzuführenden Interaktionen, der zu präsentierenden Informationen und ggf. der Story- und Gamification-Elemente vorteilhaft gewesen wäre. Dies hätte eine bessere Priorisierung ermöglicht und beispielsweise dafür gesorgt, dass mehr Ressourcen in die Elemente investiert worden wäre, welche im Endprodukt im besonderen Fokus stehen. Es ist das Wesen jeder neuen Programmentwicklung, dass neue Konzepte ausprobiert und ggf. entgegen der ursprünglichen Planung verworfen oder stark erweitert werden müssen. Somit lassen sich diese Anforderungen nur dann vollständig umsetzen, wenn lediglich Bekanntes wiederholt und keine neuen Herangehensweisen ausprobiert werden. Dennoch zeigt diese Erkenntnis die Notwendigkeit einer sorgfältigen Planung und vor allem einer guten Kommunikation aller Beteiligten, insbesondere vor dem Hintergrund, dass solche Anwendungen außerhalb der Forschung letztlich unter ökonomischen Gesichtspunkten entwickelt werden müssen.

13 Fazit & Ausblick

13.1 Fazit

Orientierung

Das zentrale Forschungsthema dieser Arbeit beschäftigte sich mit einem Fragenkatalog zur Orientierung und Nutzersteuerung in VR unter Berücksichtigung einer möglichst breit gefassten Zielgruppe und eines etwas enger definierten Einsatzzwecks an der Schnittstelle zwischen Wissenschaftskommunikation (hier am Beispiel von VMs) und der (Geo-)Datenvisualisierung (hier am Beispiel archäologischer oder historischer Befunde). Zentrale Fragen zur Orientierung lauteten:

- Wie kann ich mich in VR orientieren?
- Welche Hilfsmittel eignen sich zum Auffinden eines bestimmten Zieles?
- Welche Hilfsmittel eignen sich zur Bildung einer kognitiven Karte?
- Wie effizient sind diese Hilfsmittel im Vergleich untereinander?
- Wie lassen sich diese Hilfsmittel in der Praxis kombinieren und einsetzen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde die Orientierungsstudie konzipiert und durchgeführt. Zunächst wurden im Rahmen einer Recherche verschiedene existierende oder vorgeschlagene Orientierungslösungen gesammelt, sowohl im VR als auch im nicht-VR-Kontext. Aus diesen Hilfsmitteln wurden sechs Stück ausgewählt, welche an unterschiedlichen Stellen und mit unterschiedlichen Graden der dynamischen Anpassung die Testpersonen unterstützen. Die Teilnehmenden der Studie testeten anschließend jedes der Hilfsmittel sowie den Verzicht auf jegliche Hilfe in neutralen und somit vergleichbaren virtuellen Labyrinthwelten. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Hilfsmittel bzw. unterschiedliche Kategorien an Hilfen am besten performen. So ist eine Navigationslinie für die Wegfindung im Vergleich signifikant am besten, für die Bildung einer kognitiven Karte sind jedoch Repräsentationen der Umwelt auf 2D- oder 3D-Karten am hilfreichsten. Technische Limitationen der VR-Systeme und notwendige Abstraktionen in VR führen außerdem zu unterschiedlichen und von der Realität abweichenden Herangehensweisen, wie beispielsweise die Vermeidung von real durchgeführten Rotationen. Es konnte eine relative Einordnung der Performance der unterschiedlichen Hilfsmittel vorgenommen werden und mit der Beliebtheit verglichen werden. Das Hilfsmittel mit der besten Performance entsprach dabei nur teilweise dem mit der höchsten Beliebtheit.

Als Fazit lässt sich aus diesen Ergebnissen schließen, dass trotz aller Versuche, VR-Erlebnisse möglichst realitätsnah zu gestalten, es noch einige Unterschiede gibt, die Einfluss auf die Orientierungsfähigkeit haben und eine sehr kontextabhängige Auswahl der Hilfsmittel erfordern. Sofern Spezialfälle (Room-Scale, Schlauchlevel) außen vor gelassen werden, handelt es sich bei Nachbildungen realer Orte um offene Welten und somit sind auch – wie im realen Leben – Orientierungshilfen nötig. Diese Notwendigkeit wird zudem unterstrichen von der Diskrepanz zwischen der Selbsteinschätzung der Testpersonen zum eigenen Orientierungssinn und ihrer Fähigkeit, ohne Hilfe Ziele zu finden einerseits und dem messbaren, deutlichen Performanceabfall bei fehlender Hilfe andererseits. Mit dieser Studie konnte nun erstmalig eine relative Einordnung vorgenommen werden, anhand der die Nutzbarkeit von VR-Anwendungen vereinfacht werden kann.

Nutzersteuerung

Aus der Anforderung, die offene Lücke an VR-Anwendungen zu schließen, die zwischen sehr einfacher VR (rein passive Erfahrung, kein oder kaum Vorwissen erforderlich) und komplexer VR (umfangreiche Einarbeitung und ggf. Technologiekenntnis erforderlich) besteht, haben sich folgende Fragen zur Nutzersteuerung herauskristallisiert:

- Welche Unterstützung benötigen VR-Laien, um interaktive VR erleben zu können?
- Wie komplex darf die Simulation sein, um sowohl das Immersions-Potential von VR auszunutzen, aber gleichzeitig noch eine niedrige Einstiegshürde zu bieten?

Zunächst wurden im Rahmen der Segeberg-Studie grundlegende Erwartungen an VR-Anwendungen im musealen Kontext gesammelt. Mittels eines Fragebogens für diese Studie, durch die Beobachtung bei vorangegangenen Projekten sowie durch Befragung und Beobachtung während der Orientierungsstudie konnte das Verhalten der Nutzenden beobachtet und festgehalten werden. Dabei konnten verschiedene Verhaltensweisen beobachtet werden, die von totaler Überforderung über exakte Befolgung des vorgegebenen Verhaltens und schnellem Verständnis der Steuerung bis hin zur sehr selbstbewussten und selbstgewählten Erkundung der gezeigten VR-Welt unter Ignorierung von Anweisungen reichten (letzteres nicht in der Orientierungsstudie). Tutorials wurden durchweg gut aufgenommen und es konnte – auch und gerade bei VR-Laien – ein schneller Lerneffekt beobachtet werden. Auf der anderen Seite konnte bei Projekten wie 'Segeberg 1644' aber auch manchmal eine Überforderung und/oder ein Desinteresse beobachtet werden, sich auf die Technologie und damit verbundenen Neuerungen einzulassen.

Das Ziel, einer möglichst breiten Zielgruppe gerecht zu werden, ist also nur zu Teilen durch Senkung der Einstiegshürde oder Anpassungen von Steuerungskonzepten und Erklärungen im engeren Sinne zu erreichen. Das Wesen der VR – insbesondere die Immersion – ist und bleibt gewöhnungsbedürftig, insbesondere bei fehlender Vorerfahrung. Diese Vorerfahrung ist, wie im Rahmen aller Studien festgestellt wurde, bei der breiten Masse nach wie vor nur geringfügig vorhanden. Es wird daher empfohlen, eine klare Abgrenzung zu Anwendungen zu ziehen, welche ihren Nutzen nur bei Vorerfahrung oder der Bereitschaft zur umfangreichen Einarbeitung/Eingewöhnung (also v. a. bei VR-Anwendungen aus der Spieleindustrie) entfalten können und sich somit an eine klar umgrenzte Zielgruppe richten. Des Weiteren muss akzeptiert werden, dass VR als unterstützendes Medium zu Wissenschaftskommunikation eben genau das ist: unterstützend und nicht ersetzend. Sofern diese Punkte berücksichtigt werden, lassen die Ergebnisse jedoch darauf schließen, dass bei sorgfältiger Konzeption und Nutzerführung durchaus bei vielen die Bereitschaft dazu vorhanden ist, sich auf die VR-Technologie im Bildungsbereich einzulassen und sich dadurch sowie durch weitergehende Konzepte wie Gamification zur Auseinandersetzung mit der gezeigten Thematik motivieren lassen.

Hamburg: Neue Burg VR

Mit den Erkenntnissen aus den Studien wurden schließlich folgende Forschungsfragen angegangen:

- Wie kann eine konkrete Umsetzung eines VR-Programms aussehen, welches sowohl die Erkenntnisse zur Orientierung als auch zur Nutzersteuerung berücksichtigt?
- Für welche Anwendungsszenarien und Zielgruppen eignet es sich?
- Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich bei der Verwendung von 3D-Geodaten?

Dieser praktische Teil beinhaltete die Modellierung und Programmierung einer VR-Anwendung am Beispiel der Neuen Burg in Hamburg. Von den Orientierungshilfen wurden diejenigen, die am besten bei Wegfindung, kognitiver Karte und Beliebtheit abgeschnitten haben, überarbeitet und in das Programm implementiert. Auch einige Erkenntnisse aus den Fragen und Beobachtungen zur Nutzersteuerung sowie Angaben einiger Testpersonen bezüglich ihrer Erwartungen an VR wurden übernommen. Es wurden Anwendungsszenarios definiert und das VR-Programm entsprechend konzipiert und umgesetzt. Die finale Anwendung wurde schließlich online veröffentlicht.

'Hamburg: Neue Burg VR' kann als Vorschlag zur vertieften Nutzung des VR-Potentials für Bildungsanwendungen gelten. Das Programm geht deutlich über die sonst üblichen passiven Anwendungen oder 360°-Filme hinaus, ohne jedoch die Notwendigkeit einer intensiven Auseinandersetzung mit der Technologie oder der Steuerung zu erreichen, wie es bei einigen komplexeren Simulationen aus Trainingsanwendungen oder der Spieleindustrie der Fall ist. Auch für die Nutzungsdauer wurde mit ca. 30 Minuten ein Zeitrahmen angestrebt, der sich durchaus noch in einen Museumsbesuch integrieren lässt oder der sich – bei Gebrauch mit dem eigenen VR-Headset – als kurzer und kurzweiliger Ausflug in die Hamburger Stadtgeschichte versteht. Nur wenn die zeitliche und mentale Anfangsinvestition niedrig bleibt, haben solche Anwendungen das Potential, reibungsarm in einen Lernkontext integriert zu werden und die Nutzenden nicht zu überfordern. Der konkrete Nutzen im angestrebten Anwendungsszenario vor Ort muss noch evaluiert werden (siehe Kapitel 13.2). In Bezug auf die Verwendung von 3D-Geodaten lässt sich festhalten, dass diese Daten indirekt als Grundlage für einige Anwendungen (wie auch diese) unerlässlich sind, jedoch für die direkte Verwendung von Punktwolken oder 3D-Stadtmodellen noch (teilweise umfangreicher) Aufbereitungsbedarf besteht. Sofern Datenmenge, -formate, Ausschnitt und Qualität individuell und ggf. sogar automatisiert anpassbar werden, ließen sich diese Daten direkter verwenden und der gesamte Arbeitsablauf zum Erstellen von Echtzeitanwendungen basierend auf 3D-Geodaten massiv beschleunigen.

13.2 Ausblick

Konkrete Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten sowie spezifische offene Forschungsfragen wurden bereits in den Diskussionskapiteln zur Segeberg-Studie (Kapitel 9.3), zur Orientierungsstudie (Kapitel 10.3) und zum VR-Projekt (Kapitel 12.3.6) benannt und diskutiert. Darüber hinaus besteht weiterer Forschungsbedarf zur allgemeinen Einordnung und Bewertung der Studienergebnisse und v. a. der entwickelten VR-Anwendung im Kontext mit anderen vergleichbaren Anwendungen mit ähnlicher Zielgruppe und Einsatzzweck. In ihrem Segment der 'Lückenfüller' zwischen passiver und aktiver VR gibt es inzwischen zwar einige Ideen, Vorschläge und Prototypen, aber noch wenig etablierte Beispiele. Um die Akzeptanz einer solchen VR-Anwendung zu evaluieren, ließe sich nach Installation von VR-Systemen im Museum mithilfe von Fragebögen herausfinden, ob und inwieweit das Museumspublikum mit der Anwendung klarkommt, welche Elemente besonders hilfreich und motivierend oder aber störend sind und ob die Anwendung an sich als Teil der Ausstellung akzeptiert wird. Dazu böte sich auch ein Vergleich zwischen dieser frei begehbaren und interaktiven Anwendung und einer VR-Anwendung mit selber Thematik in der üblichen, passiven Form an. Von besonderem Interesse für Museen bzw. Bildungseinrichtungen allgemein dürfte letztlich die Frage sein, ob der Mehraufwand, der mit der Entwicklung einer interaktiven VR-Anwendung einhergeht, gerechtfertigt ist. Dabei ist auch eine

Differenzierung nach Zielgruppe und Anwendungskontext nötig, denn selbst bei Ermöglichung einer intuitiven Bedienung wird es Gruppen geben, die ungeachtet der Möglichkeiten dennoch ein passives Erlebnis bevorzugen.

Auf der technischen Seite ist zu erwarten, dass sich der Trend der letzten Jahre fortsetzt (siehe Kapitel 3.2) und in kurzen Abständen neue Generationen an VR-Systemen veröffentlicht werden, die inkrementell einzelne Aspekte wie FoV, Auflösung, PPD, Rechenleistung und Latenzzeiten verbessern. Es wird erwartet, dass der XR-Markt weiterhin stark wächst (Alsop, 2023; Esser, 2023; Fortune Business Insights, 2023; Grand View Research, 2023). Von besonderem medialem Interesse wurde beispielsweise die 2024 veröffentlichte Apple Vision Pro begleitet, welche eine Kombination aus VR und AR bildet. In der Medizin wird diesem HMD ein großes Potential zugeschrieben (z. B. Waisberg et al., 2024), für allgemeine Anwendungen fielen die Kritiken jedoch gemischt aus, was mit den weiterhin bestehenden technischen Limitationen und insbesondere hohen Anschaffungskosten begründet wird (Velazco, 2024). Dieses Beispiel unterstreicht den Hype um die Technologie, der auch beim Begriff des 'Metaversums' zum Ausdruck kommt und sowohl von Unternehmen aus dem Bereich der XR-Entwicklung als auch kulturell von SF-Medien (vgl. Kapitel 3.2) weiter befeuert wird. Dieser Hype spiegelt die Erwartungen der Gesellschaft an eine Zukunft wider, in der XR eine weit dominantere Rolle einnimmt, als es heute der Fall ist oder mit der aktuellen Technologie möglich wäre. Mit der verfügbaren Hard- und Software stellt XR aber bereits eine etablierte (Nischen-) Technologie dar, welche für spezielle Anwendungen zum Teil experimentell, zum Teil im regulären Einsatz verwendet wird (siehe Beispiele in Kapitel 3.4). Dieser Nischencharakter wird wohl auf absehbare Zeit dafür sorgen, dass trotz der Erschließung neuer Märkte die Vorerfahrung mit VR gesamtgesellschaftlich gesehen weiterhin (noch) niedrig bleibt. Für das Erreichen einer breiten Zielgruppe bleibt also die Abschaffung von Einstiegshürden die größte Herausforderung.

Verzeichnisse

Literatur

- Al Zayer, M., MacNeilage, P., & Folmer, E. (2020). Virtual Locomotion: A Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(6), 2315–2334. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2887379>
- Alalwan, N., Cheng, L., Al-Samarraie, H., Yousef, R., Ibrahim Alzahrani, A., & Sarsam, S. M. (2020). Challenges and Prospects of Virtual Reality and Augmented Reality Utilization among Primary School Teachers: A Developing Country Perspective. *Studies in Educational Evaluation*, 66, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100876>
- Aliaga, D. G., Rosen, P. A., & Bekins, D. R. (2007). Style Grammars for Interactive Visualization of Architecture. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(4), 786–797. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2007.1024>
- Almeida, L. G. G., Vasconcelos, N. V. de, Winkler, I., & Catapan, M. F. (2023). Innovating Industrial Training with Immersive Metaverses: A Method for Developing Cross-Platform Virtual Reality Environments. *Applied Sciences*, 13(15), 8915. <https://doi.org/10.3390/app13158915>
- Alsop, T. (2023). *Virtual reality (VR)—Statistics & facts*. Statista. <https://www.statista.com/topics/2532/virtual-reality-vr/#topicOverview> (abgerufen am 21.09.2023)
- Anthes, C., Garcia-Hernandez, R. J., Wiedemann, M., & Kranzlmüller, D. (2016). State of the art of virtual reality technology. *2016 IEEE Aerospace Conference*, 1–19. <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500674>
- Arnold, J. D. M., & Lafreniere, D. (2018). Creating a longitudinal, data-driven 3D model of change over time in a postindustrial landscape using GIS and CityEngine. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8(4), 434–447. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-08-2017-0055>
- Autodesk. (2023). Autodesk Produktpalette. *Autodesk Website*. <https://www.autodesk.de/products> (abgerufen am 23.10.2023)
- Avila, L., & Bailey, M. (2014). Virtual Reality for the Masses. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 34(5), 103–104. <https://doi.org/10.1109/MCG.2014.103>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Ballarin, M., Balletti, C., & Vernier, P. (2018). Replicas in Cultural Heritage: 3D Printing and the Museum Experience. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII–2, 55–62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018>
- Barceló, J. A., Forte, M., & Sanders, D. H. (Hrsg.). (2000). *Virtual Reality in Archaeology*. University of Michigan Press. <https://doi.org/10.30861/9781841710471>
- Barratt, R. P. (2021). Speculating the Past: 3D Reconstruction in Archaeology. In E. M. Champion (Hrsg.), *Virtual Heritage: A Concise Guide* (S. 13–23). Ubiquity Press. <https://doi.org/10.5334/bck.c>

- Basheer, S., Farooq, S., Hassan, V., Malik, Y. M., & Reshi, M. A. (2023). Augmented Reality and Virtual Reality in Cultural Heritage Tourism Enhancing Visitor Experiences: In Y. S. Rawal, R. Sinha, S. K. Mukherjee, & D. Batabyal (Hrsg.), *Advances in Hospitality, Tourism, and the Services Industry* (S. 13–34). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-9957-3.ch002>
- Basu, A. (2019). *A brief chronology of Virtual Reality*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1911.09605>
- Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(2), 1–36. <https://doi.org/10.1145/3145534>
- Berger, L., & Wolf, K. (2018). WIM: Fast Locomotion in Virtual Reality with Spatial Orientation Gain & without Motion Sickness. *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, 19–24. <https://doi.org/10.1145/3282894.3282932>
- Bestgen, A.-K., Edler, D., Müller, C., Schulze, P., Dickmann, F., & Kuchinke, L. (2017). Where Is It (in the Map)? Recall and Recognition of Spatial Information. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 52(1), 80–97. <https://doi.org/10.3138/cart.52.1.3636>
- Bezmalinovic, T. (2021). Virtual Reality: Spielhallen und Arcades in Deutschland, Österreich und der Schweiz. *Mixed - News zu VR, AR und KI*. <https://mixed.de/virtual-reality-spielhallen-und-arcades-in-deutschland-oesterreich-schweiz/> (abgerufen am 22.09.2023)
- Bitelli, G., Dellapasqua, M., Girelli, V. A., Sbaraglia, S., & Tinia, M. A. (2017). Historical Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the 3D Virtual Reconstruction of Destroyed Structures: A Case Study in Italy. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5/W1*, 113–119. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-113-2017>
- Boffi, P., Clerici, M., Gallace, A., & Lanzi, P. L. (2023). An educational experience in ancient Rome to evaluate the impact of virtual reality on human learning processes. *Computers & Education: X Reality*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2023.100014>
- Boissonneault, J., Lamontagne, A., & Thomas, V. (2019). Building a 3D Virtual Forest. *GIM INTERNATIONAL-THE WORLDWIDE MAGAZINE FOR GEOMATICS*, 3(33), 19–21.
- Bonali, F. L., Russo, E., Vitello, F., Antoniou, V., Marchese, F., Fallati, L., Bracchi, V., Corti, N., Savini, A., Whitworth, M., Drymoni, K., Mariotto, F. P., Nomikou, P., Sciacca, E., Bressan, S., Falsaperla, S., Reitano, D., van Wyk de Vries, B., Krokos, M., ... Tibaldi, A. (2021). How Academics and the Public Experienced Immersive Virtual Reality for Geo-Education. *Geosciences*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010009>
- Bonfadelli, H., Fähnrich, B., Lühje, C., Milde, J., Rhomberg, M., & Schäfer, M. S. (2017). Das Forschungsfeld Wissenschaftskommunikation. In H. Bonfadelli, B. Fähnrich, C. Lühje, J. Milde, M. Rhomberg, & M. S. Schäfer (Hrsg.), *Forschungsfeld Wissenschaftskommunikation* (S. 3–14). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-12898-2_1
- Braun, G., & Hogenberg, F. (1572). *Civitates orbis terrarum* (1.–6. Aufl.). Coloniae Agrippinae: apud Petrum à Brachel, sumptibus auctorum.
- Brinkman, W.-P., Hoekstra, A. R. D., & van Egmond, R. (2015). The effect of 3D audio and other audio techniques on virtual reality experience. In *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine 2015* (S. 44–48). IOS Press.
- Broderick, D. (2009). *The Judas mandala* (First edition). Fantastic Books.

- Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189(3).
- Bryson, S. (1993). Call for Participation. *IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2023). *Digitalstrategie—Gemeinsam digitale Werte schöpfen*. https://digitalstrategie-deutschland.de/static/fcf23bbf9736d543d02b79ccad34b729/Digitalstrategie_Aktualisierung_25.04.2023.pdf (abgerufen am 18.09.2023)
- Bunnenberg, C. (2020). Mittendrin im historischen Geschehen? Immersive digitale Medien (Augmented Reality, Virtual Reality, 360°-Film) in der Geschichtskultur und Perspektiven für den Geschichtsunterricht. *Geschichte für heute*, 13(4), 45–59.
- Burgess, S. (1998). A Brief (and Ancient) History of GIMP [GIMP Website]. *About GIMP*. https://www.gimp.org/about/ancient_history.html (abgerufen am 23.10.2023)
- Buyukdemircioglu, M., & Kocaman, S. (2022). Development of a Smart City Concept in Virtual Reality Environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5-2022, 51–58. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2022-51-2022>
- Büyüksalih, G., Kan, T., Özkan, G. E., Meriç, M., Isın, L., & Kersten, T. P. (2020). Preserving the Knowledge of the Past Through Virtual Visits: From 3D Laser Scanning to Virtual Reality Visualisation at the Istanbul Çatalca İnceğiz Caves. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 133–146. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00091-3>
- Catmull, E. (1975). Computer display of curved surfaces. *Proceedings of the Conference on Computer Graphics, Pattern Recognition and Data Structures*, 11–17.
- Champion, E. M. (Hrsg.). (2021). *Virtual Heritage: A Concise Guide*. Ubiquity Press. <https://doi.org/10.5334/bck>
- Chattha, U. A., Janjua, U. I., Anwar, F., Madni, T. M., Cheema, M. F., & Janjua, S. I. (2020). Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*, 8, 130486–130499. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076>
- Chizhova, M., Popovas, D., Gorkovchuk, D., Gorkovchuk, J., Hess, M., & Luhmann, T. (2020). Virtual Terrestrial Laser Scanner Simulator for Digitalisation of Teaching Environment: Concept and First Results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5-2020, 91–97. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-91-2020>
- Chopra, A., Town, L., & Pichereau, C. (2013). *Introduction to Google Sketchup* (2. ed). Wiley.
- Clemenson, G. D., Wang, L., Mao, Z., Stark, S. M., & Stark, C. E. L. (2020). Exploring the Spatial Relationships Between Real and Virtual Experiences: What Transfers and What Doesn't. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 572122. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.572122>
- Cline, E. (2011). *Ready player one. 1: Ready player* (1st ed). Crown Publishers.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155>
- Conde, D., Balado, J., Soilán, M., Martínez, J., & Arias, P. (2023). LiDAR Data Processing for Digitization of the Castro of Santa Trega and Integration in Unreal Engine 5. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2271877>
- Conroy, R. (2001). *Spatial navigation in immersive virtual environments*. University of London, University College London.

- Coomer, G., & Mitchell, J. (2020). *Half-Life: Alyx Valve Interview* (J. Feltham) [Blog-Post]. <https://www.uploadvr.com/valve-interview-half-life-alyx/> (abgerufen am 22.09.2023)
- Cruz-Neira, C. (1993). Virtual reality overview. *Siggraph*, 93(23).
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64–72. <https://doi.org/10.1145/129888.129892>
- Cummings, J. J., & Bailenson, J. N. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2), 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- Dale, S. (2014). Gamification: Making work fun, or making fun of work? *Business Information Review*, 31(2), 82–90. <https://doi.org/10.1177/0266382114538350>
- Daniels, G., van Tulleken, J., Anning, K., Rogers, D., Blitz, J., Reid, D., Rees, D., & Tsangari, A. R. (Regisseure). (2020). *Upload* [Science-Fiction; Serie, 3 Staffeln, 25 Folgen]. 3 Arts Entertainment, Reunion Pacific Entertainment, Baral-Waley Productions, Amazon Studios.
- Darken, R. P., & Sibert, J. L. (1993). A toolset for navigation in virtual environments. *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 157–165. <https://doi.org/10.1145/168642.168658>
- Davies, J. E., & Greenwood, H. (2004). Scholarly communication trends - voices from the vortex: A summary of specialist opinion. *Learned Publishing*, 17(2), 157–167. <https://doi.org/10.1087/095315104322958544>
- De Leeuw, D., De Maeyer, P., & De Cock, L. (2020). A Gamification-Based Approach on Indoor Wayfinding Research. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 423. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070423>
- Deggim, S., & Kersten, T. P. (2022). Zur Erstellung von historischen Welten in Virtual Reality—Ein Erfahrungsbericht. In T. Luhmann & C. Schumacher (Hrsg.), *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik—Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2022* (S. 68–78). Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach.
- Deggim, S., & Kersten, T. P. (2023). DVocean Digital. *Hydrographische Nachrichten*, 126, 24–30. <https://doi.org/10.23784/HN126-04>
- Deggim, S., Kersten, T. P., Lindstaedt, M., & Hinrichsen, N. (2017a). The Return of the Siegesburg—3D-Reconstruction of a Disappeared and Forgotten Monument. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 209–215. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-209-2017>
- Deggim, S., Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., & Hinrichsen, N. (2017b). Segeberg 1600—Reconstructing a Historic Town for Virtual Reality Visualisation as an Immersive Experience. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W8, 87–94. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-87-2017>
- Deggim, S., Tschirschwitz, F., & Kersten, T. P. (2017c). Entwicklung eines virtuellen Museums für ein historisches Gebäude am Beispiel des Alt-Segeberger Bürgerhauses. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, 26(Tagungsband der 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Würzburg), 454–463.
- Deterding, S., Björk, S. L., Nacke, L. E., Dixon, D., & Lawley, E. (2013). Designing gamification: Creating gameful and playful experiences. *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3263–3266. <https://doi.org/10.1145/2468356.2479662>

- Di Luca, M., Seifi, H., Egan, S., & Gonzalez-Franco, M. (2021). Locomotion Vault: The Extra Mile in Analyzing VR Locomotion Techniques. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. Article 128). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445319>
- Dong, W., Qin, T., Yang, T., Liao, H., Liu, B., Meng, L., & Liu, Y. (2022). Wayfinding Behavior and Spatial Knowledge Acquisition: Are They the Same in Virtual Reality and in Real-World Environments? *Annals of the American Association of Geographers*, *112*(1), 226–246. <https://doi.org/10.1080/24694452.2021.1894088>
- Dong, W., Yang, T., Liao, H., & Meng, L. (2020). How does map use differ in virtual reality and desktop-based environments? *International Journal of Digital Earth*, *13*(12), 1484–1503. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1731617>
- Dooley, K. (2017). Storytelling with virtual reality in 360-degrees: A new screen grammar. *Studies in Australasian Cinema*, *11*(3), 161–171. <https://doi.org/10.1080/17503175.2017.1387357>
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (Hrsg.). (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>
- Edler, D. (2019). *Landschaftstransformation im Ruhrgebiet – Potenziale von Virtual Reality (VR) zur immersiven und multimedialen 3D-Visualisierung* [Konferenzbeitrag]. Kommission Virtual Reality / Augmented Reality, Intergeo 2019, Stuttgart.
- Edler, D. (2022). Von der Waldfunktionskarte zum interaktiven und animierten 3D-Modell in immersiver Virtual Reality (VR)? Aktuelle Möglichkeiten zur Visualisierung von Wäldern mit offenen Geodaten. In K. Berr & C. Jenal (Hrsg.), *Wald in der Vielfalt möglicher Perspektiven* (S. 425–439). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33705-6_20
- Edler, D., & Dickmann, F. (2016). Interaktive Multimediakartographie in frühen Videospieldwelten—Das Beispiel „Super Mario World“. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, *66*(2), 51–58. <https://doi.org/10.1007/BF03545205>
- Edler, D., Keil, J., & Dickmann, F. (2018). Varianten interaktiver Karten in Video- und Computerspielen—Eine Übersicht. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, *68*(2), 57–65. <https://doi.org/10.1007/BF03544525>
- Edler, D., Keil, J., WiedenlÜbbert, T., Sossna, M., Kühne, O., & Dickmann, F. (2019). Immersive VR Experience of Redeveloped Post-industrial Sites: The Example of “Zeche Holland” in Bochum-Wattenscheid. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, *69*(4), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s42489-019-00030-2>
- El Jamiy, F., & Marsh, R. (2019). Survey on depth perception in head mounted displays: Distance estimation in virtual reality, augmented reality, and mixed reality. *IET Image Processing*, *13*(5), 707–712. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.5920>
- Erl, J. (2022). Die Geschichte der Virtual Reality. *Mixed - News zu VR, AR und KI*. https://mixed.de/virtual-reality-geschichte/?amp=1#VR-Hype_in_den_90ern_VRArcades_und_legendaere_Konsolenflops (abgerufen am 14.09.2023)
- Esser, R. (2023). Technology Sector Briefing: Neue Perspektiven für Virtual Reality? *Deloitte Sector Briefings*. <https://www2.deloitte.com/de/de/blog/sector-briefings/2023/technology-sector-briefing-neue-perspektiven-fuer-virtual-reality.html> (abgerufen am 21.09.2023)

- Evans, C. (2019). Il divino: Michelangelo's Sistine ceiling in VR. *ACM SIGGRAPH 2019 Virtual, Augmented, and Mixed Reality*, 1–1. <https://doi.org/10.1145/3306449.3328817>
- Fanani, A. Z., & Syarif, A. M. (2023). Historical Building 3D Reconstruction for a Virtual Reality-based Documentation. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(9), 811–818.
- Fangi, G., & Wahbeh, W. (2013). The destroyed Minaret of the Umayyad Mosque of Aleppo, the Survey of the Original State. *European Scientific Journal*, 4, 403–409.
- Flavell, L. (2010). UV Mapping. In L. Flavell, *Beginning Blender* (S. 97–122). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3127-1_5
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2012). Reviving Ancient Rome: Virtual Reality at the Service of Cultural Heritage. In M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, & R. Caffo (Hrsg.), *Progress in Cultural Heritage Preservation* (Bd. 7616, S. 159–169). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_16
- Fortune Business Insights. (2023). *Virtual Reality Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Component (Hardware, Software, and Content), By Device Type (Head Mounted Display (HMD), VR Simulator, VR Glasses, Treadmills & Haptic Gloves, and Others), By Industry (Gaming, Entertainment, Automotive, Retail, Healthcare, Education, Aerospace & Defense, Manufacturing, and Others), and Regional Forecast, 2023-2030*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/virtual-reality-market-101378> (abgerufen am 21.09.2023)
- Freeman, G., Zamanifard, S., Maloney, D., & Acena, D. (2022). Disturbing the Peace: Experiencing and Mitigating Emerging Harassment in Social Virtual Reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 6(CSCW1), 1–30. <https://doi.org/10.1145/3512932>
- Freina, L., & Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives. *The international scientific conference elearning and software for education*, 1(133).
- Frommel, J., Fahlbusch, K., Brich, J., & Weber, M. (2017). The Effects of Context-Sensitive Tutorials in Virtual Reality Games. *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 367–375. <https://doi.org/10.1145/3116595.3116610>
- Fuchs, P. (2017). *Virtual reality headsets: A theoretical and pragmatic approach*. CRC Press/Balkema.
- Furness, T. A. (1986). The Super Cockpit and its Human Factors Challenges. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 30(1), 48–52. <https://doi.org/10.1177/154193128603000112>
- Fussell, S. G., Derby, J. L., Smith, J. K., Shelstad, W. J., Benedict, J. D., Chaparro, B. S., Thomas, R., & Dattel, A. R. (2019). Usability Testing of a Virtual Reality Tutorial. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 2303–2307. <https://doi.org/10.1177/1071181319631494>
- Gaylor, G., & Joudrey, J. (2017). *VRChat* [Windows]. VRChat Inc.
- Gibson, W. (1984). *Neuromancer*. Ace Books.
- Gigante, M. A. (1993). Virtual Reality: Definitions, History and Applications. In *Virtual Reality Systems* (S. 3–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3>
- Gore, A. (1998). The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century. *Australian Surveyor*, 43(2), 89–91. <https://doi.org/10.1080/00050348.1998.10558728>

- Gourlay, M. J., & Held, R. T. (2017). Head-Mounted-Display Tracking for Augmented and Virtual Reality. *Information Display*, 33(1), 6–10. <https://doi.org/10.1002/j.2637-496X.2017.tb00962.x>
- Grand View Research. (2023). *Virtual Reality (VR) Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Semi & Fully Immersive, Non-immersive), By Device (HMD, GTD), By Component (Hardware, Software), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2023—2030*. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-reality-vr-market> (abgerufen am 21.09.2023)
- Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Contributions of Proprioception to Navigation in Virtual Environments. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40(3), 489–497. <https://doi.org/10.1518/001872098779591296>
- Gretzschel, M., Kummereincke, S., & Krüger, K. (2013). *Hamburger Zeitreise: 12 Jahrhunderte Stadtgeschichte* (1. Aufl.). Hamburger Abendblatt Ed.
- Grosjean, G., & Egli, H.-R. (1996). *Geschichte der Kartographie* (3., neu bearb. Aufl.). Arbeitsgemeinschaft Geographica Bernensia.
- Grossner, K. E., Goodchild, M. F., & Clarke, K. C. (2008). Defining a Digital Earth System. *Transactions in GIS*, 12(1), 145–160. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2008.01090.x>
- Grün, A., Remondino, F., & Zhang, L. (2002). *Reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan* [Application/pdf, Online-Datei]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004655538>
- Haesler, S., Obernesser, K., Raupp, T., Jahnke, C., Stapf, J., Bräker, J., Lubos, P., Bruder, G., & Steinicke, F. (2016). *Edutainment & Engagement at Exhibitions: A Case Study of Gamification in the Historic Hammaburg Model*. <https://doi.org/10.18420/MUC2016-MCI-0143>
- Hagemann-Tietjen, D. (1985). *Hamburg, ein Stadtgrundriß im Spätmittelalter. Grundrißanalyse eines nicht mehr bestehenden Stadtgefüges*. [Technische Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Architektur]. <https://orlis.difu.de/items/aa22fc84-e1f1-4de0-bf55-7faf94b11813>
- Halik, Ł., & Kent, A. J. (2021). Measuring user preferences and behaviour in a topographic immersive virtual environment (TopoIVE) of 2D and 3D urban topographic data. *International Journal of Digital Earth*, 14(12), 1835–1867. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1984595>
- Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does Gamification Work? -- A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 3025–3034. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>
- Harrower, M. (2007). The Cognitive Limits of Animated Maps. In *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* (Bd. 42, Nummer 4, S. 349–357).
- Heilig, M. L. (1960). *Stereoscopic Television Apparatus For Individual Use* (United States Patent Office Patent 2955156).
- Heok, T. K., & Daman, D. (2004). A review on level of detail. *Proceedings. International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, 2004. CGIV 2004.*, 70–75. <https://doi.org/10.1109/CGIV.2004.1323963>
- Hinrichsen, N. (Hrsg.). (2020). *Segeberg 1644—Schicksalsjahr einer Stadt | Das Ende der Siegesburg in Virtual Reality* (1. Auflage). Förderverein Kreis- und Stadtmuseum Segeberg e.V.

- Horbiński, T., & Zagata, K. (2022). View of Cartography in Video Games: Literature Review and Examples of Specific Solutions. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 72(2), 117–128. <https://doi.org/10.1007/s42489-022-00104-8>
- Hruby, F., Ressler, R., & De La Borbolla Del Valle, G. (2019). Geovisualization with immersive virtual environments in theory and practice. *International Journal of Digital Earth*, 12(2), 123–136. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1501106>
- Hruby, F., Sánchez, L. F. Á., Ressler, R., & Escobar-Briones, E. G. (2020). An Empirical Study on Spatial Presence in Immersive Geo-Environments. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 155–163. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00107-y>
- HTC Corporation. (2023). Vive VR/AR/XR. *Produktbeschreibung der Vive-VR-Palette*. <https://www.vive.com/de/product/> (abgerufen am 14.09.2023)
- Huang, R. (2023, März 19). TikTok's Chinese Parent Has Another Wildly Popular App in the U.S. *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/tiktoks-chinese-parent-has-another-wildly-popular-app-in-the-u-s-e14c41fc>
- Ilavský, J., & Hrinčár, V. (2018). *Beat Saber* [Windows, PlayStation VR(2), Oculus Quest (2)]. Beat Games.
- Illingworth, S. (2020). Creative communication – using poetry and games to generate dialogue between scientists and nonscientists. *FEBS Letters*, 594(15), 2333–2338. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.13891>
- Illingworth, S., & Wake, P. (2019). Developing science tabletop games: 'Catan'® and global warming. *Journal of Science Communication*, 18(04), A04. <https://doi.org/10.22323/2.18040204>
- Ishikawa, T., & Montello, D. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places☆. *Cognitive Psychology*, 52(2), 93–129. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.08.003>
- Jamei, E., Mortimer, M., Seyedmahmoudian, M., Horan, B., & Stojcevski, A. (2017). Investigating the Role of Virtual Reality in Planning for Sustainable Smart Cities. *Sustainability*, 9(11), 2006. <https://doi.org/10.3390/su9112006>
- Jerald, J. (2016). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Association for computing machinery Morgan & Claypool publishers.
- Jones, G., & Christal, M. (2002). The future of virtual museums: On-line, immersive, 3d environments. *Created Realities Group*, 4, 1–12.
- Kao, D., Magana, A. J., & Mousas, C. (2021). Evaluating Tutorial-Based Instructions for Controllers in Virtual Reality Games. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CHI PLAY), 1–28. <https://doi.org/10.1145/3474661>
- Keil, J., Edler, D., Dickmann, F., & Kuchinke, L. (2022). Uncertainties in Spatial Orientation: Critical Limits for Landmark Inaccuracies in Maps in the Context of Map Matching. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 72(3), 243–254. <https://doi.org/10.1007/s42489-022-00105-7>
- Keil, J., Edler, D., O'Meara, D., Korte, A., & Dickmann, F. (2021a). Effects of Virtual Reality Locomotion Techniques on Distance Estimations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 150. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030150>

- Keil, J., Edler, D., Schmitt, T., & Dickmann, F. (2021b). Creating Immersive Virtual Environments Based on Open Geospatial Data and Game Engines. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 71(1), 53–65. <https://doi.org/10.1007/s42489-020-00069-6>
- Keil, J., Weißmann, M., Korte, A., Edler, D., & Dickmann, F. (2023). Measuring Physiological Responses to Visualizations of Urban Planning Scenarios in Immersive Virtual Reality. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 73(2), 117–126. <https://doi.org/10.1007/s42489-023-00137-7>
- Kerres, M., Bormann, M., & Vervenne, M. (2009). Didaktische Konzeption von Serious Games: Zur Verknüpfung von Spiel- und Lernangeboten. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung, Occasional Papers*, 1–16. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2009.08.25.X>
- Kersten, T. P., Lindstaedt, M., & Vogt, B. (2009). Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai. *PFG-Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (1)*, 79-90.
- Kersten, T. P., Büyüksalih, G., Tschirschwitz, F., Kan, T., Deggim, S., Kaya, Y., & Baskaraca, A. P. (2017a). The Selimiye Mosque of Edirne, Turkey—An Immersive and Interactive Virtual reality Experience using HTC Vive. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-5/W1, 403–409. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-403-2017>
- Kersten, T. P., Deggim, S., Tschirschwitz, F., Lindstaedt, M., & Hinrichsen, N. (2018a). Das Alt-Segeberger Bürgerhaus – Das Museum und seine Baugeschichte in der Virtuellen Realität. In *Denkmal! - Zeitschrift für Denkmalpflege in Schleswig-Holstein* (S. 123–130). Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein, Boyens Buchverlag.
- Kersten, T. P., Deggim, S., Tschirschwitz, F., Lindstaedt, M., & Hinrichsen, N. (2018b). Segeberg 1600—Eine Stadtrekonstruktion in Virtual Reality. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 68(4), 183–191. <https://doi.org/10.1007/BF03545360>
- Kersten, T. P., Drenkhan, D., & Deggim, S. (2021). Virtual Reality Application of the Fortress Al Zubarah in Qatar Including Performance Analysis of Real-Time Visualisation. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 71(4), 241–251. <https://doi.org/10.1007/s42489-021-00092-1>
- Kersten, T. P., Hinrichsen, N., Lindstaedt, M., Weber, C., Schreyer, K., & Tschirschwitz, F. (2014). Architectural Historical 4D Documentation of the Old-Segeberg Town House by Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanning and Historical Analysis. *Progress in Cultural Heritage. Documentation, Preservation, and Protection*. 5th International Conference, EuroMed 2014, Limassol, Cyprus.
- Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2012). Virtual Architectural 3D Model of the Imperial Cathedral (Kaiserdom) of Königslutter, Germany through Terrestrial Laser Scanning. In M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, & R. Caffo (Hrsg.), *Progress in Cultural Heritage Preservation* (Bd. 7616, S. 201–210). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_20
- Kersten, T. P., Lindstaedt, M., Deggim, S., & Tschirschwitz, F. (2019). Das historische Holzmodell des Salomonischen Tempels in Virtual Reality. In T. Luhmann & C. Schumacher (Hrsg.), *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik—Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019* (S. 301–313). Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach.

- Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., & Deggim, S. (2017b). Development of a Virtual Museum including a 4D Presentation of Building History in Virtual Reality. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, 361–367. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017>
- Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., Deggim, S., & Lindstaedt, M. (2018c). Step into Virtual Reality—Visiting Past Monuments in Video Sequences and as Immersive Experiences. In *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling* (S. 192–219). MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-685-1>
- Kharroubi, A., Hajji, R., Billen, R., & Poux, F. (2019). Classification and Integration of Massive 3D Points Clouds in a Virtual Reality (VR) Environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 165–171. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-165-2019>
- Kolb, D., Kurtz, W., Weismüller, J., von Ramm, A., & Kranzlmüller, D. (2019). Using virtual reality to visualize extreme rainfall events derived from climate simulations. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
- Korkut, E. H., & Surer, E. (2022). *Visualization in virtual reality: A systematic review*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2203.07616>
- Korkut, E. H., & Surer, E. (2023). *Developing a Framework for Heterotopias as Discursive Playgrounds: A Comparative Analysis of Non-Immersive and Immersive Technologies*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2301.08565>
- Korte, A., Keil, J., Edler, D., & Dickmann, F. (2023). The Impact of the Landmark Attraction Effect and Central Tendency Bias on Spatial Memory Distortions. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 73(3), 211–224. <https://doi.org/10.1007/s42489-023-00143-9>
- Kreimeier, J., Hammer, S., Friedmann, D., Karg, P., Bühner, C., Bankel, L., & Götzelmann, T. (2019). Evaluation of different types of haptic feedback influencing the task-based presence and performance in virtual reality. *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 289–298. <https://doi.org/10.1145/3316782.3321536>
- Kummereincke, S. (2020). Als Hamburg sich neu erfand. In *Hamburg Historisch Nr. 3* (S. 14–33). FUNKE Medien Hamburg.
- Kummereincke, S. (2022). *Geschichte Hamburgs: Von der Hammaburg zur HafenCity*. Ellert & Richter Verlag.
- Kutzner, T., & Kolbe, T. H. (2018). CityGML 3.0: Sneak Preview. In T. P. Kersten, E. Gülch, J. Schiewe, T. H. Kolbe, & U. Stilla (Hrsg.), *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.* (Bd. 27, S. 835–839). Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.
- Lacet, D., Zeller, M. V., Martins, P., & Morgado, L. (2022). Digital Storytelling approaches in Virtual Museums: Umbrella review of systematic reviews. *Journal of Digital Media & Interaction*, 23-44 Páginas. <https://doi.org/10.34624/JDMI.V5I13.29215>
- Lake, A., Marshall, C., Harris, M., & Blackstein, M. (2000). Stylized rendering techniques for scalable real-time 3D animation. *Proceedings of the 1st International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, 13–20. <https://doi.org/10.1145/340916.340918>
- Lang, M., Kluge, P., Kruse, F., & Rosenkranz, V. (2022). Advent City: Die Rekonstruktion einer untergegangenen Siedlung in der virtuellen Realität. *Polarforschung*, 90(2), 49–61. <https://doi.org/10.5194/polf-90-49-2022>

- Langbehn, E. (2019). *Walking in Virtual Reality: Perceptually-inspired Interaction Techniques for Locomotion in Immersive Environments*. Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky.
- Langbehn, E., Lubos, P., Bruder, G., & Steinicke, F. (2017). Application of redirected walking in room-scale VR. *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, 449–450. <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892373>
- Lanier, J. (1992). Virtual Reality: The Promise of the Future. *Interact. Learn. Int.*, 8(4), 275–279.
- Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer. *Applied Ergonomics*, 53, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.024>
- Lewald, J. (2012). Auditives Orientieren im Raum und seine Störungen. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaften* (S. 251–262). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25527-4_23
- Li, L., Yu, F., Shi, D., Shi, J., Tian, Z., Yang, J., Wang, X., & Jiang, Q. (2017). Application of virtual reality technology in clinical medicine. *American Journal of Translational Research*, 9(9), 3867–3880.
- Liao, H., Wang, X., Dong, W., & Meng, L. (2019). Measuring the influence of map label density on perceived complexity: A user study using eye tracking. *Cartography and Geographic Information Science*, 46(3), 210–227. <https://doi.org/10.1080/15230406.2018.1434016>
- Liu, C. (2023). *Die drei Sonnen: Roman* (M. Hasse, Übers.). Heyne.
- Liu, J., Liu, Q., Yu, S., Ma, J., Liu, M., & Wu, L. (2022). Which Types of Learners Are Suitable for the Virtual Reality Environment: A fsQCA Approach. *2022 8th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/iLRN55037.2022.9815913>
- Lochhead, I., Hedley, N., Çöltekin, A., & Fisher, B. (2022). The Immersive Mental Rotations Test: Evaluating Spatial Ability in Virtual Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 820237. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.820237>
- Lokka, I. E., & Çöltekin, A. (2019). Toward optimizing the design of virtual environments for route learning: Empirically assessing the effects of changing levels of realism on memory. *International Journal of Digital Earth*, 12(2), 137–155. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1349842>
- Lokka, I. E., & Çöltekin, A. (2020). Perspective switch and spatial knowledge acquisition: Effects of age, mental rotation ability and visuospatial memory capacity on route learning in virtual environments with different levels of realism. *Cartography and Geographic Information Science*, 47(1), 14–27. <https://doi.org/10.1080/15230406.2019.1595151>
- Loumos, G., Kargas, A., & Varoutas, D. (2018). Augmented and virtual reality technologies in cultural sector: Exploring their usefulness and the perceived ease of use. *Journal of Media Critiques [JMC]*, 4(14).
- Löwner, M.-O., Gröger, G., Benner, J., Biljecki, F., & Nagel, C. (2016). Proposal for a new LoD and Multi-Representation Concept for CityGML. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W1, 3–12. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-3-2016>

- Lu, X., Tomkins, A., Hehl-Lange, S., & Lange, E. (2021). Finding the difference: Measuring spatial perception of planning phases of high-rise urban developments in Virtual Reality. *Computers, Environment and Urban Systems*, 90, 101685. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101685>
- Luebke, D. P. (Hrsg.). (2003). *Level of detail for 3D graphics* (1st ed). Morgan Kaufmann Publishers.
- Luhmann, T. (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen* (3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Wichmann, VDE-Verlag.
- Lulof, P. S., Opgenhaffen, L., & Sepers, M. H. (2013). The Art of Reconstruction: Documenting the process of 3D modeling: Some preliminary results. *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 333–336. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6744774>
- Lütjens, M., Kersten, T., Dorschel, B., & Tschirschwitz, F. (2019). Virtual Reality in Cartography: Immersive 3D Visualization of the Arctic Clyde Inlet (Canada) Using Digital Elevation Models and Bathymetric Data. *Multimodal Technologies and Interaction*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.3390/mti3010009>
- Maixner, B. (2010). *Haithabu—Fernhandelszentrum zwischen den Welten: Bd. Begleitband zur Ausstellung*. Archäologisches Landesmuseum in der Stiftung Schleswig-Holsteinische Landesmuseen Schloß Gottorf.
- Mallot, H. A. (2012). Raumkognition. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaften* (S. 217–224). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25527-4_20
- Mangiron, C. (2016). Games without borders: The cultural dimensión of game localisation. *Hermeneus: Revista de La Facultad de Traducción e Interpretación de Soria*, 18, 187–208.
- Matchar, E. (2017). See the Ancient World Through Virtual Reality. *Virtual Travel - A Smithsonian magazine special report*. <https://www.smithsonianmag.com/innovation/see-ancient-world-through-virtual-reality-180962237/>
- Medyńska-Gulij, B., & Zagata, K. (2020). Experts and Gamers on Immersion into Reconstructed Strongholds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 655. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110655>
- Melhop, W. (1895). *Historische Topographie der Freien und Hansestadt Hamburg von 1880 bis 1895*. W. Mauke Söhne vormals Perthes Besser & Mauke.
- Merriam-Webster Dictionary. (2023). Enzyklopädie-Eintrag zu 'Virtual Reality'. In *Merriam-Webster Dictionary*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual%20reality> (abgerufen am 13.09.2023)
- Meta Platforms. (2023). Meta Quest. *Produktbeschreibung der Meta Quest*. <https://www.meta.com/de/quest/products/quest-2/tech-specs/#tech-specs> (abgerufen am 14.09.2023)
- Metag, J. (2017). Rezeption und Wirkung öffentlicher Wissenschaftskommunikation. In H. Bonfadelli, B. Fähnrich, C. Lüthje, J. Milde, M. Rhomberg, & M. S. Schäfer (Hrsg.), *Forschungsfeld Wissenschaftskommunikation* (S. 251–274). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-12898-2_14
- Metag, J. (2019). Visuelle Wissenschaftskommunikation: Zur visuellen Darstellung von Wissenschaft, ihrer Produktion, Nutzung und Wirkung. In K. Lobinger (Hrsg.), *Handbuch Visuelle Kommunikationsforschung* (S. 291–312). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-06508-9_35

- Meydenbauer, A. (1867). Ueber die Anwendung der Photographie zur Architektur-und Terrain-Aufnahme. *Zeitschrift für Bauwesen*, 17(1), 61–70.
- Microsoft Corporation. (2023). Microsoft HoloLens 2. *Produktbeschreibung der Microsoft HoloLens 2*. <https://www.microsoft.com/de-de/hololens/hardware> (abgerufen am 21.09.2023)
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- Mine, M. R., Brooks, F. P., & Sequin, C. H. (1997). Moving objects in space: Exploiting proprioception in virtual-environment interaction. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '97*, 19–26. <https://doi.org/10.1145/258734.258747>
- Miniatur Wunderland. (2023). *Die Virtual Reality-Erlebnisse im Miniatur Wunderland*. <https://www.miniatur-wunderland.de/yullbe> (abgerufen am 22.09.2023)
- mochakingup. (2021). *Character Creator 2D (1.94)* [Windows]. <https://mochakingup.itch.io/cc2d>
- Moore, G. E. (1998). Cramming More Components Onto Integrated Circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82–85. <https://doi.org/10.1109/JPROC.1998.658762>
- Morgan, G. A., Barrett, K. C., Leech, N. L., & Gloeckner, G. W. (2020). *IBM SPSS for introductory statistics: Use and interpretation* (Sixth edition). Routledge.
- Mori, M., MacDorman, K., & Kageki, N. (2012). The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2), 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>
- Mortara, M., Catalano, C. E., Bellotti, F., Fiucci, G., Houry-Panchetti, M., & Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.04.004>
- Moser, E., & Moser, M.-B. (2014). Mapping your every move. *Cerebrum: The Dana Forum on Brain Science*, 2014, 4.
- Muckel, K. (2023). Virtual Reality: Zukunft der historischen Bildung? *H-Soz-Kult*. www.hsozkult.de/event/id/event-137083 (abgerufen am 15.11.2023)
- Murjahn, R., & Tegtmeier, S. (2016). Open Data / Transparenzportal Hamburg – Grundlagen, Umsetzung, Erfahrungen, Auswirkungen. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 5/2016, 330–335. <https://doi.org/10.12902/zfv-0138-2016>
- Mystakidis, S. (2022). Metaverse. *Encyclopedia*, 2(1), 486–497. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031>
- Neumann, D. L., Moffitt, R. L., Thomas, P. R., Loveday, K., Watling, D. P., Lombard, C. L., Antonova, S., & Tremeer, M. A. (2018). A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport. *Virtual Reality*, 22(3), 183–198. <https://doi.org/10.1007/s10055-017-0320-5>
- Nguyen-Vo, T., Riecke, B. E., & Stuerzlinger, W. (2017). Moving in a box: Improving spatial orientation in virtual reality using simulated reference frames. *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 207–208.
- Nischwitz, A., Fischer, M., Haberäcker, P., & Socher, G. (2011). *Band I: Computergrafik* (3., neu bearb. Aufl). Vieweg + Teubner.

- Obradović, M., Vasiljević, I., Đurić, I., Kićanović, J., Stojaković, V., & Obradović, R. (2020). Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). *Applied Sciences*, *10*(8), 2743. <https://doi.org/10.3390/app10082743>
- O'Keefe, J., & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Research*, *34*(1), 171–175. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(71\)90358-1](https://doi.org/10.1016/0006-8993(71)90358-1)
- Othman, M. K., Nogoibaeva, A., Leong, L. S., & Barawi, M. H. (2022). Usability evaluation of a virtual reality smartphone app for a living museum. *Universal Access in the Information Society*, *21*(4), 995–1012. <https://doi.org/10.1007/s10209-021-00820-4>
- Oxford English Dictionary. (2023). Enzyklopädie-Eintrag zu 'Virtual Reality'. In *Oxford English Dictionary*. Oxford University Press. https://www.oed.com/dictionary/virtual-reality_n?tab=meaning_and_use#15654690 (abgerufen am 13.09.2023)
- Pasquaré Mariotto, F., & Bonali, F. L. (2021). Virtual Geosites as Innovative Tools for Geoheritage Popularization: A Case Study from Eastern Iceland. *Geosciences*, *11*(4), 149. <https://doi.org/10.3390/geosciences11040149>
- Pastel, S., Chen, C.-H., Petri, K., & Witte, K. (2020). Effects of body visualization on performance in head-mounted display virtual reality. *PLOS ONE*, *15*(9), e0239226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239226>
- Patrão, B., Pedro, S., & Menezes, P. (2020). How to Deal with Motion Sickness in Virtual Reality. *22o Encontro Português de Computação Gráfica e Interação 2015*, 7 pages. <https://doi.org/10.2312/PT.20151201>
- Paulauskas, L., Paulauskas, A., Blažauskas, T., Damaševičius, R., & Maskeliūnas, R. (2023). Reconstruction of Industrial and Historical Heritage for Cultural Enrichment Using Virtual and Augmented Reality. *Technologies*, *11*(2), 36. <https://doi.org/10.3390/technologies11020036>
- Perkins, G. W., & Echeverry, S. (2022). Virtual Production in Action: A Creative Implementation of Expanded Cinematography and Narratives. *ACM SIGGRAPH 2022 Posters*, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3532719.3543231>
- Pico Technology. (2023). Pico 4. *Produktbeschreibung der Pico 4*. <https://www.picoxr.com/global/products/pico4/specs> (abgerufen am 20.09.2023)
- Pimax. (2023). Pimax 5K. *Produktbeschreibung der Pimax 5K*. <https://pimax.com/de/5k-super-Tech-Specs/> (abgerufen am 21.09.2023)
- Polycarpou, C. (2018). The ViMM Definition of a Virtual Museum. *ViMM - Virtual Multimodal Museum*. <https://www.vi-mm.eu/2018/01/10/the-vimm-definition-of-a-virtual-museum/> (abgerufen am 05.10.2023)
- Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, *54*, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001>
- Postert, P., Wolf, A. E. M., & Schiewe, J. (2022). Integrating Visualization and Interaction Tools for Enhancing Collaboration in Different Public Participation Settings. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *11*(3), 156. <https://doi.org/10.3390/ijgi11030156>

- Pujol, L., & Lorente, A. (2014). The Virtual Museum: A Quest for the Standard Definition. In G. Earl, T. Sly, D. Wheatley, I. Romanowska, C. Papadopoulos, P. Murrieta-Flores, & A. Chrysanthi (Hrsg.), *Archaeology in the Digital Era* (1. Aufl., S. 40–48). Amsterdam University Press. <https://doi.org/10.1017/9789048519590.005>
- Rec Room Inc. (2016). *Rec Room* [Software]. Against Gravity (inzw. Rec Room Inc.).
- Reinhardt, J., & Wolf, K. (2020). Go-Through: Disabling Collision to Access Obstructed Paths and Open Occluded Views in Social VR. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3384657.3384784>
- Reussner, E. (2007). Wissensvermittlung im Museum—ein überholtes Konzept. *Kultur und Management im Dialog*, 5, 20–23.
- Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & Cognition*, 27(4), 741–750. <https://doi.org/10.3758/BF03211566>
- Richardson, J. (2023). Virtual Reality is a big trend in museums, but what are the best examples of museums using VR? *MuseumNext*. <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-virtual-reality/> (abgerufen am 25.09.2023)
- Rienow, A., Lindner, C., Dedring, T., Hodam, H., Ortwein, A., Schultz, J., Selg, F., Staar, K., & Jürgens, C. (2020). Augmented Reality and Virtual Reality Applications Based on Satellite-Borne and ISS-Borne Remote Sensing Data for School Lessons. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 187–198. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00113-0>
- Rizvic, S., Boskovic, D., & Mijatovic, B. (2024). Advanced interactive digital storytelling in digital heritage applications. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, e00334. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00334>
- Rüfenacht, D., Zai, M., Sulliman, H., & Knellessen, O. (2018). Birdly und Virtuelle Realitäten. *Journal für Psychoanalyse*. <https://doi.org/10.18754/jfp.59.6>
- Rymaszewski, M. (Hrsg.). (2007). *Second life: The official guide*. Sybex.
- Sadamali Jayawardena, N., Thaichon, P., Quach, S., Razzaq, A., & Behl, A. (2023). ‘The persuasion effects of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) video advertisements: A conceptual review’. *Journal of Business Research*, 160, 113739. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113739>
- Sanders, A. (2017). *An introduction to Unreal engine 4*. Taylor & Francis, CRC Press.
- Santos Garduño, H. A., Esparza Martínez, M. I., & Portuguese Castro, M. (2021). Impact of Virtual Reality on Student Motivation in a High School Science Course. *Applied Sciences*, 11(20), 9516. <https://doi.org/10.3390/app11209516>
- Schäfer, M. S., Kristiansen, S., & Bonfadelli, H. (Hrsg.). (2015). *Wissenschaftskommunikation im Wandel: 1. Jahrestagung der Ad-hoc-Gruppe „Wissenschaftskommunikation“ der DGPUK, die im Januar 2014 an der Universität Zürich stattgefunden hat*. von Halem.
- Scharlach, H., & Crom, W. (2013). Entwicklung und Einsatzgebiete thematischer Karten im frühen 19. Jahrhundert am Beispiel der Cholera. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 63(1), 19–26. <https://doi.org/10.1007/BF03546077>
- Schietzel, K., Bau, F., Hammon, H., Schüller, J., & Carnap-Bornheim, C. von. (2014). *Spurensuche Haithabu: Archäologische Spurensuche in der frühmittelalterlichen Ansiedlung Haithabu: Dokumentation und Chronik 1963-2013*. Wachholtz Verlag.

- Schiewe, J. (2019). Empirical Studies on the Visual Perception of Spatial Patterns in Choropleth Maps. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 69(3), 217–228. <https://doi.org/10.1007/s42489-019-00026-y>
- Schiewe, J. (2022a). Austausch von Geodaten. In J. Schiewe, *Kartographie* (S. 123–128). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65441-5_8
- Schiewe, J. (2022b). Geschichte der Kartographie. In J. Schiewe, *Kartographie* (S. 21–33). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65441-5_2
- Schiewe, J. (2023). Benötigen wir in den 2030er Jahren noch die Kartographie? *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 73(1), 91–92. <https://doi.org/10.1007/s42489-023-00132-y>
- Schmohl, S., Tutzauer, P., & Haala, N. (2020). Stuttgart City Walk: A Case Study on Visualizing Textured DSM Meshes for the General Public Using Virtual Reality. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 147–154. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00106-z>
- Schweibenz, W. (2001). *Das virtuelle Museum. Überlegungen zum Begriff und Wesen des Museums im Internet* [Vortrag]. MAI-Tagung, Hagen. https://mai-tagung.lvr.de//media/mai_tagung/pdf/2001/schweibenz.pdf (abgerufen am 05.10.2023)
- Schwind, V., Knierim, P., Haas, N., & Henze, N. (2019). Using Presence Questionnaires in Virtual Reality. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300590>
- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., & Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*, 12(4), e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>
- Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Sony Interactive Entertainment. (2023). PlayStation VR. *Produktbeschreibung der PlayStation VR*. <https://www.playstation.com/de-de/ps-vr2/ps-vr2-tech-specs/> (abgerufen am 14.09.2023)
- Soto-Martin, O., Fuentes-Porto, A., & Martin-Gutierrez, J. (2020). A Digital Reconstruction of a Historical Building and Virtual Reintegration of Mural Paintings to Create an Interactive and Immersive Experience in Virtual Reality. *Applied Sciences*, 10(2), 597. <https://doi.org/10.3390/app10020597>
- Spielberg, S. (Regisseur). (2018). *Ready Player One* [Science-Fiction]. Warner Bros. Pictures.
- Statham, N. (2020). Use of Photogrammetry in Video Games: A Historical Overview. *Games and Culture*, 15(3), 289–307. <https://doi.org/10.1177/1555412018786415>
- Steam. (2023). Steam Infos [Steam Website]. *About Steam*. <https://store.steampowered.com/about/> (abgerufen am 24.10.2023)
- Sternberg, H., Kersten, T. P., Jahn, I., & Kinzel, R. (2004). Terrestrial 3D Laser Scanning—Data Acquisition and Object Modelling for Industrial As-built Documentation and Architectural Applications. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXV, Commission VII, 942–947.

- Stieglitz, S. (2017). Enterprise Gamification – Vorgehen und Anwendung. In S. Strahringer & C. Leyh (Hrsg.), *Gamification und Serious Games* (S. 3–13). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-16742-4_1
- Stiftung Digitale Spielekultur (Hrsg.). (2020). *Erinnern mit Games—Digitale Spiele als Chance für die Erinnerungskultur* (1. Aufl.). https://www.stiftung-digitale-spielekultur.de/app/uploads/2020/08/SDK_Erinnern-mit-Games_bfrei.pdf (abgerufen am 08.10.2023)
- Student. (1908). The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.2307/2331554>
- Styliani, S., Fotis, L., Kostas, K., & Petros, P. (2009). Virtual museums, a survey and some issues for consideration. *Journal of Cultural Heritage*, 10(4), 520–528. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.03.003>
- Sunesson, K., Allwood, C. M., Paulin, D., Heldal, I., Roupe, M., Johansson, M., & Westerdahl, B. (2008). Virtual reality as a new tool in the city planning process. *Tsinghua Science and Technology*, 13(S1), 255–260. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(08\)70158-5](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(08)70158-5)
- Sutherland, I. E. (1965). The ultimate display. *Proceedings of the IFIP Congress*, 2, 506–508.
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I on - AFIPS '68 (Fall, Part I)*, 757. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- Sveistrup, H. (2004). Motor rehabilitation using virtual reality. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 1(1), 10. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-1-10>
- Taube, J. S., Valerio, S., & Yoder, R. M. (2013). Is Navigation in Virtual Reality with fMRI Really Navigation? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(7), 1008–1019. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00386
- Trau, D., Kersten, T. P., & Tschirschwitz, F. (2019). Die Viermastbark Peking in Virtual Reality als neue Form der Wissensvermittlung. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, 29, 99–113.
- Tsang, D., Stanton, A., Spiro, M., & Podeswa, J. (Regisseure). (2024). *3 Body Problem* [Science-Fiction; Serie, 1 Staffel, 8 Folgen]. Netflix.
- Tschirschwitz, F., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2018). Immersive 3D-Visualisierung von Bauwerken mit Virtual Reality in der Hochschulausbildung. *Tagungsband der 38. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF*, 27, 471–482.
- Tschirschwitz, F., Richerzhagen, C., Przybilla, H.-J., & Kersten, T. P. (2019). Duisburg 1566: Transferring a Historic 3D City Model from Google Earth into a Virtual Reality Application. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 87(1–2), 47–56. <https://doi.org/10.1007/s41064-019-00065-0>
- Valve. (2020). *Half-Life: Alyx* [Windows, Linux]. Valve Corporation.
- Valve. (2023). Valve Index. *Produktbeschreibung der Valve Index*. <https://www.valvesoftware.com/de/index/headset> (abgerufen am 14.09.2023)
- Van Der Meijden, O. A. J., & Schijven, M. P. (2009). The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: A current review. *Surgical Endoscopy*, 23(6), 1180–1190. <https://doi.org/10.1007/s00464-008-0298-x>

- Varotsos, C., Tzanis, C., & Cracknell, A. (2009). The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(5), 590–592. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0114-8>
- Velazco, C. (2024). I lived inside a Vision Pro for two weeks. Here's what it was like. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/technology/2024/02/12/apple-vision-pro-review/> (abgerufen am 10.04.2024)
- Verma, J. K., & Paul, S. (Hrsg.). (2022). *Advances in Augmented Reality and Virtual Reality* (Bd. 998). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7220-0>
- Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Hrsg.). (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning* (Repr.). Whittles Publ.
- VRcompare. (2023). *VR & AR Headset Database*. <https://www.vr-compare.com/> (abgerufen am 21.09.2023)
- VRHQ. (2023). Virtual Reality Headquarters Hamburg. *Virtuelle Welten in der Speicherstadt*. <https://www.vrhq.de/> (abgerufen am 22.09.2023)
- Wachowski, L., & Wachowski, L. (Regisseure). (1999). *The Matrix* [Science-Fiction]. Warner Bros. Pictures.
- Wahbeh, W., Nebiker, S., & Fangi, G. (2016). Combining Public Domain and Professional Panoramic Imagery for the Accurate and Dense 3D Reconstruction of the Destroyed Bel Temple in Palmyra. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–5, 81–88. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-5-81-2016>
- Waisberg, E., Ong, J., Masalkhi, M., Zaman, N., Sarker, P., Lee, A. G., & Tavakkoli, A. (2024). The future of ophthalmology and vision science with the Apple Vision Pro. *Eye*, 38(2), 242–243. <https://doi.org/10.1038/s41433-023-02688-5>
- Waller, D., Loomis, J. M., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(1), 157–163. <https://doi.org/10.3758/BF03206476>
- Walmsley, A. P., & Kersten, T. P. (2019). Low-Cost Development of an Interactive, Immersive Virtual Reality Experience of the Historic City Model Stade 1620. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 405–411. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-405-2019>
- Walmsley, A. P., & Kersten, T. P. (2020). The Imperial Cathedral in Königslutter (Germany) as an Immersive Experience in Virtual Reality with Integrated 360° Panoramic Photography. *Applied Sciences*, 10(4), 1517. <https://doi.org/10.3390/app10041517>
- Walmsley, A. P., Lindstaedt, M., Schnelle, M., & Kersten, T. P. (2023). Virtual reality for spatial research in archaeology: Prototyping 3D reconstruction tools for the site of Yeha, Ethiopia [Application/pdf]. 43. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung Der DGPF*, 22.23. März 2023 in München; 123. <https://doi.org/10.24407/KXP:1841077208>
- Walz, M. (2016). Begriffsgeschichte, Definition, Kernaufgaben. In M. Walz (Hrsg.), *Handbuch Museum* (S. 8–14). J.B. Metzler. https://doi.org/10.1007/978-3-476-05184-4_2
- Wang, J., Li, Z., Hu, W., Shao, Y., Wang, L., Wu, R., Ma, K., Zou, D., & Chen, Y. (2019). Virtual reality and integrated crime scene scanning for immersive and heterogeneous crime scene reconstruction. *Forensic Science International*, 303, 109943. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109943>

- Wang, P., Wu, P., Wang, J., Chi, H.-L., & Wang, X. (2018). A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1204. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
- Waqar. (2020). What is Quixel Bridge? [Quixel Website]. *Quixel Bridge Blog*. [https://help.quixel.com/hc/en-us/articles/115000613105-What-is-Quixel-Bridge-\(abgerufen am 24.10.2023\)](https://help.quixel.com/hc/en-us/articles/115000613105-What-is-Quixel-Bridge-(abgerufen%20am%2024.10.2023))
- Webster, N. L. (2017). High poly to low poly workflows for real-time rendering. *Journal of Visual Communication in Medicine*, 40(1), 40–47. <https://doi.org/10.1080/17453054.2017.1313682>
- Weinhaus, F. M., & Devarajan, V. (1997). Texture mapping 3D models of real-world scenes. *ACM Computing Surveys*, 29(4), 325–365. <https://doi.org/10.1145/267580.267583>
- Weiss, R.-M. (Hrsg.). (2016). *Hammaburg: Wie alles begann* (Museumsausgabe). Archäologisches Museum.
- Weiss, R.-M. (Hrsg.). (2021). *Burgen in Hamburg: Eine Spurensuche*. Wachholtz.
- Weiss, R.-M., & Klammt, A. (Hrsg.). (2014). *Mythos Hammaburg: Archäologische Entdeckungen zu den Anfängen Hamburgs ; [31. Oktober 2014 - 26. April 2015, Archäologisches Museum Hamburg]*. Wachholtz.
- Weissker, T., & Froehlich, B. (2021). Group Navigation for Guided Tours in Distributed Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5), 2524–2534. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3067756>
- Wheatstone, C. (1838). XVIII. Contributions to the physiology of vision. —Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 128, 371–394. <https://doi.org/10.1098/rstl.1838.0019>
- White, M. M. (2014). *Learn to play: Designing tutorials for video games*. CRC Press, Taylor & Francis.
- Wiegand, T., & Stieglitz, S. (2014). Serious Fun-Effects of Gamification on Knowledge Exchange in Enterprises. *GI-Jahrestagung*, 321–332.
- Wikipedia. (2023). Enzyklopädie-Eintrag zu 'Virtuelle Realität'. In *Wikipedia*. https://de.wikipedia.org/wiki/Virtuelle_Realit%C3%A4t (abgerufen am 13.09.2023)
- Wolf, K., Reinhardt, J., & Funk, M. B. (2018). *Virtual Exhibitions: What do we win and what do we lose?* Electronic Visualisation and the Arts. <https://doi.org/10.14236/ewic/EVA2018.15>
- Yang, S., Hwang, W.-H., Tsai, Y.-C., Liu, F.-K., Hsieh, L.-F., & Chern, J.-S. (2011). Improving Balance Skills in Patients Who Had Stroke Through Virtual Reality Treadmill Training. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 90(12), 969–978. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e3182389fae>
- Yang, Y., Jenny, B., Dwyer, T., Marriott, K., Chen, H., & Cordeil, M. (2018). Maps and Globes in Virtual Reality. *Computer Graphics Forum*, 37(3), 427–438. <https://doi.org/10.1111/cgf.13431>
- Yates, M., Kelemen, A., & Sik Lanyi, C. (2016). Virtual reality gaming in the rehabilitation of the upper extremities post-stroke. *Brain Injury*, 30(7), 855–863. <https://doi.org/10.3109/02699052.2016.1144146>

- Zagata, K., Gulij, J., Halik, Ł., & Medyńska-Gulij, B. (2021). Mini-Map for Gamers Who Walk and Teleport in a Virtual Stronghold. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 96. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020096>
- Zagata, K., & Medyńska-Gulij, B. (2023). Mini-Map Design Features as a Navigation Aid in the Virtual Geographical Space Based on Video Games. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 12(2), 58. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020058>
- Zhao, D., & Lucas, J. (2015). Virtual reality simulation for construction safety promotion. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 22(1), 57–67. <https://doi.org/10.1080/17457300.2013.861853>

Abkürzungen

| | |
|--------------|---|
| AMH | Archäologisches Museum Hamburg |
| AR | Augmented Reality |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CC2D | Character Creator 2D |
| CHO | Cultural Heritage Object |
| CPU | Central Processing Unit |
| CSG | Constructive Solid Geometry |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DoF | Degrees of Freedom |
| DVE | Desktop Virtual Environment |
| EDV | Elektronische Datenverarbeitung |
| FoV | Field of View |
| FPS | Frames Per Second |
| GIMP | GNU Image Manipulation Program |
| GIS | Geographisches Informationssystem |
| GPU | Graphics Processing Unit |
| HCU | HafenCity Universität Hamburg |
| HMD | Head-Mounted Display |
| LoD | Level of Detail |
| MR | Mixed Reality |
| MW | Mittelwert |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NPC | Non-Player Character |
| NURBS | Non-Uniform Rational B-Splines |
| PPD | Average Angular Pixel Density |
| SD | Standard Deviation |
| SDK | Software Development Kit |
| SF | Science Fiction |
| SPSS | Statistical Package for the Social Sciences |
| SUS | System Usability Scale |
| UE | Unreal Engine |
| UI | User Interface |
| USA | United States of America |
| UX | User Experience |
| VCASS | Visually Coupled Airborne Systems Simulator |
| VIEW | Virtual Environment Interface Workstations |
| VM | Virtuelles Museum |
| VR | Virtuelle Realität |
| VRHQ | Virtual Reality Headquarters Hamburg |
| XR | Extended Reality |

Abbildungen

- Nr. Abbildung(en)*
- 1** Oben: Rekonstruktion der Hammaburg III um 900, Blick von Südwesten, ungefähr vom Standpunkt der späteren Neuen Burg (Tim-John Müller für das AMH in Weiss (2021)). Unten: Schematischer Aufbau Hamburgs nach Fertigstellung der Neuen Burg um 1023. Die besiedelte Fläche ist rot markiert. Die drei Hamaburgen befanden sich unter dem Dom. (Kay-Peter Suchowa für das AMH in Weiss (2021)).
 - 2** Zeitliche Einordnung der Neuen Burg in die Geschichte Hamburgs. Die roten Striche markieren die in den Zeitscheiben abgebildeten Stadtbilder (Kapitel 11.5.1).
 - 3** Links: Ausschnitt der Hamburger Innenstadt (Google Maps). Rechts: Überlagerung des Wallverlaufs der Neuen Burg (braun) mit der heutigen Bebauung (grau) und den Ausgrabungsbereichen (rot) (nach Kay-Peter Suchowa für das AMH in Weiss (2021) und AMH Webstory (<https://amh.de/mythos-hammaburg>)).
 - 4** Virtuality Continuum (nach Milgram & Kishino (1994)).
 - 5** Links: Patentzeichnung von Morton Heilig (Heilig, 1960). Rechts oben: The Ultimate Display von Ivan Sutherland (Sutherland (1968), nachbearbeitet von Basu (2019)). Rechts unten: modernes VR-System von Valve (<https://www.valvesoftware.com/de/index>).
 - 6** Funktionsprinzip des Inside-Out-Trackings von stationsbasierten VR-Systemen (nach Vive (https://www.vive.com/us/support/vive-pro-hmd/category_howto/verifying-your-setup.html)). Sensoren an der VR-Brille registrieren die von den Tracking-Stationen ausgesandten Signale.
 - 7** Zusammenhang zwischen Computergrafik und Bildverarbeitung (nach Nischwitz et al. (2011)).
 - 8** Definition des sichtbaren Volumens und Projektion auf die dem Augenpunkt nahe clipping plane (Nischwitz et al., 2011).
 - 9** Ein Szene a) ohne, b) mit korrektem und c) mit 'falschem' Schatten. Bei unveränderlichen Lichtverhältnissen kann der falsche Schatten durch geschickte Platzierung annähernd dem realen Schattenwurf (b) entsprechen (siehe auch Abbildung 47 in Kapitel 11.5.6) (Nischwitz et al., 2011).
 - 10** Links: Gegenüberstellung verschiedener LoDs (nach Dörner et al. (2019)). Rechts: Prinzip der abnehmenden Detailstufe bei zunehmender Entfernung (nach Luebke (2003)).
 - 11** Uncanny Valley (nach Mori et al. (2012)). Der Effekt verstärkt sich bei animierten Nachbildungen.
 - 12** Maps einer Backstein-Textur (Datenbank: textures.com). Von links nach rechts: Base Colour, Normal, Roughness, Ambient Occlusion, Displacement.
 - 13** Maps einer Backstein-Textur (Datenbank: textures.com). Von links nach rechts: Base Colour, Normal, Roughness, Ambient Occlusion, Displacement.
 - 14** Links: Rekonstruktion der Siegesburg und der umliegenden Stadt. Rechts: Draufsicht auf das virtuelle Modell. Der für die Studie begehbare Bereich ist in grün markiert.
 - 15** Übersicht über die sechs Hilfsmittel, wie sie den Testpersonen in der Studie erscheinen.
 - 16** Obere Reihe: Fünf Grundmodule zum Aufbau der Labyrinth. Mittlere & untere Reihe: Karten der sieben Labyrinthwelten sowie des Tutorials.
 - 17** Schema der Programmierung der Navigationslinie und des Richtungspfeils.
 - 18** Schema des Studienablaufs innerhalb des VR-Programms. Abläufe vor dem Start und nach Beendigung des Programms werden in Kapitel 8.2.5 erläutert.
 - 19** Schematische Darstellung der Teleportationsabläufe für die Studie und die VR-App.

- 20** Impressionen der Studiendurchführung: a) Zielplattform, b) Informationen über die Testperson wurden über dieses Buzzer-System abgefragt, c) Turmplatzierung am Ende jedes Labyrinths, d) Ranking-Angabe am Ende der Studie.
- 21** a) Altersverteilung, b) VR-Erfahrung, c) VR-Erfahrung in Abhängigkeit vom Alter (Zustimmungsskala von 1 bis 5), d) Vorerfahrung mit digitalen Medien.
- 22** a) Verteilung Motion Sickness, b) Motion Sickness in Abhängigkeit vom Alter (Zustimmungsskala von 1 bis 5).
- 23** SUS-Score in Abhängigkeit vom Alter.
- 24** a & b) Einschätzung der Benutzbarkeit, c & d) Einschätzung der Orientierungs-fähigkeit.
- 25** Verteilung von Δ HelpNeeded. Ein Wert von 0 bedeutet eine exakte Übereinstimmung bei positiver oder negativer Formulierung. Die maximale Differenz von 4 tritt bei gleichzeitiger voller Zustimmung oder Ablehnung beider Fragen auf.
- 26** a) Einschätzung zur wiederholten Benutzung, b) Einschätzung zur Empfehlung an Dritte.
- 27** a) Altersverteilung, b) VR-Erfahrung, c) Selbsteinschätzung zum Orientierungssinn, d) Motion Sickness
- 28** Gesamtdistanz der verschiedenen Hilfsmittel.
- 29** Turmfehler der verschiedenen Hilfsmittel.
- 30** Durchschnittlicher Turmfehler in Abhängigkeit a) von der VR-Erfahrung und b) vom Alter.
- 31** Korrelation zwischen Gesamtdistanz und Turmfehler.
- 32** a) Startzeit und b) Distanz der einzelnen Teleportationen.
- 33** Ranking der Hilfsmittel.
- 34** Durchschnittliche Positionierung innerhalb der Studie der a) Labyrinth und b) Hilfsmittel.
- 35** a) Gesamtdistanz und b) Turmfehler in Abhängigkeit von der Labyrinthnummer.
- 36** Performance im Verlauf der Studie über alle Hilfsmittel hinweg für a) Gesamtdistanz und b) Turmfehler.
- 37** Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs.
- 38** Modellierungsprozess für einige Gebäude, links in SketchUp, rechts die finale texturierte Version in der Unreal Engine: a) Herrenhaus, b) Torhaus, c) Kapelle.
- 39** Sammlung der Detailobjekte.
- 40** Schematische Übersicht über das Master-Material. Alle Werte können in den jeweiligen Materialinstanzen angepasst werden, um die passenden Eigenschaften darzustellen.
- 41** Palisadentextur a) nur als Farbtexur, b) mit zusätzlichen Maps (siehe Kapitel 6.3), c) mit positionsabhängiger Verschiebung, d) mit Noise-Texturen.
- 42** Gesamtansicht der Neuen Burg. Links: Illustration als Vorlage (Roland Warzecha für das AMH, <https://amh.de/ausstellung-ort/burgen-in-hamburg-eine-spurensuche>). Rechts: Dieselbe Perspektive des VR-Modells.
- 43** Je näher sich Objekte am Betrachtenden befinden, desto höher ist ihre Auflösung. Außerhalb des Sichtkegels werden Objekte nicht gerendert. Lediglich die entsprechenden Objekte im grau hinterlegten Sichtkegel werden berechnet.
- 44** Oben: Perspektive der Nutzenden. Unten: Derselbe Hintergrund aus einer etwas anderen Perspektive offenbart die ressourcenschonende Zweidimensionalität der Bäume und Büsche.
- 45** Übersicht über die 13 NPCs. Abgebildet ist jeweils das erste Bild der Animation. Obere Reihe: Männer, mittlere Reihe: Frauen, untere Reihe: Berufe (Wachposten, Holzfäller, Schäferin).
- 46** Dieselbe Ansicht der Neuen Burg ohne (oben) und mit (unten) Licht- und Schattenberechnung.
- 47** 'Falscher' schwarzer Schatten unter den NPCs.

- 48** Umrisslinie am Beispiel eines Pergaments. a) Pergament vor Überlappung mit dem Controller, b) Separierung des Objekts vom Hintergrund, c) Definition des Umrisses aus Perspektive der Betrachtenden, d) Überlagerung mit dem gerenderten Bild.
- 49** Finales Design der Handcontroller.
- 50** Draufsicht der Neuen Burg. Der begehbare Bereich ist in grün markiert.
- 51** Hinweissymbole zur Teleportation (links) und zur Interaktion (rechts).
- 52** Mini-Map mit Schnellreiseoptionen (links), Menü (Mitte) und Credits-Sektion (rechts).
- 53** Schema der Programmierung zur Visualisierung der Stadtgeschichte.
- 54** Ausschnitt der Mini-Map mit der Rundtour durch die Neue Burg.
- 55** Aufrufstatistik von Steamworks.
- 56** Sprachauswahl am Anfang des VR-Programms. Die Beschriftungen der Controller (Abbildung 51) sind für diesen ersten Moment des Programms zweisprachig ausgeführt und werden nach der Sprachauswahl angepasst.
- 57** Schematische Übersicht über das Nutzungserlebnis.
- 58** Logo (links oben) sowie weitere Screenshots als Werbematerial.
- 59** Auftritt des VR-Programms auf Steam mit Video und Screenshots (oben) sowie Beschreibungstext und Systemvoraussetzungen (unten).
- 60** Verteilung der Spielzeiten.
- 61** Animationstests mit gestikulierendem und redendem Burgvogt.

Tabellen

Nr. Tabelle

- 1** Komponenten-Übersicht für die Rechner, die zur Entwicklung und Studiendurchführung verwendet wurden.
- 2** Funktionsübersicht für die zur VR-Entwicklung und zur Durchführung der Studien verwendeten VR-Brillen. PPD = Durchschnittliche angulare Pixeldichte pro Grad des Sichtfelds.
- 3** Erhobene allgemeine Parameter für jeden Studiendurchlauf.
- 4** Erhobene individuelle Parameter für jeden einzelnen Labyrinthdurchlauf (sieben Mal pro Testperson).
- 5** Signifikante Unterschiede der Hilfsmittel bezogen auf die Gesamtdistanz.
- 6** Signifikante Unterschiede der Hilfsmittel bezogen auf den Turmfehler
- 7** Übersicht über die neun Zeitepochen zur Visualisierung der Stadtentwicklung.
- 8** Übersicht über die Stationen und die zugehörigen Interaktionen

Anhang

A) Fragebogen zur Segeberg-Studie

Fragebogen zur Virtual Reality (VR)-Anwendung Segeberg 1644

Bitte beantworten Sie die Fragen, indem Sie einen Wert zwischen 1 (Stimme gar nicht zu) und 5 (Stimme voll zu) ankreuzen.

Falls Sie bereits bei einer früheren Führung diesen Fragebogen ausgefüllt haben, füllen Sie ihn bitte nicht erneut aus.

| | Stimme gar nicht zu | | | | | Stimme voll zu |
|---|------------------------|---|---|---|---|-------------------|
| 1. Ich denke, dass ich die VR-Anwendung gerne häufiger benutzen würde. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 2. Ich fand die VR-Anwendung unnötig komplex und unübersichtlich. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 3. Ich fand die VR-Anwendung einfach zu benutzen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um die VR-Anwendung benutzen zu können. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in dieser VR-Anwendung waren gut integriert. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 6. Ich denke, die VR-Anwendung enthielt zu viele Widersprüche / unlogische Elemente. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser VR-Anwendung sehr schnell lernen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 8. Ich fand die VR-Anwendung sehr umständlich zu nutzen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der VR-Anwendung sehr sicher. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte, die VR-Anwendung zu verwenden. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 11. Während der Benutzung der VR-Anwendung sind bei mir Schwindel oder andere Symptome des Unwohlseins aufgetreten. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 12. Ohne die Hilfe einer anderen Person würde ich mich in der VR-Anwendung hoffnungslos verlaufen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 13. Ich fand den Detailgrad der VR-Umgebung nicht hoch genug. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

Auf der RÜCKSEITE geht es weiter!

14. Ich denke, dass ich die meisten der auf den Plakaten vorgestellten Gebäude und Orte auch ohne fremde Hilfe in der VR-Anwendung finden würde.

| | | | | | | |
|--|-------------------|---|---|---|---|---|
| Stimme gar nicht zu | Stimme voll zu | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; height: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;"></td> </tr> </table> | | | | | | |
| | | | | | | |
| <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; text-align: center;">1</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">2</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">3</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">4</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">5</td> </tr> </table> | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |

15. Um Ziele in der VR-Anwendung selbstständig finden zu können, würde ich mir folgende Orientierungshilfen wünschen:

16. Ich habe bereits viel Erfahrung mit anderen VR-Anwendungen gesammelt.

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
|--|--|--|--|--|

17. Mit digitalen Medien (z.B. Smartphones, sozialen Medien, Gaming) kenne ich mich überhaupt nicht aus.

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
|--|--|--|--|--|

18. Ich finde, weitere Funktionen hätten dieser VR-Anwendung gutgetan.

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
|--|--|--|--|--|

19. Ich würde mir folgende zusätzliche Funktionen (z.B. für Komfort, Information, Unterhaltung, ...) wünschen:

20. Ich würde diese VR-Anwendung weiterempfehlen.

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
|--|--|--|--|--|

21. Wie viel Zeit haben Sie in der VR-Anwendung verbracht?

| | | | | |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | | | |
| <small>< 2 min</small> | <small>2-5 min</small> | <small>5-10 min</small> | <small>10-20 min</small> | <small>> 20 min</small> |

22. Wenn Sie möchten, nennen Sie uns bitte Ihre Altersspanne:

| | | | | |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| | | | | |
| <small>< 20</small> | <small>21-35</small> | <small>36-50</small> | <small>51-65</small> | <small>> 65</small> |

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Diese Studie wird durchgeführt von der HafenCity Universität Hamburg und dient zur Erforschung und Verbesserung von VR-Anwendungen für den Wissenstransfer. Verantwortlicher und Kontakt: Simon Deggim, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, HafenCity Universität Hamburg, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg, Mail: simon.deggim@hcu-hamburg.de

B) Sprachskript zur Orientierungsstudie

Tutorial 01: Start

Herzlich willkommen zu dieser Studie. Vielen Dank, dass sie mitmachen. In dieser Studie geht es um Orientierungssinn und räumliche Wahrnehmung in der virtuellen Realität. Falls sie noch nie eine VR-Brille aufhatten, schauen Sie sich erst einmal um und gewöhnen Sie sich an das Gefühl. Bevor wir mit der Studie beginnen, werden Ihnen in diesem Tutorial alle wichtigen Elemente erklärt.

Tutorial 02: Erklärung der Zielplattform

Sie werden gleich durch sieben labyrinthartige Level laufen. Das Ziel in jedem Level ist es, die grün markierte Zielplattform auf möglichst direktem Wege zu erreichen. Die Zielplattform versteckt sich hinter einigen Biegungen und Abzweigungen und sieht so aus wie gerade eingeblendet.

Tutorial 03: Erklärung der Landmarke

Auf ihrem Weg zum Ziel werden sie an einem großen roten Turm vorbeikommen. Versuchen Sie, sich die Position des Turmes zu merken.

Tutorial 04: Ankündigung der Hilfen

Um das Auffinden der Ziele zu erleichtern, werden Ihnen in jedem Level unterschiedliche Hilfen zur Verfügung gestellt. Diese werden jetzt einmal kurz vorgestellt. Sie werden aber auch nochmal am Anfang des jeweiligen Levels erklärt. Folgende Hilfen stehen zur Verfügung:

Tutorial 05: Keine Hilfe + Erklärung im Level + Interaktionserklärung

Und schließlich wird es auch ein Level geben, welches Sie ohne zusätzliche Hilfe bewältigen müssen. Schauen Sie nun zum roten Knopf vor sich: Sobald Sie ein Level starten wollen, drücken Sie auf diesen Knopf, indem Sie Ihren rechten Controller zum Knopf bewegen und, wie eingeblendet, die Taste an Ihrem Zeigefinger drücken. Probieren Sie das jetzt einmal aus.

Tutorial 06: Teleporterklärung + Ausprobieren, Ziel erreichen

Sehr gut. Innerhalb eines Levels können Sie sich mit der Teleport-Funktion fortbewegen. Halten Sie dazu mit Ihrem Daumen wie eingeblendet die Teleport-Taste gedrückt, zielen Sie in die Richtung, in die Sie sich teleportieren wollen und lassen Sie schließlich die Taste los. Probieren Sie das jetzt ein paar Mal aus. Wenn Sie sich an die Steuerung gewöhnt haben, suchen Sie die grüne Zielplattform in diesem Tutorial und teleportieren Sie sich dorthin.

Tutorial 07: Ziel erreicht, Turmplatzierung erklären

Sie haben die Zielplattform erreicht. Am Ende jedes Levels wird zu Ihrer Rechten ein kleines 3D-Modell des Labyrinths erscheinen, durch das Sie gerade gegangen sind. Wenn Sie Ihren Controller über dieses Modell bewegen, erscheint eine Miniatur-Version des roten Turms, den Sie im Modell platzieren können. Das können Sie wieder mit der Taste an Ihrem Zeigefinger tun. Platzieren Sie den roten Turm nun an der Stelle, die Sie sich gemerkt haben.

Tutorial 08: Turm platziert, Fragen beantworten

Gut. Sie wissen jetzt alles, um diese Studie durchzuführen. Zuvor möchte ich Sie aber noch um die Beantwortung einiger Fragen bitten. Drücken Sie hierzu einfach den Knopf mit der zutreffenden Antwort.

Tutorial 09: Frage nach Alter

Frage 1: Wie alt sind Sie?

Tutorial 10: Frage nach Geschlecht

Frage 2: Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an.

Tutorial 11: Frage nach VR-Erfahrung

Frage 3: Wieviel Erfahrung haben Sie mit Virtual Reality – Anwendungen?

Tutorial 12: Frage nach Orientierungssinn

Frage 4: Wie schätzen Sie Ihren Orientierungssinn ein?

Tutorial 13: Studie starten oder Tutorial wiederholen?

Vielen Dank. Sie können nun mit dem ersten Level der Studie starten. Alternativ können Sie das Tutorial auch erneut durchlaufen.

Tutorial 14: Tutorialende

Die Studie wird nun gestartet. Viel Spaß.

Hilfeerklärung 01: Keine Hilfe

Keine Hilfe. Versuchen Sie, den Zielpunkt ohne zusätzliche Hilfe zu erreichen.

Hilfeerklärung 02: 2D-Karte

Karte. Bei dieser Hilfe handelt es sich um eine simple, zweidimensionale Karte, die rechts neben ihrem Startpunkt angezeigt wird, und auf der Sie die Positionen des Startpunkts, des Ziels und des Turms erkennen können.

Hilfeerklärung 03: 2D-Karte am Controller

Karte an Ihrem Handcontroller. Bei dieser Hilfe führen Sie an Ihrem linken Controller eine Karte mit, auf der Sie Ihre eigene Position mitsamt Sichtkegel sowie den Start- und den Zielpunkt erkennen können.

Hilfeerklärung 04: 3D-Karte

3D-Modell. Bei dieser Hilfe erscheint rechts neben Ihrem Startpunkt ein 3D-Modell des Labyrinths, in dem außerdem Ihr Start- und der Zielpunkt visualisiert sind.

Hilfeerklärung 05: Richtungspfeil

Pfeil. Bei dieser Hilfe zeigt ein gelber Pfeil vor Ihnen in Richtung des Weges, der zum Zielpunkt führt.

Hilfeerklärung 06: Navigations-/Bodenlinie

Bodenlinie. Bei dieser Hilfe wird Ihnen eine rote Linie angezeigt, die den kürzesten Weg zum Zielpunkt darstellt.

Hilfeerklärung 07: Wegweiser

Wegweiser. Bei dieser Hilfe erscheinen an Abzweigungen Wegweiser, die den Weg zum Zielpunkt weisen.

Studie 01: Hilfeankündigung

In diesem Level erhalten Sie folgende Hilfe...

Studie 02: Startbutton

Betätigen Sie zum Start dieses Levels den roten Knopf.

Studie 03: Ziel erreicht, Turmplatzierung

Sie haben die Zielplattform erreicht. Platziere Sie jetzt den roten Turm im Modell.

Studie 04: Turm platziert, nächstes Level

Gut. Fahren wir fort mit dem nächsten Level.

Studie 05: Alle Level fertig, Ranking erklären

Vielen Dank. Das war das letzte Level. Ordnen Sie nun die Hilfsmittel bitte danach, wie hilfreich Sie die jeweilige Unterstützung fanden. Beginnen Sie mit dem Hilfsmittel, das Sie am besten fanden. Bestätigen Sie die Reihenfolge mit dem Knopf ganz rechts, wenn Sie fertig sind.

Studie 06: Ranking nicht vollständig ausgefüllt

Bitte füllen Sie die Tabelle vollständig aus, bevor Sie bestätigen.

Studie 07: Ranking mit Doppelung ausgefüllt

Sie haben Hilfsmittel doppelt angegeben. Bitte achten Sie darauf, dass jedes Hilfsmittel in der Tabelle nur einmal vertreten ist.

Studie 08: Motion Sickness

Geben Sie nun bitte noch an, ob Sie während der Durchführung dieser Studie Symptome des Unwohlseins wie zum Beispiel Schwindel verspürt haben.

Studie 09: Studienende

Das war die letzte Frage. Vielen herzlichen Dank für ihre Teilnahme an dieser Studie. Sie können die VR-Brille nun absetzen.

C) Sprachskript zu 'Hamburg: Neue Burg VR'

Tutorial: Willkommen, Teleport-Erklärung (Tut02_WillkommenTeleport)

Willkommen in Hamburg im Jahre 1024. Wir befinden uns hier in der sogenannten 'Neuen Burg', die vor 1000 Jahren die erste Stadterweiterung Hamburgs bildete. Bevor wir die Umgebung erkunden können, musst du als erstes wissen, wie du dich bewegen kannst. Schau mal auf die Controller in deinen Händen. Da sind einige Knöpfe, die beschriftet sind. Den ersten brauchen wir jetzt: Teleport! Lege deinen Daumen auf den Knopf, der mit Teleport beschriftet ist, ziele mit dem Controller in die Richtung, in die du dich bewegen möchtest und dann drücke den Knopf. Probier's jetzt mal aus.

Tutorial: 1. Teleport fertig. Rote Linie + Interaktion erklären (Tut03_Interaktion)

Sehr gut. Mit der Teleport-Funktion kannst du dich in kleinen Schritten durch die gesamte Burg bewegen. Einfach in die gewünschte Richtung zielen, drücken, und schon geht's los. Dabei empfehle ich dir, der roten Linie zu folgen, die vor dir auf dem Boden erscheint. Sie führt dich zum jeweils nächsten interessanten Ort auf unserer Tour. Unsere erste Station liegt direkt vor dir: Da geht es um Bernhard den Zweiten, dem Bauherren dieser Burg. Du kannst mit einigen Objekten in dieser Burg interagieren. Wenn das der Fall ist, wird dies durch das kleine, rot blinkende Controller-Symbol angezeigt, dass auf oder neben dem Objekt platziert ist, das man auswählen kann. Bei Bernhard dem Zweiten kannst du das Pergament direkt auswählen. Berühre mit deinem Controller das Pergament und drücke mit deinem Zeigefinger den Knopf, der mit 'Auswählen' beschriftet ist.

Tutorial: 1. Interaktion fertig. Auf Bild hinweisen. Mini-Spiel erklären, auf Bildfetzen hinweisen (Tut04_Gemaelde)

Genau. Und damit weißt du eigentlich schon alles, was du hier zum Fortkommen brauchst. Es gibt insgesamt 22 Stationen in und um der Neuen Burg. Bei jeder Station ist ein kleiner Teil eines Bildes versteckt. Momentan siehst du hier nur einen leeren Bilderrahmen an der Wand, aber wenn du an jeder Station die Bildteile einsammelst, hast du am Ende der Tour ein vollständiges Porträt vom Bauherren. Den ersten Bildteil findest du direkt neben dem Bilderrahmen. Du kannst ihn auswählen, um ihn einzusammeln.

Tutorial: 1. Bildfetzen gefunden. Auf weitere Bildfetzen hinweisen, MiniMap, Reminder zur Roten Linie. (Tut05_Bild1)

Das war der erste Bildteil, sehr gut. Vielleicht findest du auch die anderen 21. Ein Letztes noch: Es gibt eine Karte, die du mit dem Karten-Knopf an deinem linken Controller An- und Ausschalten kannst. Und nicht vergessen: Die rote Linie führt dich immer zur nächsten Station. Los geht's.

Tutorial: Tutorial überspringen (Tut06_SkipTut)

Du weißt schon, wie's abläuft? Sehr gut!

Tutorial: Minimap zum ersten Mal geöffnet. Kurz Teleport auf Karte erklären (Tut07_Minimap)

Das ist die Karte. Der rote Punkt bist du. Wenn du möchtest, kannst du direkt zu den einzelnen Stationen springen. Wähle dazu einfach das entsprechende Pergament aus.

Generell: Letzten Bildfetzen gefunden. Zurück zu B2 (Gen02_LetzterBildteil)

Das war der letzte Teil des Bildes. Kehre zur Station ganz am Anfang zurück, um dein Werk zu betrachten.

Generell: Vor komplettem Bild. Fertig. Verabschiedung. (Gen03_Fertig)

Das Bild ist vollständig, sehr gut! Wir sehen hier Bernhard den Zweiten... zumindest so wie er über 450 Jahre später gemalt wurde. Wir wissen also nicht, wie er tatsächlich aussah, aber wir wissen, dass er der Bauherr dieser Burg war und aus der damals sehr einflussreichen Familie der Billunger stammte. Bernhard II. pflegte eine sehr gute Beziehung zum damaligen Erzbischof Unwan. Diese Allianz zwischen weltlichen und geistlichen Mächten schaffte sehr günstige Rahmenbedingungen für den weiteren Aufstieg Hamburgs.

Und damit sind wir am Ende dieser Tour angelangt. Danke, dass du diese kleine Reise mitgemacht hast. Du kannst jetzt eine unheimlich spektakuläre Zeitreise 1000 Jahre in die Zukunft unternehmen! Setze dazu einfach die VR-Brille ab! Natürlich kannst die Neue Burg aber auch noch weiter alleine erkunden.

Rundgang: 1) Bernhard II (Tour01_BernhardII)

Du hast noch nicht alle Bildteile von Bernhard dem Zweiten gesammelt... Schau dich gründlich an den einzelnen Stationen um und komme wieder, wenn du alle gefunden hast.

Rundgang: 2) Stadtentwicklung (Tour02_3DStadt)

Die Neue Burg ist über 1000 Jahre alt! Seitdem hat sich dieser Ort stark verändert, wurde vielfach überbaut, zerstört, und wieder aufgebaut. Der Modelltisch neben dir stellt die Entwicklung dieses Ortes bis zum heutigen Zeitpunkt dar. Wähle einfach das Pergament mit der entsprechenden Jahreszahl aus und schau, wie sich die Stadt verändert hat.

Rundgang: 2) 1020 (3DStadt_1020)

Alles begann mit einer grünen Wiese. Ausgrabungen deuten darauf hin, dass diese Halbinsel in der Alsterschleife vor dem Burgbau ungenutzt war. Der Bauplatz lag direkt an der Alsterfurt und war auf drei Seiten von Wasser umgeben und somit gut geschützt. Im Norden verlief der Handelsweg und die Alsterfurt verband dieses Gebiet im Nordosten mit der alten Hammaburg-Siedlung.

Rundgang: 2) 1022 (3DStadt_1022)

Die Neue Burg wurde von 1021 bis 1023 errichtet. Begonnen wurde mit einer Unterlage aus Reisig, gefolgt von einer Wallbasis aus Holzrosten. Auf diesem Fundament wurden Kastenkonstruktionen errichtet, die schließlich mit Kleilagen verbunden und Grassoden abgedeckt wurden. Die Ähnlichkeit zu einem Deich ist kein Zufall, schließlich musste die niedrig liegende Burg vor den regelmäßigen Hochwassern geschützt werden.

Rundgang: 2) 1024 (3DStadt_1024)

Nach der Fertigstellung war die Neue Burg mit einem Durchmesser von bis zu 171 m die größte sächsische Ringwallanlage im Einflussbereich der Billunger Herzöge. Gleichzeitig wurde die Hammaburg auf der anderen Seite der Alster aufgegeben und eingeebnet. Somit war die Neue Burg von nun an die einzige – und letzte – Burg im Bereich der heutigen Hamburger Innenstadt.

Rundgang: 2) 1188 (3DStadt_1188)

Über 120 Jahre lang hatte die Neue Burg Bestand. Im Jahr 1139 wurde sie allerdings nach einem Überfall aufgegeben und nicht wieder aufgebaut. Sie lag brach bis zum Jahre 1188, als Graf Adolf III. von Schauenburg das Areal im Inneren der Burgwälle aufschütten ließ und auf dem so gewonnenen Bauplatz die Neustadt gründete. Für die Archäologie war diese 'Begrabung' der Neuen Burg ein Glücksfall. Denn obwohl durch die Bebauung der nachfolgenden Jahrhunderte viel

verloren ging, so sind doch einige Wallsegmente bis heute unberührt geblieben und erlauben es uns, diese Geschichte zu erzählen.

Rundgang: 2) 1500 (3DStadt_1500)

In den folgenden Jahrhunderten dominierte die Kirche St. Nikolai das Stadtviertel. Möglicherweise lag die Kirche in direkter Nachfolge der Kapelle der Neuen Burg direkt oberhalb des Vorgängerbaus. Drumherum entstand ein Markt – heute Hopfenmarkt genannt – und es ließen sich vor allem Kaufleute nieder, die den weiteren Aufstieg Hamburgs stark mitbestimmten. Die Grundstückseinteilung blieb über viele Jahrhunderte bis zum großen Brand von 1842 gleich. Lediglich die Straße 'Neue Burg' erinnerte an den Vorgängerbau: Der Straßenverlauf entspricht in großen Teilen dem früheren Ost- und Südwall.

Rundgang: 2) 1842 (3DStadt_1842)

Der Große Brand von 1842 brach in unmittelbarer Nachbarschaft im Südwesten der Nikolaikirche aus. Keines der im Ausschnitt gezeigten Gebäude überlebte. Auch die Nikolaikirche brannte vollständig aus. Vier Tage lang wütete der Brand, der ein Viertel der Hamburger Stadtfläche zerstörte. Über 1700 Häuser fielen ihm zum Opfer, 52 Menschen verloren ihr Leben.

Rundgang: 2) 1939 (3DStadt_1939)

Nach dem Brand veränderte sich das Stadtbild grundlegend. Die Nikolaikirche wurde wieder aufgebaut, allerdings in völlig anderem Stil und um ca. 50 Meter nach Südosten in die Mitte der Alsterschleife versetzt. St. Nikolai war nun eine neugotische Kirche mit dreischiffigem Langhaus und einem 147 Meter hohen Turm – zum Zeitpunkt des Baus das höchste Bauwerk der Welt.

Rundgang: 2) 1945 (3DStadt_1945)

Von den umfangreichen Bombardierungen Hamburgs während des Zweiten Weltkriegs blieben auch die Nikolaikirche und ihre Umgebung nicht verschont: 1943 stürzte das Dach des Kirchenschiffs ein. Der Turm selbst und einige Wände überstanden die Bombardierungen aber – wenngleich mit sichtbaren Beschädigungen. Die Kirche wurde nicht wieder aufgebaut, sondern in ihrem zerstörten Zustand belassen und ist als Mahnmal den Opfern von Krieg und Gewaltherrschaft gewidmet. Auch die Umgebung wurde größtenteils zerstört, was nach dem Wiederaufbau ein völlig neues Stadtbild zur Folge hatte.

Rundgang: 2) 2023 (3DStadt_2023)

Auch heute dominiert der Kirchturm als Mahnmal weiterhin die Umgebung. Mit der Willy-Brandt-Straße verläuft heute eine wichtige Ost-West-Achse an der Kirche entlang – und direkt über den früheren Südwall der 'Neuen Burg'. Auch der Hopfenmarkt ist heute noch als unbebaute Fläche erhalten geblieben. An die Neue Burg erinnert heute nur noch ein kleiner Straßenabschnitt östlich des Kirchenschiffs.

Rundgang: 3) Vieh (Tour03_Vieh)

Viele Bewohner besaßen wahrscheinlich zur Selbstversorgung Hühner oder Schweine. Diese mussten regelmäßig versorgt werden – zusätzlich zur Arbeit im eigentlichen Beruf. Oft fressen sie einfach alles, was Ihnen unter die Nase kommt – zum Beispiel einen Teil des Bildes, den wir suchen. Vielleicht ist es im Gehege ja wieder – 'zum Vorschein gekommen'.

Rundgang: 4) Hausbau (Tour04_Hausbau)

Das Innere der Neuen Burg war sicherlich bebaut – wir wissen nur nicht, wie. Potentielle Überreste sind mit der Zeit aufgrund von Nachfolgebauten – z. B. Hauskeller oder Tiefgaragen – verloren gegangen. Eigentlich ist das Innere somit nicht rekonstruierbar. Die hier dargestellte Burgsiedlung basiert auf Befunden ähnlicher Burgen zu ungefähr derselben Zeit. Es KÖNNTE also so ausgesehen haben. Vielleicht aber auch ganz anders. Bei allen historischen Rekonstruktionen muss immer abgewogen werden zwischen einer vermittelbaren, lebendigen Vergangenheit und dem tatsächlichen Kenntnisstand.

Hast du eine andere Idee, wie die Neue Burg im Inneren ausgesehen haben könnte? Am Tisch neben dir kannst du die Gebäude versetzen und deine eigene Burgsiedlung bauen.

Rundgang: 5) Kapelle (Tour05_Kapelle)

Höchstwahrscheinlich gab es eine Kapelle innerhalb der Neuen Burg. Möglicherweise war der Standort der Kapelle ausschlaggebend für die spätere Position der Nikolaikirche. Daher wurde sie direkt unter dem Chor der späteren Kirche verortet.

Schau mal auf den Glockenturm, irgendjemand hat ein Teil des Bildes dort versteckt... Da wirst du wohl klettern müssen. Nimm dafür die Hufeisen zur Hilfe und ziehe dich hoch – aber gut festhalten. Zum Glück waren damals die Glockentürme noch nicht ganz so hoch wie heute...

Rundgang: 6) Michel (Tour06_Michel)

Der Blick über die Palisade nach Westen war vor über 1000 Jahren geprägt von unbebauter Natur. Es ist denkbar, dass am Fuß dieser Palisade ein kleiner Wassergraben verlief. Das hätte die Neue Burg zu einer Insel gemacht. Wir wissen es aber nicht wirklich, da sich ein solcher Graben in den Ausgrabungen nicht nachweisen lässt.

Heute schweift der Blick von dieser Stelle über den Rand des Hopfenmarktes über die Hamburger Neustadt. In der Entfernung ist die 1906 wiederaufgebaute Sankt Michaeliskirche zu sehen. Als 'Michel' gehört sie zu den bekanntesten Hamburger Wahrzeichen.

Rundgang: 7) Hopfenmarkt (Tour07_Hopfenmarkt)

An dieser Stelle befinden wir uns heute mitten auf dem Hopfenmarkt am Fuße des Nikolaiturms. Der Platz existiert schon sehr lange und war bereits Teil der mittelalterlichen Neustadt, die nach Aufgabe der Neuen Burg hier gegründet wurde. Der Name spricht für sich: Hier wurde früher vor allem Hopfen gehandelt.

Seine Funktion als Markt hat dieser Platz aber inzwischen verloren. Neben einer Grünanlage mit einigen Bäumen wird diese Freifläche heute als Parkplatz genutzt.

Rundgang: 8) Elbphilharmonie (Tour08_Elbphilharmonie)

Als ein weiteres – modernes – Wahrzeichen Hamburgs gilt die 2016 fertiggestellte Elbphilharmonie mit ihrer charakteristischen Dachform. Zu Zeiten der Neuen Burg war dieser Ausblick freilich noch nicht so bebaut: Die Alster mündete nach einigen Schleifen in die Elbe und es erstreckte sich eine weitläufige Landschaft aus kleinen Inseln, die erst in späteren Jahrhunderten bebaut und erweitert wurden und heute mit einer Vielzahl von Brücken erschlossen sind.

Die Elbphilharmonie bestimmt heute zusammen mit dem Columbus-Haus die Skyline in diese Richtung. Und in der Entfernung sind heute die vielen Hafenkräne auf der anderen Seite der Elbe zu erkennen.

Rundgang: 9) Nikolaikirche (Tour09_Nikolaikirche)

Diese große Kirchrue, die jetzt über der gesamten Neuen Burg zu sehen ist, ist das Mahnmal St. Nikolai. Wenn du dem Rundgang gefolgt bist, warst du bereits bei der kleinen Holzkapelle – in gewisser Weise ein Vorgängerbau. An diesem Ort stand fast 1000 Jahre lang eine Nikolaikirche. 1842 brannte der letzte Vorgängerbau beim Großen Brand von Hamburg ab. Ihre Nachfolgerin wurde genau hier errichtet und war sogar zeitweise das höchste Bauwerk der Welt. Während des zweiten Weltkriegs wurde sie größtenteils zerstört, ihr Kirchturm blieb jedoch erhalten und steht genau dort, wo wir im Jahre 1024 unsere Tour begonnen haben.

Rundgang: 10) Kirchenschiff (Tour10_Kirchenschiff)

Vom Kirchenschiff der Nikolaikirche sind heute nur noch wenige Wände übrig. Die Freifläche bedeckt einen großen Teil des Areals, das früher zum Innenraum der Neuen Burg gehörte. Genau genommen befinden wir uns hier fünf Meter ÜBER dem Innenraum, denn nach ihrer Aufgabe wurde die Neue Burg zugeschüttet und das neue Bodenniveau lag auf Höhe der Walloberkante. Es ist möglich, unter das Kirchenschiff auf das alte Bodenniveau zu gehen – denn die Kellerräume der Nikolaikirche haben den Krieg ebenfalls überstanden. Dort befindet sich heute ein Museum über die Geschichte der Kirche und ihrer Zerstörung. Allerdings ist an dieser Stelle aus der Zeit der Neuen Burg nichts mehr übrig.

Rundgang: 11) Nikolaifleet (Tour11_Nikolaifleet)

Das heutige Nikolaifleet war früher der Hauptarm der Alster. Sie wand sich in einem großen Bogen um diese Fläche, schirmte sie zu drei Seiten von der Umgebung ab und machte sie somit zu einer gut geschützten Stelle. Durch die Alster führte weiter nördlich die Alsterfurt, die einzige Verbindung zur älteren Hammaburg-Siedlung und ein wichtiger Handelsweg. Heute führt an dieser Stelle die Willy-Brandt-Straße auf einer breiten Brücke über das Fleet. Diese Querung ist erst mit dem Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg hinzugekommen. Das Fleet endet weiter nördlich in einer Sackgasse, da ein Teil dieses alten Alsterlaufs zugeschüttet wurde und heute von der U-Bahn genutzt wird.

Rundgang: 12) Fischerei (Tour12_Fischerei)

Neben dem eigentlichen Beruf haben viele Burgbewohner nebenbei auch gefischt. Es gab aber auch hauptberufliche Fischer, die auf die Elbe rausfuhren. Hier geht's manchmal chaotisch zu, schon wieder ist ein Eimer umgefallen. Vielleicht kannst du helfen und die Fische zurück in die Kiste da hinten schmeißen?

Rundgang: 13) Trostbrücke (Tour13_Trostbruecke)

Die Trostbrücke – beziehungsweise ihre Vorgängerbauten – lassen sich bereits bis ins 13. Jahrhundert zurückdatieren. Sie verband die damalige Neustadt mit der heute noch existierenden Großen Reichenstraße – die damals noch auf einer Insel lag. Die vier Gebäude, welche die Trostbrücke umrahmen, gehören zu den wenigen in diesem Gebiet, die den Zweiten Weltkrieg überstanden haben. Im Jahre 1024 befand sich an dieser Stelle aber noch keine Brücke, sondern ein Teil des frühen Hamburger Hafens.

Rundgang: 14) Schiffbau (Tour14_Schiffbau)

Hier entsteht gerade ein neues Schiff, das für die Fischerei oder zum Handel eingesetzt werden wird. Im Vergleich zu modernen Zeiten ist dieser Hafen noch recht überschaubar, aber in den kommenden Jahrhunderten wird er sich über viele Fleete und schließlich bis auf die andere Seite

der Elbe hin ausdehnen.

Schau mal am Mast nach oben. Am Ende der Rah hat sich ein Teil des Bildes verfangen – das muss der Wind gewesen sein. Da musst du wohl wieder hochklettern. Ich hoffe du bist schwindelfrei...

Rundgang: 15) Hammaburg (Tour15_Hammaburg)

Über diese Furt – Alsterfurt genannt – war die Neue Burg mit der alten Hammaburg-Siedlung verbunden, der Keimzelle Hamburgs. Es lassen sich drei Versionen bzw. Baustufen der Hammaburg nachweisen, die erste Hammaburg wurde wohl bereits im 8. Jahrhundert errichtet. Die Neue Burg ist somit bereits die vierte in diesem Gebiet. Es gilt aber inzwischen als gesichert, dass keine dieser Burgen gleichzeitig existierte. Die Überreste der dritten und letzten Hammaburg wurden ungefähr zeitgleich mit der Errichtung der Neuen Burg abgetragen. Heute befindet sich an der Stelle der ehemaligen Hammaburg der Domplatz.

Rundgang: 16) Großer Burstah (Tour16_GrosserBurstah)

Die alte Straße, die von Westen kommend die Neue Burg mit der Hammaburg-Siedlung verband, existiert heute noch. In diesem Bereich heißt sie 'Großer Burstah'. In einem weiten Bogen verbindet sie die Mönckebergstraße und das Rathaus im Osten mit dem Rödingsmarkt im Westen. Wenn man sich auf diesem Bogen nach Süden wendet – also in Richtung des Nikolaiturms – blickt man genau auf das frühere Nordtor der Neuen Burg.

Rundgang: 17) Nordtor (Tour17_Nordtor)

Hamburg war immer wieder das Ziel von Überfällen. Die Hammaburg wurde mehrfach von dänischen Wikingern und Slawen angegriffen und niedergebrannt. Hamburg versuchte sich mit dem stetigen Wiederaufbau und der Erweiterung der Hammaburg und schließlich mit der Errichtung eines sogenannten Heidenwalls im Osten Hamburgs zu verteidigen. Auch die Neue Burg blieb nicht verschont: Mehrfache Slawenüberfälle sind überliefert und schließlich wurde die Neue Burg im Jahre 1139 von Heinrich von Badewide zerstört und anschließend nicht wieder aufgebaut. Ich fürchte, auch du musst jetzt versuchen, die Neue Burg einzunehmen – oder zumindest das Torhaus zu überwinden. Da oben kannst du nämlich einen weiteren Teil des Bildes finden.

Rundgang: 18) Handwerk (Tour18_Handwerk)

Rund 200 Bewohnerinnen und Bewohner dürften in der Neuen Burg gelebt haben. Alles, was benötigt wurde, musste vor Ort hergestellt werden. So gab es eine Vielzahl von Berufen: Töpfer, Drechsler, Fischer, Schuhmacher, Fassmacher, Kammacher, Schmiede, Gärtner, Viehhirte, Stallknechte und so weiter. Darüber hinaus dürften viele der hier lebenden Menschen wahre Multitalente gewesen sein, schließlich musste man sich größtenteils selbst versorgen. Zum Hauswerk gehörten Dinge wie Feuerholz sammeln, Kleidung nähen, das Haus regelmäßig reparieren oder das Vieh zu füttern.

Rundgang: 19) Rathaus (Tour19_Rathaus)

Wer vor 1000 Jahren über die nordöstliche Palisade schaute, sah auf die Alster und – dahinter – auf die alte Hammaburg-Siedlung. Heute steht in dieser Richtung das Hamburger Rathaus, das 1897 fertiggestellt wurde. Unter dem Rathaus wurde lange Zeit eine mysteriöse, weitere Burg vermutet, die sogenannte 'Alsterburg'. Inzwischen wissen wir aber: Die hat es nie gegeben. Die Neue Burg war also – solange sie existierte – die einzige im näheren Umfeld.

Die markantesten Gebäude weiter Richtung Osten sind heute die Hauptkirchen St. Petri und – im Hintergrund – St. Jacobi.

Rundgang: 20) Ausgrabung (Tour20_Ausgrabung)

Jetzt bist du sprichwörtlich in die Geschichte eingetaucht. Denn um dich herum siehst du die Ausgrabung, die am ehemaligen Osttor der Neuen Burg durchgeführt wurde. Hier konnten die Archäologen viel über den Aufbau des Burgwalls lernen. Außerdem wurden Überreste einer Treppe gefunden – dieselbe Treppe, die auf den Außenweg jenseits der Palisade führt, wenn du durch das Tor hindurchgehst. Daher wissen wir: Hier war ein Tor. Es verschaffte den Bewohnerinnen und Bewohnern einen direkten Zugang zum Hafen. Und dieser Weg existiert – mehr oder weniger – bis heute. Über die gesamte Stadtgeschichte fand sich hier in den Kartenaufzeichnungen ein Durchgang zwischen den Gebäuden, und selbst heute findet sich hier, eingebettet in ein altes Kontorhaus – eine kleine Tordurchfahrt.

Rundgang: 21) WillyBrandt (Tour21_WillyBrandt)

Der Südwall bot damals wohl eine Aussicht auf die Alster – heute steht man mitten auf einer großen, mehrspurigen Straße, die quer durch die Innenstadt führt. Die Willy-Brandt-Straße wurde nach dem Zweiten Weltkrieg in den 50ern gebaut und führt heute direkt an der Nikolaikirche vorbei – ihr Verlauf gleicht in diesem Bereich dem des früheren Südwalls.

Rundgang: 22) Herrenhaus (Tour22_Herrenhaus)

Das Herrenhaus war vermutlich das größte Gebäude innerhalb der Neuen Burg. Wir wissen weder genau, wie es aussah noch wo es stand. Vermutet wird es aber in der südwestlichen Ecke der Burg, da der Wind meistens aus dieser Richtung kam und die unangenehmen Gerüche der anderen Gewerke somit nicht über das Herrenhaus zogen. Hier lebten und regierten – zumindest zeitweise – Herzog Bernhard II. und sein Sohn Ordulf.

Und wo wir gerade bei Bernhard dem II. waren: Hast du schon alle Bildteile von ihm gefunden? Das hier war die letzte Station des Rundgangs. Falls dir also noch Bildteile fehlen schau nochmal genau bei den Stationen nach. Bei jeder ist in direkter Nähe ein Teil des Bildes versteckt. Gegenüber, also bei Station 1 und dem Anfang unserer Tour – kannst du nachschauen, ob das Bild schon vollständig ist.